

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM
ENGENHARIA QUÍMICA – NÍVEL DE DOUTORADO

**INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO
DISTRIBUÍDA E CENTRALIZADA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS
PROJETO DAI-CNPQ**

ANDY AVIMAEEL SAAVEDRA MENDOZA

TOLEDO – PR – BRASIL

Maio de 2023

ANDY AVIMAEEL SAAVEDRA MENDOZA

**INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO DISTRIBUÍDA
E CENTRALIZADA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS - PROJETO DAI-CNPQ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química em cumprimento aos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, na área de concentração em Desenvolvimento de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Freddy Mendoza Morejon

TOLEDO – PR – BRASIL

Maio de 2023

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Saavedra Mendoza, Andy Avimael
Inovações tecnológicas para a industrialização distribuída e centralizada de resíduos orgânicos - Projeto DAI-CNPq / Andy Avimael Saavedra Mendoza; orientador Camilo Freddy Mendoza Morejon. -- Toledo, 2023.
252 p.

Tese (Doutorado Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2023.

1. Resíduos orgânicos. 2. Industrialização. 3. Vermicompostagem. 4. Inovação. I. Mendoza Morejon, Camilo Freddy, orient. II. Título.

ANDY AVIMAEI SAAVEDRA MENDOZA

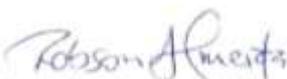
Inovações tecnológicas para a industrialização distribuída e centralizada de resíduos orgânicos - Projeto DAI/CNPq

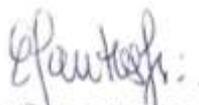
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração Desenvolvimento de Processos, linha de pesquisa Monitoramento e Controle Ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a) - Camilo Freddy Mendoza Morejon
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Toledo (UNIOESTE)


Marcia Regina Fagundes Klen
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Toledo (UNIOESTE)


Soraya Moreno Palácio
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Toledo (UNIOESTE)


Robson Luciano de Almeida
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)


Elias Lira dos Santos Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, por ter me proporcionado a força, a iluminação e a oportunidade de realizar este trabalho.

Minha gratidão à minha mãe Eulogia e ao meu pai Roberto, que mesmo distantes, sempre me apoiaram incondicionalmente e me deram todo o amor necessário. Tudo o que conquistei até agora é graças a eles, que sempre me incentivaram a buscar meus sonhos e me tornar a pessoa que sou hoje.

A meu irmão Alberto e a meus primos, que me apoiaram em todos os momentos. Seu amor e carinho foram fundamentais para que eu pudesse superar as dificuldades.

Às minhas queridas tias Sonia, Rosa, Rosmery e Joselene, sou profundamente grato por todo o apoio, amor e conselhos recebidos durante este trabalho. Suas palavras e gestos foram de grande importância para minha motivação e perseverança, e serei eternamente grato por ter pessoas tão especiais na minha vida. Espero poder retribuir o que fizeram por mim ao longo da minha vida.

Agradeço especialmente ao meu orientador, o Prof. Camilo Freddy Mendoza Morejon, por seu empenho, dedicação e paciência em me guiar durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua sabedoria, visão e experiência foram fundamentais para a conclusão deste projeto de tese. Sou grato pelo seu constante apoio e pela confiança em meu trabalho, que sempre me incentivaram a buscar a excelência em cada etapa. Seu papel foi fundamental para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço ao Prof. Wilson Rogério Boscolo e as Doutorandas Alessandra A. de Souza Almeida e Silmara Silva Ribeiro da UNIOESTE pela colaboração e suporte na realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Lúcio Cardozo Filho e ao Doutorando Vitor Anthony Duarte da UEM, a colaboração e suporte na etapa final foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Agradeço por dedicarem seu tempo e esforço em me orientar e oferecer seu conhecimento, que certamente ajudou a enriquecer a pesquisa.

À empresa Linear Criações pelo suporte fornecido na realização deste trabalho.

À empresa MINHOCAL AGROINDUSTRIAL pelo valioso apoio e suporte desmedido que me foi fornecido durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao CNPq pelo suporte financeiro.

Enfim, agradeço a todos os professores, funcionários, colegas do PPGEQ e familiares que, direta e indiretamente, contribuíram com a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xvi
NOMENCLATURA	xix
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos.....	4
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1. Resíduos Sólidos	6
2.1.1. Geração dos resíduos sólidos	7
2.1.2. Classificação dos resíduos sólidos	8
2.1.3. Composição dos resíduos sólidos	10
2.1.4. Propriedades físicas, químicas e biológicas dos resíduos sólidos	12
2.1.5. Gestão convencional dos resíduos sólidos urbanos	13
2.1.6. Resíduos orgânicos e potencial de aproveitamento	17
2.2. Tratamento e Processamento de Resíduos Sólidos Orgânicos	20
2.2.1. Compostagem	20
2.2.1.1. Taxa de aeração na compostagem	22
2.2.1.2. Teor de umidade na compostagem	23
2.2.1.3. Temperatura na compostagem	24
2.2.1.4. Conteúdo de nutrientes na compostagem	25
2.2.1.5. Tamanho da partícula na compostagem	26
2.2.1.6. pH na compostagem	26
2.2.1.7. Tempo de residência na compostagem	27

2.2.2. Processos de biodigestão anaeróbica	28
2.2.2.1. Temperatura na biodigestão anaeróbica	30
2.2.2.2. Sólidos totais e sólidos voláteis na biodigestão anaeróbica.....	32
2.2.2.3. Tempo de retenção hidráulica na biodigestão anaeróbica	32
2.2.2.4. Relação carbono/nitrogênio na biodigestão anaeróbica	33
2.2.2.5. pH na biodigestão anaeróbica	33
2.2.2.6. Inibidores na biodigestão anaeróbica.....	34
2.2.2.7. Bioindicadores na biodigestão anaeróbica.....	35
2.2.3. Vermicompostagem	35
2.2.3.1. Minhocas (Oligoquetas).....	37
2.2.3.2. Taxa de aeração na vermicompostagem	39
2.2.3.3. Teor de umidade na vermicompostagem	39
2.2.3.4. Temperatura na vermicompostagem.....	40
2.2.3.5. Conteúdo de nutrientes na vermicompostagem	41
2.2.3.6. pH na vermicompostagem	43
2.2.1.7. Tempo de residência na vermicompostagem.....	45
2.3. Desenho de Processos em Engenharia Química.....	46
2.3.1. Desenvolvimento de desenho de processos	46
2.4. Desenho de Tecnologias no Contexto dos Processos das Indústrias Químicas	48
2.4.1. Etapas para o desenvolvimento de tecnologias.....	49
2.4.2. Ferramentas tecnológicas para desenvolver desenhos tridimensionais	50
2.4.3. Ferramentas tecnológicas para desenvolver sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas	52
2.4.3.1. Tecnologias para realizar códigos inteligentes para microcontroladores ...	53
2.4.3.2. Tecnologias para desenvolver circuitos eletrônicos	57
2.4.4. Ferramentas tecnológicas para desenvolver <i>softwares</i> para sistemas SCADA	59

2.4.4.1. Visual Basic e Visual Studio.net	60
2.4.4.2. MATLAB	63
2.4.4.3. LABVIEW	66
2.5. Contribuições da Biotecnologia para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Transformação de Resíduos Orgânicos para um Futuro Sustentável	69
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	72
3.1. Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos.....	74
3.1.1. Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em atividades domésticas no Brasil, no Estado do Paraná e no Município de Toledo/PR.....	74
3.1.2. Caracterização da fonte geradora de resíduos sólidos orgânicos em atividades de criação e engorda de animais	75
3.1.3. Caracterização das fontes geradoras de resíduos orgânicos estudados em termos do teor de carbono, nitrogênio, umidade e o potencial hidrogeniônico.....	77
3.1.4. Caracterização dos resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento distribuído	78
3.1.5. Especificação da disponibilidade da carga de resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento centralizado	79
3.2. Avaliação dos métodos, processos e tecnologias para o processamento de resíduos orgânicos.....	79
3.3. Desenvolvimento e proposição dos processos e das tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos visando a obtenção de produtos de elevado valor agregado.....	80
3.3.1. Construção e codificação do <i>software</i> para o cálculo da relação carbono/nitrogênio no processamento de resíduos orgânicos	81
3.3.2. Desenvolvimento da tecnologia para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos.....	82
3.3.2.1. Estudo prospectivo das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos em bases de patentes	82
3.3.2.2. Estudo da cinética de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos..	83

3.3.2.3. Construção de planilhas eletrônicas para o cálculo das dimensões da tecnologia do processo distribuído	83
3.3.2.4. Desenvolvimento do desenho tridimensional da tecnologia e descrição do funcionamento	84
3.3.3. Desenvolvimento do processo centralizado para o processamento de resíduos orgânicos.....	84
3.3.3.1. Estudo da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado	85
3.3.3.2. Estudo da estabilização do material digerido nos sistemas de biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado	87
3.3.3.3. Estudo do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado	88
3.3.3.4. Estudo do potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos	89
3.3.3.5. Caracterização das minhocas, extração do líquido celomático com solventes e obtenção de carcaças de minhocas.....	89
3.3.3.6. Desenvolvimento do processo de extração do líquido celomático e a obtenção de carcaças.....	91
3.3.3.7. Desenvolvimento do processo para o processamento/industrialização centralizada dos resíduos orgânicos.....	91
3.3.4. Desenvolvimento e construção da tecnologia SCADA para o monitoramento, controle e processamento de dados no processo de industrialização centralizado de resíduos orgânicos.....	92
3.4. Avaliação dos requisitos proteção intelectual	93
3.5. Análise, sistematização e organização dos resultados do trabalho.....	94
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	95
4.1. Sistematização e organização dos resultados da Tese de Doutorado	95
4.2. Resultados da caracterização e do potencial de geração de resíduos orgânicos.....	97

4.2.1. Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em atividades domésticas (ROD)	97
4.2.2. Caracterização da fonte geradora de resíduos sólidos orgânicos em atividades de criação e engorda de animais	102
4.2.3. Caracterização das fontes geradoras de resíduos orgânicos estudados em termos do teor de carbono, nitrogênio, umidade e o potencial hidrogeniônico.....	105
4.2.4. Caracterização dos resíduos orgânicos para a alternativa de processamento distribuído	115
4.2.5. Especificação da disponibilidade da carga de resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento centralizado	116
4.3. Resultados da avaliação das vantagens e desvantagens dos métodos, processos e tecnologias convencionais para o processamento de resíduos orgânicos.....	118
4.4. Resultados do desenvolvimento e da proposição dos processos e das tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos visando a obtenção de produtos de elevado valor agregado	124
4.4.1. Software para o cálculo da relação carbono/nitrogênio no processamento de resíduos orgânicos.....	124
4.4.2. Tecnologia para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos	127
4.4.2.1. Prospecção das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos em bases de patentes	127
4.4.2.2. Cinética de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos	131
4.4.2.3. Planilhas eletrônicas para cálculo das dimensões da tecnologia utilizada no processo distribuído	135
4.4.2.4. Desenho tridimensional da tecnologia e descrição do funcionamento	139
4.4.2.5. Consolidação da proposta do processamento distribuído de resíduos orgânicos.....	146
4.4.3. Processamento centralizado de resíduos orgânicos	148
4.4.3.1. Processamento centralizado por meio da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos.....	148

4.4.3.2. Processamento centralizado por meio da estabilização do material digerido nos sistemas biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem de resíduos orgânicos	163
4.4.3.3. Processamento centralizado por meio do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos	164
4.4.3.4. Potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos	168
4.4.3.5. Caracterização das minhocas, extração do líquido celomático (com a utilização de solventes orgânicos) e obtenção da carcaça de minhocas	172
4.4.3.6. Processo extração do líquido celomático, obtenção de carcaças de minhocas e balanços de massa	184
4.4.3.7. Consolidação da proposta de processamento centralizado para a industrialização dos resíduos orgânicos.....	186
4.4.4. Tecnologia SCADA para o monitoramento, controle e processamento de dados no processo de industrialização centralizado de resíduos orgânicos	199
4.5. Produção Intelectual resultante da Tese de Doutorado	210
4.6. Impactos socioambientais da tese.....	211
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	215
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	218

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação gráfica da geração per capita de RSU nos estados de Brasil.	7
Figura 2.2 - Representação gráfica do número de unidades de disposição final dos resíduos sólidos urbanos utilizados nas regiões do Brasil no 2018.	15
Figura 2.3 - Representação gráfica dos dados históricos da disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (t. ano ⁻¹) 2016-2020.	15
Figura 2.4 – Modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos do município de Toledo/PR.	16
Figura 2.5 – Proposta de um novo modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos.	17
Figura 2.6 - Representação gráfica da evolução da produção científica sobre o processo de compostagem ao longo do tempo.	21
Figura 2.7 - Representação gráfica dos países com maior número de pesquisas referentes a processos de compostagem.	22
Figura 2.8 - Representação gráfica do comportamento da temperatura nas fases no processo de compostagem em função do tempo.	24
Figura 2.9 - Representação gráfica da evolução da produção científica sobre o processo de biodigestão anaeróbica ao longo do tempo.	29
Figura 2.10 - Representação gráfica dos países com maior número de pesquisas referentes a processos de biodigestão anaeróbica.	29
Figura 2.11 - Representação gráfica da taxa de crescimento dos microrganismos metanogênicos em função da temperatura.	31
Figura 2.12 - Representação gráfica da evolução da produção científica sobre o processo de vermicompostagem ao longo do tempo.	36
Figura 2.13 - Representação gráfica dos países com maior número de pesquisas referentes a processos de vermicompostagem.	37
Figura 2.14 - Representação gráfica do comportamento: a) do pH do vermicomposto em função do tempo; b) das cinzas em função do tempo; c) do pH e cinzas do vermicomposto com pH inicial igual a 4.3 em função do tempo; e d) do pH e cinzas do vermicomposto com pH inicial igual a 6.9 em função do tempo.	44
Figura 2.15 - Representação gráfica de uma peça realizada em Autodesk Inventor.	51

Figura 2.16 – Logotipos das ferramentas tecnológicas para desenvolver códigos para microcontroladores.	55
Figura 2.17 – Esquema de um sistema eletrônico que mede e controla a temperatura utilizando o software PROTEUS.....	59
Figura 2.18 – Interface visual do sistema SCADA desenhado para uma planta de produção de lã mineral.	60
Figura 2.19 – Janela de desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário em Visual Studio.net.....	61
Figura 2.20 – Interface de programação do Visual Studio.net para realizar o código fonte que controlar a interface gráfica de usuário.....	62
Figura 2.21 – Interface gráfica do sistema SCADA desenhado em Visual Basic.....	63
Figura 2.22 – Janela do GUIDE para realizar o desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário em MATLAB.....	64
Figura 2.23 – Janela do editor de funções para realizar o código fonte para controlar a interface gráfica de usuário em MATLAB.....	65
Figura 2.24 – Interface gráfica de um sistema SCADA desenhado em MATLAB para monitorar e controlar canais de irrigação.	66
Figura 2.25 – Interface gráfica de programação onde são apresentados o a) diagrama de blocos e b) painel frontal do software LABVIEW.....	67
Figura 2.26 – Interface gráfica de um sistema SCADA desenhado para monitorar e controlar um sistema de gerenciamento de baterias de fluxo redox.	68
Figura 3.1 – Estrutura referente à sistematização e organização das etapas metodológicas da tese de Doutorado.	73
Figura 3.2 - Representação gráfica do processo produtivo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR e os principais pontos de geração de RS, RL e, RG.	76
Figura 4.1 – Estrutura referente à sistematização e organização dos resultados da tese de Doutorado.	96
Figura 4.2 - Geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e composição dos resíduos orgânicos da área doméstica no Brasil.	98

Figura 4.3 - Geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e composição dos resíduos orgânicos da área doméstica no estado do Paraná.....	98
Figura 4.4 - Geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e composição dos resíduos orgânicos da área doméstica no município de Toledo-PR.	99
Figura 4.5 – Potencial de Geração de resíduos orgânicos domésticos em t.dia ⁻¹ de 50 municípios da Região Oeste do Estado do Paraná.	101
Figura 4.6 – Potencial de Geração de resíduos orgânicos domésticos de 50 municípios da Região Oeste do Estado do Paraná e os municípios âncoras com possibilidade de implantação de unidades de industrialização de resíduos orgânicos.	102
Figura 4.7 – Balanço de massa do ciclo produtivo de um processo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR.	103
Figura 4.8 - Representação gráfica do balanço de massa do ciclo produtivo de um processo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR.....	103
Figura 4.9 - Representação gráfica da geração histórica de esterco de suíno e bovino em atividades de criação e engorda de animais referente aos anos 2016 e 2021, no núcleo regional de Toledo.	104
Figura 4.10 - Representação gráfica do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos em Brasil.	113
Figura 4.11 - Representação gráfica do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos no Estado do Paraná.	113
Figura 4.12 - Representação gráfica do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos e em uma atividade de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR.....	114
Figura 4.13 – Levantamento do número de quarteirões no município de Toledo utilizando o Google Maps.	115
Figura 4.14 – Levantamento de dados referente ao número de casas em um quarteirão localizadas no município de Toledo utilizando o Google Maps.	115
Figura 4.15 – Cálculo da capacidade de processamento num processo centralizado utilizando o Software para o cálculo da relação C/N ideal para o processamento desses resíduos. ..	117

Figura 4.16 - Representação gráfica do diagrama de fluxo utilizado no balanço de massa para o cálculo das propriedades da mistura de resíduos orgânicos.	124
Figura 4.17 – Janela de apresentação do programa desenvolvido.....	125
Figura 4.18 – Janela para a busca e seleção de RO na base de dados do programa desenvolvido.....	125
Figura 4.19 – Janela desenhada para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de matéria prima total, a quantidade de porcentagem de aditivos, catalizadores e matéria base de RO a serem utilizados para seu processamento.	126
Figura 4.20 – Janela desenhada para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de matéria prima de RO a serem utilizados para seu processamento.....	126
Figura 4.21 – Resultado do cálculo da relação C/N em função da relação mássica da primeira mistura de resíduos orgânicos.....	131
Figura 4.22 - Resultado do cálculo da relação C/N em função da relação mássica da segunda mistura de resíduos orgânicos.....	132
Figura 4.23 – Resultado do cálculo da relação C/N em função da relação mássica da terceira mistura de resíduos orgânicos.....	132
Figura 4.24 - Representação gráfica referente à simulação do comportamento da variação da porcentagem de carbono no processo de vermicompostagem.....	133
Figura 4.25 – Representação gráfica referente à simulação do comportamento da variação da porcentagem de nitrogênio no processo de vermicompostagem.	134
Figura 4.26 – Representação gráfica referente à simulação do comportamento da variação da relação C/N no processo de vermicompostagem.....	134
Figura 4.27 – Informações utilizadas para a construção da planilha eletrônica.....	135
Figura 4.28 – Características operacionais para o dimensionamento das células de vermicompostagem.....	135
Figura 4.29 – Variáveis de desenho para o cálculo geométrico no dimensionamento da tecnologia.	136
Figura 4.30 – Dados de entrada para a realização dos cálculos de dimensionamento da tecnologia utilizando a planilha eletrônica desenhada.	137

Figura 4.31 – Planilha eletrônica desenvolvida para o cálculo de dimensões.....	138
Figura 4.32 – Informação utilizada para o desenvolvimento do desenho tridimensional da tecnologia.	140
Figura 4.33 – Planilha eletrônica direcionada para realizar a vinculação de dados dimensionados da tecnologia com o programa de desenho tridimensional.....	140
Figura 4.34 – Desenho da célula de vermicompostagem.	141
Figura 4.35 – Desenho e montagem de um conjunto de 7 células de vermicompostagem distribuídas em formato helicoidal.	141
Figura 4.36 – Desenho final da tecnologia denominada como minhocário modular helicoidal para o processamento distribuído de RO.....	142
Figura 4.37 - Esquema tridimensional com vista lateral dos elementos principais e auxiliares e o arranjo final do sistema que compreende o minhocário modular helicoidal para processamento distribuído de resíduos orgânicos.	143
Figura 4.38 - Esquema tridimensional com vista superior lateral explodido dos elementos principais e auxiliares da célula de vermicompostagem.	143
Figura 4.39 - Esquema tridimensional com vista superior lateral explodido dos elementos principais e auxiliares e o arranjo final da tecnologia que compreende o minhocário modular helicoidal para processamento distribuído de resíduos orgânicos.....	144
Figura 4.40 – Proposta referente ao processamento distribuído de resíduos orgânicos....	147
Figura 4.41 – Transformação dos RO gerados no município de Toledo-PR em produtos gasosos e matéria orgânica digerida utilizando processos centralizados constituídos por um processo de biodigestão anaeróbica de RO.	151
Figura 4.42 – Potencial de aproveitamento e transformação dos produtos gerados no processo de biodigestão anaeróbica para a obtenção de novos produtos.	153
Figura 4.43 – Estabilização do material orgânico proveniente do sistema de biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem.....	164
Figura 4.44 – Processamento centralizado por meio do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos.	165
Figura 4.45 – Diversas Possibilidades do aproveitamento dos produtos gerados no processo de vermicompostagem.....	167

Figura 4.46 – Potencial de aproveitamento dos produtos gerados no processo de vermicompostagem.....	169
Figura 4.47 – Minhocas vivas separadas do vermicomposto.	172
Figura 4.48 – Minhocas vivas previamente lavadas.....	172
Figura 4.49 – Partes consideradas na caracterização das minhocas.	172
Figura 4.50 – Resultado da caracterização das minhocas.	174
Figura 4.51 – Resultado da biodegradação anaeróbica das minhocas.....	175
Figura 4.52 – Resultado referente a extração do líquido celomático utilizando 2 tipos de solventes (solvente A - álcool isopropílico e solvente B - álcool etílico).	175
Figura 4.53 – Resultado referente variação da massa da carcaça das minhocas depois de ser realizado a extração do líquido celomático com os solventes (solvente A - álcool isopropílico e solvente B - álcool etílico em função do tempo.	176
Figura 4.54 – Resultado das análises realizadas no cromatógrafo de gases com espectrômetro de massa a amostras resultantes do processo de extração do líquido celomático utilizando solventes a base de álcool isopropílico.....	178
Figura 4.55 – Resultado das análises realizadas no cromatógrafo de gases com espectrômetro de massa a amostras resultantes do processo de extração do líquido celomático utilizando solventes a base de álcool etílico.....	179
Figura 4.56 – Resultados referentes aos compostos químicos identificados por meio da análise cromatográfica da amostra resultante da extração do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool isopropílico e a descrição das aplicações desses compostos.	180
Figura 4.57 – Resultados referentes aos compostos químicos identificados por meio da análise cromatográfica da amostra resultante da extração do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool etílico e a descrição das aplicações desses compostos.	181
Figura 4.58 – Resultados das análises do teor de proteínas realizadas nas carcaças de minhocas, referente às amostras resultantes do processo de secagem, com e sem a extração prévia do líquido celomático, utilizando diferentes solventes.....	182
Figura 4.59 – Resultados das análises do teor de gorduras realizadas nas carcaças de minhocas, referente às amostras resultantes do processo de secagem, com e sem a extração prévia do líquido celomático, utilizando diferentes solventes.....	183

Figura 4.60 – Proposta de um diagrama de fluxo de processos para a obtenção de produtos a partir das minhocas.	184
Figura 4.61 – Potencial de aproveitamento das minhocas vivas.	185
Figura 4.62 - Detalhamento do processo principal de obtenção de derivados a partir dos resíduos orgânicos.	187
Figura 4.63 - Detalhamento das etapas do processo industrial híbrido para a transformação dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado.	188
Figura 4.64 – Diagrama de fluxo dos sistemas eletrônicos projetados para o desenvolvimento da tecnologia SCADA direcionado para o processamento de resíduos orgânicos.	200
Figura 4.65 – Diagrama de fluxo do sistema eletrônico desenvolvido para a simulação computacional da tecnologia SCADA destinado para o processamento de resíduos orgânicos.	202
Figura 4.66 – Resultado: Simulação computacional do circuito eletrônico da tecnologia desenvolvida.	202
Figura 4.67 – Resultado: Programa desenvolvido correspondente à interface visual da tecnologia SCADA composto pela a) tela de apresentação; b) tela de configuração da porta de comunicações entre a interface visual e o sistema eletrônico; c) tela do diagrama de fluxo do processo bem como a apresentação da dados monitorados correspondentes à temperatura e umidade tanto do ambiente como dos resíduos orgânicos e o controle ou acionamento de válvulas e motores; e d) tela para o registro dos dados gerados na tecnologia.	205
Figura 4.68 – Resultado: Simulação virtual da comunicação entre o programa e o sistema eletrônico desenvolvido.	206
Figura 4.69 - Resultado do teste experimental do sistema eletrônico projetado utilizando placas de prova.	207
Figura 4.70 - Resultados: Placas eletrônicas desenhadas para realizar: a) o condicionamento de sinais, aquisição de dados e controle, b) o acionamento de válvulas e motores, c) a configuração do relógio eletrônico, d) ativar e desativar leds indicadores do funcionamento do sistema e e) a alimentação de corrente contínua.	207
Figura 4.71 - Resultados: Placas eletrônicas construídas para realizar: a) o condicionamento de sinais, aquisição de dados e controle, b) o acionamento de válvulas e motores, c) a	

configuração do relógio eletrônico, d) ativar e desativar leds indicadores do funcionamento do sistema e e) a alimentação de corrente contínua.....	208
Figura 4.72 Resultado: Desenho da carcaça para a tecnologia SCADA.	208
Figura 4.73 - Resultados: Construção da carcaça e montagem da parte física da tecnologia desenvolvida.	209
Figura 4.74 - Resultado: Teste final da tecnologia desenvolvida.	209
Figura 4.75 - Detalhamento de todas as etapas do processo de industrialização de resíduos orgânicos.	211

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixas de geração per capita de resíduos sólidos urbanos.....	7
Tabela 2.2 – Classificação dos resíduos com gestão sob responsabilidade do poder público municipal.....	9
Tabela 2.3 – Classificação dos resíduos sob responsabilidade do gerador.	9
Tabela 2.4 – Composição de resíduos sólidos domésticos.....	12
Tabela 2.5 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos dos resíduos sólidos.	12
Tabela 2.6 – Relações de produção de metano e sólidos voláteis em função dos resíduos sólidos orgânicos digeridos nos digestores anaeróbicos.....	33
Tabela 2.7 – Comportamento dos microrganismos em função da faixa ótima de operação com relação ao pH e os produtos resultantes do processo de biodigestão anaeróbica.	34
Tabela 3.1 – Produção média diária de dejetos (kg), dejetos + urina (kg) e dejetos diluídos (L) por animal por fase.	77
Tabela 4.1 – Composição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	97
Tabela 4.2 - Teor de carbono, nitrogênio e relação C/N contido nos diversos RO.....	105
Tabela 4.3 – Teor de umidade dos resíduos orgânicos.....	108
Tabela 4.4 – Potencial hidrogeniônico dos resíduos orgânicos.....	110
Tabela 4.5 – Teor médio de carbono, nitrogênio, a relação C/N e o potencial hidrogeniônico (pH) dos resíduos orgânicos comumente gerados na área urbana e rural no Brasil.....	112
Tabela 4.6 – Quantidade de RO gerados no município de Toledo/PR.....	116
Tabela 4.7 – Vantagem e Desvantagem do processo de compostagem para o processamento de resíduos orgânicos.	118
Tabela 4.8 – Vantagem e Desvantagem do processo de biodigestão anaeróbica para o processamento de resíduos orgânicos.....	120
Tabela 4.9 – Vantagem e Desvantagem do processo de vermicompostagem para o processamento de resíduos orgânicos.....	122
Tabela 4.10 – Avaliação técnica da patente CN215819684U.....	128
Tabela 4.11 – Avaliação técnica da patente CN216292677U.....	128

Tabela 4.12 – Avaliação técnica da patente CN215684311U.....	128
Tabela 4.13 – Avaliação técnica da patente CN216147049U.....	129
Tabela 4.14 – Avaliação técnica da patente CN113828624A.....	129
Tabela 4.15 – Avaliação técnica da patente CN113826586A.....	130
Tabela 4.16 – Avaliação técnica da patente BR112015029412-0B1.....	130
Tabela 4.17 – Relação mássica de resíduos orgânicos para o cálculo da relação C/N final de mistura.....	131
Tabela 4.18 – Relações da produção de metano em função dos sólidos voláteis provenientes de processos de biodigestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos.....	148
Tabela 4.19 – Composição química e concentrações média dos gases gerados em processos de biodigestão anaeróbica.....	149
Tabela 4.20 – Métodos e processos utilizados para aumentar a concentração do metano no biogás gerado em processo de biodigestão anaeróbica.....	153
Tabela 4.21 – Métodos e processos de absorção/dessorção para recuperar o dióxido de carbono capturado tanto em solventes como em adsorventes.....	156
Tabela 4.22 – Métodos e processos para produzir gás sulfídrico e/ou enxofre elementar a partir do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbica.....	158
Tabela 4.23 – Métodos e processos para produzir gás sulfídrico e/ou enxofre elementar a partir do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbica.....	160
Tabela 4.24 – Características e formas de aproveitamento do concentrado líquido gerado no processo de biodigestão anaeróbica.....	161
Tabela 4.25 – Características e formas de aproveitamento dos sólidos orgânicos resultantes do processo de biodigestão anaeróbica.....	162
Tabela 4.26 – Potencial de aproveitamento do Húmus de minhoca gerado no processo de vermicompostagem e as suas aplicações.....	166
Tabela 4.27 – Potencial de aproveitamento do líquido concentrado rico em nutrientes gerado no processo de vermicompostagem e as suas aplicações.....	167
Tabela 4.28 – Prospecção referente ao potencial de aproveitamento das minhocas.....	168

Tabela 4.29 – Prospecção referente aos métodos/processos para obtenção de produtos primários a partir das minhocas vivas.	170
Tabela 4.30 – Caracterização mássica das minhocas – Porcentagem de Umidade, porcentagem de absorção de água e porcentagem dos elementos presentes na minhoca..	173
Tabela 4.31 – Caracterização da minhoca: Fração de resíduos orgânicos digeridos localizados na parte interna das minhocas, fração do líquido celomático/sangue e a fração da carcaça da minhoca.....	173

NOMENCLATURA

AA	Água absorvida pela minhoca
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CM	Carcaça de minhoca
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
UM	Conteúdo de água na minhoca
LC	Conteúdo de líquido celomático nas minhocas
SM	Conteúdo de sangue nas minhocas
CAD	Desenho assistido por computador
DE	Diâmetro externo
DI	Diâmetro interno
DAI	Doutorado Acadêmico para Inovação
P	Fração mássica
Gb	Gigabytes
GHz	Giga-hertz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
M	Massa
MO	Matéria orgânica
MR	Material reciclável
NBR	Norma Brasileira
PIM	Parte inferior da minhoca
PMM	Parte média da minhoca
PSM	Parte superior da minhoca
POP's	Poluentes orgânicos persistentes
pH	Potencial de hidrogênio
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-only Memory
FPA	Resíduos de poda de árvores
RO	Resíduos Orgânicos
RDI	Resíduos orgânicos digeridos localizados na parte interna da minhoca
ROD	Resíduos Orgânicos Domésticos
RSO	Resíduos sólidos orgânicos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
RTC	Real Time Clock
SCADA	Sistema de controle supervisão e aquisição de dados
SV	Sólidos voláteis
T_{RH}	Tempo de retenção hidráulica (dias)
CPU	Unidade central de processamento
GPU	Unidade de processamento gráfico
V_f	Volume de RO gerados por família
V_R	Volume do biodigestor (m ³)
V_S	Volume do substrato introduzido no digestor (m ³)

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO DISTRIBUÍDA E CENTRALIZADA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS - PROJETO DAI-CNPQ

AUTOR: ANDY AVIMAEEL SAAVEDRA MENDOZA

ORIENTADOR: PROF. DR. CAMILO FREDDY MENDOZA MOREJON

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Rua da Faculdade, 645; CEP: 85903-000 – Toledo – PR, Brasil, defendida em 12 de maio de 2022. 252 p.

RESUMO

Os resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes frequentemente constituem a maior fração da composição total dos resíduos e ao mesmo tempo apresentam um potencial significativo de contaminação. Essa característica é amplamente observada devido às propriedades intrínsecas desses resíduos, que propiciam a proliferação de agentes contaminantes. Portanto, é crucial considerar medidas adequadas de gerenciamento e tratamento para minimizar os riscos associados a esses resíduos. Embora existam várias tecnologias para o tratamento desses resíduos como a biodigestão anaeróbica, compostagem, vermicompostagem, desidratação e a incineração, a maioria delas apresenta baixo potencial de agregação de valor, restrições na aplicação na escala artesanal e gargalos tecnológicos. Esses fatores dificultam a exploração plena do grande potencial de aproveitamento dos resíduos. Nesse contexto, para dois cenários de processamento (distribuído e centralizado), o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver processos com tecnologias inovadoras que possibilitem o aproveitamento dos resíduos orgânicos em escala industrial, embarcando conhecimentos que propiciem a obtenção de produtos inovadores com elevado valor agregado. Para essa finalidade, a metodologia contemplou a realização de 5 etapas: 1) caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos; 2) prospecção dos métodos, processos e tecnologias de processamento de resíduos orgânicos; 3) desenvolvimento e proposição dos processos e das tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos; 4) a avaliação dos requisitos de proteção intelectual; e 5) a análise e sistematização dos resultados. Os principais resultados compreendem: o diagnóstico do cenário atual com explicitação do potencial segregado de geração de resíduos orgânicos da

área urbana (ROU) e rural (ROR) (Ex. ROU no Brasil é de 116.058,54 t.dia⁻¹, no Paraná 6.273,24 t.dia⁻¹, Toledo 77,69 t.dia⁻¹); as alternativas de processamento de resíduos orgânicos, numa escala industrial, com base do processamento distribuído (aplicado em um município com 35.321 residências) e centralizado (num complexo industrial com capacidade de 189,49 t.dia⁻¹); três processos, com características inovadoras, o primeiro para o processamento distribuído de resíduos orgânicos (com a obtenção de 5 produtos de valor agregado), o segundo para o processamento centralizado de resíduos orgânicos (com a obtenção de 25 produtos com elevado valor agregado) e o terceiro para a obtenção do líquido celomático e carcaças a partir das minhocas (processo principal de transformação); tecnologias, com características inovadoras, baseadas no estudo das condições operacionais dos processos de transformação dos resíduos orgânicos (RO) constituídas por um minhocário modular helicoidal e tecnologias de sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados (SCADA) para realizar o monitoramento, controle e processamento dos dados para os processos de industrialização de RO; e a produção intelectual em forma de artigos, patentes, programas de computador, sistemas SCADA e desenhos industriais. A consequência disso será a viabilização de 100% de aproveitamento dos resíduos orgânicos, neste caso por meio do aproveitamento dos resíduos orgânicos segregados na fonte. Desta forma, apresenta-se os elementos técnicos para propiciar a industrialização dos resíduos orgânicos em sintonia com os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: resíduos orgânicos; industrialização; biodigestão; vermicompostagem; inovação.

TECHNOLOGICAL INNOVATIONS FOR DISTRIBUTED AND CENTRALIZED INDUSTRIALIZATION OF ORGANIC WASTE - DAI-CNPQ PROJECT

AUTHOR: ANDY AVIMAEEL SAAVEDRA MENDOZA

SUPERVISOR: PROF. DR. CAMILO FREDDY MENDOZA MOREJON

Doctor Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; Western Paraná State University; College Street, 645; CEP: 85903-000 – Toledo – PR, Brazil, presented on May 12th 2023. 252 p.

ABSTRACT

Organic waste from various sources often constitutes the largest fraction of the total waste composition and at the same time presents a significant potential for contamination. This characteristic is widely observed due to the intrinsic properties of these residues, which favor the proliferation of contaminating agents. It is therefore crucial to consider appropriate management and treatment measures to minimize the risks associated with these wastes. Although there are several technologies for the treatment of these residues, such as anaerobic digestion, composting, vermicomposting, dehydration and incineration, most of them have low potential for adding value, restrictions in the application on an artisanal scale and technological bottlenecks. These factors make it difficult to take full advantage of the great potential for using waste. In this context, for two processing scenarios (distributed and centralized), the general objective of this work was to develop processes with innovative technologies that allow the use of organic waste on an industrial scale, incorporating knowledge that facilitates the obtaining of innovative products with high added value. To this end, the methodology included carrying out 5 stages: 1) characterization of the source generating organic waste; 2) exploration of methods, processes and technologies for treating organic waste; 3) development and proposition of alternative processes and technologies for the differentiated industrialization of organic waste; 4) the assessment of intellectual protection requirements; and 5) the analysis and systematization of the results. The main results comprise: the diagnosis of the current scenario with an explanation of the segregated potential for organic waste generation in urban (ROU) and rural (ROR) areas (Ex. ROU in Brazil is 116,058.54 t.day⁻¹, in Paraná 6,273 .24 t.day⁻¹, Toledo 77.69 t.day⁻¹); alternatives

for the treatment of organic waste, on an industrial scale, based on distributed processing (applied in a municipality with 35,321 households) and centralized processing (in an industrial complex with a capacity of 189.49 t.day⁻¹); three processes, with innovative characteristics, the first for the distributed treatment of organic waste (obtaining 5 products with added value), the second for the centralized treatment of organic waste (obtaining 25 products with high added value) and the third for obtaining liquid coelomic and worm carcasses (main transformation process); technologies, with innovative characteristics, based on the study of the operational conditions of the processes of transformation of organic residues (OR) constituted by a helical modular earthworm and technologies of supervisory control and data acquisition (SCADA) to carry out the monitoring, control and processing of data for RO industrialization processes; and intellectual production in the form of articles, patents, computer programs, SCADA systems and industrial designs. The consequence of this will be the viability of 100% use of organic waste, in this case through the use of organic waste segregated at source. In this way, the technical elements are presented to promote the industrialization of organic waste in line with the 17 Sustainable Development Goals.

Keywords: organic waste; industrialization; biodigestion; vermicomposting; innovation.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A gestão dos resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes tem se tornado um desafio dentro e fora do Brasil. Nesse cenário, prevalece a gestão com a coleta, transporte e destinação dos resíduos sólidos, misturando com a fração orgânica e demais componentes, “no melhor dos casos” aos aterros sanitários. Esse modelo de gestão inviabiliza o aproveitamento integral dos componentes presentes nos resíduos.

De acordo com relatórios realizados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), a geração de resíduos sólidos urbanos tem aumentado de forma alarmante no Brasil. Em 2022, a população brasileira gerou 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, o que equivale a 224 mil toneladas por dia. Isso significa que a geração per capita, naquele ano, foi de 381 kg por habitante por ano (ou 1,043 kg por habitante por dia). Desse total, aproximadamente 42 milhões de toneladas são constituídas pelos resíduos orgânicos.

CELESTINO *et al.* (2022) apontam que as principais fontes de geração de resíduos sólidos orgânicos nas áreas urbanas são de origem domiciliar e comercial, incluindo padarias, açougues, restaurantes, bares, praças de alimentação, refeitórios, entre outros.

AGUILAR *et al.* (2022) mencionam que o crescimento populacional e a rápida urbanização levaram a considerar que os resíduos gerados nas indústrias e em atividades rurais também devem ser considerados como parte geradora de resíduos sólidos orgânicos. Ou seja, as áreas urbanas não são as únicas responsáveis pela geração desses resíduos, e que as atividades industriais e rurais também têm contribuição significativa nesse aspecto.

Devido a este fato, no Brasil está em fase de implementação a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2017), por meio do qual se incorpora as diretrizes para o desenvolvimento e a implantação de soluções tecnológicas para a redução, reutilização, reciclagem e/ou a industrialização dos resíduos sólidos.

Segundo ALIBARDI & COSSU (2015), a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos se caracterizam por ter uma elevada umidade e biodegradabilidade, principalmente devido ao grande conteúdo de resíduos alimentares (provenientes de cozinha, restaurantes, lanchonetes, padarias e supermercados).

SHARMA *et al.* (2021) mencionam que, em termos de composição química, a fração orgânica dos RSU esta composta por diversas substâncias, os quais pertencem a três grupos principais de compostos orgânicos biodegradáveis, sendo eles os hidratos de carbono, as proteínas e os lipídios.

Segundo o THE WORLD BANK (2022), o potencial de geração de resíduos orgânicos é influenciado por aspectos sociais e econômicos, relacionados principalmente com a disponibilidade dos alimentos e os padrões de consumo, o que conseqüentemente atribui ao resíduo orgânico uma composição fortemente heterogênea e dependente do perfil da fonte geradora.

Dentre os processos de estabilização de resíduos sólidos orgânicos, tem-se a compostagem, a biodigestão anaeróbica, a vermicompostagem, os processos de desidratação e a incineração.

A compostagem é um processo que permite a decomposição aeróbia dos resíduos orgânicos por meio da ação de microrganismos aeróbios. Esse processo tem como resultado a estabilização da matéria orgânica e a geração de um produto sanitizado, rico em nutrientes que pode ser utilizado no solo. No entanto, a eficiência da compostagem está diretamente relacionada a fatores operacionais, principalmente aos ambientes propícios para a proliferação dos microrganismos aeróbios (AYOUBMOUBARECK *et al.*, 2022).

A biodigestão anaeróbica é outro processo que permite a decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos orgânicos na ausência de ar. Esse processo é considerado como promissor devido à possibilidade de aproveitamento dos produtos resultantes da biodigestão, como o biogás e o biofertilizante. Do ponto de vista do processo, a decomposição da matéria orgânica acontece pela ação combinada de uma variedade de microrganismos anaeróbios e reações químicas que acontecem em quatro etapas de degradação. No entanto, é importante destacar que esse processo é lento, pois o material a ser descomposto requer um longo período de estabilização e decomposição. Além disso, é necessário garantir condições operacionais rigorosas para o seu sucesso (ARNAU *et al.*, 2022).

A vermicompostagem é um processo diferenciado comparado com os processos anteriores porque envolve a degradação, fragmentação e bioestabilização dos resíduos sólidos orgânicos por meio de uma simbiose entre minhocas e microrganismos (ENEBE & ERASMUS, 2023). O produto principal desse processo é um fertilizante altamente

estabilizado, rico em minerais, nutrientes orgânicos e fitohormônios, que são essenciais para o crescimento das plantas (VAMBE *et al.*, 2023).

De acordo com HIRUNAVUKKARASU *et al.* (2022), a vermicompostagem é considerada um processo sustentável e de fácil operação. No entanto, ainda está restrita a tempos de processamento longos e à escala artesanal, resultando em volumes reduzidos.

De modo geral, nesses processos prevalecem como fatores limitantes a baixa capacidade de processamento, grau de tecnificação nos processos e agregação de valor nos produtos, os quais inviabilizam a sua utilização em grande escala.

Os processos de desidratação de resíduos orgânicos são também alternativas tecnológicas complementares para a otimização dos sistemas de acondicionamento (pela diminuição da quantidade de umidade), bem como para a inibição da atividade microbiológica que propicia a inativação de microrganismos e bactérias presentes nos resíduos orgânicos (SILVA, 2015), esse resultado também foi corroborado por DAI *et al.* (2020). De acordo com o exposto, os processos de desidratação somente modificam a composição dos resíduos orgânicos reduzindo especificamente a sua umidade, porém, este processo não consegue realizar a transformação desses resíduos em produtos de valor agregado.

A incineração é um método indireto de processamento dos resíduos orgânicos presentes nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Esse método tem diversas finalidades, como a redução do volume dos resíduos, a geração de energia térmica e a desintegração dos materiais. No entanto, a incineração apresenta um grande problema que é a transformação dos resíduos sólidos orgânicos em gases altamente nocivos e tóxicos, que incluem poluentes atmosféricos prejudiciais à saúde (KALINCI & DINCER, 2018).

Segundo NETO *et al.* (2014) a incineração de RSU pode afetar de forma negativa ao meio ambiente devido à emissão de gases de efeito estufa e poluentes orgânicos persistentes POP's, compostos por dioxinas e furanos. Enquanto, no continente europeu o nível máximo de emissão de dioxinas permitido é de $0,1 \text{ ng m}^{-3}$, e no Brasil esse valor é cinco vezes maior ao limite europeu ($0,5 \text{ ng m}^{-3}$).

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2016) indica que a dioxina é uma substância altamente tóxica, pois consegue afetar de forma direta o sistema imunológico, reprodutivo e até pode gerar câncer nas pessoas, e uma vez que as dioxinas entra no corpo, demoram em média de 7 a 11 anos para serem eliminadas.

Segundo CUDJOE & ACQUAH (2021) no mundo existem cerca de 1.179 plantas de incineração de RSU, dos quais países como África do Sul, Egito, Argélia, Marrocos e Nigéria são responsáveis pelo maior potencial de emissão de dioxinas. Outro aspecto que chama a atenção é que mesmo tendo o questionamento deste tipo de tecnologias KAYA *et al.* (2021) reporta que em Istambul (Turquia) estão construindo uma planta de incineração para realizar a queima de 3.000 toneladas de RSU por dia.

Segundo MOREJON *et al.* (2012) a geração de RSU é um indicador típico do desenvolvimento socioeconômico de uma nação e como a economia está em constante expansão, a geração de RSU aumentará proporcionalmente. Os autores indicam que dependendo do tipo de RSU pode significar um problema, porém, ao mesmo tempo pode ser a fonte da solução dos problemas.

Diante desse cenário, se faz necessário uma análise criteriosa das alternativas tecnológicas tradicionais e, principalmente, o desenvolvimento de métodos, processos e tecnologias inovadoras para o processamento otimizado, em escala industrial, dos resíduos orgânicos, neste caso com a estratégia da industrialização dos resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes.

Alinhado a esse desafio a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por meio do Núcleo de Biotecnologia e Desenvolvimento de Processos Químicos, do campus Toledo, coordenado pela professora Soraya Moreno Palácio, o presente trabalho foi contemplado com recursos do Programa de Doutorado Acadêmico em Inovação (DAI) do CNPq.

1.2. Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver processos com tecnologias inovadoras que possibilitem o aproveitamento dos resíduos orgânicos, numa escala industrial em dois cenários: o processamento distribuído e o centralizado. Em cada caso, embarcando conhecimentos de média e alta complexidade que resultaram na obtenção de produtos inovadores com elevado valor agregado. Para essa finalidade, os objetivos específicos foram: 1) caracterizar a fonte geradora de resíduos orgânicos; 2) prospectar os métodos, processos e tecnologias de processamento de resíduos orgânicos; 3) desenvolver e propor os processos e as tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos, neste caso visando a obtenção de produtos de elevado valor agregado; 4) avaliar dos

requisitos de proteção intelectual; e 5) analisar, sistematizar e organizar os resultados do trabalho.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

Para atender aos objetivos da presente Tese de Doutorado, o referencial teórico abrangeu o estudo dos antecedentes da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, os elementos do potencial de geração, a classificação e composição dos resíduos sólidos, bem como as propriedades físicas, químicas e biológicas dos mesmos. Além disso, foram exploradas as formas convencionais de gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e foi dada ênfase à análise dos resíduos orgânicos e ao seu potencial de aproveitamento. Posteriormente, foram examinados os diversos conceitos e fundamentos dos processos e das tecnologias convencionais que permitem o aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos, tais como a compostagem, os processos combinados de biodigestão e vermicompostagem. Na revisão, também foram contempladas o estudo das metodologias relacionadas com o desenho de processos, desenho de tecnologias no contexto dos Processos das Indústrias Químicas e os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS).

2.1. Resíduos Sólidos

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2017), instituída pela Lei nº12.305/2010, os resíduos sólidos são constituídos de materiais, substâncias, objetos ou bens descartados após seu uso nas diversas atividades humanas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), por meio da norma NBR-10.004/2004, define como resíduos nos estados sólidos ou semissólidos aqueles materiais que resultam das atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícola, de serviços e de varrição. A norma, também considera, como resíduos sólidos, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de afluentes e efluentes líquidos.

Segundo SOARES (2011) e SÁNCHEZ *et al.* (2019), as características dos resíduos sólidos urbanos (composição e a geração) dependem de vários fatores relacionados com as fontes de geração, como características das cidades, tamanho, densidade populacional, atividades econômicas, hábitos das pessoas, padrões de consumo, clima e nível educacional, entre outros.

2.1.1. Geração dos resíduos sólidos

Na área urbana, segundo o Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001), a geração per capita dos RSU pode ser estimada em função do tamanho da cidade e da população urbana, com base de quatro faixas de geração per capita de RSU, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Faixas de geração per capita de resíduos sólidos urbanos.

Tamanho das Cidades	População Urbana (habitantes)	Geração per capita kg/hab./dia
Pequena	Até 30 mil	0,5
Média	De 30 mil a 500 mil	De 0,5 a 0,8
Grande	De 500 mil a 5 milhões	De 0,8 a 1,0
Megalópole	Acima de 5 milhões	Acima de 1,00

Fonte: IBAM (2001).

Com base nos dados apresentados pelo Ministério de Desenvolvimento Regional (BRASIL, 2022), no comportamento da geração per capita dos resíduos sólidos urbanos, nos diversos estados do Brasil, prevalece a tendência variável devido ao comportamento das fontes de geração e também devido à diferença no número de habitantes em cada estado. Na Figura 2.1 são apresentados os dados da geração per capita dos RSU nos estados do Brasil para o ano 2020.

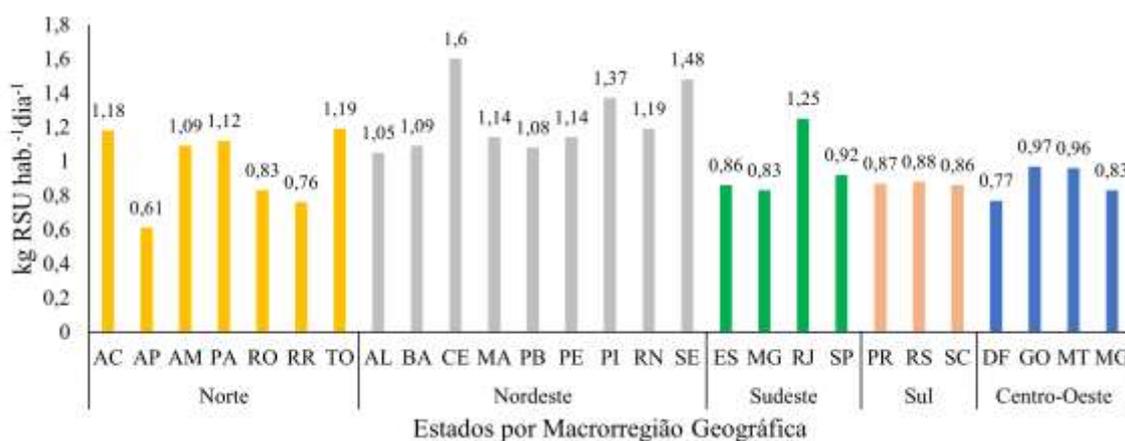


Figura 2.1 - Representação gráfica da geração per capita de RSU nos estados de Brasil.
Fonte: Adaptado de BRASIL (2022).

Na área rural, com grande concentração de atividades de criação e engorda de suínos, bovinos, aves e peixes, com suas respectivas unidades de processamento industrialização são também importantes fontes de geração de resíduos sólidos. Segundo os dados apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) a produção de

cabeças de animais produzidas no Brasil em 2019 teve 1,5 bilhões de cabeças de galináceos, 17,4 milhões de cabeças de codornas, 249,1 milhões de galinhas, 11,3 milhões de caprinos, 214,7 milhões de bovinos, 5,9 milhões de equinos, 40,6 milhões de suínos, 19,7 milhões de ovinos e 1,4 milhões de bubalinos. Com base nos dados de OLIVEIRA (1993) com relação à produção de dejetos para diversos animais e considerando o número de cabeças produzidas no Brasil em 2019, pode-se indicar que por dia foi produzido 37.365 toneladas de dejetos de galinhas, 97.440 toneladas de dejetos de suíno, 2.683.750 toneladas de dejetos de bovino, 13.790 t.dia⁻¹ de dejetos de ovinos.

2.1.2. Classificação dos resíduos sólidos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), em sua norma NBR-10.004/2004 classifica aos resíduos sólidos em função dos riscos que podem afetar tanto ao meio ambiente como à saúde. Dessa forma os resíduos são classificados em:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos, caracterizados pela inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos, caracterizados por resíduos de restaurantes (restos de alimentos), resíduos de madeira, sucata de metais ferrosos, resíduos de materiais têxteis, sucata de metais não ferrosos, resíduos de minerais não metálicos, resíduos de papel e papelão, areia de fundição, resíduos de plástico polimerizado, bagaço de cana, resíduos de borracha, e outros resíduos não perigosos;
- c) Resíduos Classe II A – Não Inertes, caracterizados por resíduos que possuem propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água; e
- d) Resíduos Classe II B – Inertes, caracterizados por compostos inertes (não biodegradáveis) solúveis, os quais quando são solubilizados não atingem a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água conforme é apresentado na norma NBR-10.004/2004, excetuando-se o aspecto, a cor, a turbidez, a dureza e sabor.

Na Tabela 2.2 e 2.3 são apresentados a Classificação dos resíduos em função das características das fontes de geração de resíduos, bem como, do ponto de vista legal, sua relação com o responsável pela gestão dos mesmos.

Tabela 2.2 – Classificação dos resíduos com gestão sob responsabilidade do poder público municipal.

Origem	Definição
Resíduos Sólidos Domiciliares	Originários de atividades domésticas. São constituídos por resíduos secos (recicláveis) e resíduos úmidos (Orgânicos).
Resíduos Sólidos Recicláveis	Constituídos por embalagens fabricadas a partir de plásticos, papeis, vidros e metais diversos.
Rejeitos	São os resíduos sólidos domiciliares contaminados como os resíduos de atividade de higiene.
Resíduos de Limpeza Urbana	Originários de serviços de varrição, capina, poda, raspagem e remoção da terra, limpeza de bueiros, limpeza de feiras urbanas e de outras atividades correlatas.
Resíduos Verdes	Provenientes da manutenção de parques, áreas verdes e jardins.
Resíduos Volumosos	Móveis, utensílios domésticos inservíveis, grandes embalagens.

Fonte: TOLEDO (2015).

Tabela 2.3 – Classificação dos resíduos sob responsabilidade do gerador.

Origem	Definição
Resíduos de Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviços	Gerados nas atividades e não classificados nas demais categorias, como óleos vegetais usados, óleos lubrificantes, entre outros.
Resíduos da Construção Civil	Gerados em atividades de construção ou demolição, são compostos principalmente por restos de alvenarias, argamassa, concreto, entre outros.
Resíduos de Serviço de Saúde	Gerados em estabelecimentos de serviços de saúde sendo potencialmente infectantes, químicos, rejeitos, radioativos e perfurocortantes.
Resíduos de Serviços Públicos de Saneamento Básico	Gerados nas atividades de tratamento e manutenção dos sistemas de água, esgoto e drenagem pluvial.
Resíduos Cemiteriais	Provenientes do processo de exumação.
Resíduos Industriais	Gerados nos processos produtivos industriais que não possam ser equiparados aos resíduos domiciliares.
Resíduos de Serviços de Transportes	Originários de atividades de transporte rodoviário, ferroviário, aéreo e aquaviário.

Fonte: TOLEDO (2015).

2.1.3. Composição dos resíduos sólidos

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), a composição dos resíduos sólidos urbanos, gerados no Brasil, está constituída por 51,4% de matéria orgânica, 31,9% de material reciclável (2,9% de metais, 13,1% de papel/papelão/tetrapak, 13,5% de plástico total, e 2,4% de vidro) e 16,7% de outros materiais.

Com base nos dados do Plano Municipal de Coleta Seletiva de Cascavel (CASCAVEL, 2014), a composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Cascavel-PR está composta por 38,79% de matéria orgânica, 35,71% de materiais recicláveis e 25,50% de rejeitos. Esses números revelam uma diferença significativa em relação à composição dos RSU no estado do Paraná, que é de 56,5% de matéria orgânica (MO), 26% de materiais recicláveis (MR) e 17,5% de rejeitos. Os autores indicam que essa variação na composição dos RSU em Cascavel pode ser atribuída ao perfil socioeconômico da população local. Segundo eles, a população de Cascavel tem um alto poder aquisitivo, o que resulta em um consumo predominante de produtos industrializados e embalados. Esse padrão de consumo influencia diretamente a maior proporção de materiais recicláveis presentes nos RSU da região.

De acordo com o Plano Municipal de Coleta Seletiva de Toledo (TOLEDO, 2015) a composição dos RSU em Toledo-PR está constituída por 46,08% de matéria orgânica, 32,41% de materiais recicláveis, 15,47% de rejeitos e 6,03% de outros. Para o mesmo município MOREJON *et al.* (2012) indicaram que a composição dos RSU esta constituída por 69% de matéria orgânica, 23% de materiais recicláveis, e 8% de rejeitos.

Segundo o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo (SÃO PAULO, 2014), a composição dos RSU em São Paulo está constituída por 51,232% de matéria orgânica, 34,529% de materiais recicláveis, e 14,265% de rejeitos.

De acordo como o Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Foz de Iguaçu (FOZ DO IGUAÇU, 2012), a composição dos RSU em Foz de Iguaçu esta constituída por 57,35% de matéria orgânica, 20,41% de materiais recicláveis, e 22,24% de rejeitos.

SOUZA & GUADAGNIN (2009) indicam que a composição dos RSU no município de Cocal do Sul está constituída por 37,41% de matéria orgânica, 43,52% de materiais recicláveis, e 19,08% de rejeitos. Os autores também declaram que as cidades que

apresentam uma geração baixa de matéria orgânica, comparada com a média nacional, podem ser consideradas como um parâmetro no qual as populações utilizam métodos de reciclagem de resíduos sólidos orgânicos *in situ*, onde as sobras orgânicas são empregadas para a alimentação de animais ou para a decomposição, utilizando a compostagem rudimentar em hortas domiciliares.

Segundo TAVARES (2007), a composição dos RSU no município de Curitiba-PR está constituída por 47,9% de matéria orgânica, 42% de materiais recicláveis, e 10,1% de rejeitos.

LEME & JOIA (2006) indicam que a composição dos RSU no município de Aquidauana-MS está constituída por 12,67% de matéria orgânica, 12,35% de materiais recicláveis, e 14,98% de rejeitos. Também ressalta que o aumento da porcentagem de resíduos sólidos orgânicos pode ser influenciado também pelo nível de arborização dos municípios, pois a presença de folhas é muito comum nos RSU, dessa forma vale ressaltar que o nível de arborização pode ser considerado como um parâmetro que influi na variação da porcentagem de matéria orgânica e a geração desses resíduos pode aumentar em função das estações do ano, mais especificamente na estação de outono.

Segundo MELO *et al.* (2011), a composição dos RSU no município de Rolândia-PR está constituída por 51,38% de matéria orgânica, 42,94% de materiais recicláveis, e 5,68% de rejeitos.

Com base nas informações apresentadas pode-se constatar que a composição dos resíduos sólidos urbanos varia em função das características das cidades, da população, dos hábitos de consumo e das metodologias utilizadas na estimativa dessas composições.

SALSA *et al.* (2018) apresentam a caracterização física de resíduos sólidos domiciliares, realizados em três condomínios habitacionais (condomínio A, B e C). Em cada caso com características diferentes na forma da estrutura física dos condomínios (disposição vertical e horizontal), na quantidade da população, e na localização (Londrina/PR e Camboriú/SC). De acordo com essa pesquisa foi identificado que: a) a composição dos resíduos orgânicos gerados nos três condomínios variam de 69,86 a 91,88%; b) com relação à composição gravimétrica dos resíduos sólidos recicláveis, nos três condomínios variam de 8,12 a 30,14% sendo a maior porcentagem, desses resíduos, é composto por resíduos de papel, plásticos, vidro, metais, isopor, embalagens de remédio, orgânicos, e outros; e c) a geração per capita de RSU nos três condomínios variam de 0,48 a 0,757 kg hab.⁻¹ dia⁻¹. Na

Tabela 2.4 são apresentados os dados consolidados, no qual MO representa o material orgânico e MR o material reciclável.

Tabela 2.4 – Composição de resíduos sólidos domésticos.

Estudo	Localização	Geração per capita kg hab. ⁻¹ dia ⁻¹	Composição (%)	
			MO	MR
Condomínio A	Londrina/PR	0,757	78,96	21,01
Condomínio B	Balneário Camboriú/SC	0,916	91,88	8,12
Condomínio C	Londrina/PR	0,48	69,86	30,14

Fonte: Adaptado de SALSA *et al.* (2018).

2.1.4. Propriedades físicas, químicas e biológicas dos resíduos sólidos

Segundo o Plano Municipal de Gestão dos Resíduos Sólidos de Toledo-PR (TOLEDO, 2011), os resíduos sólidos podem ser classificados em função da: i) composição física dos materiais presentes nos resíduos sólidos em termos de frações; ii) composição química relacionada principalmente pelos componentes orgânicos; iii) os parâmetros físicos e químicos como o teor de umidade, a densidade, o poder calorífico, a relação carbono/nitrogênio, o potencial de hidrogênio (pH) e as concentrações dos sólidos totais, fixos e voláteis; iv) a velocidade de decomposição biológica dos materiais presentes nos resíduos; e v) o teor dos materiais combustíveis, não combustíveis contidos nos resíduos e nos materiais inertes.

O Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (REBOUÇAS, 2016) indica que os resíduos sólidos podem ser classificados também em função da: a) natureza física onde a composição física desses resíduos pode ser dividida em resíduos secos (materiais recicláveis) e em resíduos úmidos (resíduos orgânicos); e b) a natureza química onde a composição química desses resíduos pode ser dividida em componentes orgânicos e inorgânicos.

Na Tabela 2.5 são apresentados os parâmetros físicos, químicos e biológicos dos resíduos sólidos.

Tabela 2.5 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos dos resíduos sólidos.

Tipo	Parâmetro	Características	Unidade
Propriedades Físicas	Composição gravimétrica	Quantifica a fração mássica de cada componente presente numa amostra.	%
	Geração per capita	Quantifica a massa de RSU que é gerada por habitante em um dia.	kg hab ⁻¹ dia ⁻¹
	Teor de umidade	Representa a porcentagem de água que pode conter um resíduo sólido.	%

Continuação da Tabela 2.5

Tipo	Parâmetro	Características	Unidade
Propriedades Físicas	Peso específico	É a quantidade de peso de um determinado elemento ou composto que pode ocupar um determinado volume.	N m ⁻³
	Compressividade	Quantifica o grau de compactação que pode sofrer um determinado objeto quando é submetido a uma pressão de 4kg/cm ² .	%
Propriedades Químicas	Composição química	Quantifica os teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio e outros.	%
	Relação C/N	Indica o grau de decomposição de matéria orgânica.	
	Potencial de hidrogênio, pH	Indica o teor de alcalinidade ou acidez.	
	Poder Calorífico	Indica a quantidade de calor que pode gerar um determinado material quando é submetido à queima.	kcal kg ⁻¹
Propriedades biológicas	Agentes patogênicos População microbiana	Apresenta as características biológicas com relação ao tipo de agentes patogênicos e a população microbiana nos resíduos e a sua relação com o nível de geração de doenças em homens, animais ou vegetais.	

Fonte: Adaptado de IBAM (2001) e ABNT (2004).

2.1.5. Gestão convencional dos resíduos sólidos urbanos

No contexto internacional, tanto nos países em desenvolvimento como nos países desenvolvidos, existe uma forte preocupação com relação ao aumento dos volumes dos resíduos sólidos e ao gerenciamento desses resíduos, nesse cenário, cada país está adotando políticas em base a normativas que visam a otimização dos seus planos de tratamento e a destinação final dos resíduos (SINGH *et al.*, 2011; NETO *et al.*, 2014).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2017), instituída pela Lei nº12.305/2010, é obrigação dos municípios brasileiros a busca de tecnologias adequadas para a destinação final dos resíduos sólidos e, nessa lei também se apresenta como uma alternativa viável o uso de aterros sanitários, os processos de compostagem, os processos de reciclagem, e as tecnologias para a recuperação e aproveitamento energético como métodos de destinação adequada do RSU. Nessa Lei também se menciona que os lixões e os aterros controlados são considerados como uma disposição final inadequada.

Os aterros sanitários, são considerados como um método adequado para a disposição final de resíduos sólidos urbanos, devido a que minimiza os impactos ambientais. Este método possui elementos que possibilitam a proteção do solo por meio da implantação de camadas de argila e membranas geotêxteis. A característica principal deste método é que configura o confinamento dos resíduos sólidos em um local isolado, de tal forma que os lixiviados (material líquido) são recuperados e são tratados por um sistema de tratamento e, em alguns casos, de forma paralela permite a recuperação e o aproveitamento do biogás gerado (POSSA, 2013).

Os lixões ou vazadouros, são áreas onde são depositados os resíduos sólidos a céu aberto, sem nenhum planejamento e cuidado com o meio ambiente, é considerado como um método de disposição final inadequada dos resíduos sólidos. Esse tipo de destinação dos resíduos sólidos é atualmente utilizado na maioria dos municípios brasileiros, conforme os dados apresentados pela ABRELPE (2022). Nesse sentido, os resíduos sólidos ao estar expostos dessa forma induzem à proliferação de microrganismos, insetos e animais que podem ser portadores e transmissores de doenças, além disso, a decomposição dos resíduos orgânicos gera gases contaminantes e de forma paralela gera um líquido denominado de chorume que possui uma alta carga orgânica e é altamente tóxica, onde por meio da percolação pode atingir aos lençóis freáticos, produzindo assim a contaminação dos mesmos (MONTEIRO, 2017; BIANCO, 2018; PEREIRA & ALEIXO, 2018).

O aterro controlado é um método de disposição final de resíduos sólidos e é considerado como inadequado. A característica principal deste método é o uso de camadas de terra no recobrimento dos resíduos sólidos, porém, esta prática não é considerada como um método limpo, devido a este tipo de aterros não apresentar isolamento na base, permitindo que os lixiviados (material líquido) possam atingir aos lençóis freáticos causando a sua contaminação (RAMOS, 2004).

Na disposição final dos RSU no Brasil, até o ano 2018, prevaleceu o uso de lixões, aterros controlados, aterros sanitários, unidades de compostagem, e unidades de incineração. De acordo com a literatura, 2.569 municípios utilizam lixões, 1.508 municípios utilizam aterros controlados, 1.493 municípios utilizam aterros sanitários, 70 municípios possuem unidades de compostagem, e 14 municípios contam com unidades de incineração como método de disposição final dos RSU (ABRELPE, 2019; BRASIL, 2019).

Na Figura 2.2 são apresentados dados referentes ao número de unidades de disposição final dos resíduos sólidos urbanos utilizados nas diversas regiões do Brasil para o ano de 2018.

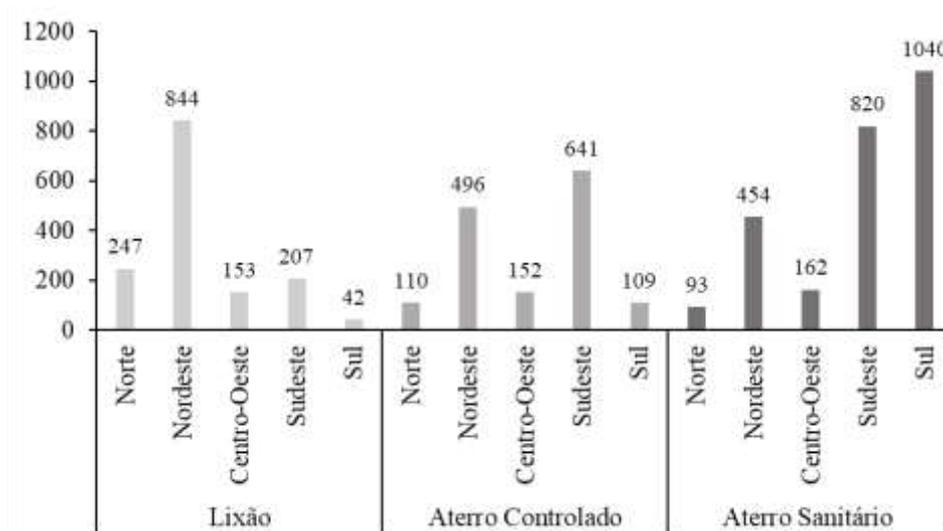


Figura 2.2 - Representação gráfica do número de unidades de disposição final dos resíduos sólidos urbanos utilizados nas regiões do Brasil no 2018.

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2019).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), indica que das 76,12 milhões de toneladas de RSU coletados no Brasil no ano 2020, o 61% foram encaminhadas para aterros sanitários, o 23% foram encaminhados para aterros controlados e 16% foram encaminhados para os lixões. Na Figura 2.3 são apresentados os dados históricos da disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

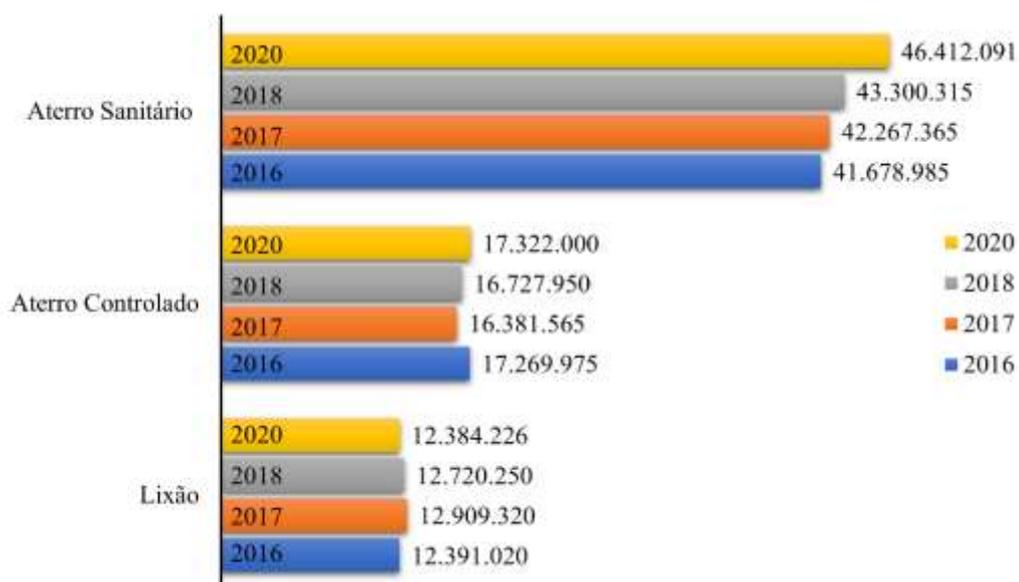


Figura 2.3 - Representação gráfica dos dados históricos da disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (t. ano⁻¹) 2016-2020.

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2022).

Um estudo detalhado da gestão de resíduos sólidos urbanos realizado por MOREJON *et al.* (2012), apresentam as deficiências e limitações dos sistemas convencionais e também uma proposta de gestão diferenciada dos RSU com base da coleta segregada dos resíduos na fonte. Na Figura 2.4 é apresentado o cenário convencional do modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos do município de Toledo-PR. Com base nessa figura, o 98% dos RSU tem como destino final os sistemas de coleta convencional os quais estão compostos por aterros sanitários e 2% desses resíduos são conduzidos a sistemas de coleta seletiva.

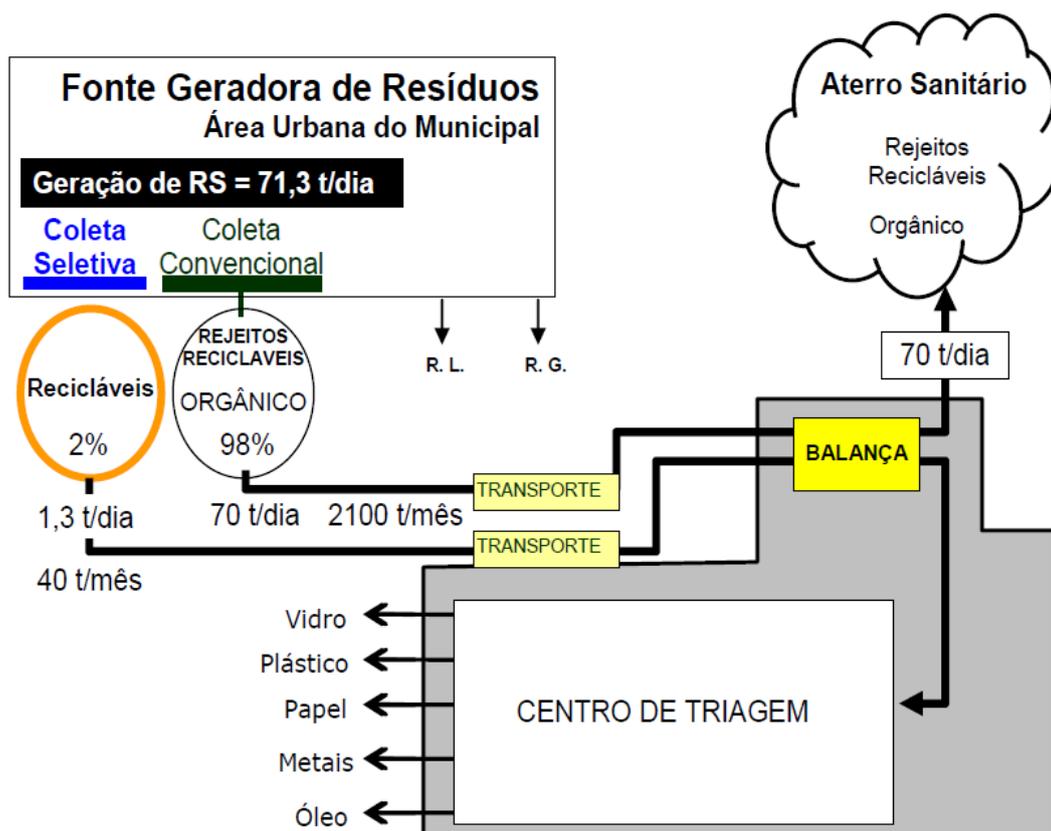


Figura 2.4 – Modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos do município de Toledo/PR.
Fonte: MOREJON *et al.* (2012).

Na Figura 2.5 é apresentada a proposta de um novo modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos com base na coleta segregada dos resíduos (MOREJON *et al.*, 2012). Com base nessa figura a proposta consiste em socializar a implementação de mecanismos de modelos de gestão que conduzindo o maior interesse a uma coleta diferenciada dos resíduos orgânicos, pois esse tipo de resíduos representa a maior geração de problemas ambientais. O desafio dessa proposta consiste em fazer a separação desses resíduos orgânicos na fonte por meio de um método de incentivo econômico, complementado com usinas de processamento orgânico, de acordo com a coleta diferenciada, todo o material orgânico

coletado poderá ser reaproveitado e utilizado como matéria prima para a produção de derivados com elevado valor agregado, entre eles, biofertilizantes e biocombustíveis, para isso será necessária a busca de novos métodos, processos e tecnologias para essa transformação.

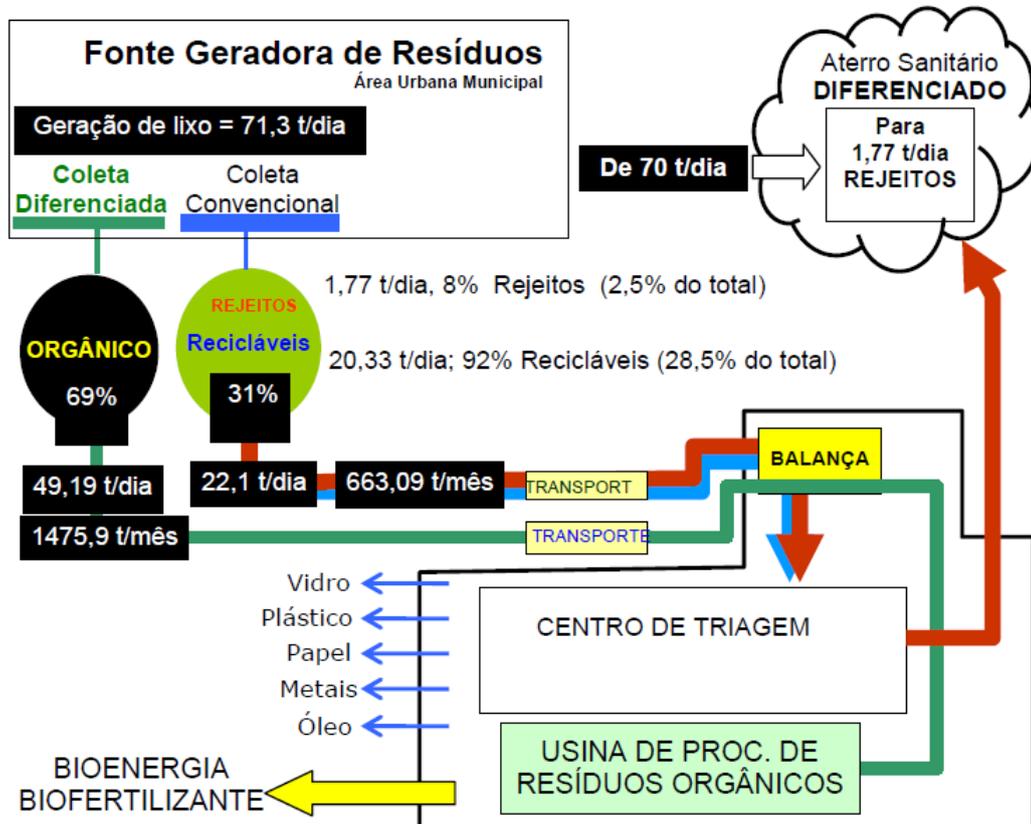


Figura 2.5 – Proposta de um novo modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos.
Fonte: MOREJON *et al.* (2012).

Deste modo, nesse trabalho fica explícito a importância da coleta segregada e o processamento diferenciado dos componentes dos RSU.

2.1.6. Resíduos orgânicos e potencial de aproveitamento

BATTISTA *et al.* (2022) ressaltam que os resíduos orgânicos apresentam um grande potencial de aproveitamento, devido aos altos teores de carbono, nitrogênio e fósforo que compõem sua estrutura. Essa característica torna-os uma fonte valiosa para a produção de biocombustíveis e produtos de base biológica. De acordo com o estudo realizado por eles, é possível obter ácidos graxos voláteis a partir desses resíduos. Esses ácidos têm diversas aplicações, sendo especialmente relevantes na produção de lubrificantes, fragrâncias e

produtos farmacêuticos, desempenhando um papel significativo em diferentes setores industriais. Essa descoberta ressalta o potencial dos resíduos orgânicos como matéria-prima para a obtenção de produtos de alto valor agregado, incentivando assim a busca por soluções mais sustentáveis e a valorização desses materiais em um contexto econômico e ambientalmente favorável.

YANG *et al.* (2023) mencionam que os resíduos orgânicos (RO) podem ser utilizados para produzir materiais hidrolisados, os quais têm sido aplicados com sucesso em processos de nitrificação e desnitrificação no tratamento de águas residuais. Esses materiais hidrolisados provenientes dos RO apresentam propriedades que permitem a depleção biológica do nitrogênio, ou seja, são capazes de promover a remoção eficiente do nitrogênio presente nas águas residuais. Essa aplicação dos materiais hidrolisados dos RO no tratamento de águas residuais contribui para melhorar a qualidade da água tratada, auxiliando na redução dos níveis de nitrogênio e, conseqüentemente, na preservação do meio ambiente.

Por outro lado, ASHOKKUMAR *et al.* (2022) destacam que apenas 20% dos resíduos gerados são reciclados, o que indica a necessidade de uma abordagem mais abrangente para o gerenciamento desses resíduos. De acordo com as pesquisas realizadas pelos autores, os resíduos orgânicos são compostos que podem ser decompostos por microrganismos e dependendo das condições dos processos, esses resíduos podem ser convertidos em biocombustíveis gasosos e líquidos, bioplásticos, ácidos orgânicos e biofertilizantes.

No entanto, devido à diversidade física e química desses resíduos, podem surgir desafios no processo de transformação. Por exemplo, conforme mencionado por ADEOGBA *et al.* (2019), os resíduos orgânicos provenientes de atividades domésticas se encontram constituídos por uma variedade de recursos ricos em carbono e nutrientes, como carboidratos, lipídios, proteínas, celulose, hemicelulose e lignina. Essa composição complexa dos resíduos requer abordagens específicas para a sua conversão eficiente e sustentável.

Nesse sentido, é necessário desenvolver processos eficientes que possam lidar com essa diversidade e garantir uma conversão adequada dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado. O estudo desses processos é fundamental para promover avanços na tecnologia de aproveitamento de resíduos orgânicos e para impulsionar práticas mais sustentáveis de gestão de resíduos.

Por outro lado, é importante destacar que o crescimento populacional aliado ao crescimento econômico inevitavelmente resultará no aumento da demanda por alimentos e energia, o que, conseqüentemente, levará a um aumento proporcional na geração de resíduos (ADEOGBA *et al.*, 2019). Como parte desse cenário, é evidente que as áreas urbanas estão se aproximando cada vez mais das áreas rurais. Esse contexto implica que os resíduos orgânicos gerados nas atividades rurais (atividades agrícolas, pecuárias e agroindustriais) podem se tornar um importante e adicional fonte de resíduos orgânicos. Diante dessa convergência entre áreas urbanas e rurais, é essencial adotar uma abordagem integrada e sustentável para o gerenciamento dos resíduos orgânicos, a fim de aproveitar seu potencial e minimizar os impactos ambientais associados.

Em continuidade a ordem de ideias, realizou-se um levantamento de informações para identificar o potencial de geração de resíduos orgânicos. Essa pesquisa abrangeu tanto o cenário nacional quanto o estado do Paraná, visando obter uma visão abrangente do volume de resíduos orgânicos produzidos.

Nesse sentido, com base nos dados apresentados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), mencionam que durante o ano 2022 foram gerados aproximadamente 224 mil toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos (RSU). Considerando os dados da composição média de resíduos orgânicos nos RSU (51,4%) oferecida pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), a geração de resíduos orgânicos no Brasil é de 115 mil toneladas por dia.

Por outra parte, com base nos dados da geração per capita média (0,82 kg RSU.dia⁻¹hab.⁻¹) dos RSU no estado de Paraná fornecida pelo Ministério de Desenvolvimento Regional (BRASIL, 2019), e a população estimada (11.516.840) no estado de Paraná fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), e com base aos dados da composição média de resíduos orgânicos nos RSU (51,4%) oferecida pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), a geração de resíduos orgânicos no Estado do Paraná é de 6.163 toneladas por dia.

Conforme mencionado por BIANCO (2018), na Região Oeste do Paraná, que abrange 50 municípios, estima-se que cerca de 566 toneladas de resíduos orgânicos foram geradas diariamente no ano de 2020. Esses números evidenciam a significativa quantidade de resíduos orgânicos produzidos na região e ressaltam a necessidade de implementar estratégias eficazes de gestão e aproveitamento desses materiais.

Em Toledo em base ao levantamento de dados realizados na presente revisão foi identificado que a maior parte dos RSU se encontra composta por resíduos orgânicos. MOREJON *et al.* (2012) indicam que o lixo doméstico está composto por 69% de resíduos orgânicos domésticos, é importante salientar que até o momento o aproveitamento segregado desses resíduos, não é uma prioridade. Por tanto, é mister a busca de soluções com base de processos de transformação não convencionais.

Com base nos dados apresentados anteriormente, torna-se evidente que tanto o Brasil quanto o Estado do Paraná e seus 399 municípios, possuem volumes significativos de resíduos orgânicos que poderiam ser objeto de aproveitamento.

Diante dessa realidade, é imprescindível buscar soluções eficientes, sendo fundamental identificar modelos de gestão que se baseiem em processos de transformação desses resíduos. Dessa forma, será possível explorar todo o potencial dos resíduos orgânicos e promover uma abordagem mais sustentável em relação ao seu gerenciamento. Além do mais se faz necessário o conhecimento detalhado da composição dos resíduos orgânicos e sua relação com os métodos, processo e tecnologias de processamento dos mesmos.

2.2. Tratamento e Processamento de Resíduos Sólidos Orgânicos

2.2.1. Compostagem

A compostagem, é um processo de bio-oxidação que envolve a decomposição biológica dos resíduos orgânicos por meio da ação de microrganismos aeróbicos que transformam os resíduos orgânicos em produtos estáveis, nesse processo acontece a produção de dióxido de carbono (CO₂), a liberação de substâncias minerais e a formação de compostos orgânicos estáveis (FERNANDES & SILVA, 1999).

Os compostos orgânicos estabilizados no processo de compostagem, podem ser utilizados como fertilizantes de solos e podem ser até substitutos dos fertilizantes químicos. De acordo com os dados encontrados na literatura, o produto orgânico estabilizado apresentam nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (KIEHL, 1995; LIMA *et al.*, 2004; LOBO *et al.*, 2020).

ZHANG *et al.* (2021) indicam que o processo de compostagem, além de propiciar a transformação dos resíduos orgânicos, também pode propiciar a eliminação dos resíduos biológicos perigosos como patógenos.

MACIAS-CORRAL *et al.* (2019) e SINGH *et al.* (2012), identificaram que parâmetros como a temperatura, o conteúdo de nutrientes e a umidade são parâmetros operacionais importantes para a eliminação desses patógenos.

Para perceber como foi a evolução do conhecimento científico referente ao processo de compostagem, foi considerado o uso dos dados encontrados na base de dados da SCOPUS (2021b), por meio das informações encontradas até o ano 2021, foi identificado que nos últimos 10 anos a produção de documentos científicos referentes ao processo de compostagem teve um aumento considerável, alcançando a uma média anual de 1.091 artigos publicados nesse período. Na Figura 2.6 se apresenta a evolução da produção científica sobre o processo de compostagem ao longo do tempo de forma histórica.

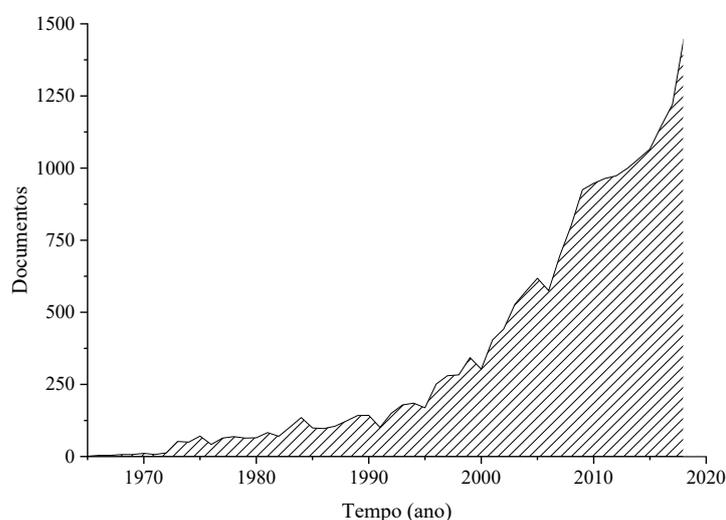


Figura 2.6 - Representação gráfica da evolução da produção científica sobre o processo de compostagem ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de SCOPUS (2021b).

Por meio do levantamento de informações na base de dados da SCOPUS (2021b), na atualidade, os Estados Unidos lideram na produção de trabalhos publicados relacionados com processos de compostagem, que atualmente possui 3.541 trabalhos publicados, seguido da China com 2.571 e a Índia com 1.392. Já o Brasil contribuiu com a produção de 511 documentos. Na Figura 2.7 são apresentados os países com maior número de pesquisas referentes a processos de compostagem.

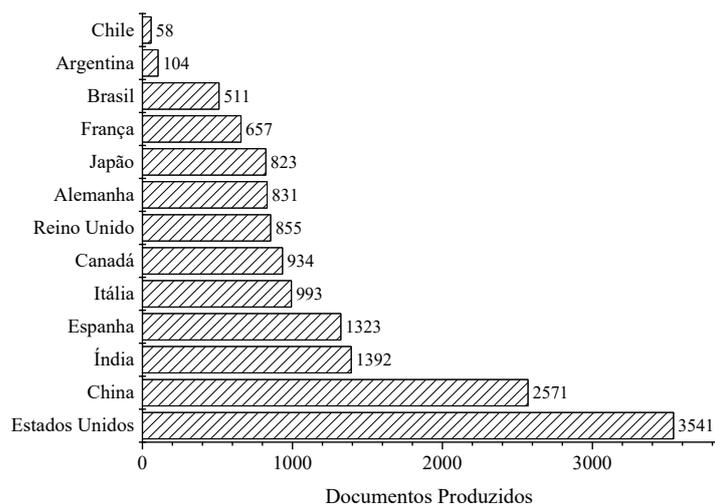


Figura 2.7 - Representação gráfica dos países com maior número de pesquisas referentes a processos de compostagem.

Fonte: Adaptado de SCOPUS (2021b).

De forma geral, o processo de compostagem depende de parâmetros operacionais, os quais se encontram divididos em função da taxa de aeração, do teor de umidade, da temperatura, dos nutrientes, do tamanho da partícula e do potencial hidrogeniônico (pH). A continuação será explicitada a influência de cada parâmetro no processo de compostagem.

2.2.1.1. Taxa de aeração na compostagem

A taxa de aeração é um parâmetro que influencia principalmente na remoção do ar saturado com gás carbônico (produto do processo de compostagem). FERNANDES & SILVA (1999) mencionam que a taxa de aeração na compostagem acelera o metabolismo dos microrganismos. Conforme os resultados de FRITSCH (2006) foram encontrados que a taxa de aeração influencia proporcionalmente na redução do tempo de residência do processo de compostagem, como também na estabilização acelerada da massa orgânica.

A taxa de aeração também pode ser utilizada como um parâmetro para o controle da emissão da amônia e a perda de nitrogênio no substrato (CHANG *et al.*, 2020), bem como para a inativação de metais pesados durante o processo de compostagem (SHEN *et al.*, 2016).

A falta de oxigênio no processo de compostagem pode influenciar na mudança do processo aeróbico para um processo anaeróbico, bem como a geração de gases como o metano e gases com odores desagradáveis (QUEIROZ, 2007).

GE *et al.* (2020) indicam que taxas de aeração maiores a $0,68 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, podem afetar diretamente na atividade microbiana devido a que essa ação promove a mudanças na temperatura e na umidade dos resíduos a serem degradados no processo de compostagem.

KIEHL (2012) indica que a aeração pode ser realizada de forma forçada por meio de equipamentos que possibilitem a ventilação utilizando ventoinhas, ou realizando o revolvimento dos resíduos a serem degradados.

PAIVA *et al.* (2012) propõem um sistema de aeração forçada inovador para otimizar a degradação de resíduos orgânicos (RO) durante o processo de compostagem. O sistema consiste em dutos conectados a um tanque de água e uma ventoinha, projetados especificamente para transportar ar úmido para a leira de compostagem. A introdução de ar úmido promove condições ideais para a atividade microbiana e acelera a degradação dos resíduos orgânicos. Essa abordagem tem como objetivo maximizar a eficiência do processo de compostagem, resultando em uma decomposição mais rápida e efetiva dos RO.

2.2.1.2. Teor de umidade na compostagem

O teor de umidade na compostagem é um parâmetro relevante para que aconteça o processo de degradação dos resíduos orgânicos, pois a vida dos microrganismos aeróbicos como a transferência de oxigênio ao meio dependerá desse parâmetro (WANG *et al.*, 2015).

KIYASUDEEN *et al.* (2016) manifestaram que no processo de compostagem, a quantidade de água no substrato pode diminuir devido à evaporação da água. JIANG *et al.* (2011) indicam que altas temperaturas e fortes taxas de aeração podem maximizar a perda de água nos substratos.

FERNANDES & SILVA (1999) mencionam que o teor de umidade ótimo para o desenvolvimento microbiano, se encontra na faixa de 50 a 60%. Se o teor de umidade da massa orgânica for maior a 65%, o conteúdo de água ocuparia os espaços vazios do meio, impossibilitando assim a passagem do oxigênio, como também o aparecimento de zonas anaeróbicas, esta ação compromete diretamente na vida dos microrganismos aeróbicos. Se o teor de umidade do meio for inferior a 40% produziria a inibição da atividade microbiana afetando de forma direta na redução da velocidade da biodegradação da massa orgânica.

2.2.1.3. Temperatura na compostagem

A temperatura na compostagem é um parâmetro indicativo do metabolismo dos microrganismos aeróbios e da decomposição da matéria orgânica (BERTOLDI *et al.*, 1988).

FERNANDES & SILVA (1999) mencionam que a compostagem aeróbica se encontra dividida por fases e cada fase pode ser identificada em função da temperatura. No começo da compostagem aeróbica prevalece a fase mesofílica, no qual a temperatura do material a ser tratado aumenta de 25 a 43 °C, na sequência passa por uma fase de transição e seguidamente segue para a fase termofílica, no qual a temperatura do material a ser tratado aumenta de 45 a 85 °C. Nesta fase, para conseguir a máxima intensidade microbiológica, é necessário que a temperatura seja mantida na faixa de temperatura de 55 a 65 °C. Depois de completada a biodegradação dos compostos orgânicos a temperatura diminui até ficar em equilíbrio com a temperatura do ambiente e na sequência o material tratado passa para uma fase de humificação ou estabilização. Na Figura 2.8 é apresentado o comportamento da temperatura nas fases no processo de compostagem em função do tempo.

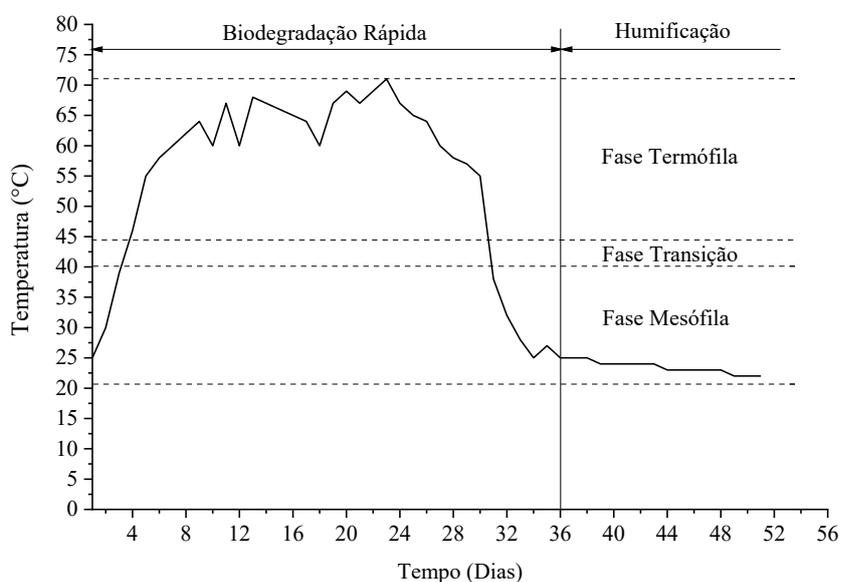


Figura 2.8 - Representação gráfica do comportamento da temperatura nas fases no processo de compostagem em função do tempo.

Fonte: Adaptado de FERNANDES & SILVA (1999).

JIA *et al.* (2021) mencionam que a compostagem pode acontecer em temperaturas psicrófilas de 3 a 11 °C, porém, para que aconteça a compostagem é necessário a inoculação de agentes microbianos que suportam essas temperaturas. De acordo com os dados apresentados pelos autores, foi identificado que o inóculo atua rapidamente na

degradação dos compostos orgânicos e desta forma consegue alcançar temperaturas termofílicas (>50 °C) em locais onde a temperatura do meio alcança aos 10 °C.

Segundo SINGH *et al.* (2012), a temperatura pode ser considerada também como um parâmetro que possibilita a eliminação de patógenos nos resíduos orgânicos e, com base em seus experimentos, foi identificado que temperaturas de operação de 60 °C e umidades de 50% no substrato, favorecem a eliminação da *Salmonella* após um período de 24 h.

De acordo com os dados encontrados na literatura, as máximas temperaturas alcançadas nos processos de compostagem dependem do tipo de resíduo a ser degradado.

Por exemplo, ZAKARYA *et al.* (2018) constataram que a temperatura mais alta registrada no processo de compostagem foi de 50 °C, durante o processamento de uma mistura de resíduos de alimentos e resíduos provenientes da queima da palha de arroz.

Por outro lado, COTTA *et al.* (2015) conduziram um estudo para investigar as temperaturas máximas atingidas durante os processos de compostagem para diferentes materiais. Os resultados demonstraram que: i) resíduos sólidos vegetais alcançaram temperaturas de até 35°C; ii) uma mistura de resíduos sólidos vegetais com esterco atingiu temperaturas de até 53°C; e iii) a combinação de resíduos sólidos vegetais com serragem de madeira chegou a temperaturas de até 51°C. Essas descobertas destacam a influência dos diferentes materiais na geração de calor durante a compostagem e fornecem informações valiosas para o controle e otimização desse processo.

2.2.1.4. Conteúdo de nutrientes na compostagem

O conteúdo de nutrientes na compostagem é um parâmetro relevante para que aconteça o crescimento e a diversificação dos microrganismos aeróbios no processo da compostagem (FILHO *et al.*, 2013).

Os microrganismos necessitam de macro e micronutrientes, entre eles os mais importantes são o carbono e o nitrogênio, de modo que o carbono é utilizado como fonte de energia e o nitrogênio é essencial na síntese de proteínas.

Vários autores, incluindo FERNANDES & SILVA (1999) e KIEHL (2012), afirmam que a relação ótima de C/N para a compostagem está na faixa de 25 a 35. Eles também mencionam que se a relação C/N for muito alta, os microrganismos podem enfrentar escassez de nitrogênio para a síntese de proteínas, o que limitaria a atividade microbiana.

Por outro lado, se a relação C/N for muito baixa, pode ocorrer a perda de nitrogênio por volatilização da amônia.

FERNANDES & SILVA (1999) indica que independentemente da relação inicial de C/N, após o processo de compostagem, a relação C/N final tende a ficar na faixa de 10 a 20.

PEDROSA *et al.* (2013) realizaram o monitoramento da relação C/N na compostagem de resíduos agroindustriais compostos por casca de banana, poda de jurema-preta, poda de marmeleiro e esterco de bovino. A mistura alcançou a uma relação C/N igual a 28, após o término do processo de compostagem a relação de C/N reduziu a 6, isto demonstra que a atividade microbiana foi elevada e eficiente para a transformação desses resíduos.

2.2.1.5. Tamanho da partícula na compostagem

O tamanho da partícula na compostagem pode ser considerado como um parâmetro importante, de modo que permite a formação de espaços vazios para a movimentação de líquidos e gases no processo de compostagem aeróbica.

KIEHL (2012) menciona que os compostos com tamanhos granulométricos muito finos influenciam negativamente no processo de compostagem aeróbica, devido a que a granulometria dos compostos possibilita a retenção de água e a compactação dos compostos, como também a putrefação dos compostos orgânicos, desprendendo gases com odor desagradável, além de que, o processo poderia chegar a funcionar como um processo anaeróbico.

FERNANDES & SILVA (1999) indicam que, de modo geral, o tamanho ótimo das partículas deverá de estar entre 25 e 75 mm, porém, segundo PEDROSA *et al.* (2013), quando os resíduos orgânicos foram triturados até chegar a um diâmetro de partículas igual a 10 mm se encontrou bons resultados na compostagem.

2.2.1.6. pH na compostagem

O pH é um parâmetro indicativo da degradação da matéria orgânica no processo de compostagem aeróbica. KIEHL (2012) destaca que durante o processo de compostagem, a degradação dos compostos orgânicos ocorre inicialmente por meio de reações químicas

ácidas. Conforme o processo avança, ocorre a transformação dos resíduos em um composto final estável, caracterizado por um pH alcalino.

FRITSCH (2006) indica que o pH não é um parâmetro crítico no processo de compostagem, devido a que no transcurso do processo de degradação o pH dos compostos orgânicos é variável, mudando de pH ácidos a pH alcalinos, esse fenômeno é chamado de auto-regulação.

FERNANDES & SILVA (1999) indicam que a compostagem inicia quando o pH se encontra na faixa de 5,5 a 6, também mencionam que o pH pode diminuir devido à formação de ácidos orgânicos. Se o pH fica próximo de 5 ou ligeiramente inferior, pode ocorrer a diminuição da atividade microbiológica, na sequência o pH tende a aumentar quando a compostagem passa da fase mesofílica para a fase termofílica, chegando normalmente a um pH alcalino na faixa de 7,5 a 9.

Segundo KIYASUDEEN *et al.* (2016), pH maiores a 7,5 induz à perda de nitrogênio devido à volatilização desse composto na forma de amônia.

2.2.1.7. Tempo de residência na compostagem

SILVA (2016) indica que o tempo de estabilização, também conhecido como tempo de residência, no tratamento de resíduos orgânicos depende principalmente do teor de carbono e nitrogênio presentes nos resíduos. Com base nos dados apresentados pela autora, foi constatado que ao misturar 50% de material vegetal com 50% de restos de alimentos, o tempo de estabilização desses resíduos foi de 30 dias.

JIA *et al.* (2021) demonstraram que o tempo de estabilização dos resíduos orgânicos pode ser acelerado por meio da inoculação de microrganismos. Com base nos dados apresentados, verificou-se que a mistura de resíduos de cogumelos com aparas de madeira apresentou um tempo de estabilização de 28 dias sem a inoculação, enquanto com a inoculação de microrganismos esse tempo foi reduzido para 15 dias.

Com base aos dados apresentados por MACIAS-CORRAL *et al.* (2019), o tempo de estabilização de uma mistura de esterco de bovino com palha de milho foi de 51 dias. Por outro lado, DELGADO *et al.* (2019) em seus estudos utilizaram resíduos orgânicos com relações de C/N inferiores a 20 e constataram que o tratamento desses resíduos exigiu 77 dias para alcançar a estabilização.

2.2.2. Processos de biodigestão anaeróbica

A biodigestão anaeróbica é um processo de tratamento de resíduos sólidos orgânicos que ocorre na ausência de oxigênio. Essa tecnologia possibilita a transformação da biomassa, composta por resíduos sólidos orgânicos, em biogás e biofertilizantes (DE ARAÚJO *et al.*, 2021). De acordo com GIONGO *et al.* (2020), a transformação dos resíduos sólidos orgânicos acontece por meio de microrganismos específicos, que promovem a estabilização dos resíduos sólidos orgânicos e o resultado desse processo é um biogás com um alto conteúdo de metano e uma biomassa estável e livre de patógenos.

Segundo MUÑOZ *et al.* (2015), o biogás gerado nos biodigestores anaeróbicos é composto por metano CH₄, dióxido de carbono CO₂, nitrogênio N₂, água H₂O, oxigênio O₂, gás sulfídrico H₂S, amônia NH₃, e também hidrocarbonetos e siloxanos (compostos a base de sílica presentes no biogás).

OLIVEROS-MUÑOZ *et al.* (2021) consideram que os biocombustíveis produzidos nos processos de biodigestão anaeróbica serão utilizados ainda no futuro, devido ao aumento da geração de resíduos, como também da demanda de energia.

Segundo as pesquisas realizadas por ANDRADE *et al.* (2002), o primeiro biodigestor construído, foi na Índia em 1908, e desde 1951 começaram a implantar essa tecnologia nesse país, seguido da China. No Brasil essa tecnologia começou a ser utilizada na década de 80.

Para perceber como foi a evolução do conhecimento científico referente ao processo de biodigestão anaeróbica, foi considerado o uso dos dados encontrados na base de dados da SCOPUS (2021), por meio das informações encontradas até o ano 2021, foi identificado que nos últimos 10 anos a produção de documentos científicos referentes a processos de biodigestão anaeróbica teve um aumento considerável, alcançando a uma média anual de 435 artigos publicados nesse período. Na Figura 2.9 se apresenta a evolução da produção científica sobre o processo de biodigestão anaeróbica ao longo do tempo de forma histórica.

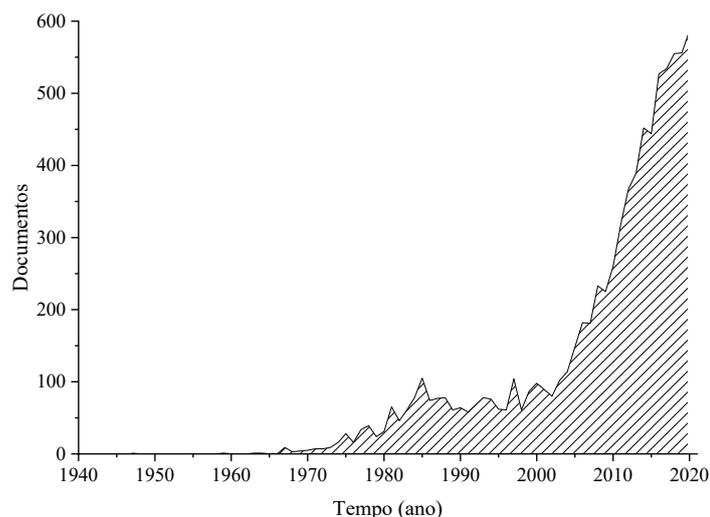


Figura 2.9 - Representação gráfica da evolução da produção científica sobre o processo de biodigestão anaeróbica ao longo do tempo.
 Fonte: Adaptado de SCOPUS (2021).

Por meio do levantamento de dados realizados na base de dados da SCOPUS (2021), na atualidade, Estados Unidos é o maior produtor de artigos referentes a processos de biodigestão anaeróbica, atualmente possui 1.830 trabalhos publicados, seguido da China com 796, e Espanha com 492. Já o Brasil contribuiu com a produção de 144 documentos. Na Figura 2.10 são apresentados os países com maior número de pesquisas referentes a processos de biodigestão anaeróbica.

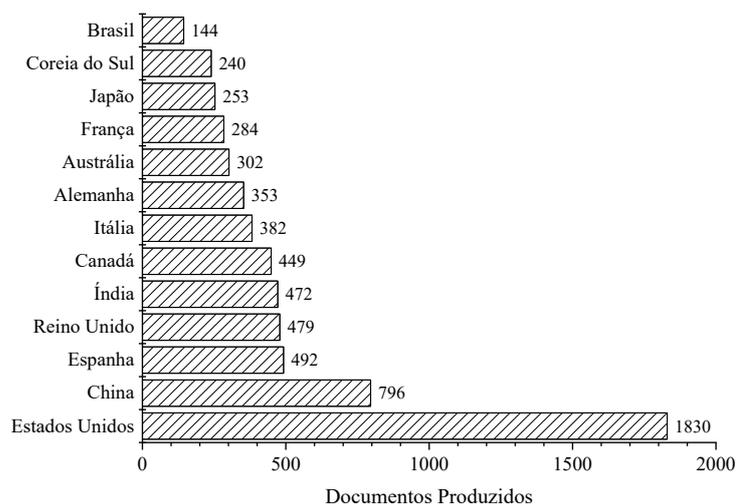


Figura 2.10 - Representação gráfica dos países com maior número de pesquisas referentes a processos de biodigestão anaeróbica.
 Fonte: Adaptado de SCOPUS (2021).

A biodegradação anaeróbica dos resíduos sólidos orgânicos é considerada como altamente complexa, devido a que esses resíduos se encontram constituídos por carboidratos de alto peso molecular, gorduras e proteínas que deverão de ser transformadas por meio da interação de microrganismos e bactérias fermentativas, em polímeros solúveis constituídos por ácidos orgânicos, álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio e metano (ANGELIDAKI *et al.*, 2009).

RAJENDRAN *et al.* (2014) lograram identificar que no processo de biodigestão anaeróbica acontecem: 13 tipos de reações químicas de hidrólise, 23 tipos de reações químicas para a degradação dos aminoácidos, 2 tipos de reações químicas acidogênicas, 6 tipos de reações químicas acetogênicas e 2 reações químicas metanogênicas.

De forma geral, o processo de biodigestão anaeróbica depende de parâmetros operacionais, os quais se encontram divididos em função da temperatura, dos sólidos totais e voláteis, da taxa de retenção hidráulica, dos nutrientes, do pH, dos inibidores e bioindicadores. A continuação será explicitada a influência de cada parâmetro no processo de biodigestão anaeróbica.

2.2.2.1. Temperatura na biodigestão anaeróbica

A temperatura é um parâmetro importante nos processos de biodigestão anaeróbica, esse parâmetro influencia diretamente na duração do processo (ZOHOROVIC *et al.*, 2016), como também na produção do biogás e na atividade dos microrganismos metanogênicos (RAMÍREZ *et al.*, 2010).

De acordo com a pesquisa bibliográfica, foi encontrado que os microrganismos metanogênicos conseguem-se adaptar a condições psicrófilas (temperaturas abaixo dos 25°C), mesofílicas (temperaturas entre 25 e 45°C) e termofílicas (temperaturas entre 45 e 70°C). Na Figura 2.11 são apresentados a taxa de crescimento dos microrganismos metanogênicos.

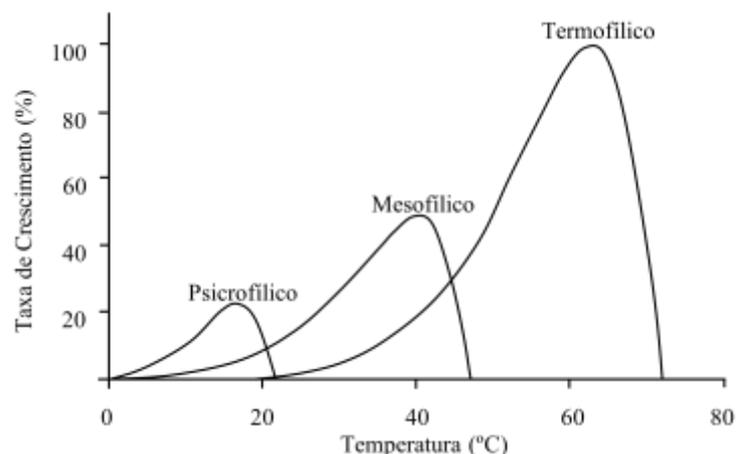


Figura 2.11 - Representação gráfica da taxa de crescimento dos microrganismos metanogênicos em função da temperatura.
 Fonte: Adaptado de LETTINGA *et al.* (2001).

De acordo com as informações anteriores e com base aos estudos de VINDIS *et al.* (2009), se confirma que: a) a produção do biogás pode acontecer a temperaturas de 35°C (Faixa mesofílica) e 55°C (Faixa termofílica), b) a produção do biogás é mais rápida a 55°C e c) a composição do metano aumenta proporcionalmente com a temperatura de operação, porém, a variação da composição do metano não possui uma diferença significativa nos processos estudados pelos autores.

CASTRO & CORTEZ (1998) evidenciaram que variações bruscas de temperaturas nos biodigestores, entorno dos 4°C, podem resultar na inativação dos microrganismos metanogênicos, chegando a inibir a produção de biogás. Essa descoberta ressalta a importância de manter condições térmicas estáveis no processo de biodigestão, a fim de garantir um ambiente propício para a atividade dos microrganismos e maximizar a produção de biogás.

BOUŠKOVÁ *et al.* (2005) estudaram o comportamento da produção do biogás tomando em conta duas estratégias, a primeira foi o incremento da temperatura de biodigestão anaeróbica de forma gradual de 37 a 55 °C e a segunda foi o incremento da temperatura de biodigestão anaeróbica de forma radical, aumentando a temperatura em uma etapa de 37 a 55°C. Considerando as duas estratégias foi descoberto que o incremento gradual da temperatura de biodigestão não foi capaz de inativar a produção do biogás, portanto, a atividade dos microrganismos não foi afetada, no caso do incremento radical da temperatura de biodigestão, provocou a inibição da produção do biogás nos primeiros 8 dias, depois desse tempo a produção do biogás aumentou consideravelmente, portanto, pode-se

concluir que a atividade dos microrganismos conseguem-se adaptar a esse tipo de mudanças de temperaturas.

2.2.2.2. Sólidos totais e sólidos voláteis na biodigestão anaeróbica

Os sólidos totais e os sólidos voláteis são parâmetros utilizados para estudar o comportamento da biodegradação dos resíduos sólidos orgânicos, particularmente em processos de biodigestão anaeróbica a partir desses parâmetros podem ser calculados a taxa de produção média do biogás e/ou metano, como também a eficiência dos biodigestores, e a cinética de degradação dos resíduos sólidos orgânicos (PESSUTO *et al.*, 2016; LEITE & POVINELLI, 1999; CASTRO & CORTEZ, 1998).

SANTOS *et al.* (2017) mencionam que os sólidos totais são um parâmetro operacional relevante nos digestores anaeróbicos, tanto para evitar o entupimento dos canos nos biodigestores quanto para otimizar o desempenho operacional. De acordo com o estudo, a concentração de sólidos totais na alimentação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) deve ser mantida abaixo de 8%.

2.2.2.3. Tempo de retenção hidráulica na biodigestão anaeróbica

O tempo de retenção hidráulica é um parâmetro utilizado para descrever o tempo necessário de degradação ou permanência de um determinado substrato num biodigestor anaeróbico. O tempo de retenção hidráulica (T_{RH}) em dias pode ser calculado pela divisão do volume do biodigestor (V_R) em m^3 e o volume do substrato introduzido no biodigestor por dia (V_S) em m^3/dia^{-1} .

O tempo de retenção hidráulica é um parâmetro dependente do material a ser degradado nos biodigestores, como também da temperatura de operação (DONG *et al.*, 2019; JÚNIOR *et al.*, 2010).

Segundo SEADI *et al.* (2008), o tempo de retenção hidráulica além da sua utilização no dimensionamento dos biodigestores, serve também como parâmetro de controle do nível de degradação por meio da biodigestão da matéria orgânica. Este parâmetro define a rapidez do desempenho do equipamento bem como define a qualidade do material digerido na saída do biodigestor.

Na Tabela 2.6 são apresentadas a relação entre a temperatura e o tempo de retenção hidráulica.

Tabela 2.6 – Relações de produção de metano e sólidos voláteis em função dos resíduos sólidos orgânicos digeridos nos digestores anaeróbicos.

Faixa de temperatura	Temperatura	Tempo de retenção hidráulica mínima
Psicrofílicas	<20°C	70 a 80 dias
Mesofílicas	30 a 42°C	30 a 40 dias
Termofílicas	43 a 55°C	15 a 20 dias

Fonte: SEADI *et al.* (2008).

2.2.2.4. Relação carbono/nitrogênio na biodigestão anaeróbica

De acordo com a revisão bibliográfica, pode-se argumentar que, qualquer resíduo orgânico pode ser utilizado nos processos de biodigestão anaeróbica, porém, o funcionamento desses digestores dependerá das composições químicas desses resíduos.

LEITE *et al.* (2017) estabelecem que o balanceamento da relação de nutrientes nos resíduos orgânicos é importante, para propiciar o crescimento bacteriano, como também para melhorar a eficiência dos processos de biodigestão anaeróbica.

KIYASUDEEN *et al.* (2015) mencionam que cada matéria prima (resíduos orgânicos) se caracteriza pelo conteúdo particular de carbono e nitrogênio. Dados técnicos apontam que a relação ótima de C/N nos resíduos orgânicos a serem tratados em processos de biodigestão anaeróbica deverão ficar numa faixa de 20 e 30. Relações de C/N acima da faixa ótima, induzem ao consumo rápido de nitrogênio por parte das bactérias e as relações C/N abaixo da faixa ótima, promove ao acúmulo de amônia no digestor, como também o aumento do pH e a inibição da atividade dos microrganismos metanogênicos (MONNET, 2003; RODRIGUES, 2005).

2.2.2.5. pH na biodigestão anaeróbica

O pH nos processos de biodigestão anaeróbica pode-se apresentar de duas formas: a primeira afetando diretamente na atividade das enzimas e a segunda afetando de forma indireta devido à formação de compostos tóxicos (PESCADOR, 2001).

LINDNER *et al.* (2015) determinaram que nos processos de biodigestão, o valor do pH influencia na produção de compostos intermédios, entre eles podem ser encontrados: o

ácido capróico, ácido acético, ácido propiônico, ácido n-butírico, ácido isobutírico, ácido isovalérico, ácido láctico, etanol, 1,2 propanodiol, entre outros.

Na Tabela 2.7 são apresentados o pH ótimo dos microrganismos para os respectivos produtos resultantes do processo de biodigestão anaeróbica.

Tabela 2.7 – Comportamento dos microrganismos em função da faixa ótima de operação com relação ao pH e os produtos resultantes do processo de biodigestão anaeróbica.

Microrganismos	pH	Produtos
Metanogênicos	6,5 a 7,2	Metano e CO ₂ .
Fermentativos	<4,0	Ácido acético e butírico
Fermentativos	8,5	Ácido acético e propanoico

Fonte: APPELS *et al.* (2008).

KERAMATI & BEIKI (2017) manifestam que o pH é um parâmetro importante na produção do biogás, pois depende desse parâmetro a estabilidade do processo de biodigestão anaeróbica, como também a atividade dos microrganismos metanogênicos. Os autores recomendam que para maximizar a produção do biogás é necessário fazer o monitoramento e correção do pH nos resíduos para seu valor ótimo de 7.

CAROTENUTO *et al.* (2016) chegaram a demonstrar que a biodigestão anaeróbica de resíduos que apresentem pH sob a faixa de 6 a 7,5, a biodegradação acontece sem a necessidade do ajuste do pH.

2.2.2.6. Inibidores na biodigestão anaeróbica

Os compostos inibidores são compostos cuja concentração afeta diretamente na atividade dos microrganismos de forma negativa, provocando a inibição da degradação dos resíduos orgânicos, como também a inibição total da produção do biogás nos biodigestores anaeróbicos. CARRILHO (2012) indica que o amoníaco, os ácidos graxos voláteis, os sulfuretos, metais pesados e oxigênio são os principais compostos inibidores dos processos de biodigestão.

BOE (2006) indica que as vezes os compostos inibidores não se encontram presentes inicialmente na alimentação, porém, esses compostos (amoníaco e ácidos graxos voláteis) podem aparecer no transcurso do processo de degradação dos resíduos orgânicos.

JANSSON *et al.* (2020) mencionam que os microrganismos podem-se adaptar aos compostos inibidores, em alguns casos até pode melhorar o rendimento na produção de metano.

2.2.2.7. Bioindicadores na biodigestão anaeróbica

No estudo de caso realizado por FONGARO *et al.* (2014) foi descoberto que a biodigestão anaeróbica do esterco de suíno não consegue inativar patógenos como a Circovirose Suína (PCV2) e a Salmonella, devido a esse fato os autores sugerem que esses patógenos podem ser considerados como bioindicadores e dessa forma podem ser avaliados as eficiências dos processos na inativação desses patógenos, também menciona que o uso de biofertilizantes com presença de patógenos podem atingir de maneira negativa na saúde das pessoas e animais.

2.2.3. Vermicompostagem

A vermicompostagem é um processo que permite a degradação biológica dos resíduos orgânicos através da ação conjunta de minhocas e microrganismos (BORUAH *et al.*, 2019).

DOMÍNGUEZ *et al.* (2010) indicam que os microrganismos produzem enzimas que permitem a degradação biológica da matéria orgânica. Essas enzimas são responsáveis por catalisar as reações que quebram as moléculas complexas em compostos mais simples, permitindo a decomposição e o aproveitamento dos componentes orgânicos pelos microrganismos.

SINHA *et al.* (2002) indicam que as minhocas agem como: aeradores, moedores, trituradores, agentes da degradação química dos compostos orgânicos e como estimuladores biológicos.

HUANG *et al.* (2013) indicam que as minhocas no processo da vermicompostagem, conseguem degradar e estabilizar de forma econômica e eficiente os resíduos orgânicos em produtos estáveis, os quais podem ser utilizados como produtos agrícolas.

De acordo com as pesquisas bibliográficas foi constatado que a vermicompostagem pode ser utilizado para diversos fins ecológicos, entre eles, para a degradação de resíduos

sólidos, bem como para o tratamento de resíduos contendo metais pesados. Em todos os casos, propicia a transformação de resíduos orgânicos em húmus.

Para perceber como foi a evolução do conhecimento científico referente ao processo de vermicompostagem, foi considerado o uso dos dados encontrados na base de dados da SCOPUS (2021c), por meio das informações encontradas até o ano 2021, foi identificado que nos últimos 10 anos a produção de documentos científicos referentes ao processo de vermicompostagem aumentou consideravelmente, alcançando a uma média anual de 98 artigos publicados nesse período. Na Figura 2.12 se apresenta a evolução da produção científica sobre o processo de vermicompostagem ao longo do tempo de forma histórica.

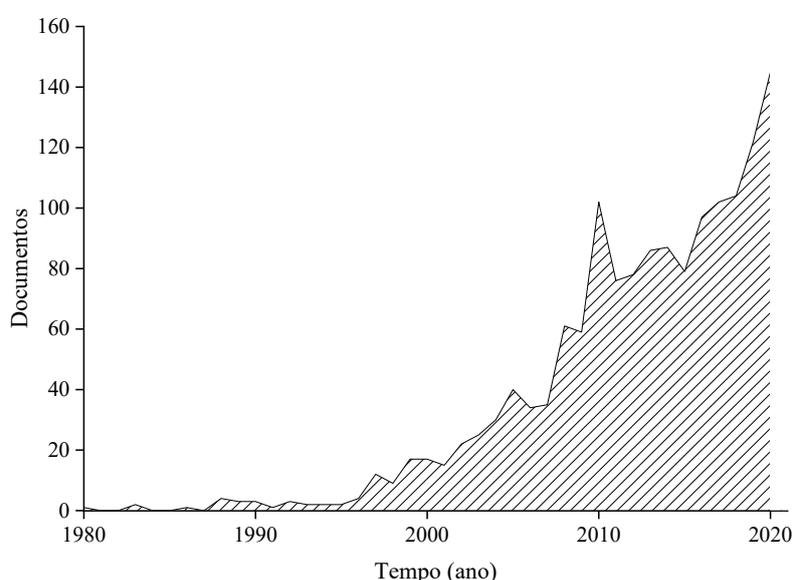


Figura 2.12 - Representação gráfica da evolução da produção científica sobre o processo de vermicompostagem ao longo do tempo.
Fonte: Adaptado de SCOPUS (2021c).

Na atualidade, a Índia é o maior produtor de *papers* referentes a processos de vermicompostagem, atualmente possui 613 trabalhos publicados, seguido de China com 153, e Espanha com 126. Já o Brasil contribuiu com a produção de 78 documentos. Na Figura 2.13 são apresentados os países com maior número de pesquisas referentes a processos de vermicompostagem.

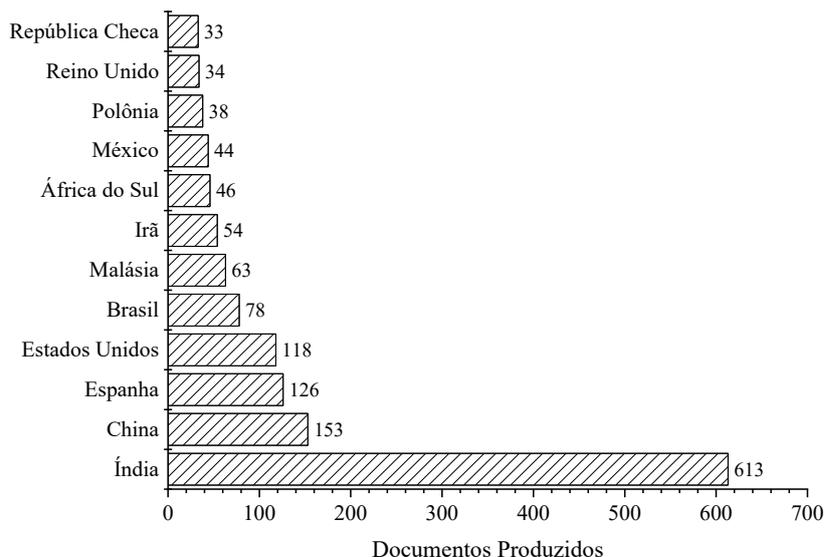


Figura 2.13 - Representação gráfica dos países com maior número de pesquisas referentes a processos de vermicompostagem.

Fonte: (Adaptado de SCOPUS, 2021c).

O processo de vermicompostagem depende de parâmetros operacionais, os quais se encontram divididos em função do tipo minhocas, da taxa de aeração, do teor de umidade, da temperatura, dos nutrientes, do pH, e do tempo de processamento. A continuação será explicitada a influência de cada parâmetro no processo de vermicompostagem.

2.2.3.1. Minhocas (Oligoquetas)

As minhocas são organismos biológicos frequentemente utilizados no processo de vermicompostagem. Conforme mencionado por AQUINO (2009), é recomendado o uso de meio litro de minhocas (o que equivale a aproximadamente 1000 minhocas) por cada metro cúbico de resíduos orgânicos para iniciar o processo de vermicompostagem.

CORRÊA & SANTOS (2015) estabelecem que as minhocas têm o poder de fertilizar e de recuperar os solos. As minhocas ingerem terra e matéria orgânica equivalente a seu peso e por meio da biodigestão chega a expelir cerca dos 60% do material ingerido na forma de húmus. Vários autores entre eles AQUINO *et al.* (1992), SINHA *et al.* (2002) e DOMÍNGUEZ & PÉREZ-LOSADA (2010), mencionam que as minhocas comumente utilizadas no processo de vermicompostagem são: a *Eisenia Fetida* (vermelha da Califórnia), a *Eisenia Andrei* e a *Eudrilus Eugeniae* (gigante africana).

De acordo com as pesquisas realizadas por ROBINSON *et al.* (2021) chegaram a identificar que no estudo de 4 tipos de espécies de minhocas, a minhoca *Eisenia Fetida* apresenta menor sensibilidade quando é exposta a produtos químicos.

Por outra parte, LOUREIRO *et al.* (2007) mencionam que a minhoca *Eisenia Andrei* apresenta uma elevada adaptação na decomposição dos resíduos orgânicos domésticos, mas quando estes resíduos são misturados com esterco bovino permite de certa forma o aumento na reprodução dessas minhocas, apresentando assim, o maior crescimento da população com relação ao número de casulos e minhocas jovens.

JASKULAK *et al.* (2021) mencionam que por meio de experimentos em laboratório é possível obter minhocas híbridas a partir do acasalamento entre a minhoca *Eisenia Fetida* e a *Eisenia Andrei*. De acordo com as pesquisas e os resultados obtidos pelos autores, as minhocas híbridas podem suportar ambientes altamente contaminados, porém, com a passagem do tempo a fertilidade dessas minhocas chega a diminuir.

Com relação ao tratamento de resíduos sólidos orgânicos, na maioria dos casos, podem apresentar metais pesados na sua composição, por exemplo, resíduos orgânicos como o lodo de esgoto, esterco bovino, esterco de porco, fezes humanas, serragem e outros, possuem uma carga específica de metais pesados (SWATI & HAIT, 2017). Nesse sentido, SULEIMAN *et al.* (2017) mencionam que as minhocas possuem mecanismos de defesa que possibilitam a sua sobrevivência em ambientes altamente contaminados com metais pesados e ao mesmo tempo ao ingerir esses resíduos, conseguem acumular esses contaminantes em seus corpos (tecidos) seguindo a seguinte ordem de absorção $Cd > Co > Cu > Zn > Ni > Pb > Cr$.

De acordo com os reportes apresentados por HE *et al.* (2016), foram identificados que no processo de vermicompostagem é possível reduzir substancialmente a concentração de 9 tipos de metais pesados nos resíduos orgânicos com as minhocas, entre eles se encontram o As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn.

WANG *et al.* (2017) chegaram a identificar que as minhocas conseguem absorver entorno de 10,05 mg de Cd por kg de minhocas, 6,42 mg de Pb por kg de minhocas e 25,58 mg de Cr por kg de minhocas.

Por outra parte, LV *et al.* (2016) destacam que a capacidade de absorção de metais pesados pelas minhocas varia e dependente do tipo de matéria prima (resíduos orgânicos) a ser decomposta. Por exemplo, as minhocas podem absorber quantidades variáveis de metais

pesados, como 19 a 33 mg de Zn por kg de minhoca e de 1,46 a 4,6 mg de Cu por kg de minhoca. Essa capacidade de absorção demonstra a relevância das minhocas no processo de remediação de solos contaminados por metais pesados.

Também é importante indicar que, as minhocas além de reduzir a concentração de metais pesados nos resíduos orgânicos e aumentar o conteúdo de nutrientes no vermicomposto (húmus), também conseguem reduzir o mau odor desses vermicompostos (SINGH & KALAMDHAD, 2016; SUTHAR, 2009).

Com relação à carga biológica dos resíduos orgânicos, WANG *et al.* (2021) mencionam que as minhocas possuem um intestino muito aprimorado e seletivo no tratamento biológico de grupos bacterianos e patógenos, onde a mistura da biomassa microbiana e os fluidos digestivos (líquido celomático) maximizam a degradação dos resíduos orgânicos e ao mesmo tempo inibem a atividade de bactérias e patógenos. Esse sistema aprimorado das minhocas contribui para a eficiência e segurança do processo de decomposição dos resíduos orgânicos.

2.2.3.2. Taxa de aeração na vermicompostagem

A taxa de aeração na vermicompostagem é um parâmetro relevante, devido a que os organismos biológicos, entre eles as minhocas (organismos biológicos que respiram através da pele) precisam de ar para sobreviver. Segundo BIDONE & POVINELLI (1999) citado por CASARIL (2014), uma oxigenação de 3 mg de O₂ L⁻¹ é suficiente para a vida das minhocas no meio, também menciona que a presença de ar atmosférico na vermicompostagem pode ingressar e estar presente quando a leira possua como máximo uma altura de 0,3 m de matéria orgânica não compactada, permitindo assim a livre mobilidade da minhoca no meio, além de, provocar o revolvimento do material, o que dispensaria a necessidade do revolvimento da matéria orgânica na vermicompostagem.

2.2.3.3. Teor de umidade na vermicompostagem

O teor de umidade na vermicompostagem é um parâmetro importante devido a que as minhocas necessitam de um ambiente úmido para sobreviver, porém, é necessário ter especial cuidado com teores de umidade muito elevados devido a que pode influenciar negativamente (redução de ar no meio) na vida das minhocas. AQUINO (2009) menciona

que as minhocas precisam de um ambiente úmido sobre a faixa de 60 a 70%. TRIPATHI & BHARDWAJ (2004) observaram que a minhoca *Eisenia Fétida* pode viver otimamente num meio úmido com 70% de umidade, também menciona que a mesma minhoca mostrou uma baixa atividade quando este se encontrava num ambiente pouco úmido igual a 50%.

2.2.3.4. Temperatura na vermicompostagem

Conforme DOMÍNGUEZ (2004), vários autores demonstraram que o comportamento das minhocas (metabolismo, crescimento e a reprodução) é influenciado pela temperatura.

De acordo com PANDIT *et al.* (2012), com base em dados da literatura, foi identificado que a faixa de temperatura ótima para a vida das minhocas situa-se entre 20°C e 35°C.

TRIPATHI & BHARDWAJ (2004) identificaram que a minhoca *Eisenia Fétida* teve um comportamento ótimo quando a temperatura no meio foi igual a 25°C, isto foi identificado em função da quantidade máxima de biomassa produzida no processo de vermicompostagem. Dessa forma, para garantir a estabilidade da temperatura do meio, LOUREIRO *et al.* (2007) recomendam que os resíduos orgânicos, antes da vermicompostagem, precisam de uma termoestabilização (processo de compostagem preliminar) para dar condições apropriadas para o desenvolvimento das minhocas.

Por outro lado, ZHOU *et al.* (2021) conduziram testes experimentais com minhocas da espécie *Eisenia Fetida* para investigar o comportamento delas em uma faixa de temperatura entre 10°C e 50°C. Os resultados indicaram que as minhocas conseguem tolerar essa faixa de temperaturas. No entanto, quando expostas a 30°C, as minhocas *Eisenia Fetida* apresentaram uma atividade altamente intensificada. Esse aumento na atividade foi atribuído ao aumento da atividade enzimática, ao aumento do teor de nitrogênio nos resíduos tratados, ao aumento da população microbiana no interior das minhocas e à degradação acentuada das populações fúngicas.

Em conclusão, os estudos conduzidos por diversos pesquisadores enfatizam a importância de selecionar uma temperatura de operação adequada para a efetiva transformação dos resíduos orgânicos durante o processo de vermicompostagem.

2.2.3.5. Conteúdo de nutrientes na vermicompostagem

Os nutrientes são parâmetros relevantes no processo da vermicompostagem e dependendo do caso (resíduo orgânico a tratar) pode influenciar positivamente ou negativamente na vida, na reprodução, e no crescimento das minhocas, além de promover tempos de residências (tempo necessário para a decomposição biológica dos resíduos orgânicos) curtos ou longos no processo da vermicompostagem.

CORRÊA & SANTOS (2015) estabelecem que alimentos com conteúdo elevados de proteínas, frutas ácidas, temperos fortes, gorduras, papeis entre outros, podem provocar o surgimento de elementos contaminadores, odores e até a morte das minhocas.

RICCI (1996) menciona que a facilidade da decomposição dos RSO depende da relação C/N, esta relação significa a proporção de carbono e nitrogênio contida na matéria orgânica. DORES-SILVA *et al.* (2011) explicam que no processo de vermicompostagem os valores da relação C/N podem diminuir até aproximadamente 50% ao longo do processo, devido a que acontece o consumo do carbono presente no material a ser decomposto, por parte das minhocas e ao mesmo tempo acontece o aumento da concentração do nitrogênio.

De acordo com os reportes encontrados na literatura, existem trabalhos onde as minhocas conseguem-se adaptar a relações de C/N de 8,81, segundo HUANG *et al.* (2013); 13,74 a 16,69, segundo DORES-SILVA *et al.* (2011) e de 15 a 30, segundo NAYAK *et al.* (2013). Porém, neste último caso foi identificado que os RO não precisaram da estabilização térmica (processo de compostagem), pois no experimento os autores utilizaram uma altura pequena para a biomassa no tratamento dos RO, igual a 90 mm. Em função desses resultados se pode concluir que os RO tratados dessa forma não acumulam energia devido à atividade microbiana, tornando-se termicamente estáveis em relação ao ambiente circundante. Isso ocorre devido ao efeito convectivo com o ambiente, proporcionando a estabilidade térmica dos RO.

BIDONE & POVINELLI (1999) citado por GUERMANDI (2015) sugerem que a relação C/N adequado para o desempenho das minhocas deve ser igual a 10. No entanto, SINGH *et al.* (2011) indicam que a proporção ideal de C/N para processos de vermicompostagem deve ser igual a 30, após a estabilização térmica.

Por outro lado, MOREIRA (2016) demonstrou que as minhocas são capazes de se adaptar na biodegradação de frutas, como goiaba, mamão e laranja. No entanto, observou-

se que o crescimento da população de minhocas foi influenciado pelo tipo de fruta. Os resultados mostraram que a população de minhocas na presença de goiaba foi de 283 indivíduos (167 adultos e 116 jovens), juntamente com 82 casulos; para o mamão, a população foi de 226 minhocas (153 adultos e 73 jovens), com 41 casulos; e para a laranja, a população foi de 154 minhocas (69 adultos e 85 jovens), com 29 casulos.

RAO (1997) citado por SINHA *et al.* (2002) estabeleceu que o tempo necessário para a biodegradação dos resíduos orgânicos varia de acordo com o tipo de resíduos e do tipo de minhocas. No experimento conduzido pelo autor, foram utilizadas 150 minhocas e 1 kg de resíduos para cada caso, e os resultados foram as seguintes: a) para a biodegradação do esterco de gado, foram necessários 59, 44, e 62 dias quando utilizadas as minhocas *Eisenia Fetida*, *Eudrilus Eugeniae* e a *Perionyx Excavatus*, respectivamente; b) para a biodegradação de resíduos de cozinha, foram necessários 78, 61, e 83 dias com as minhocas *Eisenia Fetida*, *Eudrilus Eugeniae* e a *Perionyx Excavatus*, respectivamente; e c) para a biodegradação dos resíduos de jardim, foram necessários 89, 69, e 91 dias com as minhocas *Eisenia Fetida*, *Eudrilus Eugeniae* e *Perionyx Excavatus*, respectivamente. Em todos os casos, observou-se que: i) a *Eudrilus Eugeniae* apresentou maior rapidez na biodegradação dos resíduos orgânicos em comparação com as outras minhocas; ii) o tempo de residência para a biodegradação dos resíduos orgânicos varia de acordo com o tipo de resíduo, sendo que a minhoca *Eudrilus Eugeniae* foi capaz de biodegradar os resíduos de gado, cozinha e jardim em 44, 61 e 69 dias, respectivamente; e por último, iii) constatou-se que, dependendo do tipo de resíduo utilizado, foram obtidos aproximadamente 1 kg de vermicomposto a partir do esterco de gado, 900 g de vermicomposto a partir dos resíduos de cozinha e 850 g de vermicomposto a partir dos resíduos de jardim.

Em um estudo realizado por LOUREIRO *et al.* (2007) foi examinado o comportamento das minhocas quando expostas a uma mistura de resíduos domésticos, com e sem adição de esterco bovino, no processo de vermicompostagem. Os resultados dessa pesquisa revelaram que o crescimento da população de casulos e minhocas jovens foi beneficiado positivamente quando a biodegradação foi conduzida utilizando uma mistura de resíduos domésticos e esterco bovino.

Por outra parte, LI *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre a transformação de resíduos orgânicos, utilizando uma mistura de resíduos de frutas e vegetais combinada com lodos ativados. Os resultados desse estudo indicaram que a combinação de resíduos de

cenoura e alface com lodos ativados resultou em um maior ganho de peso das minhocas, além de provocar um aumento significativo na produção de casulos.

Em conclusão, os estudos conduzidos por diferentes pesquisadores destacam a importância da seleção adequada dos resíduos orgânicos utilizados no processo de vermicompostagem.

2.2.3.6. pH na vermicompostagem

O pH desempenha um papel importante na vermicompostagem, afetando a atividade das minhocas, devido a que as minhocas são muito sensíveis a resíduos orgânicos muito ácidos. EDWARDS (1995) citado por PANDIT *et al.* (2012) reporta que um pH entre 5 e 9 proporciona um ambiente favorável para maximizar a produtividade das minhocas no processo de vermicompostagem.

SINGH *et al.* (2005) demonstraram que o pH tem um impacto direto na atividade das minhocas durante a biodegradação de compostos orgânicos. Em ambientes ácidos, a mineralização dos resíduos ocorre de forma mais lenta. No entanto, os dados experimentais encontrados mostraram que as minhocas podem promover a alcalinização e subsequente neutralização dos vermicompostos, mesmo em um ambiente ácido com pH de 4,3. No entanto, o tempo de processamento é maior em comparação com resíduos orgânicos que possuem um pH inicial de 6,9.

CHEN *et al.* (2023) mencionam que a mineralização dos resíduos orgânicos é um parâmetro importante para explicar a eficiência de assimilação das minhocas quando são expostas aos resíduos. A mineralização refere-se à transformação do material orgânico em um composto mineral que contém principalmente altos teores de fósforo, nitrogênio e potássio, elementos facilmente assimiláveis pelas plantas. De acordo com KIEHL (1985), a transformação da matéria orgânica presente nos resíduos orgânicos em material mineral pode ser avaliada por meio do método de perda de massa por ignição. Esse método consiste na queima do material, resultando em resíduos conhecidos como cinzas que deverão de se pesados para contabilizar a transformação. A presença e quantidade de cinzas são utilizadas para identificar a atividade das minhocas.

Na Figura 2.14 são apresentados o comportamento do pH e das cinzas nos vermicompostos em função do tempo.

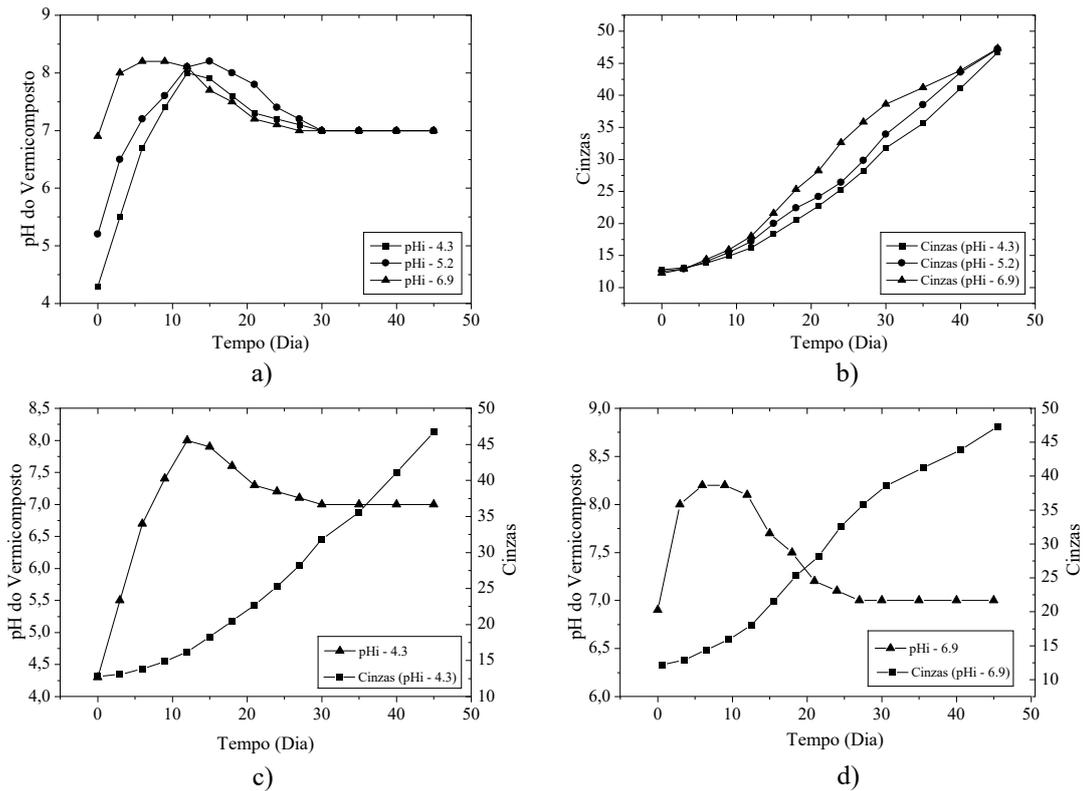


Figura 2.14 - Representação gráfica do comportamento: a) do pH do vermicomposto em função do tempo; b) das cinzas em função do tempo; c) do pH e cinzas do vermicomposto com pH inicial igual a 4.3 em função do tempo; e d) do pH e cinzas do vermicomposto com pH inicial igual a 6.9 em função do tempo.

Fonte: Adaptado de SINGH *et al.* (2005).

A partir da Figura 2.14, é possível observar os resultados dos experimentos conduzidos por SINGH *et al.* (2005) em relação à atividade das minhocas e sua relação com o pH dos compostos orgânicos. Essa relação foi evidenciada pela variação do teor de cinzas no vermicomposto ao longo do tempo. Inicialmente, verificou-se que o pH influenciou a atividade das minhocas, sendo exemplificado pelo teor de cinzas produzido. Por exemplo:

- i) Nos experimentos com um pH inicial de 4,3 (com um teor de cinzas de 12,8 no dia 0), a biodegradação dos compostos orgânicos ocorreu de forma mais lenta, isto pode ser identificado na Figura 2.14.c. Entretanto, os dados demonstraram um aumento gradual do pH para 8 (teor de cinzas igual a 16,2) após 12 dias do início do experimento. A partir desse ponto, o pH começou a diminuir até atingir a neutralidade (pH 7, teor de cinzas de 46,7) do vermicomposto, evidenciando um processo de neutralização; e
- ii) Esse mesmo fenômeno foi observado quando o pH inicial do vermicomposto foi de 6,9, porém, a atividade das minhocas foi mais rápida, isto pode ser identificado na

Figura 2.14.d. Nesse caso, o teor de cinzas atingiu um valor de 18 (pH 8,1) após 12 dias do início do experimento.

Essas informações destacam a importância de considerar o pH e a mineralização dos resíduos na prática da vermicompostagem. Compreender esses fatores é fundamental para otimizar o processo de decomposição de resíduos orgânicos e promover a produção de vermicomposto de alta qualidade, rico em nutrientes assimiláveis pelas plantas.

2.2.1.7. Tempo de residência na vermicompostagem

AQUINO (2009) menciona que o tempo de residência do processo de vermicompostagem depende principalmente da relação C/N nos resíduos orgânicos, também menciona que a vermicompostagem de esterco de suíno pode levar um tempo de residência de 30 a 40 dias.

CASARIL (2014) menciona que o tempo de residência para o processamento dos resíduos orgânicos por meio do processo de vermicompostagem pode variar até 60 dias.

COTTA *et al.* (2015) mencionam que para evitar a morte das minhocas, é essencial submeter os resíduos orgânicos a um processo de termoestabilização prévio. Considerando o tempo de estabilização térmica e o processo de vermicompostagem, o tratamento de resíduos orgânicos requer de um tempo de residência total de 56 dias.

De forma geral, com todas as informações apresentadas anteriormente, fica evidente a importância de um estudo detalhado nos processos de biodigestão. Os diversos fatores discutidos, como a escolha dos resíduos orgânicos adequados, a temperatura e umidade ideais, a atividade das minhocas/microrganismos e a duração dos processos, destacam a complexidade e a necessidade de compreender melhor essas técnicas. Através de pesquisas contínuas e aprimoramento das práticas, é possível aperfeiçoar e otimizar esses processos. Para essa finalidade é importante entender como podem ser desenvolvidos tanto processos e tecnologias para otimizar esses processos. A continuação serão explicitados os métodos e os conceitos teóricos para desenvolver desenhos de processos e tecnologias aplicadas na Engenharia Química.

2.3. Desenho de Processos em Engenharia Química

O desenho de processos em Engenharia Química trata-se da realização da eleição e o sequenciamento das etapas necessárias para realizar a transformação química e física das matérias primas (TPE DESIGN ENGINEERING, 2021).

MORAN (2015) indica que os problemas encontrados em engenharia raramente estão definidos, em função disso, o engenheiro de desenho de processos deverá de idear e procurar possíveis soluções com imaginação e intuição na resolução de problemas.

De acordo com RASE & BARROW (1975) para desenvolver o desenho de processos é necessário a geração de dados e a recopilação das informações obtidas em testes experimentais na escala laboratorial, isto com o objetivo de conhecer a natureza do comportamento das matérias primas e a sua transformação.

DIMIAN & BILDEA (2008) estabelecem que, o trabalho de um engenheiro no desenho de processos é desafiante, porque precisa: a) conhecer e tomar em conta uma variedade de condicionantes, os quais serão de caráter técnico, econômico e social; b) ter experiência em engenharia; c) ser criativo; e d) ter um enfoque analítico para resolver problemas.

2.3.1. Desenvolvimento de desenho de processos

Para desenvolver um desenho de processo, seja este novo ou em certo caso da melhora de algum processo existente, PETERS *et al.* (2003) indicam que o engenheiro de desenho de processos deverá fazer o levantamento de todas as informações que se encontram na literatura referente às etapas de processos, os quais são necessários para obter um produto de maneira confiável, segura e econômica. Com essas informações o engenheiro poderá definir as possíveis soluções para o desenvolvimento do processo.

SINNOTT & TOWLER (2020) argumentam que o desenvolvimento de um desenho de processos, começa a partir de uma necessidade ou de algum objetivo definido pelo demandante ou cliente, em esse contexto, o desenhador deverá de realizar a eleição: i) do tipo de processo, ii) das condições do processo, iii) dos materiais e iv) os equipamentos necessários para resolver essas necessidades. Os autores também indicam que o engenheiro de desenho deverá de: a) apresentar o esboço do diagrama de fluxo das principais etapas do

processo, b) indicar a função principal de cada etapa, e c) identificar as principais limitações de cada etapa.

Por outra parte, SMITH (2005) indica que podem existir duas situações no desenvolvimento de desenhos de processos onde: a primeira situação, está constituída pelo desenvolvimento de um desenho de processo novo. Neste tipo de situações, se tem a vantagem de que o desenhador tem liberdade de eleger as opções do desenho e os tamanhos dos equipamentos; e a segunda situação, está constituída pelo desenvolvimento de uma modificação, reabilitação ou modernização de algum processo existente. Esta situação acontece quando se quer: aumentar a capacidade de produção, produzir produtos com características e especificações diferentes, reduzir custos operacionais, melhorar a segurança ou reduzir a emissão de contaminantes ambientais.

GLAVIČ *et al.* (2021) estabelecem que existem 3 etapas básicas para realizar o desenvolvimento de um desenho de processos, entre essas etapas se encontram a: etapa de sínteses do processo, nesta etapa são realizados a eleição das tecnologias e a combinação das etapas industriais, para conseguir objetivos como: melhorar a pureza do produto, aumentar os rendimentos e as taxas de produção; etapa da análise do processo, nesta etapa se desenvolve a resolução de balanços de massa e energia utilizando o diagrama de fluxo do processo; e a etapa otimização do processo, nesta etapa são realizados: i) a otimização estrutural baseada na seleção de equipamentos e a interconexão de unidades, e ii) a otimização paramétrica onde são estudados o comportamento da composição dos elementos presentes nos processos e as condições operativas (pressão, temperatura, etc.).

HAIK & SHAHIN (2011) chegaram a identificar três graus de dificuldade no desenvolvimento de desenhos de processos, entre eles se encontram: o desenho adaptativo, este conceito é utilizado quando o engenheiro realiza modificações de caráter técnico, neste caso não é necessário de algum conhecimento ou habilidade especial devido a que os problemas são de fácil solução; o desenho de desenvolvimento, este conceito é utilizado quando o desenho precisa de uma formação científica e a capacidade de desenho para modificar o formato de algum desenho existente; e o novo desenho, este conceito é utilizado quando um engenheiro precisa inovar e criar novos desenhos. Este nível é complicado no desenho de processos porque implica ter conhecimentos sólidos nas habilidades anteriores, bem como, ter criatividade, imaginação, perspicácia e previsão.

Do ponto de vista do desenho de processos direcionados para a transformação dos resíduos orgânicos, considerando a base teórica anteriormente apresentada, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem estruturada para o desenvolvimento de novos processos. Com base nessa abordagem, será possível estruturar modelos de processos inovadores, que permitirão a maximização do valor agregado dos resíduos. A combinação de conhecimentos teóricos sólidos, criatividade e pensamento inovador é essencial para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades associadas à transformação dos resíduos orgânicos. Dessa forma, será possível contribuir não apenas para a gestão adequada dos resíduos, mas também para a criação de produtos com maior valor e sustentabilidade.

2.4. Desenho de Tecnologias no Contexto dos Processos das Indústrias Químicas

De acordo com as informações apresentadas por PIEROBOM *et al.* (2020), o mercado atual se encontra numa elevada competitividade, onde muitas empresas estão prestando mais atenção no processo de desenvolvimento de equipamentos tecnológicos que ajudem a aumentar a produtividade nos processos industriais.

Desde a primeira revolução industrial os avanços tecnológicos sempre foram importantes na evolução das indústrias, de tal forma que esses avanços possibilitou: i) a mecanização dos processos industriais, ii) a criação de processos de produção em massa, e até iii) a automatização de processos de produção na escala industrial (RODRIGUES *et al.*, 2016; SCHWAB, 2016).

PYLAEVA *et al.* (2022) mencionam que as empresas de todo o mundo, estão tentando adaptar a sua produção com as novas tecnologias impostas pela Indústria 4.0. Nesse sentido, os autores indicam que: as indústrias que precisam de equipamentos com uma elevada tecnologia na cadeia produtiva (produção de medicamentos, equipamentos eletrônicos, aeronaves e outros) serão as primeiras a enfrentar essa transformação tecnológica; e no caso das pequenas e medianas empresas, estas terão que se adaptar a esse processo, atualizando e introduzindo tecnologias de ponta com o objetivo de diminuir os custos com relação à produção, flexibilidade na gestão de ativos e o lucro.

Segundo TESSARINI & SALTORATO (2018), a indústria 4.0 trata-se de um novo conceito na produção, onde máquinas, ferramentas e processos estarão interconectados por meio de uma rede de internet, isto com a finalidade de interagir entre si e com a capacidade de operar de forma praticamente autônoma.

JACOB *et al.* (2020) enfatizam que as novas tecnologias possuem um vasto potencial de mercado. No entanto, sua introdução traz consigo desafios que exigem habilidades e conhecimentos avançados em engenharia. Esses desafios incluem a seleção criteriosa das novas tecnologias, a busca por materiais adequados e o gerenciamento dos custos de produção. Superar esses obstáculos é fundamental para aproveitar ao máximo o potencial das novas tecnologias e garantir seu sucesso no mercado. A engenharia desempenha um papel crucial nesse processo, impulsionando a inovação e desenvolvendo soluções eficientes para enfrentar os desafios associados à adoção de tecnologias emergentes.

2.4.1. Etapas para o desenvolvimento de tecnologias

JOHANNESON & PERJONS (2014) estabelecem que, o objetivo da ciência do desenho não é exclusivamente a criação de tecnologias. Os autores indicam que grandes projetos de desenho respondem a uma série de questionamentos e requisitos, os quais deverão de ser realizados por meio de estratégias. Nesse contexto, uma das estratégias comumente utilizadas esta composta por uma:

- i) Etapa de identificação do problema, nesta etapa são realizadas a coleta das informações por meio de entrevistas, observações e o estudo de documentos referente ao problema em consideração;
- ii) Etapa de definição dos requerimentos, nesta etapa são realizadas as pesquisas referentes aos requisitos necessários para realizar a projeção da tecnologia a ser desenhada;
- iii) Etapa de desenho e o desenvolvimento da tecnologia, nesta etapa são realizadas a produção do desenho da tecnologia baseado nos requerimentos definidos, na funcionalidade, na criatividade, na imaginação e o *brainstorming*;
- iv) Etapa da demonstração da funcionalidade da tecnologia ou artefato, nesta etapa é apresentada a tecnologia e em função disso é realizada a prova de conceito para corroborar a viabilidade tecnológica; e a
- v) Etapa da avaliação da tecnologia, nesta etapa é estudado o alcance da tecnologia indicando até que ponto a tecnologia pode resolver ou aliviar o problema.

2.4.2. Ferramentas tecnológicas para desenvolver desenhos tridimensionais

DOS SANTOS & MENEZES (2009) ressaltam a importância da representação gráfica como uma etapa fundamental no desenvolvimento de projetos de desenho. Nessa etapa, são estabelecidos aspectos essenciais como o tamanho, a forma dos objetos, a estética e o posicionamento dos principais sistemas funcionais, entre outros elementos. Através da representação gráfica, os engenheiros podem visualizar e comunicar suas ideias de maneira clara e precisa, permitindo a tomada de decisões fundamentais para o desenvolvimento do projeto. É por meio dessa etapa que a concepção ganha forma, tornando-se tangível e facilitando a compreensão e colaboração entre os envolvidos no processo de desenho. A representação gráfica, portanto, desempenha um papel central no planejamento e na materialização de projetos de desenho bem-sucedidos.

De acordo com as informações apresentadas por PALHAIS (2015), os *softwares* de desenho assistido por computador (CAD) se converteram em ferramentas importantes, na qual podem ser realizados, desde desenhos simples até os mais complexos, apresentando modelos de desenho em formatos tridimensionais.

Autores como FLÓREZ-RUIZ *et al.* (2019) adotam o uso de *softwares* de desenho tridimensional como uma etapa crucial antes de realizar a construção de equipamentos tecnológicos. Essa abordagem é fundamentada no fato de que esses softwares permitem aos autores projetar, modificar e montar virtualmente as peças dos equipamentos por meio de um computador. Além disso, eles têm a capacidade de realizar simulações para avaliar o comportamento físico das peças desenhadas, como deformação e ruptura.

Por outra parte, ABDELALL *et al.* (2020) mencionam que existem ferramentas tecnológicas computacionais que além de realizar o desenho e a simulação do comportamento das peças, podem avaliar e detectar as possíveis falhas de desenho (espessura mal definida, tamanho das uniões entre outros) antes da realização da fabricação.

SENABRE *et al.* (2010) mencionam que o Autodesk Inventor é um *software* computacional que permite a criação de peças, a criação de conjuntos mecânicos, a realização de planos, a simulação de movimentos, a montagem e desmontagem de peças, entre outros. Porém, de acordo com as informações encontradas na página web dos desenvolvedores do *software* Autodesk Inventor 2020, indicam que os desenhos desenvolvidos nesse *software* podem precisar de um *hardware* robusto para essas finalidades, nesse sentido, eles recomendam utilizar:

- a) Windows 10 de 64 bits como sistema operacional;
- b) Uma unidade central de processamento (CPU) de 2,5 GHz ou superior;
- c) Uma memória RAM de 16 Gb para montagens de menos de 500 peças; e
- d) Placas de vídeo com unidades de processamento gráfico (GPU) de 1 Gb ou superior.

Na Figura 2.15 é apresentado o desenho tridimensional realizado no *software* Autodesk Inventor.

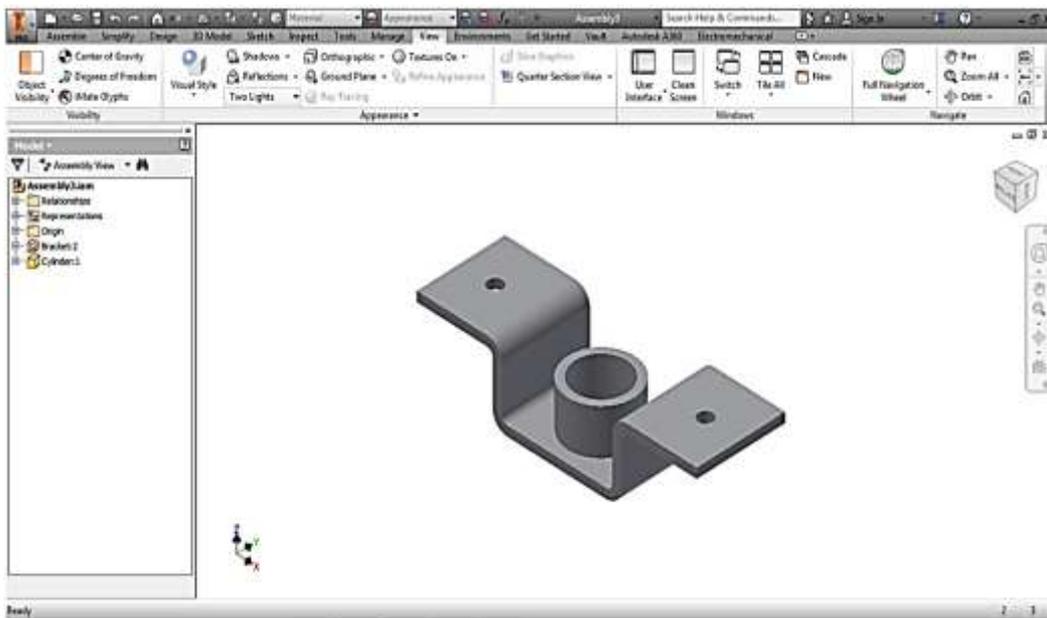


Figura 2.15 - Representação gráfica de uma peça realizada em Autodesk Inventor.
Fonte: TICKOO (2015).

TICKOO (2015) menciona que o *software* Autodesk Inventor, além de fazer desenhos tridimensionais, possui diversas potencialidades, entre as mais importantes se encontram:

- i) Sistemas automáticos denominados como “*Design Doctor*” onde o *software* examina, identifica e sugere as possíveis soluções a erros encontrados nos desenhos;
- ii) Aplicações denominadas como o “*Analysis tools*” podem ser utilizadas para analisar a tensão nos componentes desenhados em relação ao material e às condições de operação (como peso ou carga). Essas aplicações são capazes de identificar os limites operacionais permitidos para as peças;
- iii) Uma base de dados com relação aos materiais comumente utilizados na fabricação de peças;
- iv) Montagem e explodido das peças desenhadas;
- v) Criação de planos construtivos;

- vi) Criação de vídeos animados; e
- vii) Um sistema onde planilhas de dados de Excel podem ser lidas e vinculadas com os desenhos paramétricos realizados no Inventor.

2.4.3. Ferramentas tecnológicas para desenvolver sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas

Com o avanço do nível tecnológico os sistemas de monitoramento e controle de variáveis físicas estão passando por adaptações significativas para atender às necessidades das indústrias. Esse progresso é impulsionado pelo desenvolvimento contínuo de tecnologias de computação, comunicação e controle.

Atualmente, os processos industriais são mais complexos e precisam atender aos requisitos que a sociedade exige em termos de qualidade e agilidade, nesse sentido, HERAS-CERVANTES *et al.* (2020) explicam que as técnicas de controle e monitoramento são necessárias para monitorar continuamente o *status* do processo.

Por outra parte, WANG *et al.* (2018) mencionam que as tecnologias de monitoramento e controle de variáveis físicas, podem ter sistemas inteligentes, desenhados especificamente para manter estáveis os valores dos parâmetros físicos, tomando em conta os limites de segurança, os quais podem ser definidos em função do processo industrial.

PANDE *et al.* (2015) indicam que os sistemas de controle e monitoramento são necessários, principalmente, para alterar os parâmetros operacionais nos processos industriais e, mais que tudo, quando os operadores não se encontrarem localizados nas indústrias ou por motivos de segurança, logística e transporte, não consigam fazer as alterações desses parâmetros de forma manual.

De acordo com as pesquisas bibliográficas, os sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas, estão sendo utilizados para diversas aplicações. Por exemplo, pesquisadores como:

- i) CASTRO-BELLO *et al.* (2022) utilizam sistemas eletrônicos para o monitoramento e controle da mudança de cor e temperatura em reatores de tratamento de águas residuais provenientes da indústria têxtil, por meio de eletroválvulas;
- ii) BARBOSA *et al.* (2022) utilizam sistemas eletrônicos para realizar o monitoramento e controle do conteúdo de água presente nas folhas de soja, esta tecnologia foi

- projetada para conhecer e estudar o comportamento da saúde das folhas quando são expostas aos insumos agrícolas;
- iii) HERAS-CERVANTES *et al.* (2020) utilizam sistemas eletrônicos para o monitoramento e controle da temperatura em colunas de destilação por meio de um atuador de aquecimento;
 - iv) QUINTERO-POLANCO *et al.* (2018) utilizam sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas, os quais se encontram constituídos por sensores (pH, oxigênio dissolvido e temperatura) e placas eletrônicas programáveis (Arduino e Raspberry) para otimizar as condições de vida no cultivo intensivo de tilápias;
 - v) CALDERON-CORDOVA *et al.* (2018) utilizam sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas como a temperatura, umidade e a iluminação, na produção de orquídeas;
 - vi) SOUSA *et al.* (2017) utilizam sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas como a umidade do solo, umidade do ar e a temperatura do ambiente para ser aplicados na irrigação agrícola.
 - vii) NEELAMEGAM *et al.* (2008) utilizam sistemas eletrônicos de monitoramento e controle de variáveis físicas como a temperatura, iluminação, oxigênio dissolvido e o pH, para aumentar a taxa de crescimento de peixes de água doce.

2.4.3.1. Tecnologias para realizar códigos inteligentes para microcontroladores

De acordo com IBRAHIM (2008), o microcontrolador é um microcomputador, que possui elementos que permitem a sua interação com dispositivos externos, por meio de um programa codificado. O autor menciona que, estes dispositivos geralmente são programados por meio de linguagens de programação de alto nível, devido a que essas linguagens facilitam o desenvolvimento de códigos grandes e complexos, e são mais fáceis de aprender comparado com a linguagem Assembly.

WILMSHURST (2007) menciona que: programar códigos na linguagem Assembly é bastante demorado, devido a que, um conjunto de instruções pode ser representado por um mnemônico, nesse sentido, a programação é propensa a gerar erros e na maioria dos casos é complicado produzir códigos bem estruturados, porém, este método de programação oferece uma elevada vantagem, porque utiliza todos os recursos do computador para criar códigos

eficientes, capaz de executar as tarefas de forma rápida e ao mesmo tempo utiliza pouco espaço na memória não volátil; e no caso da linguagem de alto nível a programação é rápida, devido a que, as instruções se relacionam com a nossa própria língua, nesse sentido, a programação é mais simples de entender e em função disso é possível produzir programas sofisticados, porém, a desvantagem do método de programação surge devido a que utiliza os recursos do computador de forma separada, propiciando a execução das tarefas de forma ineficiente, e ao mesmo tempo, precisa de um maior espaço na memória não volátil.

A memória não volátil se refere a um tipo de memória que permite somente a leitura de dados (*read-only memory* ROM), neste sentido, esta memória não pode ser alterada ou apagada. As informações ou instruções somente poderão ser gravadas por uma única vez.

CEBALLOS (2007) explica que desde o ponto de vista físico, tanto a memória como as unidades de processamento e outros elementos que se encontram nos microcomputadores, podem diferenciar as instruções definidas na linguagem de programação em função do estado, o qual se encontra caracterizado por dois níveis de tensão. Cada estado está representado genericamente por bits (simbolizados por 0 ou 1).

BARRETT & PACK (2006) mencionam que um bit pode conter uma única informação e essa informação permanecerá até que o nível lógico seja alterado. O nível lógico está definido por números binários compostos por 1 ou 0. Uma condição lógica está representada por sinais físicas, neste caso, por sinais de tensão de corrente contínua, por exemplo, uma condição lógica verdadeira será representada dependendo do microcontrolador por um sinal de 3,3 ou 5 V e uma condição lógica falsa será representado por um sinal de 0 V.

Segundo a página web da MICROCHIP (<https://www.microchip.com/>), no mercado podem ser encontrados microcontroladores que podem ler e processar dados de 8 a 32 bits. SUBERO (2018) menciona que, quanto maior é o número dos bits num microcontrolador, maior será a velocidade de processamento das tarefas e maior será o consumo da energia, isto acontece devido a que existem um maior número de transistores nesses dispositivos.

Com relação aos *softwares* de programação de alto nível, ELAHI (2018) indica que os desenvolvedores implementaram compiladores para transformar, os códigos desenvolvidos (código fonte) em códigos de linguagem Assembly (códigos mnemônicas) e a sua vez estes códigos são transformados a códigos de linguagem máquina (bits).

De acordo com a literatura, foi encontrado 6 tipos de *softwares*, entre eles se encontram: o mikroC, mikroBasic, mikroPascal, MPLAB, Compilador C CCS, e o MicroCode Studio (IBRAHIM, 2008; WILMSHURST, 2007; BREIJO, 2008; REYES, 2006). Na Figura 2.16 são apresentados os logotipos das ferramentas tecnológicas para desenvolver códigos para microcontroladores



Figura 2.16 – Logotipos das ferramentas tecnológicas para desenvolver códigos para microcontroladores.

Fonte: Elaboração própria.

MIKROE é uma empresa dedicada ao desenvolvimento de ferramentas tecnológicas para a indústria da microeletrônica. Segundo a página web (<https://www.mikroe.com/>), os desenvolvedores apresentam:

- i) Compiladores específicos para criar códigos para diversos tipos de microcontroladores (ARM, PIC, PIC32, dsPIC/PIC24, AVR, 8051 e FT90x) em linguagem de programação de alto nível, entre elas se encontram as linguagens de programação em C, Basic e Pascal, como cada linguagem é diferente, eles desenharam compiladores específicos para cada linguagem, entre eles se encontram o mikroC, mikroBasic e mikroPascal;
- ii) Compiladores com bibliotecas de mais 1.045 funções, essas funções estão compostas por drivers de microcontroladores, sensores e manejo de dados;
- iii) Compiladores com 168 exemplos como método de ajuda para entender o funcionamento do compilador e das bibliotecas; e
- iv) Seus compiladores suportam mais de 808 tipos de microcontroladores.

A MICROCHIP além de criar microcontroladores, sensores e outros elementos eletrônicos, é uma empresa que desenvolveu o compilador MPLAB. Segundo a página web

(<https://www.microchip.com/>), a MICROCHIP oferece compiladores com suporte a linguagens de programação de alto e baixo nível. Entre essas linguagens, destacam-se a linguagem de programação C e a linguagem de programação Assembler. Essas ferramentas permitem que os desenvolvedores programem e desenvolvam soluções eficientes para uma ampla gama de aplicações eletrônicas.

A CCS, é outra empresa dedicada ao desenvolvimento de compiladores em linguagem de alto nível em C. Segundo a página web (<https://www.ccsinfo.com/>), os desenvolvedores indicam que:

- i) A CCS foi a primeira empresa em desenvolver um compilador em C para microcontroladores da MICROCHIP há mais de 25 anos;
- ii) Os compiladores da CCS são fáceis de usar para um programador menos experiente;
- iii) O compilador possui funções incorporadas para facilitar a programação;
- iv) O compilador possui programas de exemplo para compreender a metodologia de programação;
- v) Inclui drivers de microcontroladores, sensores e outros dispositivos; e
- vi) Possui bibliotecas matemáticas para o manejo de dados.

O MicroCode Studio, é outro *software* e foi desenvolvido pela empresa MECANIQUE, este software é utilizado para o desenvolvimento de códigos para microcontroladores. Segundo a página web (<https://www.mecanique.co.uk/>), os desenvolvedores informam que:

- i) O MicroCode Studio utiliza uma linguagem de programação baseado em Basic;
- ii) Este software foi projetado especificamente para utilizar o compilador do PICBASIC PRO da microEngineering Labs;
- iii) Possui bibliotecas para realizar o uso de diferentes dispositivos eletrônicos no código;
- iv) Este software possui um sistema que pode identificar e corrigir erros na linha de códigos; e
- v) Possui um depurador de códigos inteligente, os quais podem ser instalados no circuito eletrônico, para identificar e apresentar a linha de código que está sendo executada pelo microcontrolador.

2.4.3.2. Tecnologias para desenvolver circuitos eletrônicos

De acordo com RASHID (2011), a elaboração de circuitos eletrônicos aplicados à processos da Engenharia Química começa com a identificação da necessidade ou do problema a ser resolvido. Além disso, é essencial possuir conhecimento sobre as características, parâmetros e modelos dos dispositivos eletrônicos disponíveis.

ČERNÝ & DOBEŠ (2014) mencionam que a primeira versão de um simulador de circuitos eletrônicos foi apresentada ao público nos anos 70, na Universidade da Califórnia em Berkeley.

De acordo com o avanço das ciências da computação, e mais especificamente na produção de simuladores de circuitos eletrônicos, é possível atualmente, projetar e avaliar o comportamento das peças eletrônicas de forma rápida e sem a necessidade de fazer experimentações físicas (TUPAC-YUPANQUI *et al.*, 2022).

AZIMIRAD & MOVAHHED (2022) de forma estratégica utilizam *softwares* de simulação de circuitos eletrônicos para: i) simular o funcionamento de dispositivos eletrônicos que são economicamente caros, ii) identificar a estabilidade dos circuitos eletrônicos projetados, e iii) para identificar outros fenômenos que podem acontecer no ambiente real de experimentação.

BREIJO (2008) menciona que PROTEUS é um *software* que permite: desenvolver o desenho de circuitos eletrônicos utilizando um ambiente gráfico, simular o funcionamento dos componentes ou dispositivos projetados, e permite desenhar placas eletrônicas. Segundo a página web (<https://www.labcenter.com/>), os desenvolvedores informam que o PROTEUS possui:

- i) Um ambiente gráfico para a seleção e colocado das peças nos circuitos eletrônicos projetados;
- ii) Uma biblioteca com mais de 15 milhões de peças (dispositivos eletrônicos) para realizar simulações;
- iii) Recursos que permitem simular e identificar as linhas de execução no código do microcontrolador;
- iv) Instrumentos virtuais como osciloscópios, analisadores lógicos, gerador de funções, voltímetros e outros, os quais são utilizados para analisar e simular o comportamento físico dos circuitos projetados; e

- v) Um sistema inteligente para realizar o posicionamento das peças e as rotas de conexão entre os componentes, os quais são destinados especificamente para realizar a criação de circuitos eletrônicos impressos.

De acordo com as pesquisas bibliográficas o *software* PROTEUS é utilizado para diversas aplicações. Por exemplo, podem ser encontrados projetos e circuitos eletrônicos para:

- i) Realizar o controle e monitoramento da temperatura em motores (SUNDARARAJAN *et al.*, 2022);
- ii) Realizar o controle remoto de fontes de alimentação de corrente contínua (SUS *et al.*, 2021);
- iii) Realizar o controle e monitoramento remoto de sistemas de irrigação inteligente aplicadas em culturas agrícolas (SHWETHA *et al.*, 2021);
- iv) Realizar o controle automático da temperatura (AFRICA *et al.*, 2020; WANG, Q. *et al.*, 2019)
- v) Identificar a resposta de sensores de fluxo de ar utilizando sistemas fuzzy (SOBRINHO *et al.*, 2020);
- vi) Utilizar em ambientes de treinamento educacional (APAYDIN & SERTELLER, 2020);
- vii) Automatizar e monitorar de forma remota a temperatura em reatores (UDEZE *et al.*, 2018);
- viii) Simular o comportamento operacional em reatores nucleares, utilizando conversores eletrônicos de potência de resposta rápida (SASIDHARAN *et al.*, 2018); e
- ix) Realizar o monitoramento remoto de dados físicos por meio de sensores eletrônicos (PRAKASH & SINGH, 2016).

Na Figura 2.17 são apresentados o esquema de um sistema eletrônico que mede e controla a temperatura utilizando o software PROTEUS.

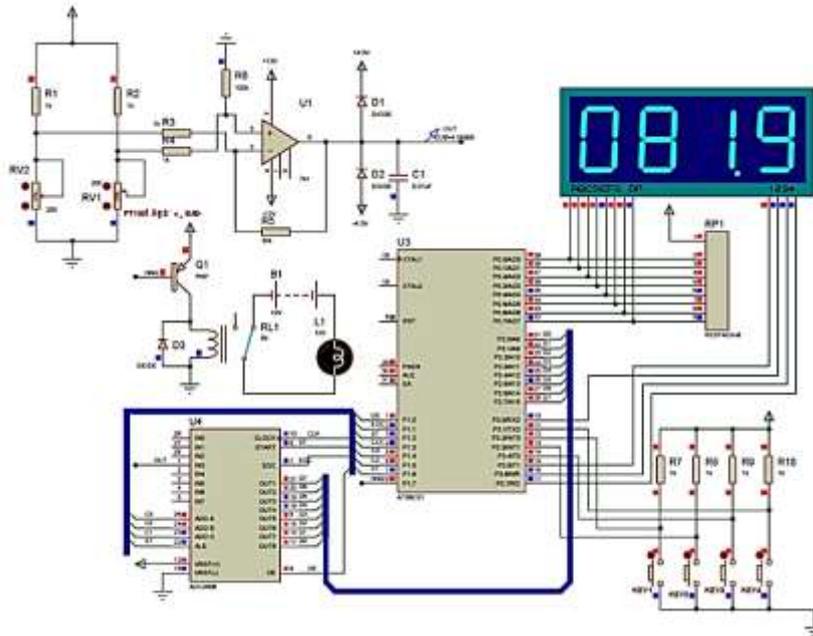


Figura 2.17 – Esquema de um sistema eletrônico que mede e controla a temperatura utilizando o software PROTEUS.
 Fonte: WANG *et al.* (2019).

2.4.4. Ferramentas tecnológicas para desenvolver *softwares* para sistemas SCADA

Os sistemas de controle supervísório e aquisição de dados, denominados como sistemas SCADA, são ferramentas que possuem arquiteturas projetadas para realizar o monitoramento e controle de vários equipamentos e processos na indústria (NANDA *et al.*, 2021).

MCCRADY (2013) explica que os sistemas SCADA estão compostos por dois subsistemas: a) o primeiro é constituído pelo *hardware*, também conhecido como controlador de campo. Esse controlador tem a função de converter os sinais do mundo físico em informações que podem ser lidas pelo software; e b) o segundo sistema é composto pelo *software*, responsável por apresentar, por meio de uma interface visual e gráfica, a leitura e o envio de informações para o mundo físico.

Na Figura 2.18 são apresentados a interface gráfica de um sistema SCADA desenhado para o controle e monitoramento de uma planta de produção de lã mineral.

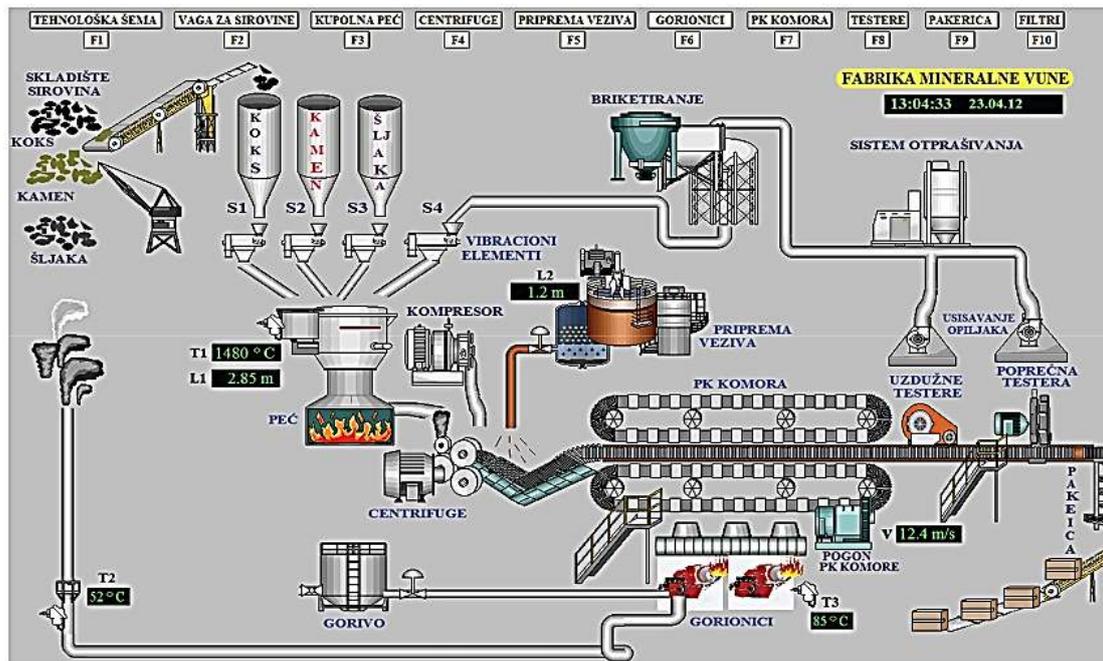


Figura 2.18 – Interface visual do sistema SCADA desenhado para uma planta de produção de lã mineral.

Fonte: STANKOV (2013).

ZHOU *et al.* (2019) mencionam que os sistemas SCADA são geralmente empregados no controle e monitoramento de equipamentos de sistemas de abastecimento de água, usinas nucleares, refino de petróleo e gás, e em sistemas de transporte.

Por outra parte, WEI *et al.* (2022) mencionam que os sistemas SCADA podem ser utilizados para reconhecer falhas e identificar o envelhecimento de dispositivos que se encontram presentes em equipamentos, por meio da avaliação de determinados parâmetros de referência.

Na atualidade existem uma grande variedade de *softwares* para o desenvolvimento de sistemas SCADA. *Softwares* como o Visual Basic, Visual Studio.Net, MATLAB e LABVIEW possuem elementos computacionais que permitem a conectividade (por meio de linhas de códigos) com o mundo real, utilizando como meio de comunicação, as portas de comunicação do computador.

2.4.4.1. Visual Basic e Visual Studio.net

O Visual Basic e o Visual Studio.Net são *softwares* que possuem enormes ferramentas de programação e foram desenvolvidos pela Microsoft. Estas ferramentas tecnológicas utilizam uma linguagem de programação orientado a objetos, onde por meio da

combinação de linhas de códigos, conhecimento, imaginação e criatividade, podem ser criados diversos tipos de aplicações para Windows.

FITRIANI & SOFYAN (2020) explicam que esses *softwares* de programação oferecem recursos para criar interfaces gráficas de usuário GUI os quais podem ser utilizados para simular, controlar e projetar interfaces Homem-Máquina (IHM) em sistemas SCADA.

As IHM em sistemas SCADA permitem que controlar e monitorar parâmetros físicos em processos industriais por meio de instruções previamente definidas que são enviados desde o computador até os microcontroladores (ARUNACHALAPERUMAL *et al.*, 2017).

Na Figura 2.19 são apresentados a janela de desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário em Visual Studio.net.

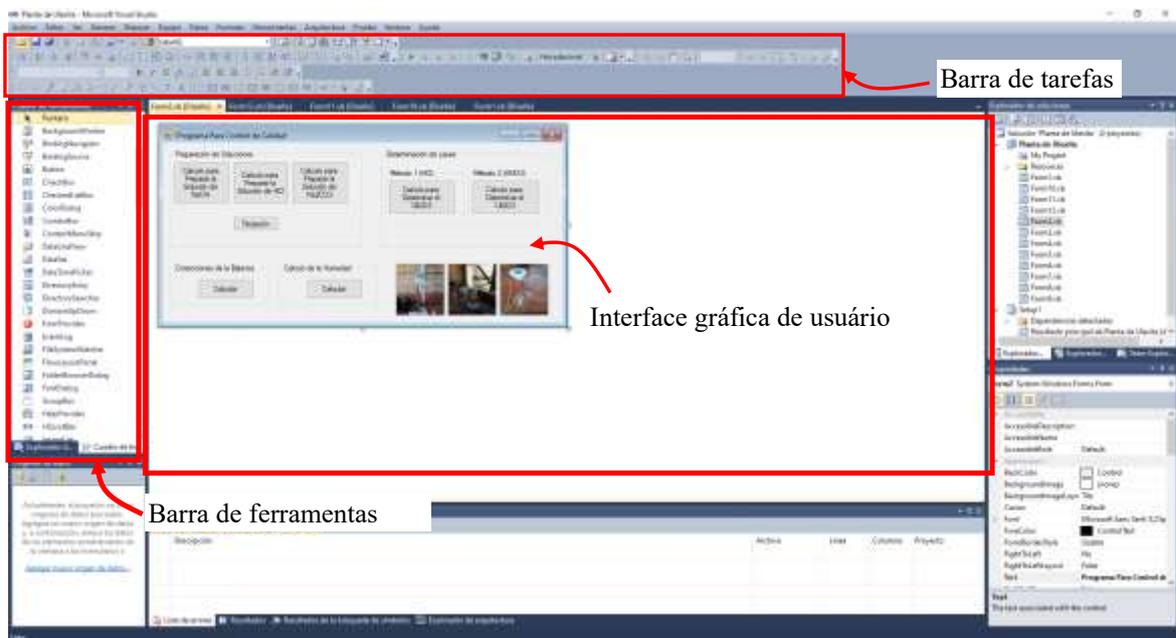


Figura 2.19 – Janela de desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário em Visual Studio.net.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 2.20 são apresentados a interface de programação do Visual Studio.net para realizar o código fonte que controla a interface gráfica.

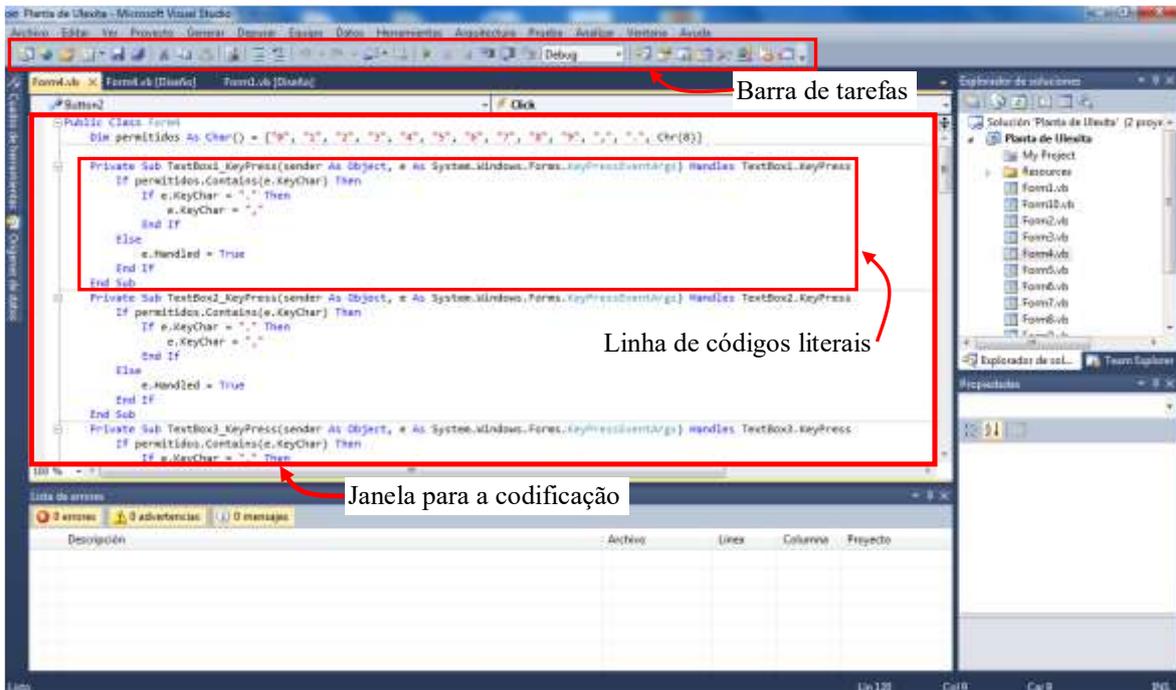


Figura 2.20 – Interface de programação do Visual Studio.net para realizar o código fonte que controlar a interface gráfica de usuário.
 Fonte: Elaboração própria.

Desde o ponto de vista do desenvolvimento de sistemas SCADA e de acordo com as pesquisas realizadas na literatura, foram encontradas aplicações que conseguem receber e enviar dados a partir de sistemas eletrônicos compostos por microcontroladores, dispositivos de comunicação sem fio, controladores lógicos e sensores.

Por exemplo:

- i) ÜNAL *et al.* (2021) apresentam um projeto para monitorar e armazenar dados de variáveis físicas provenientes de um protótipo triturador de resíduos de poda autopropelido;
- ii) FITRIANI & SOFYAN (2020) apresentam um projeto para monitorar e controlar variáveis físicas para usinas de energia;
- iii) ARUNACHALAPERUMAL *et al.* (2017) apresenta um projeto para monitorar e controlar variáveis físicas e dispositivos como válvulas de controle, bombas e outros para plantas industriais dedicadas à produção de laticínios;
- iv) RUIZ-AYALA *et al.* (2018) apresenta outro projeto para realizar o monitoramento e armazenamento de dados de variáveis físicas, proveniente de um protótipo composto por uma estação meteorológica;

- v) PALMIERI *et al.* (2014) apresenta outro projeto relacionado com o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e armazenamento de dados a partir de sensores eletrônicos (umidade relativa e a temperatura do ar) os quais podem ser utilizados para auxiliar no estudo das variáveis climáticas na produção agrícola; e
- vi) SENTHILKUMAR & PAMELA (2013) apresenta outro projeto relacionado com o desenvolvimento de protótipos de monitoramento e armazenamento de dados de variáveis físicas utilizando dispositivos que permitem uma conexão remota.

Na Figura 2.21 são apresentados a interface gráfica de um sistema SCADA desenhado em Visual Basic.

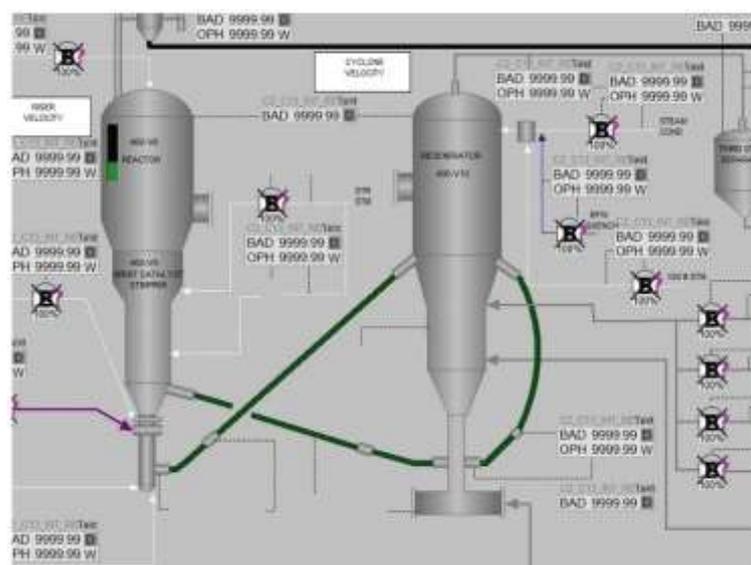


Figura 2.21 – Interface gráfica do sistema SCADA desenhado em Visual Basic.
 Fonte: MEHTA & REDDY (2015).

2.4.4.2. MATLAB

O MATLAB é um *software* de alto nível desenvolvido pela Mathworks. Este *software* foi desenhado para realizar cálculos matemáticos, desenvolvimento de algoritmos, modelagem e simulação, análise de dados, obtenção de gráficas e o desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário GUI (LÓPEZ, 2006).

Uma interface gráfica de usuário GUI é uma ferramenta que permite a comunicação entre o usuário de um programa de computador com o código fonte. Nessa interface podem ser apresentados a entrada e saída de dados por meio de componentes gráficos interativos como menus, botões, campos de texto e outros elementos, que podem ser mostrados em janelas de diálogo na tela de um computador (LOPES *et al.*, 2021).

LENT (2013) menciona que o MATLAB utiliza dois tipos de arquivos para realizar o desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário. No primeiro arquivo (que possui o sufixo “.fig”) são utilizados para desenhar a interface gráfica de usuário. No segundo arquivo (que possui o sufixo “.m”) são utilizados para desenvolver códigos fonte para dar funcionalidade aos componentes gráficos interativos.

Na Figura 2.22 são apresentados a janela do GUIDE para realizar o desenvolvimento da interface gráfica de usuário em MATLAB.

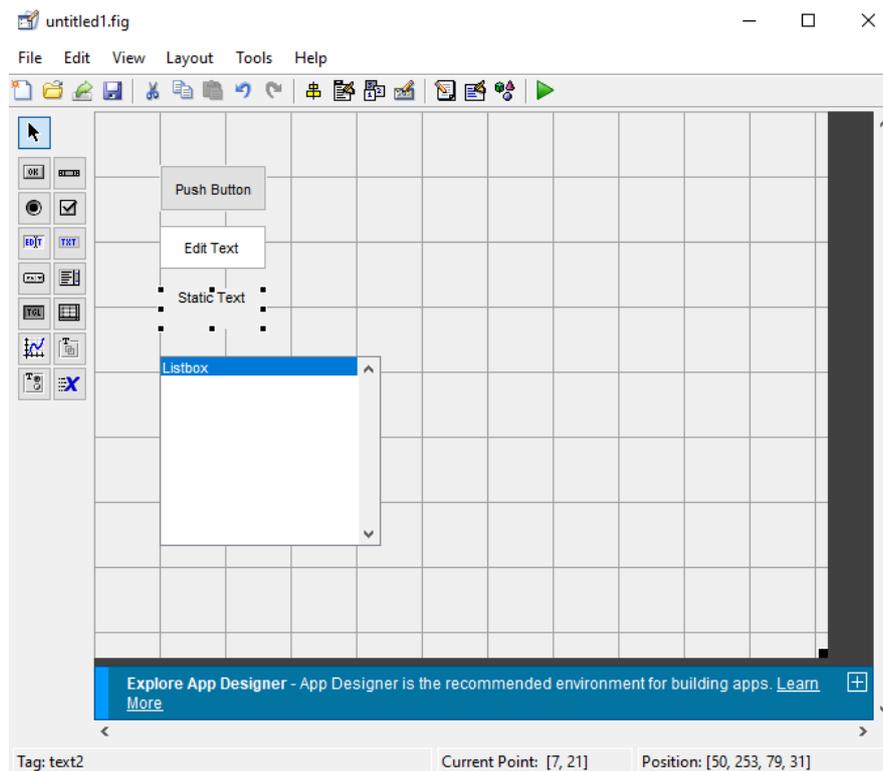


Figura 2.22 – Janela do GUIDE para realizar o desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário em MATLAB.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 2.23 são apresentados a janela do editor de funções para realizar o código fonte para controlar a interface gráfica de usuário em MATLAB.

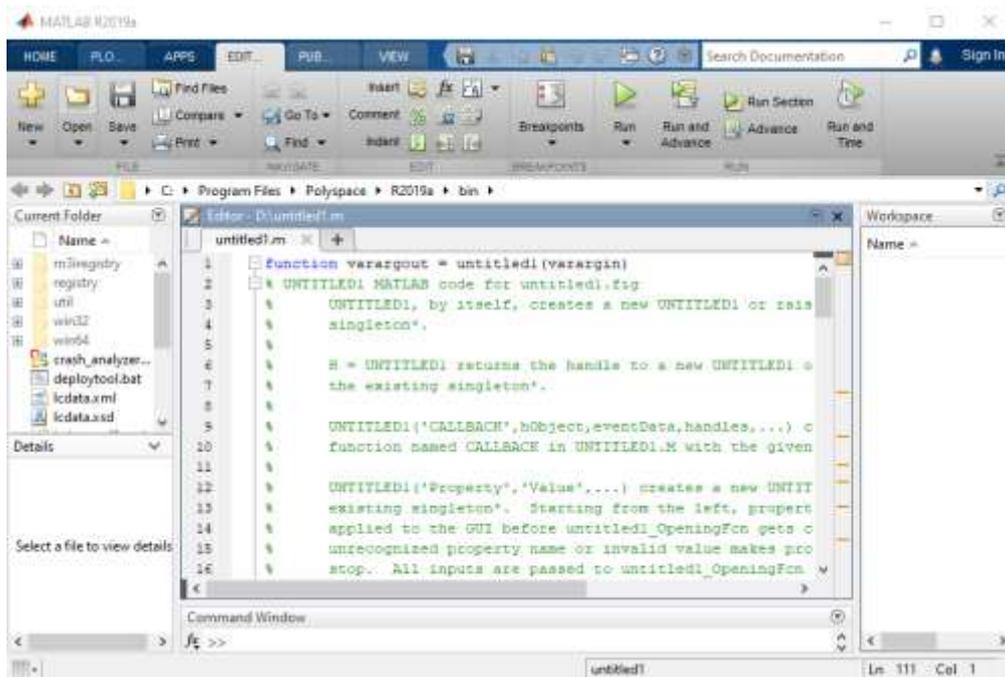


Figura 2.23 – Janela do editor de funções para realizar o código fonte para controlar a interface gráfica de usuário em MATLAB.

Fonte: Elaboração própria.

CHAPMAN (2016) menciona que o MATLAB é um programa otimizado e possui mais de 1000 funções predefinidas para realizar cálculos científicos e de engenharia de forma fácil e eficiente.

PETKOV *et al.* (2018) explicam que o MATLAB possui ferramentas que permitem desenvolver e desenhar sistemas de controle para sistemas embarcados. Os autores mencionam que os sistemas embarcados são sistemas que possuem um controlador de processamento digital (*hardware*). Geralmente a maioria dos equipamentos na indústria são controlados por meio de sistemas embarcados os quais podem ser controlados por meio de programas desenhados em MATLAB para essa finalidade.

Desde o ponto de vista do desenvolvimento de sistemas SCADA e de acordo com as pesquisas realizadas na literatura foram encontradas interfaces gráficas desenvolvidas em MATLAB para controlar e monitorar canais de irrigação (FIGUEIREDO *et al.*, 2013); e para controlar e monitorar processos de fermentação em biorreatores (INOSTROZA *et al.*, 2021).

Na Figura 2.24 são apresentados a interface gráfica de um sistema SCADA desenhado para monitorar e controlar canais de irrigação.



Figura 2.24 – Interface gráfica de um sistema SCADA desenhado em MATLAB para monitorar e controlar canais de irrigação.
 Fonte: FIGUEIREDO *et al.* (2013).

2.4.4.3. LABVIEW

O LABVIEW é um *software* que utiliza uma linguagem de programação gráfica chamada de linguagem G, este tipo de programação utiliza símbolos gráficos para descrever ações de programação (BISHOP, 2015).

Desde o ponto de vista do desenvolvimento de aplicações, o LABVIEW conta com uma enorme variedade de funções para realizar: conversões de dados, cálculos matemáticos, análise de dados utilizando funções estatísticas, aquisição e manejo de dados a partir de *hardwares*, gráficas, processamento de sinais, entre outros (LARSEN, 2011).

SINGH *et al.* (2018) explicam que o LABVIEW possui uma interface gráfica de programação composta por dois componentes: a) o primeiro componente, trata-se de um painel frontal onde são desenvolvidos a interface gráfica de usuário, nesse painel podem ser colocados indicadores como leds, controles como botões e gráficos; e b) o segundo componente, trata-se de uma interface chamado de diagramas de blocos, nessa interface são desenvolvidos o código fonte gráfico.

Na Figura 2.25 são apresentados um exemplo de uma interface gráfica de programação em LABVIEW.

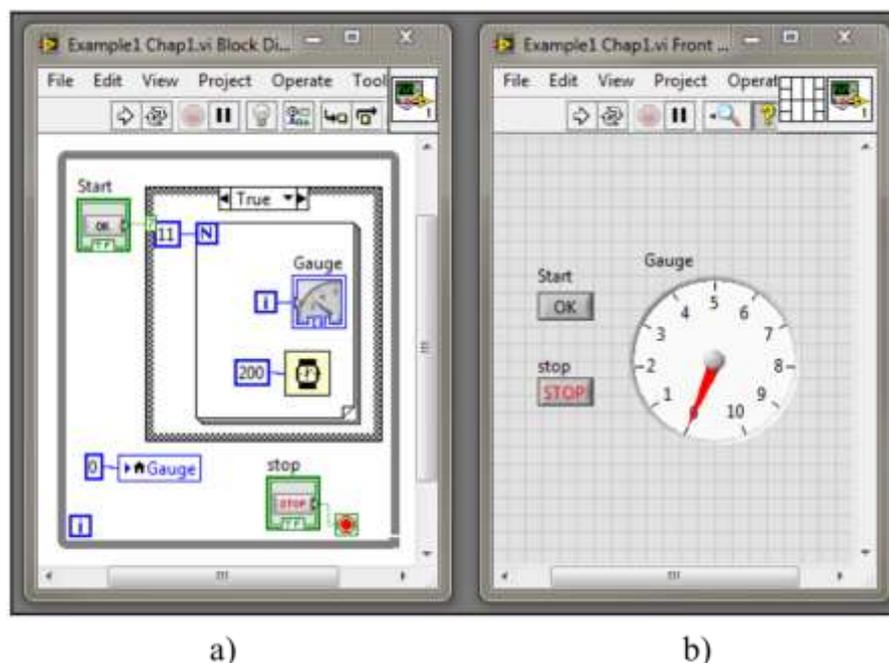


Figura 2.25 – Interface gráfica de programação onde são apresentados o a) diagrama de blocos e b) painel frontal do software LABVIEW.

Fonte: EHSANI (2016).

DUBEY *et al.* (2018) mencionam que o LABVIEW é geralmente utilizado para desenvolver aplicações de controle de equipamentos, aquisição e análise de dados de medição, desenho de sistemas embarcados e matriz de portas programáveis, e sistemas automatizados para realizar testes e validação de tecnologias.

BISHOP (2015) manifesta que tanto engenheiros como cientistas utilizam o LABVIEW para desenvolver diversos produtos para a área: automotiva, semicondutora, aeroespacial, eletrônica, química, telecomunicações e farmacêuticas.

Desde o ponto de vista do desenvolvimento de sistemas SCADA e de acordo com as pesquisas realizadas na literatura, foram encontrados projetos que utilizam o LABVIEW para:

- i) Desenvolver sistemas automáticos de monitoramento de gases em biorreatores (HENRIQUE *et al.*, 2022);
- ii) Desenvolver interfaces de usuário para estudar a estabilidade da medição da taxa de evaporação em protótipos desenhados para realizar medições da distribuição de tamanho de poros em membranas (KRANTZ *et al.*, 2022);

- iii) Desenvolver sistemas SCADA para realizar o monitoramento de parâmetros físicos para avaliar o desempenho de baterias de chumbo-ácido (DEMIRCI & TASKIN, 2021);
- iv) Desenvolver interfaces gráficas para monitorar e controlar reatores baixo custo para realizar o crescimento de filmes de CUSbS_2 para aplicações fotovoltaicas (GORDILLO *et al.*, 2021);
- v) Desenvolver sistemas SCADA para monitorar e controlar variáveis físicas para a criação de aves (LAHLOUH *et al.*, 2020);
- vi) Desenvolver interfaces SCADA de sistemas de gerenciamento de baterias de fluxo redox em escala industrial (TROVÒ, 2020);
- vii) Analisar, avaliar e monitorar o comportamento de novos desenhos de sensores para realizar medições de temperatura (PRAJAPATI & DESHMUKH, 2019);
- viii) Desenvolver sistemas SCADA para aplicações agrícolas baseado no reconhecimento de ervas daninhas utilizando o processamento de imagens digitais utilizando uma câmera (RAVEENDRA *et al.*, 2020);
- ix) Desenvolver sistemas de controle de oxigênio dissolvido em biorreatores (CHITRA *et al.*, 2018); e
- x) Desenvolver laboratórios remotos para a área educacional (DOMÍNGUEZ, M. *et al.*, 2010; CHANDRA *et al.*, 2014).

Na Figura 2.26 são apresentados a interface gráfica de um sistema SCADA desenhado para monitorar e controlar sistemas de gerenciamento de baterias de fluxo redox.

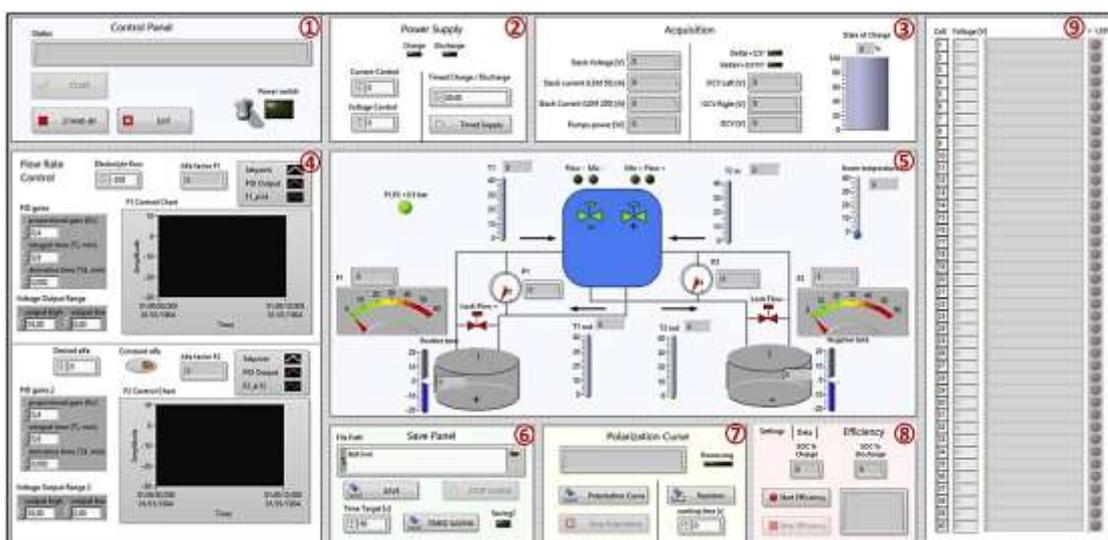


Figura 2.26 – Interface gráfica de um sistema SCADA desenhado para monitorar e controlar um sistema de gerenciamento de baterias de fluxo redox.

Fonte: TROVÒ (2020).

Com base nas informações apresentadas anteriormente, fica evidente que o desenho de tecnologias para os processos industriais químicos exige um conhecimento sólido e a busca contínua por informações sobre as ferramentas tecnológicas disponíveis. No contexto do desenvolvimento de tecnologias voltadas para a transformação dos resíduos orgânicos, é crucial utilizar eficientemente essas ferramentas para alcançar o sucesso na busca e no desenvolvimento de novas soluções.

2.5. Contribuições da Biotecnologia para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Transformação de Resíduos Orgânicos para um Futuro Sustentável

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são mecanismos criados com o objetivo de promover a harmonia entre a natureza e a humanidade (EVANS, 2023). Esses mecanismos são baseados em forma de objetivos e representam uma resposta urgente à necessidade de equilibrar o progresso humano com a preservação do meio ambiente, visando à criação de um futuro sustentável para todos.

De acordo com as informações encontradas no documento das NAÇÕES UNIDAS (2018), os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável foi proclamado por 193 membros, no qual explicitam a existência de 17 objetivos e 169 metas a serem realizadas pelos países considerando a Agenda 2030. Os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável são:

- 1) Erradicar a pobreza em todas as formas e em todos os lugares;
- 2) Erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável;
- 3) Garantir o acesso à saúde de qualidade e promover o bem-estar para todos, em todas as idades;
- 4) Garantir o acesso à educação inclusiva, de qualidade e equitativa, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos;
- 5) Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas;
- 6) Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos;
- 7) Garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos;
- 8) Promover o crescimento econômico inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos;

- 9) Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação;
- 10) Reduzir as desigualdades no interior dos países e entre países;
- 11) Tomar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis;
- 12) Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis;
- 13) Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos;
- 14) Conservar e usar de forma sustentável os oceanos, mares e os recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável;
- 15) Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda da biodiversidade;
- 16) Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas a todos os níveis; e
- 17) Reforçar os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

De acordo com GOYENECHÉ *et al.* (2019), os ODS não devem ser vistos como metas isoladas, mas sim como um conjunto interligado. Nesse sentido, é crucial considerar todos os objetivos de forma integrada, a fim de enfrentar os desafios complexos da sociedade de maneira abrangente.

LAURENT *et al.* (2020) destacam que a sustentabilidade será cada vez mais integrada aos processos de decisão. No contexto do desenvolvimento de produtos, tecnologias e serviços, eles serão avaliados em termos de sua contribuição com os objetivos de desenvolvimento sustentável. Essa abordagem permitirá a avaliação dos impactos ambientais decorrentes desses processos e guiará a busca por soluções mais sustentáveis no futuro.

MA *et al.* (2023) mencionam que países como a China estão adotando políticas rigorosas de desenvolvimento sustentável com o objetivo de reduzir os resíduos orgânicos. Segundo os autores, essas políticas são fundamentadas em cinco princípios conhecidos como os “5R”, que abrangem os seguintes métodos: i) “repensar”, enfocando a recuperação eficiente e eficaz dos materiais; ii) “reduzir”, priorizando a minimização do consumo de recursos naturais, materiais e energia; iii) “reutilizar”, promovendo a reutilização de produtos e embalagens; iv) “reciclar”, enfatizando o reprocessamento para recuperar

recursos e materiais; e v) “recuperar”, explorando a utilização desses resíduos como fonte de energia ou compostos químicos valiosos.

SUTHERLAND *et al.* (2021) destacam que, sob a perspectiva dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, os processos biotecnológicos desempenham um papel crucial na redução e transformação de resíduos. Além disso, eles ressaltam que esses processos podem contribuir simultaneamente para a consecução de diversos objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pelas Nações Unidas. Essas contribuições são as seguintes:

- i) "Erradicação da fome": A biotecnologia desempenha um papel fundamental ao permitir a conversão de resíduos em alimentos. Essa abordagem proporciona oportunidades para enfrentar o desafio da fome, aproveitando recursos anteriormente considerados como desperdício e transformando-os em fontes nutritivas na forma de alimentos;
- ii) "Acesso à água limpa e saneamento": A aplicação da biotecnologia desempenha um papel fundamental na remoção eficiente de contaminantes. Essa abordagem contribui para a melhoria da saúde pública e para a promoção de condições de vida saudáveis, atendendo assim a uma necessidade essencial para o bem-estar das comunidades;
- iii) "Energia acessível e limpa": Os resíduos podem ser convertidos em biocombustíveis por meio da biotecnologia, promovendo o acesso a fontes de energia limpa;
- iv) "Consumo e produção responsáveis": A biotecnologia permite a produção de bioplásticos recicláveis, fomentando práticas de consumo e produção responsáveis;
- v) "Conservação da vida aquática": A biotecnologia desempenha um papel na biorremediação da poluição aquática, contribuindo para a preservação da vida aquática; e
- vi) "Conservação da vida terrestre": A geração de bioestimulantes por meio da biotecnologia promove a melhora e a estabilidade do solo, auxiliando na conservação da vida terrestre.

Essas contribuições evidenciam a importância dos processos biotecnológicos na busca por soluções sustentáveis, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável definidos pelas Nações Unidas.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

A metodologia adotada na tese é uma combinação de abordagem qualitativa e quantitativa, exploratória e descritiva, sustentada na prospecção tecnológica. Essa metodologia se baseia em um extenso levantamento bibliográfico da fronteira do conhecimento, abrangendo literatura nacional e internacional, incluindo registros históricos, relatórios governamentais, bancos de dados estatísticos, livros, dissertações, teses, artigos de jornais, artigos de periódicos, patentes, entre outras fontes relevantes.

Ao utilizar uma abordagem quali-quantitativa, busca-se compreender e descrever fenômenos relacionados aos resíduos orgânicos, combinando informações qualitativas, como conceitos e percepções, com dados quantitativos, como estatísticas e métricas. A abordagem exploratória-descritiva permite explorar e descrever aspectos pouco conhecidos ou pouco estudados sobre o tema em questão.

Por meio da prospecção tecnológica, busca-se identificar e analisar as mais recentes tecnologias e métodos disponíveis na literatura, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o assunto e identificar oportunidades para aprimoramento e inovação. A análise crítica e a síntese dessas informações contribuem para embasar as conclusões e recomendações apresentadas neste trabalho de tese.

De modo específico, o trabalho foi conduzido em cinco etapas metodológicas, aplicadas de forma sequencial e simultânea, visando a abordagem abrangente do tema. Essas etapas são: 1) Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos; 2) Prospecção dos métodos, processos e tecnologias de processamento de resíduos orgânicos; 3) Desenvolvimento e proposição dos processos e das tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos, neste caso visando a obtenção de produtos de elevado valor agregado; 4) Avaliação dos requisitos de proteção intelectual; e 5) Análise, sistematização e organização dos resultados do trabalho.

Na Figura 3.1 se apresenta a estrutura (mapa mental) com a sistematização das etapas metodológicas utilizadas na tese de Doutorado.

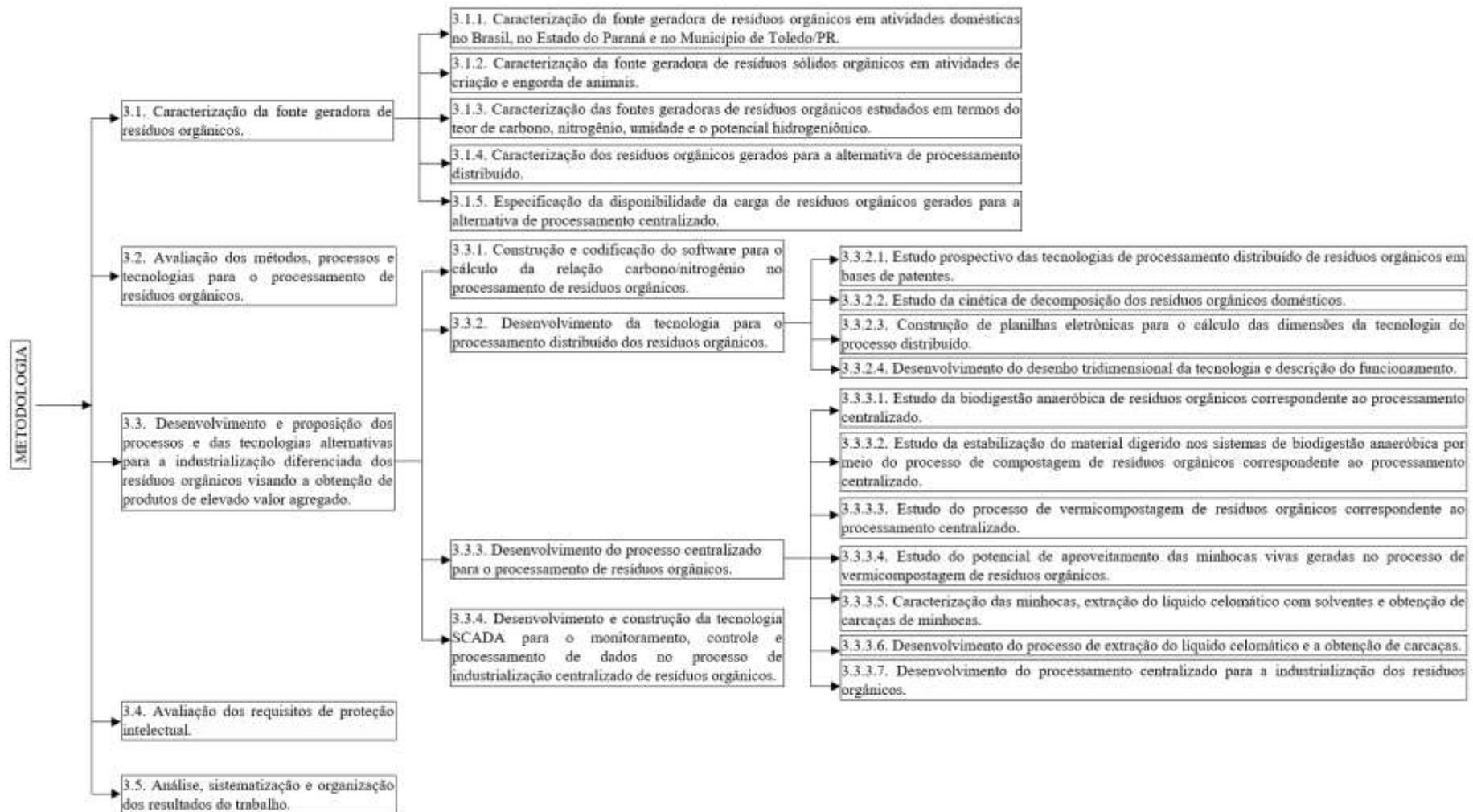


Figura 3.1 – Estrutura referente à sistematização e organização das etapas metodológicas da tese de Doutorado.

Fonte: Elaboração própria.

3.1. Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos

De modo geral, a caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos foi realizada levando em consideração o comportamento das atividades humanas. Neste sentido, a presente caracterização foi direcionada em função ao estudo da: i) Geração de resíduos sólidos orgânicos em atividades domésticas no Brasil, no estado do Paraná e em Toledo-PR; ii) Geração de resíduos sólidos orgânicos em indústrias de criação e engorda de animais; iii) Caracterização desses resíduos em base ao conteúdo de carbono, nitrogênio, a relação C/N, o nível do potencial hidrogeniônico (pH) e o teor de umidade; iv) Caracterização dos resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento distribuído; e v) A especificação da disponibilidade de carga para a alternativa de processamento centralizado.

Para melhor compreensão da caracterização dos resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento distribuído, é importante destacar que se refere à quantificação dos resíduos orgânicos gerados diariamente no local de origem. Essa caracterização permitirá determinar a carga de resíduos orgânicos que precisa ser tratada por meio de processos alternativos distribuídos, os quais podem ser implementados na própria fonte geradora.

No caso da especificação da disponibilidade de carga para a alternativa de processamento centralizado, trata-se da quantificação total dos resíduos gerados diariamente. Essa especificação será crucial para estabelecer a capacidade necessária dos processos industriais que poderão ser utilizados para transformar esses resíduos.

Essas etapas metodológicas possibilitaram uma caracterização abrangente da fonte geradora de resíduos orgânicos, fornecendo informações essenciais para o desenvolvimento de estratégias de gestão sustentável e aproveitamento desses resíduos.

3.1.1. Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em atividades domésticas no Brasil, no Estado do Paraná e no Município de Toledo/PR

Para a caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em atividades domésticas, foi realizado o cálculo da quantidade de resíduos sólidos urbanos e resíduos orgânicos, gerados em atividades domésticas no Brasil, no Estado do Paraná e no Município de Toledo/PR. Para essa finalidade os cálculos foram realizados com base das seguintes informações e dados:

- a) Foi realizada o levantamento de dados em documentos que se encontram na literatura (artigos e documentos técnicos) referente à composição média dos resíduos sólidos urbanos no Brasil;
- b) Foram consideradas os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021) com relação as populações estimadas no Brasil, no Estado do Paraná e no Município de Toledo/PR reportadas até o mês de abril de 2021, no qual até essa data, a população estimada para Brasil foi de 213.068.197 habitantes, no Estado do Paraná a população estimada foi de 11.516.840 habitantes e para Toledo-PR foi de 142.645 habitantes;
- c) Foi considerado também a geração per capita dos resíduos sólidos urbanos reportados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), no qual a geração per capita dos resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2022 foi de $381 \text{ kg.ano}^{-1}\text{hab.}^{-1}$ equivalente a $1,04 \text{ kg.dia}^{-1}\text{hab.}^{-1}$;
- d) Por último foram consideradas os dados da caracterização dos resíduos sólidos orgânicos na área doméstica com relação ao porcentagem de resíduos provenientes de frutas (67%), carnes (14%), legumes (13%), verduras (5%) e ovos (1%) reportadas por MOREJON *et al.* (2006).

3.1.2. Caracterização da fonte geradora de resíduos sólidos orgânicos em atividades de criação e engorda de animais

Para a caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em atividades de criação e engorda de animais, foi realizado o cálculo e o levantamento de dados referente a quantidade de resíduos orgânicos gerados em atividades de criação e engorda de animais no Município de Toledo-PR. Para essa finalidade, foram levantadas as seguintes informações e dados:

- a) Foi realizada o levantamento de dados com relação ao processo produtivo de criação e engorda de suínos, numa empresa em Toledo/PR;
- b) Foi realizada uma visita técnica a uma empresa dedicada à atividade de criação e engorda de suínos, nessa visita foram realizados a contabilização do número de animais (até o mês de novembro de 2020) em função das etapas do processo produtivo, referente a quantidade de matrizes encontradas na etapa de gestação,

- maternidade, matrizes na etapa de reposição e reprodução, a quantidade de leitões e por último a quantidade de machos;
- Foi realizado um balanço de massa para identificar a geração de dejetos do ciclo produtivo de atividades de criação e engorda de animais, conforme o diagrama de fluxo apresentado na Figura 3.2;
 - Foram consideradas as informações reportadas por OLIVEIRA (1993) referente à produção diária de dejetos, urina mais dejetos e dejetos líquidos, esses dados são apresentados na Tabela 3.1; e
 - Por último, foram coletadas informações por meio de um levantamento histórico presente nos relatórios técnicos da Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Governo do Estado do Paraná (SEAB, 2022), com o objetivo de analisar a produção de esterco de suínos e bovinos nos municípios do núcleo regional de Toledo. Esses relatórios forneceram dados relevantes sobre a quantidade e características desses resíduos na região em estudo.

Na Figura 3.2 são apresentados o processo produtivo de atividades de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR. A figura destaca os principais pontos onde são gerados os resíduos líquidos (RL), sólidos (RS) e gasosos (RG).

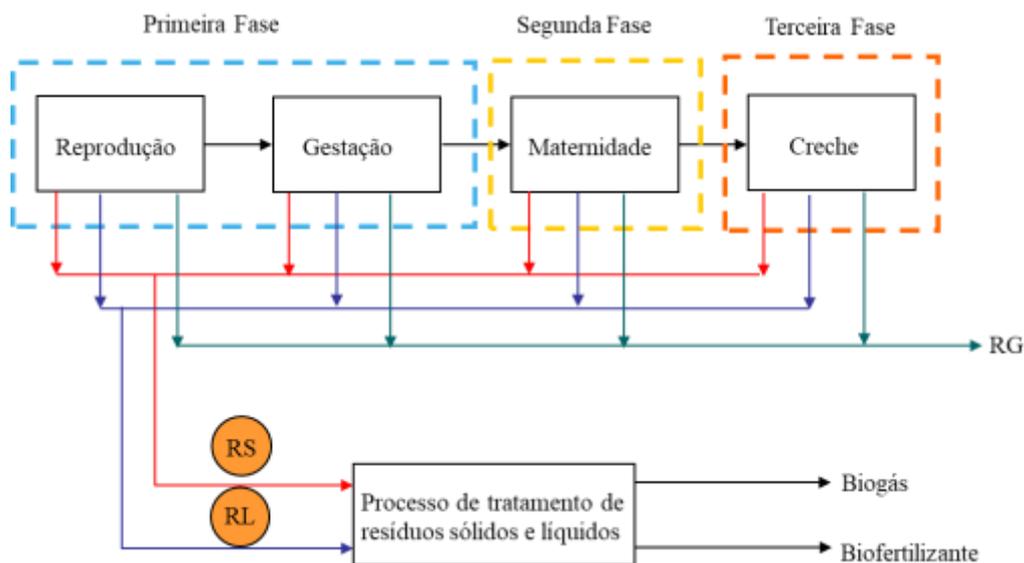


Figura 3.2 - Representação gráfica do processo produtivo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR e os principais pontos de geração de RS, RL e RG.

Fonte: MENDOZA (2016).

Na Tabela 3.1 são apresentados os dados da produção média diária de dejetos, dejetos mais urina e dejetos diluídos para atividades de criação e engorda de suínos.

Tabela 3.1 – Produção média diária de dejetos (kg), dejetos + urina (kg) e dejetos diluído (L) por animal por fase.

Categoria de Suínos	Esterco	Esterco + Urina	Dejetos diluído
25-100 kg	2,3	4,9	7
Porcas em gestação	3,6	11	16
Porcas em lactação	6,4	18	27
Macho	3	6	9
Leitão desmamado	0,35	0,95	1,4
Média	2,35	5,8	8,6

Fonte: OLIVEIRA (1993)

Para o desenvolvimento dos balanços do processo produtivo da criação e engorda de suínos foi realizada com base: a) ao levantamento de dados encontrados na visita técnica referente à população de suínos; b) dos dados apresentados na Tabela 3.1; e c) por último por meio do diagrama de fluxo do ciclo produtivo apresentados na Figura 3.2 foi realizado o balanço de massa para identificar a quantidade de resíduos sólidos orgânicos gerados por essa atividade.

3.1.3. Caracterização das fontes geradoras de resíduos orgânicos estudados em termos do teor de carbono, nitrogênio, umidade e o potencial hidrogeniônico

Para a caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em termos do teor de carbono, nitrogênio, umidade e o potencial hidrogeniônico (pH), foram realizados o levantamento de informações e o cálculo do conteúdo de carbono e nitrogênio presentes nos resíduos orgânicos estudados. Para essa finalidade, foram consideradas:

- i) A construção de uma tabela prevalecendo a sistematização dos dados da prospecção tecnológica, utilizando fontes de informação (artigos) que datam desde 1990 até julho do ano 2022, referentes às composições de carbono, nitrogênio, e a relação de C/N nos resíduos orgânicos, os quais se encontram constituídos por resíduos orgânicos domésticos (alface, batata, cebola, carne e outros), resíduos industriais (resíduos de frigoríficos, resíduos de incubatórios, lodo de avícola, resíduos de usinas de cana de açúcar e outros), resíduos de animais (esterco de suínos, bovinos, ovinos e outros), e resíduos de atividades rurais (poda de árvores, serragem de madeira, folhas, palhas e outros);
- ii) A construção de uma tabela prevalecendo a sistematização dos dados da prospecção tecnológica, utilizando fontes de informação (artigos) que datam desde 2007 até julho do ano 2022, referentes ao teor de umidade dos resíduos orgânicos (resíduos

- orgânicos domésticos, resíduos industriais, resíduos de animais, e resíduos das atividades rurais);
- iii) A construção de uma tabela prevalecendo as a sistematização dos dados da prospecção tecnológica, utilizando fontes de informação (artigos) que datam desde 2007 até julho do ano 2022, referentes ao pH dos resíduos orgânicos (resíduos orgânicos domésticos, resíduos industriais e resíduos de animais);
 - iv) A construção de uma tabela prevalecendo o agrupamento das informações anteriores referente ao teor médio de carbono, nitrogênio, relação C/N e o potencial hidrogeniônico em função de 6 tipos de resíduos orgânicos, os quais foram divididos em resíduos de frutas, resíduos de carne, resíduos de legumes, resíduos de verduras, resíduos de ovos, e dejetos de suínos;
 - v) No intuito de explicitar o potencial de disponibilidade de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos foi realizado o cálculo em base ao conteúdo de C e N nos resíduos orgânicos gerados (frutas, carne, legumes, verduras, ovos e dejetos de suíno) correspondente à geração total de RSO (conforme descrito no item 3.1.2) no Brasil, no Estado do Paraná e no município de Toledo-PR; e
 - vi) Por último, foram realizados os cálculos do teor de carbono e nitrogênio nos resíduos gerados em processos de criação e engorda de suínos e bovinos com base nos dados calculados conforme descrito no item 3.1.2.

3.1.4. Caracterização dos resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento distribuído

A caracterização dos resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento distribuído contempla: a determinação do número de pessoas por residência, a quantidade de resíduos orgânicos gerados por residência e o número total de módulos para o processamento distribuído.

Para o cálculo do número de pessoas por residência, foi obtido dividindo a população da área urbana do município de Toledo (IBGE, 2021) pelo número de residências. O número de residências foi obtido pela multiplicação do número total de quarteirões e o número de residências por quarteirão. O número de quarteirões presentes no município de Toledo-PR foi obtido utilizando o Google Maps. Da mesma forma o número de residências por cada

quarteirão foi obtido com base do cálculo da média de uma amostra de 5 quarteirões obtida no Google Maps no mês de julho de 2022.

Para a estimativa da quantidade de resíduos orgânicos gerados por residência, foi utilizada a geração per capita de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2022), juntamente com a composição média dos resíduos orgânicos nos RSU (de acordo com a metodologia descrita no item 3.1.1), multiplicada pelo número de pessoas que moram em uma residência.

O número total de módulos para o processamento distribuído foi calculado com base do número de residências do município de Toledo-PR.

3.1.5. Especificação da disponibilidade da carga de resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento centralizado

A especificação da disponibilidade da carga de RO gerados para a alternativa de processamento centralizado foi obtida por meio da soma da quantidade diária de resíduos orgânicos gerados na área doméstica (nas residências do município de Toledo-PR) mais o valor equivalente a quantidade diária de resíduos orgânicos gerados nas atividades de criação e engorda de animais (do município de Toledo-PR) mais a quantidade de carbono necessário. Este último obtido com base da relação C/N (relação ótima para processos de biodigestão) determinado pelo software apresentado no item 4.4.1.

3.2. Avaliação dos métodos, processos e tecnologias para o processamento de resíduos orgânicos

Para realizar a avaliação dos métodos, processos e tecnologias convencionais (compostagem, biodigestão anaeróbica e vermicompostagem) utilizados no processamento de resíduos orgânicos, foram realizados em função do levantamento e a concentração das informações que se encontram em: bases de dados de patentes (INPI, *Spacenet*, *Latipat*, *Google Patents* e outros), bases de dados de artigos científicos (*Scopus*, *ScienceDirect* e no *Web of Science*) e bases de dados disponíveis no portal Capes referente a artigos técnicos, dissertações e teses, encontrados até o mês de agosto do 2022. Para essa finalidade, foram geradas tabelas explicitando as vantagens e desvantagens para cada um dos processos e tecnologias convencionais, considerando 15 critérios de estudo, sendo eles: 1) Construção de equipamentos para o processo; 2) Elementos biológicos para a transformação de resíduos

orgânicos; 3) Temperatura de operação; 4) Relação C/N de operação; 5) pH de operação; 6) Umidade de operação; 7) Tempo de estabilização; 8) Necessidade de sistemas de controle; 9) Sistemas de moagem; 10) Capacidade em termos de volume de resíduos a ser degradados; 11) Controle de patógenos; 12) Redução de metais pesados nos produtos digeridos; 13) Redução da porcentagem de massa de resíduos orgânicos pelo processo; 14) Produtos; e 15) O custo do processo.

3.3. Desenvolvimento e proposição dos processos e das tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos visando a obtenção de produtos de elevado valor agregado

Com base nos resultados obtidos na caracterização qualitativa e quantitativa dos elementos estudados, juntamente com a avaliação dos métodos, processos e tecnologias, levando em consideração suas vantagens, desvantagens e limitações econômicas, técnicas e operacionais, foi desenvolvido:

- i) A construção e codificação de um software, para o cálculo da relação carbono/nitrogênio no processamento de resíduos orgânicos;
- ii) O desenvolvimento da tecnologia para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos, considerando, a prospecção das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos em bases de patentes, o estudo da cinética de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos, a construção de planilhas eletrônicas para o cálculo das dimensões da tecnologia do processo distribuído, o desenho tridimensional da tecnologia e descrição do funcionamento, e a apresentação da consolidação da proposta;
- iii) O desenvolvimento de um processo centralizado para o processamento de resíduos orgânicos. Esse desenvolvimento abrangeu o estudo do processamento centralizado por meio da biodigestão anaeróbica, o estudo do processamento centralizado por meio da compostagem, o estudo do processamento centralizado por meio da vermicompostagem, o estudo do potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem, a caracterização das minhocas por meio da extração do líquido celomático e a obtenção de carcaças, bem como o desenvolvimento do processo de extração do líquido celomático e a obtenção de

- carcaças. Além disso, foi realizado o desenvolvimento do processamento centralizado para a industrialização dos resíduos orgânicos; e
- iv) O desenvolvimento de tecnologias de sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados (SCADA) com o objetivo de monitorar, controlar e processar dados para os processos de industrialização de RO.

3.3.1. Construção e codificação do *software* para o cálculo da relação carbono/nitrogênio no processamento de resíduos orgânicos

Para realizar a construção e codificação de um *software* para o cálculo da relação carbono/nitrogênio no processamento de resíduos orgânicos, foram realizados em função das informações obtidas em etapas anteriores, principalmente, na caracterização dos resíduos orgânicos e a utilização do *software* de programação Visual Studio.net. Para essa finalidade foi considerada:

- i) O uso da linguagem Visual Basic;
- ii) A construção de uma base de dados, utilizando a informação que se encontram na literatura, referente ao conteúdo de carbono, conteúdo de nitrogênio e umidade presentes nos resíduos sólidos orgânicos;
- iii) A criação de três categorias de resíduos sólidos orgânicos os quais poderão ser selecionados no *software* desenvolvido, constituídos por: resíduos orgânicos do tipo “aditivo” referente aos resíduos provenientes da área doméstica e indústrias (alimentos), resíduos orgânicos do tipo “catalizador” referente aos resíduos que possuem maior carga biológica (resíduos de animais) e resíduos orgânicos denominados como “matéria base” conformados por resíduos orgânicos com elevado conteúdo de carbono e baixa umidade (resíduos de poda de árvores, serragem de madeira e outros), para a seleção dos RO a ser misturados;
- iv) A criação de um código para a leitura de dados a partir de uma planilha de Excel;
- v) A criação de um código para realizar a organização alfabética da base de dados referente aos nomes dos resíduos orgânicos;
- vi) A criação de um código de busca rápida de RO por meio da digitalização dos nomes dos resíduos;
- vii) A criação de um código para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de mistura de matéria prima na forma de RO a transformar;

- viii) A criação de um código para o cálculo da relação C/N em função das porcentagens de mistura de matéria prima na forma de RO a transformar; e
- ix) A criação de um código que possibilite a apresentação das possibilidades, referente ao tipo de processo que pode ser utilizado para realizar seu processamento e transformação.

3.3.2. Desenvolvimento da tecnologia para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos

Para o desenvolvimento da tecnologia para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos, foram considerados as seguintes etapas de desenvolvimento:

- i) Foi realizada o estudo prospectivo das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos em bases de patentes;
- ii) Foi realizado o estudo do comportamento cinético de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos;
- iii) Foi realizada a construção de planilhas eletrônicas desenvolvidas em Excel para realizar o cálculo de dimensões da tecnologia referente a um processamento distribuído;
- iv) Foi realizado o desenho tridimensional da tecnologia alternativa e descrição do funcionamento; e
- v) Foi realizada a apresentação da consolidação da proposta por meio da estimativa do número de equipamentos necessários para realizar o processamento distribuído dos RO na cidade de Toledo-PR.

3.3.2.1. Estudo prospectivo das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos em bases de patentes

Para realizar o estudo prospectivo das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos, foram realizados o levantamento das informações nas bases de patentes (*Espacenet*, *Google Patents*, e no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual INPI) referente às tecnologias patenteadas para realizar a transformação dos RO utilizando equipamentos portáteis que utilizam como base de processamento de RO ao processo de vermicompostagem. Para essa finalidade foram criadas tabelas especificando as

características das tecnologias, os problemas técnicos e a possibilidade de uso no sistema distribuído de processamento.

3.3.2.2. Estudo da cinética de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos

Para realizar o estudo da cinética de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos, foram considerados:

- i) Os dados apresentados por HUANG *et al.* (2013) e TRIPATHI & BHARDWAJ (2004) referente ao comportamento da variação da porcentagem de carbono, nitrogênio, e a relação C/N em função do tempo, em processos de vermicompostagem;
- ii) Três tipos de misturas de resíduos orgânicos, contendo relações C/N de 20,46, 25,61 e 29,94 para realizar as simulações referente à decomposição desses resíduos em termos do conteúdo de carbono, nitrogênio e a relação C/N em função do tempo; e
- iii) Para realizar o cálculo das três relações C/N indicadas anteriormente, foram utilizadas o *software* desenvolvido (conforme descrito no item 3.3.1) para o cálculo de C/N.

3.3.2.3. Construção de planilhas eletrônicas para o cálculo das dimensões da tecnologia do processo distribuído

Para calcular as dimensões da tecnologia do processo distribuído, foram criadas planilhas eletrônicas que levam em consideração os seguintes aspectos:

- i) A carga (quantidade) de resíduos orgânicos gerados por família no município de Toledo-PR, conforme descrito no item 3.1.4;
- ii) O tempo de residência necessário para transformar os resíduos orgânicos utilizando processos de vermicompostagem, conforme descrito no item 3.3.2.2;
- iii) As características operacionais relacionadas ao processo de vermicompostagem;
- iv) A ideia de um processamento modular, visando maximizar a eficiência tanto no tratamento dos resíduos quanto na transformação desses resíduos em produtos de valor agregado; e
- v) A aplicação de fórmulas matemáticas para o cálculo de dimensões de superfícies e figuras geométricas.

Todo esse conjunto de operações foi desenvolvido no programa Microsoft Excel com a ideia principal de que seja uma ponte de vinculação dos dados de desenho neste caso numéricos a dados gráficos por meio do programa de desenho tridimensional.

3.3.2.4. Desenvolvimento do desenho tridimensional da tecnologia e descrição do funcionamento

Para o desenvolvimento do desenho tridimensional da tecnologia e a descrição do funcionamento, foram considerados:

- i) A concentração dos dados de desenho (comprimento, espessura, raio e outros) da tecnologia numa planilha eletrônica, para realizar a vinculação com o programa Autodesk Inventor;
- ii) A realização do desenho tridimensional das peças com base das características operacionais, considerando um formato modular utilizando o programa Autodesk Inventor;
- iii) A montagem das peças desenhadas utilizando o programa Autodesk Inventor;
- iv) A verificação dos dados de desenho e a sua vinculação, entre a planilha eletrônica e o programa Autodesk Inventor; e
- v) A apresentação das características da tecnologia e a descrição do funcionamento.

3.3.3. Desenvolvimento do processo centralizado para o processamento de resíduos orgânicos

Para o desenvolvimento do processamento centralizado de resíduos orgânicos, foram considerados as seguintes etapas de desenvolvimento:

- i) Estudo da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado;
- ii) Estudo da estabilização do material digerido nos sistemas de biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado;
- iii) Estudo do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado;

- iv) Estudo do potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos;
- v) Caracterização das minhocas, extração do líquido celomático e obtenção de carcaças de minhocas;
- vi) Desenvolvimento do processo de extração do líquido celomático e a obtenção de carcaças de minhocas; e o
- vii) Desenvolvimento do processo para o processamento/industrialização centralizada dos resíduos orgânicos.

3.3.3.1. Estudo da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado

Para realizar o estudo do processo centralizado por meio da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos, foram consideradas as seguintes etapas de desenvolvimento:

- i) Prospecção e levantamento das informações referentes à produção de metano em função dos sólidos voláteis provenientes de diversos tipos de resíduos orgânicos utilizando fontes de informação presentes em artigos científicos publicados entre 2004 e 2019. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados.
- ii) Prospecção e levantamento das informações referente a composição química e concentrações médias dos gases gerados em processos de biodigestão anaeróbica de diversos tipos de resíduos e misturas (por exemplo, compostas por: resíduos de animais, mistura de resíduos de animais com resíduos orgânicos urbanos, e mistura de alimentos com resíduos de animais) utilizando fontes de informação presentes em artigos científicos. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados.
- iii) Quantificação dos produtos gerados a partir dos processos centralizados constituídos por processos de biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos, utilizando balanço de massa, com base das informações: da especificação da disponibilidade de carga para a alternativa de processamento centralizado (conforme descrito no item 3.1.5), as informações referentes à produção de metano a partir de diversos resíduos, a concentração média dos gases gerados nos processos de biodigestão e a porcentagem

- de redução da biomassa dos resíduos orgânicos utilizando processos de biodigestão anaeróbica, reportado por CHAVEZ-RICO *et al.* (2022);
- iv) Cálculo do potencial de aproveitamento na forma econômica dos produtos gasosos (metano e dióxido de carbono) gerados no processamento centralizado dos RO, considerando como base de cálculo a sua comercialização em seu estado puro e o valor referente a cotação pela venda desses produtos;
 - v) Busca de informação em artigos científicos referente as possíveis aplicações dos produtos gerados no processo de biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos;
 - vi) A partir das informações da anterior etapa, foi realizado a prospecção e o levantamento de informações em artigos científicos e patentes, para encontrar métodos e processos para aumentar a concentração do metano no biogás gerado no processo de biodigestão aeróbica. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados em função das informações referente: 1) aos locais de aplicação do processo ou método, 2) as características do método ou processo, 3) as concentrações máximas que podem alcançar quando utilizado o método ou processo e 4) a fonte;
 - vii) A partir das informações da anterior etapa, foi realizado a prospecção e o levantamento de informações em artigos e bases de patentes, para encontrar métodos e processos para recuperar o dióxido de carbono a partir do biogás gerado no processo de biodigestão aeróbica. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados em função das informações referente: 1) aos locais de aplicação do processo ou método, 2) as características do método ou processo, 3) as concentrações máximas que podem alcançar quando utilizado o método ou processo e 4) a fonte;
 - viii) A partir das informações da anterior etapa, foi realizado a prospecção e o levantamento de informações em artigos e bases de patentes, para encontrar métodos e processos para produzir gás sulfídrico e enxofre elementar a partir do biogás gerado no processo de biodigestão aeróbica. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados em função das informações referente: 1) aos locais de aplicação do processo ou método, 2) as características do método ou processo, 3) as concentrações máximas que podem alcançar quando utilizado o método ou processo e 4) a fonte;
 - ix) A partir das informações da anterior etapa, foi realizado a prospecção e o levantamento de informações em artigos e bases de patentes, para encontrar formas

de aproveitamento do concentrado líquido resultante do processo de biodigestão aeróbica. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados em função das informações referente: 1) aos locais de aplicação do processo ou método, 2) as características do método ou processo, 3) as concentrações máximas que podem alcançar quando utilizado o método ou processo e 4) a fonte; e por último

- x) A partir das informações da etapa anterior, foi realizado a prospecção e o levantamento de informações em artigos e bases de patentes, para encontrar formas de aproveitamento dos sólidos resultantes do processo de biodigestão aeróbica. Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados em função das informações referente: 1) aos locais de aplicação do processo ou método, 2) as características do método ou processo, 3) as concentrações máximas que podem alcançar quando utilizado o método ou processo e 4) a fonte.

3.3.3.2. Estudo da estabilização do material digerido nos sistemas de biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado

Para realizar o estudo da estabilização do material digerido nos sistemas de biodigestão anaeróbica, por meio do processo de compostagem de resíduos orgânicos, foram realizadas a quantificação dos produtos gerados no processo centralizado, nesta oportunidade considerando um processo de compostagem de RO. Para essa finalidade foram utilizados balanços de massa, considerando:

- i) Uso dos resultados proveniente da etapa metodológica expressa no item 3.3.1, referente a quantidade resultante na forma de material digerido (sólido/líquido orgânico) proveniente do processo centralizado composto por processos de biodigestão;
- ii) O tempo de residência mínimo necessário para estabilizar os resíduos orgânicos, conforme os resultados da etapa metodológica apresentada no item 3.2; e
- iii) A porcentagem de redução dos resíduos orgânicos utilizando processos de compostagem, reportados por CHAVEZ-RICO *et al.* (2022).

3.3.3.3. Estudo do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos correspondente ao processamento centralizado

Para realizar o estudo do processo centralizado por meio do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos, foram realizadas em função das seguintes informações:

- i) Quantificação dos produtos gerados a partir dos processos centralizados constituídos por processos de vermicompostagem de resíduos orgânicos, utilizando balanço de massa, com base das informações referente: 1) aos resultados proveniente da etapa descrita no item 3.3.2 relacionado com quantidade de matéria orgânica resultante do processo de compostagem, 2) a porcentagem de produção de matéria orgânica na forma de húmus referente a processos de vermicompostagem, reportados por CORRÊA & SANTOS (2015), 3) a relação de inoculação de kg minhocas vivas por kg de RO e o crescimento da biomassa na forma de minhocas vivas, reportados por ZHOU *et al.* (2021), 4) o uso dos resultados proveniente da etapa metodológica expressada no item 3.3.2, referente ao tempo de residência necessário para realizar o processamento centralizado por meio de processos de vermicompostagem;
- ii) Cálculo do potencial de aproveitamento na forma econômica realizando a estimativa pela venda dos produtos gerados no processamento centralizado por meio do processo de vermicompostagem, considerando como base de cálculo a comercialização do húmus de minhoca e o valor mínimo referente a cotação pela venda desse produto;
- iii) Busca de informações na literatura (artigos e patentes) referente ao potencial de aproveitamento do húmus de minhoca proveniente de processos de vermicompostagem e as suas aplicações; e
- iv) Busca de informações na literatura (artigos e patentes) referente ao potencial de aproveitamento do líquido concentrado proveniente de processos de vermicompostagem e as suas aplicações.

3.3.3.4. Estudo do potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos

Para realizar o estudo do potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem, foram realizadas em função das seguintes informações:

- i) Prospecção e levantamento de informações referente às possíveis aplicações e o potencial de aproveitamento das minhocas vivas em bases de dados de artigos e patentes;
- ii) Prospecção e levantamento de informações referente aos métodos/processos para a obtenção de produtos primários (farinha de minhoca e líquido celomático) a partir das minhocas vivas em bases de dados de artigos e patentes; e
- iii) Com base nessa prospecção, foi construída uma tabela que sistematizou os dados coletados;

3.3.3.5. Caracterização das minhocas, extração do líquido celomático com solventes e obtenção de carcaças de minhocas

Para o desenvolvimento da caracterização das minhocas, extração do líquido celomático com solventes e obtenção da carcaça das minhocas, foi realizado o estudo de forma experimental. Para essa finalidade, o estudo compreendeu:

- i) Coleta de amostra representativa de minhocas vivas previamente separadas do vermicomposto, proveniente da empresa Minhocal Agroindustrial Ltda;
- ii) As minhocas vivas foram lavadas utilizando água proveniente da rede pública;
- iii) As minhocas vivas e limpas foram pesadas inicialmente utilizando uma balança analítica da Marca Shimadzu modelo ATX-224;
- iv) As minhocas vivas e limpas passaram por um processo de corte (utilizando um bisturi) para separar a parte superior (composta pela boca, faringe, esôfago, papo e moela), a parte média (composto pelo clitelo) e a parte inferior (composto pelo intestino e ânus);
- v) As minhocas, depois do corte, começam a expelir uma solução líquida constituída pelo líquido celomático e o sangue. Esse líquido foi removido com adsorventes;
- vi) Na sequência, as minhocas (livres do líquido celomático e a sangue) foram pesadas na balança analítica;

- vii) Posteriormente, as minhocas foram conduzidas para o equipamento de secagem utilizando como temperatura de secagem de 95°C. O equipamento utilizado foi um analisador de umidade da Marca Ohaus modelo MB27;
- viii) Seguidamente, pela diferença de pesos foi determinado a composição em peso das partes das minhocas, o teor de umidade, o teor do líquido celomático mais a sangue, e a massa seca denominado como carcaça de minhoca;
- ix) Os dados coletados foram sistematizados e apresentados na forma de resultados por meio de tabelas e figuras;
- x) Também foi realizado a identificação do comportamento anaeróbico da degradação das minhocas, para essa finalidade as minhocas foram submersas em um solvente orgânico a base de etanol, e por um tempo de 3 meses foi realizado o acompanhamento qualitativo (variação da cor do solvente) dos resultados;
- xi) Identificação das potencialidades da extração do líquido celomático e a obtenção de carcaças de minhocas, no qual as minhocas vivas foram submetidas a um processo de extração utilizando 2 tipos de solventes orgânicos (etanol e isopropanol), utilizando como tempo limitante de extração de 15 minutos depois de acontecer a morte das minhocas;
- xii) Após realizado a extração do líquido celomático com os solventes, posteriormente, as amostras foram separadas utilizando meios filtrantes (papel filtro) para obter dois tipos de amostras. Neste caso, as amostras consistem em uma amostra líquida (composta por uma mistura entre o solvente e o líquido celomático) e uma amostra sólida (constituída pela carcaça resultante do processo de extração do líquido celomático);
- xiii) As amostras em estado líquido (solvente mais o líquido celomático) foram analisadas utilizando um cromatógrafo de gases com espectrômetro de massas CG-MS da marca Agilent modelo 7890A. A partir das análises realizadas foi possível identificar as potencialidades dos solventes no processo de extração do líquido celomático em função dos compostos identificados na análise;
- xiv) As amostras sólidas compostas pelas carcaças das minhocas obtidas nos experimentos mencionados acima foram submetidas a processos de secagem, utilizando temperaturas de 95°C e 120°C, a fim de identificar a variação dos teores de proteínas e gorduras. A secagem foi realizada utilizando o analisador de umidade da marca Ohaus, modelo MB27.

- xv) Em seguida, as amostras sólidas (carcaças de minhocas) resultantes do processo de secagem foram submetidas a análises utilizando equipamentos de destilação e digestão, visando identificar os teores de proteínas e gorduras presentes nas carcaças das minhocas;
- xvi) Para realizar a análise do teor de proteína da carcaça de minhocas, foi utilizado o método Kjeldahl. Nesse processo, foram empregados um bloco aquecedor da marca TECNAL, modelo TE-007MP, juntamente com um destilador de nitrogênio também da marca TECNAL, modelo TE-0364; e
- xvii) Para a análise do teor de gorduras na carcaça de minhocas, foi utilizado um sistema específico para a determinação de gordura da marca TECNAL, modelo TE-044.

3.3.3.6. Desenvolvimento do processo de extração do líquido celomático e a obtenção de carcaças

O desenvolvimento do processo de extração do líquido celomático e obtenção da carcaça das minhocas, foi realizado considerando:

- i) As informações resultantes da etapa metodológica do item. 3.3.3.4, referente aos processos utilizados para realizar a obtenção do líquido celomático e a obtenção de carcaças a partir das minhocas vivas;
- ii) As informações resultantes da etapa metodológica do item. 3.3.3.5, referente a caracterização das minhocas;
- iii) O desenvolvimento de diagramas de fluxo referente a um processo para a obtenção do líquido celomático, carcaças, recuperação do húmus existente na parte interna das minhocas e a recuperação do solvente; e
- iv) A apresentação do balanço de massa do processo desenvolvido.

3.3.3.7. Desenvolvimento do processo para o processamento/industrialização centralizada dos resíduos orgânicos

Para o desenvolvimento do processamento/industrialização centralizada dos resíduos orgânicos, foi realizada com base dos resultados de todas as etapas anteriores. Para essa finalidade foi contemplado:

- i) O detalhamento do processo principal de obtenção de derivados a partir dos resíduos orgânicos;
- ii) O detalhamento de todas as etapas do processo de industrialização de resíduos orgânicos; e
- iii) A explicitação do funcionamento do processo industrial etapa por etapa para a obtenção dos produtos a partir dos resíduos orgânicos.

3.3.4. Desenvolvimento e construção da tecnologia SCADA para o monitoramento, controle e processamento de dados no processo de industrialização centralizado de resíduos orgânicos

Para realizar o desenvolvimento e a construção da tecnologia do sistema SCADA foram executadas as seguintes etapas:

- i) Análise das informações encontradas nas etapas anteriores, principalmente, na identificação dos parâmetros operacionais dos métodos e processos utilizados no processamento dos RO. Com base nos dados encontrados foram projetados os parâmetros a serem monitorados e controlados pela tecnologia;
- ii) Especificação dos elementos eletrônicos necessários para o desenvolvimento da tecnologia. Neste caso, foi considerando o número de sensores, o sistema de condicionamento de sinais, o sistema de aquisição de dados eletrônicos, o sistema para o acionamento de válvulas e motores, o sistema de comunicação sem fio e o sistema de armazenamento dos dados monitorados em uma memória SD;
- iii) Desenvolvimento do diagrama de fluxo do sistema eletrônico levando em consideração as características dos elementos eletrônicos necessários para o desenvolvimento da tecnologia;
- iv) Desenvolvimento do código específico para o microcontrolador utilizando o software PIC-Compiler;
- v) Desenvolvimento do circuito eletrônico no programa PROTEUS para o sistema de condicionamento de sinais, o sistema de aquisição de dados eletrônicos, o sistema para o acionamento de válvulas e motores, o sistema de comunicação sem fio e o sistema de armazenamento dos dados monitorados em uma memória SD;
- vi) Desenvolvimento do programa computacional para a interface do sistema SCADA, que é composto por uma interface visual apresentando a) o diagrama de fluxo do

- processo industrial para o processamento dos RO, b) as variáveis monitoradas, tais como a temperatura e umidade do ambiente e dos RO, c) botões para ativar/desativar de válvulas e um motor, d) o armazenamento de dados monitorados em uma planilha do Excel e e) a apresentação dos resultados de monitoramento. Esse programa foi desenvolvido utilizando a linguagem Visual Basic no programa Visual Studio.net;
- vii) Simulação da comunicação e envio de dados entre o circuito eletrônico desenvolvido em PROTEUS e o programa computacional desenhado;
 - viii) Prototipagem por meio do projeto, construção e montagem da parte física da tecnologia. Com base nas informações das anteriores etapas, nesta parte, foi realizado a montagem dos elementos eletrônicos em placas de prova para verificar o funcionamento da parte eletrônica. Em seguida, após a verificação do funcionamento da parte eletrônica, foi realizado o projeto para a fabricação das placas eletrônicas, considerando a ordem e a distribuição dos elementos, incluindo os sistemas de condicionamento de sinais, sistema de aquisição de dados eletrônicos, sistema de controle de um motor e válvulas, sistema de comunicação sem fio e o sistema de armazenamento de dados em uma memória SD. Posteriormente, após a construção das placas eletrônicas, foi realizado a montagem dos elementos eletrônicos e conectores;
 - ix) Com base nos resultados da etapa anterior, foi projetada a carcaça da tecnologia levando em consideração o tamanho das placas eletrônicas desenvolvidas anteriormente, bem como a tela LCD utilizada para apresentar os dados monitorados pelos sensores, botões e conectores para os sensores, para o controle do motor e válvulas. Para essa finalidade, foram utilizados o software Autodesk Inventor e um equipamento de corte a laser; e
 - x) Montagem das peças eletrônicas na carcaça complementada com os testes operacionais para verificar o seu funcionamento de acordo com os resultados obtidos nas etapas anteriores.

3.4. Avaliação dos requisitos proteção intelectual

A avaliação dos requisitos de proteção intelectual foi realizada com base dos atos normativos amparados na Lei que regula os direitos e as obrigações relativos à propriedade industrial (Lei nº 9.279/96). Conforme Art. VIII os requisitos para a proteção intelectual são a novidade, atividade inventiva, aplicação industrial e suficiência descritiva.

3.5. Análise, sistematização e organização dos resultados do trabalho

Após a realização das etapas anteriores, em sintonia com o objetivo geral do trabalho, dentro do contexto do projeto DAI (Doutorado acadêmico em inovação) que envolve a parceria Universidade-Empresa nos moldes da Lei de Inovação (Lei 10.973/2004), nesta etapa foram explicitados e organizados todos os resultados e todos os produtos tecnológicos resultantes do trabalho, em cada caso prevalecendo as características qualitativas, quantitativas e também os atributos das soluções tecnológicas na escala industrial. O resultado desta etapa contempla um mapa mental que explicita, de forma objetiva, a lógica de apresentação de todos os resultados da tese de doutorado. O qual serve de estrutura para melhor compreensão do capítulo de resultados.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1. Sistematização e organização dos resultados da Tese de Doutorado

Na Figura 4.1 se apresenta a estrutura (mapa mental) com a sistematização dos resultados do trabalho. Nesse esquema, os resultados compreendem: i) a caracterização e o potencial de geração de Resíduos Orgânicos (RO), neste caso explicitando o diagnóstico do cenário atual com a qualificação e quantificação do potencial segregado de geração de resíduos orgânicos da área urbana e rural; ii) a caracterização dos RO gerados para a alternativa de processamento distribuído; iii) a especificação da disponibilidade da carga dos RO gerados para a alternativa de processamento centralizado; iii) resultados da avaliação das vantagens e desvantagens dos métodos, processos e das tecnologias convencionais para o processamento dos RO; iv) o software para o cálculo da relação carbono nitrogênio (C/N) no processamento dos RO; v) as alternativas de processamento dos RO, numa escala industrial, com base do processamento distribuído e centralizado; e vi) o sistema SCADA para realizar o monitoramento, o controle e o processamento dos dados no processo de industrialização de resíduos orgânicos.

No caso do processamento distribuído, os resultados compreendem o desenvolvimento da respectiva tecnologia, explicitando: i) a prospecção das tecnologias de processamento do tipo distribuído em bases de patentes; ii) o estudo da cinética de decomposição dos RO; iii) as planilhas eletrônicas para o cálculo das dimensões da tecnologia do processo distribuído; iv) o desenho tridimensional da tecnologia e sua descrição do funcionamento; e v) a consolidação da proposta do processamento distribuído dos resíduos orgânicos.

No caso do processamento centralizado, os resultados compreendem: i) o processo centralizado por meio da biodigestão anaeróbica dos resíduos orgânicos; ii) o processo centralizado por meio da estabilização de material digerido nos sistemas de biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem de RO; iii) o processamento centralizado por meio do processo de vermicompostagem de RO; iv) o potencial de aproveitamento do excedente de minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem de RO; v) a caracterização das minhocas, a extração do líquido celomático e a separação das carcaças das minhocas; vi) o processo de obtenção do líquido celomático, obtenção de carcaças de

minhocas e balanços de massa; e vii) o detalhamento do processamento centralizado para a industrialização dos RO.

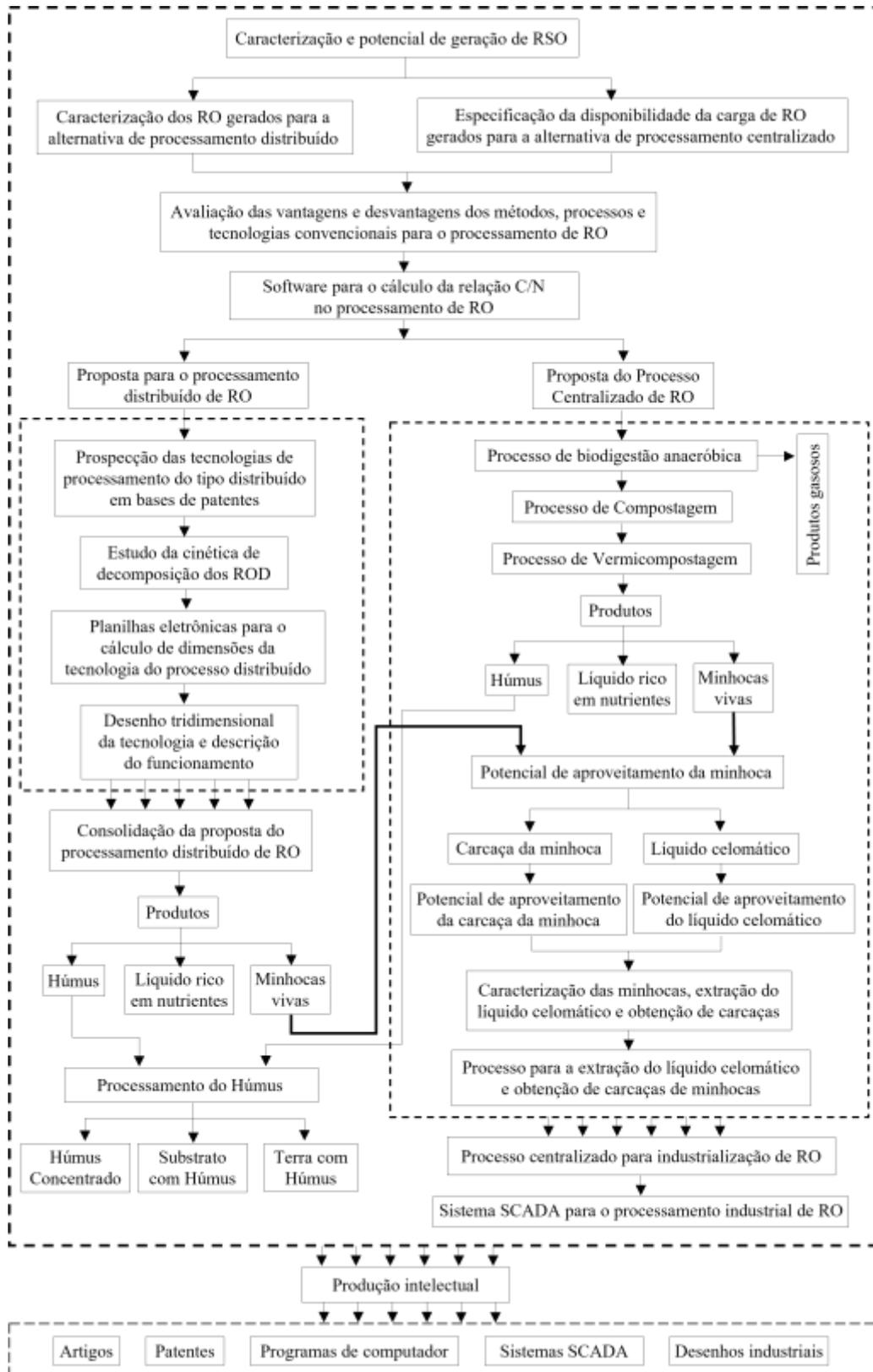


Figura 4.1 – Estrutura referente à sistematização e organização dos resultados da tese de Doutorado.

Fonte: Elaboração própria.

Na sequência se apresenta o detalhamento de cada um desses resultados, os quais fazem parte de artigos, patentes, programas de computador e desenhos industriais que se encontram concretizados e/ou estão em fase de desenvolvimento.

4.2. Resultados da caracterização e do potencial de geração de resíduos orgânicos

4.2.1. Caracterização da fonte geradora de resíduos orgânicos em atividades domésticas (ROD)

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados do levantamento de dados referente a composição média dos resíduos sólidos urbanos, os quais estão classificados em material orgânico (MO), material reciclável (MR) e outros materiais que, em geral são constituídos por rejeitos. Os resultados do levantamento de dados mostraram que no Brasil a composição média dos resíduos sólidos urbanos está constituída por 52,32% de matéria orgânica na forma de resíduos, 33,56% correspondem à porcentagem do material reciclável e 14,12% podem ser considerados como rejeitos.

Tabela 4.1 – Composição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Município/Estado/Pais	Composição (%)			Fonte
	MO	MR	Outros	
Brasil	51,4	31,9	16,7	ABRELPE (2019)
Cascavel/PR	38,79	35,71	25,5	CASCADEL (2014)
Toledo/PR	46,08	32,41	21,51	TOLEDO (2015)
São Paulo/SP	51,23	34,53	14,25	SÃO PAULO (2014)
Foz De Iguaçu/PR	57,35	20,41	22,24	FOZ DO IGUAÇU (2012)
Cocal do Sul/SC	37,41	60,33	2,26	SOUZA & GUADAGNIN (2009)
Curitiba/PR	47,9	42	10,1	TAVARES (2007)
Aquidauana/MS	72,67	12,35	14,98	LEME & JOIA (2006)
Rolândia/PR	51,38	42,94	5,68	MELO <i>et al.</i> (2011)
Toledo/PR	69	23	8	MOREJON <i>et al.</i> (2012)
Valor Médio	52,32	33,56	14,12	

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados da geração total de RSU, a fração orgânica e a correspondente composição dos RO na área doméstica no Brasil. Os resultados demonstraram que no Brasil são gerados 221.824,42 t.dia⁻¹ de RSU, a partir desse total 116.058,54 t.dia⁻¹ são resíduos orgânicos domésticos, dos quais, 77.759,22 t.dia⁻¹ são desperdícios de frutas, 16.248,19 t.dia⁻¹ são desperdícios de carnes, 15.087,61 t.dia⁻¹ são desperdícios de legumes, 5.802,93 t.dia⁻¹ são desperdícios de verduras e 1.160,59 t.dia⁻¹ são desperdícios de ovos. Considerando uma capacidade de processamento de ROD de 155 t.dia⁻¹

¹, no Brasil seria possível a implantação de 749 plantas de industrialização de resíduos orgânicos.

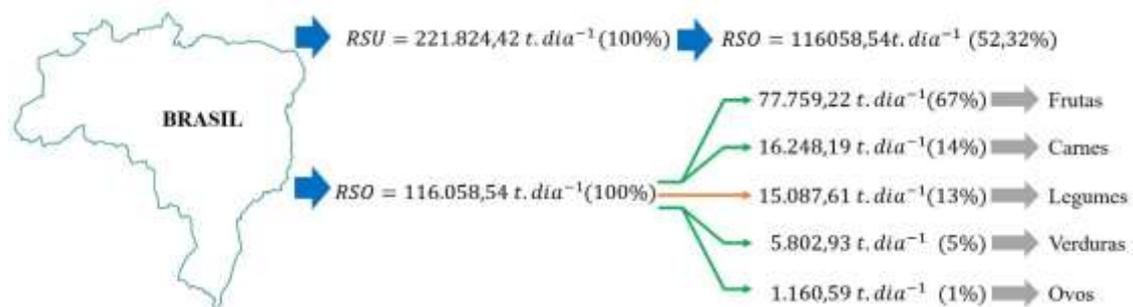


Figura 4.2 - Geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e composição dos resíduos orgânicos da área doméstica no Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados da geração total de RSU, a fração orgânica e a correspondente composição dos RO na área doméstica no estado do Paraná. Os resultados demonstraram que no Estado do Paraná são gerados $11.990,14 \text{ t. dia}^{-1}$ de RSU, a partir desse total $6.273,24 \text{ t. dia}^{-1}$ são resíduos orgânicos domésticos, dos quais, $4.203,07 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de frutas, $878,25 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de carnes, $815,52 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de legumes, $313,66 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de verduras e $62,73 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de ovos. Considerando uma capacidade de processamento de ROD de 155 t. dia^{-1} , no Estado do Paraná seria possível a implantação de 41 plantas de industrialização de resíduos orgânicos.

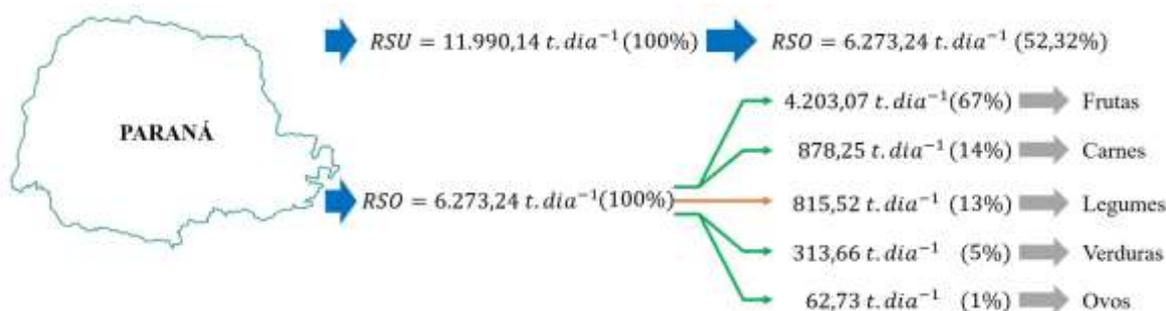


Figura 4.3 - Geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e composição dos resíduos orgânicos da área doméstica no estado do Paraná.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados da geração total de RSU, a fração orgânica e a correspondente composição dos RO na área doméstica no município de Toledo-PR. Os resultados apontam que, no município de Toledo-PR, são gerados $148,51 \text{ t. dia}^{-1}$ de RSU, a partir desse total $77,69 \text{ t. dia}^{-1}$ são resíduos orgânicos domésticos, dos quais, $52,06 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de frutas, $10,88 \text{ t. dia}^{-1}$ são desperdícios de carnes, $10,10 \text{ t. dia}^{-1}$ são

desperdícios de legumes, $3,88 \text{ t.dia}^{-1}$ são desperdícios de verduras e $0,78 \text{ t.dia}^{-1}$ são desperdícios de ovos. Considerando uma capacidade de processamento de ROD de 155 t.dia^{-1} , no município de Toledo-PR não seria possível a implantação de plantas de industrialização.

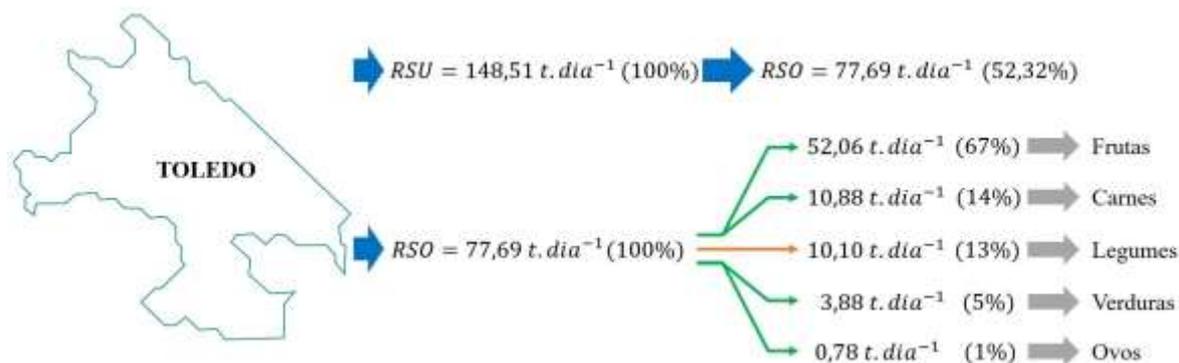


Figura 4.4 - Geração de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e composição dos resíduos orgânicos da área doméstica no município de Toledo-PR.

Fonte: Elaboração própria.

Nesse sentido, dependendo do caso (tamanho dos municípios), principalmente pela menor disponibilidade de ROD, se constata que nem sempre seria possível a implantação de uma unidade industrial em cada um dos municípios. Neste caso, seria necessário a centralização desses resíduos, em municípios âncoras, que permitam a sua coleta e a implantação de unidades industriais por meio de consórcios municipais. Para essa finalidade, foram realizados o cálculo do potencial de geração de ROD, referente a 50 municípios da Região Oeste do Paraná.

Na Figura 4.5 se apresenta o detalhamento do potencial de geração de ROD dos 50 municípios da Região Oeste do Paraná. Os resultados mostram que, municípios como:

- i) Cascavel ($180,83 \text{ t.dia}^{-1}$), Foz de Iguaçu ($140,52 \text{ t.dia}^{-1}$) e Toledo ($77,69 \text{ t.dia}^{-1}$), apresentam a maior disponibilidade de ROD da região, apresentando uma faixa de geração de ROD de $77,69$ a $180,83 \text{ t.dia}^{-1}$;
- ii) Marechal Cândido Rondon ($29,11 \text{ t.dia}^{-1}$), Medianeira ($25,34 \text{ t.dia}^{-1}$), Assis Chateaubriand ($18,14 \text{ t.dia}^{-1}$), Guaíra ($18,12 \text{ t.dia}^{-1}$) e Palotina ($17,48 \text{ t.dia}^{-1}$), apresentam uma faixa de geração ROD de $17,48$ a $29,11 \text{ t.dia}^{-1}$;
- iii) São Miguel do Iguaçu (15 t.dia^{-1}), Santa Helena ($14,56 \text{ t.dia}^{-1}$), e Santa Terezinha do Itaipu ($12,90 \text{ t.dia}^{-1}$), apresentam uma faixa de geração ROD de $12,9$ a 15 t.dia^{-1} ;
- iv) Cafelândia ($10,04 \text{ t.dia}^{-1}$), Matelândia ($9,85 \text{ t.dia}^{-1}$), Terra Roxa ($9,53 \text{ t.dia}^{-1}$), Corbélia ($9,31 \text{ t.dia}^{-1}$), Capitão Leônidas Marques ($8,62 \text{ t.dia}^{-1}$), Guaraniaçu ($6,65$

t.dia⁻¹), Três Barras do Paraná (6,55 t.dia⁻¹), e Céu Azul (6,43 t.dia⁻¹), apresentam uma faixa de geração ROD de 6,43 a 10,04 t.dia⁻¹; e

- v) Os demais municípios (ao redor de 32) apresentam uma faixa de geração de ROD de 1,22 a 6,19 t.dia⁻¹.

Na Figura 4.6, com base dos municípios âncoras, se apresenta o resultado do arranjo para a implantação de unidades industrializadoras de resíduos orgânicos os quais foram regionalizados em função da disponibilidade de matéria prima (RO) e a logística e o custo do transporte. Os resultados mostram que, com base nesse cenário, seria possível a implantação de 16 unidades industriais em 5 municípios âncoras (Cascavel, Toledo, Santa Terezinha de Itaipu, Céu Azul e Nova Aurora), cada um deles abrangendo um raio de 100 km e uma capacidade mínima de processamento de 45 t.dia⁻¹, neste último, a capacidade mínima foi determinada em função da somatória dos resíduos orgânicos domésticos mínimos gerados nos municípios regionalizados.

No caso do município ancora de Santa Terezinha de Itaipu, ele poderia também atender a demanda de industrialização dos resíduos orgânicos dos municípios da região da fronteira. Dessa forma, pode-se viabilizar o aproveitamento dos resíduos orgânicos como matéria prima de processo de industrialização visando a obtenção de produtos com elevado valor agregado.

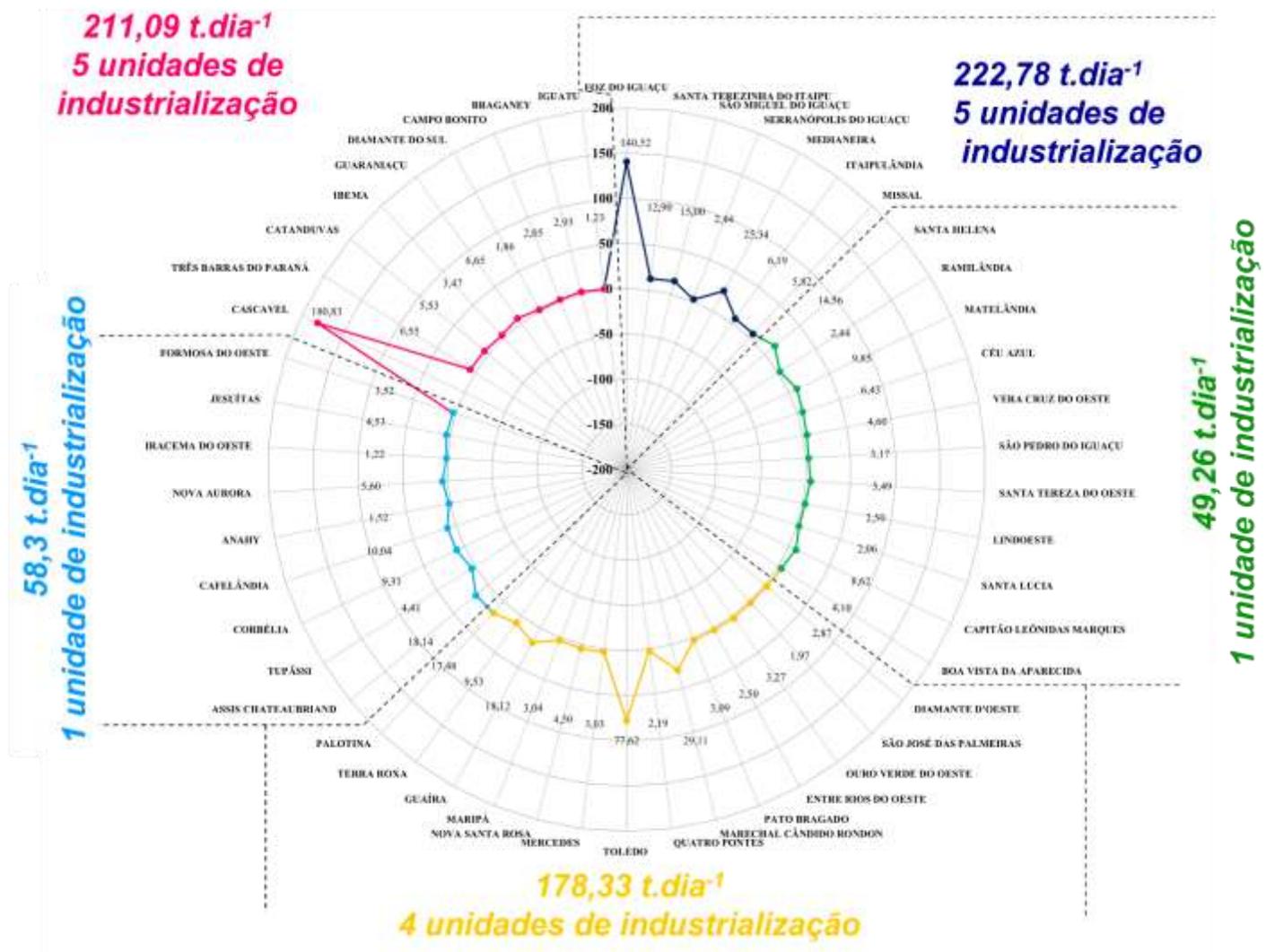


Figura 4.5 – Potencial de Geração de resíduos orgânicos domésticos em t.dia⁻¹ de 50 municípios da Região Oeste do Estado do Paraná.
Fonte: Elaboração própria.

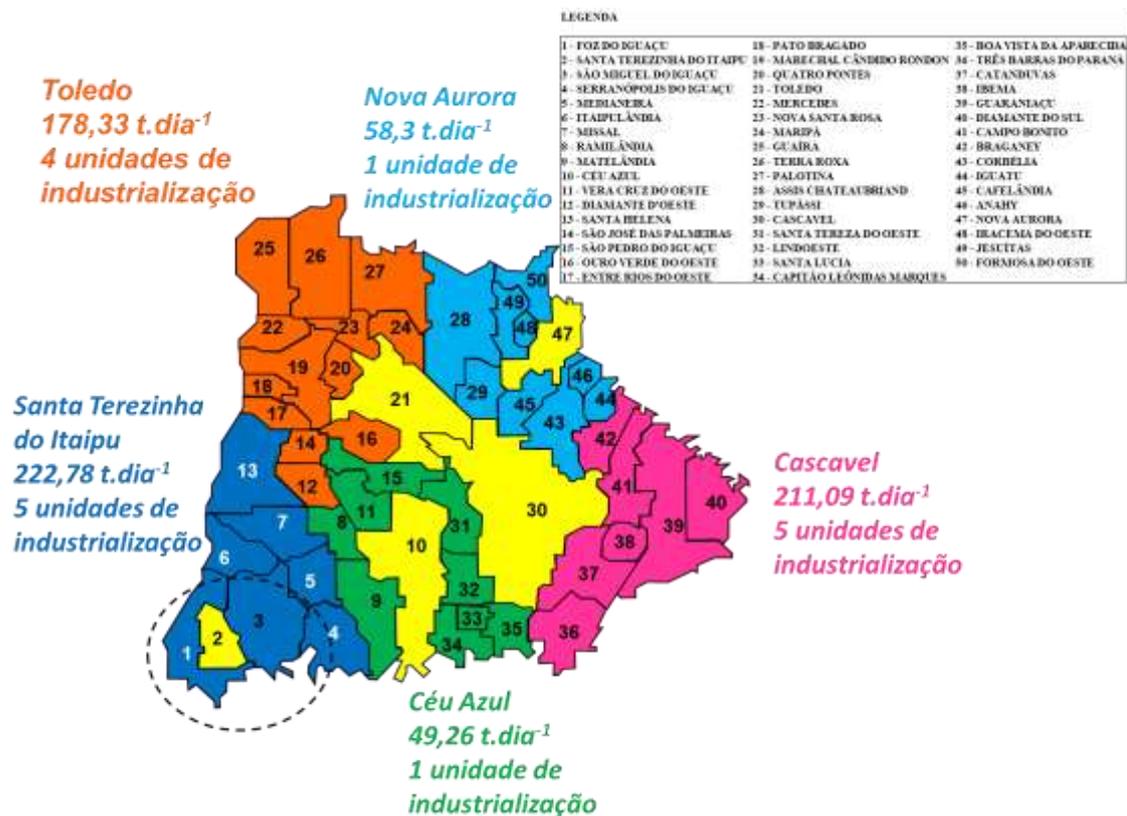


Figura 4.6 – Potencial de Geração de resíduos orgânicos domésticos de 50 municípios da Região Oeste do Estado do Paraná e os municípios âncoras com possibilidade de implantação de unidades de industrialização de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

Nesse cenário, para o desenvolvimento e, principalmente, escolha de uma rota de industrialização de RO, se faz também necessário a análise do ponto de vista da composição dos RO. Por exemplo, a simples utilização de resíduos orgânicos domésticos composto por resíduos de frutas, carnes, legumes, verduras e ovos pode não viabilizar os processos de transformação biológica. Nesses casos, seria necessário a adição de outros tipos de resíduos orgânicos com outras propriedades. Seria o caso dos RO das atividades de criação e engorda de animais, especificamente dos dejetos.

4.2.2. Caracterização da fonte geradora de resíduos sólidos orgânicos em atividades de criação e engorda de animais

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados do balanço de massa no ciclo produtivo de um processo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR. Para esse caso, foi realizado o levantamento de dados (até o mês de novembro de 2020) referente à população dos animais em cada etapa do ciclo produtivo de criação e engorda de suínos. Os

resultados demonstraram que o ciclo produtivo de criação e engorda de suínos apresentou um total de 3.000 matrizes (1.500 matrizes na etapa de cobertura e reprodução, 750 matrizes na gestação, e 750 matrizes na maternidade), 17.000 leitões (9.000 leitões na etapa da maternidade e 8000 na etapa da creche) e 15 suínos machos.

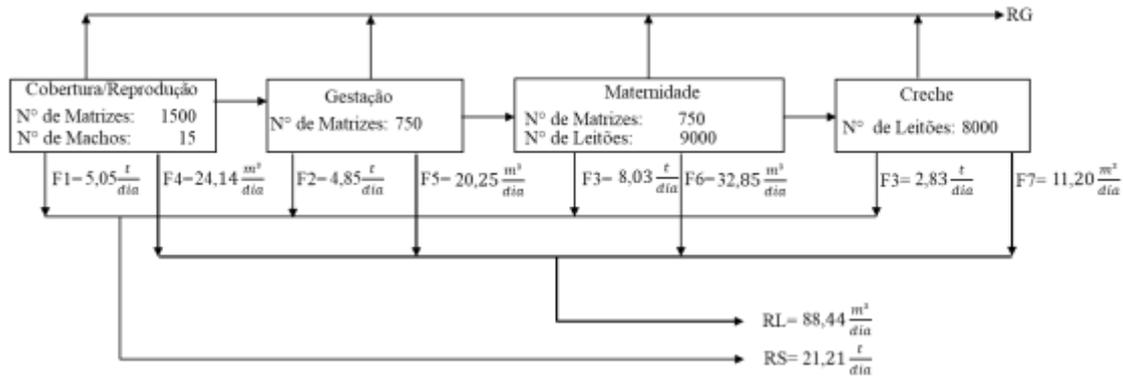


Figura 4.7 – Balanço de massa do ciclo produtivo de um processo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR.

Fonte: Elaboração própria.

O resultado do balanço de massa do ciclo produtivo da criação e engorda de suínos, mostra que nesse processo se consegue gerar 88,44 m³ dia⁻¹ de resíduos líquidos (urina) e 21,21 t.dia⁻¹ de resíduos sólidos orgânicos (dejetos).

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados do potencial de geração de resíduos sólidos orgânicos por etapa, no ciclo produtivo de um processo de criação e engorda de suínos, no município de Toledo-PR. Nessa figura, se constata que a etapa da maternidade consegue a maior geração de resíduos orgânicos, seguido pela etapa de cobertura/reprodução, na sequência segue a etapa de gestação e por último a etapa da creche.

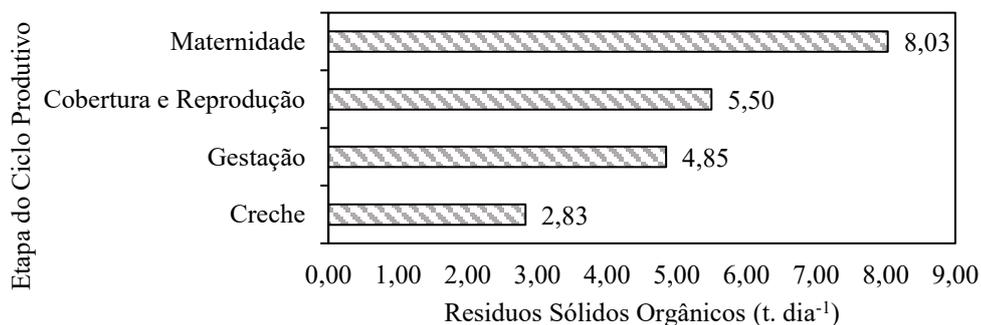


Figura 4.8 - Representação gráfica do balanço de massa do ciclo produtivo de um processo de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados da geração de dejetos em atividades de criação de suínos e bovinos. Esse levantamento corresponde para o período de 2016 a 2021.

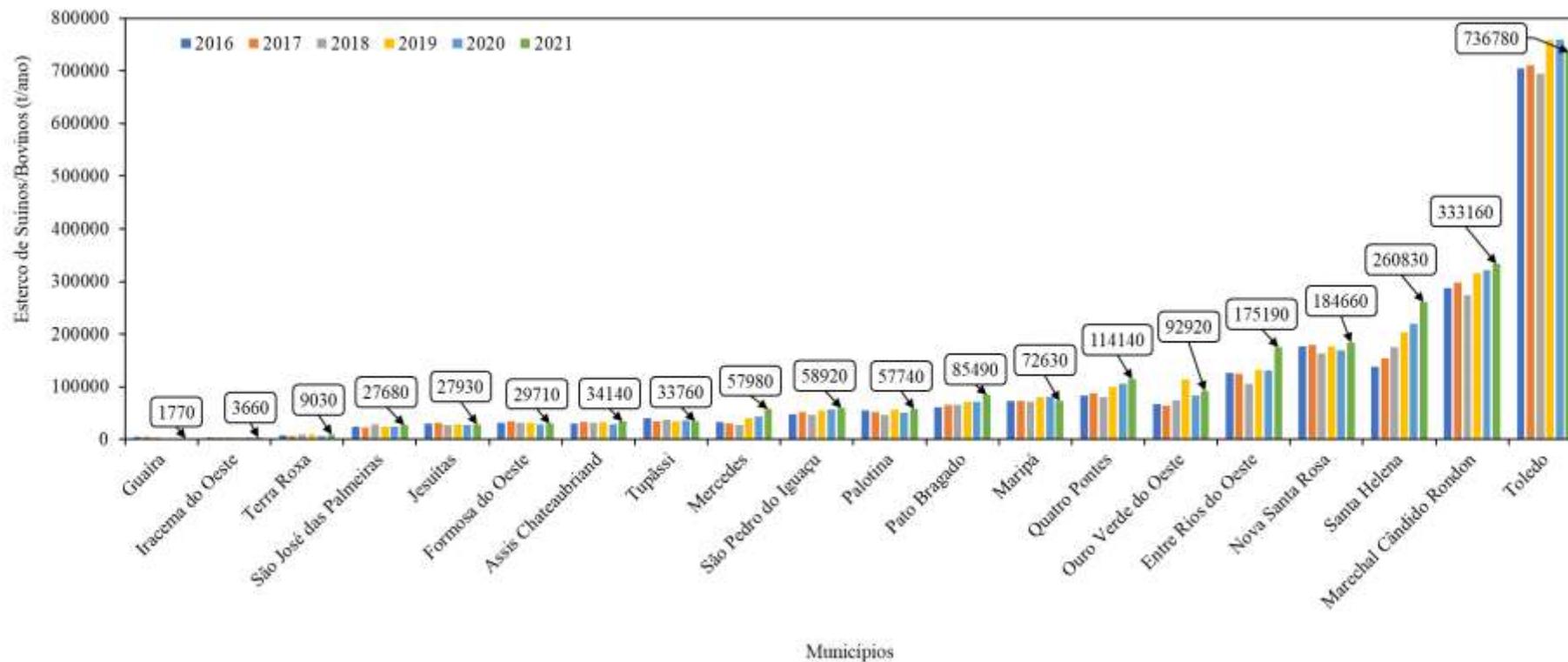


Figura 4.9 - Representação gráfica da geração histórica de esterco de suíno e bovino em atividades de criação e engorda de animais referente aos anos 2016 e 2021, no núcleo regional de Toledo.

Fonte: Adaptado de SEAB (2022).

Com base na Figura 4.9, o histórico mostra que os 4 principais municípios que geram mais esterco de suínos e bovinos são: Toledo-PR com 736.780 t.ano⁻¹ (1.980,59 t.dia⁻¹), seguido de Marechal Candido Rondon-PR com 333.160 t.ano⁻¹ (895,59 t.dia⁻¹), Santa Helena-PR com 260.830 t.ano⁻¹ (701,16 t.dia⁻¹), e Nova Santa Rosa-PR com 184.660 t.ano⁻¹ (496,39 t.dia⁻¹). A soma dos 20 municípios apresenta um potencial de geração anual de 2.400.141 toneladas de esterco de suínos e bovinos por ano.

4.2.3. Caracterização das fontes geradoras de resíduos orgânicos estudados em termos do teor de carbono, nitrogênio, umidade e o potencial hidrogeniônico

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados da sistematização do teor de carbono, nitrogênio e a relação C/N contido nos diversos resíduos orgânicos. Os resultados demonstraram que: a) os resíduos orgânicos domésticos, apresentaram composições de carbono sob a faixa de 3,11 a 86,1%, composições de nitrogênio sob a faixa de 0,22 a 5,88%, e relações C/N sob a faixa de 3,32 a 88,23; b) os resíduos industriais, apresentaram composições de carbono sob a faixa de 7,79 a 59,9%, composições de nitrogênio sob a faixa de 0,08 a 9,08%, e relações C/N sob a faixa de 4,58 a 158,97; c) os esterco de animais, apresentaram composições de carbono sob a faixa de 8,82 a 45%, composições de nitrogênio sob a faixa de 0,57 a 5,5%, e relações C/N sob a faixa de 4,8 a 27; e d) os resíduos de atividades rurais, apresentaram composições de carbono sob a faixa de 20,5 a 73,52%, composições de nitrogênio sob a faixa de 0,08 a 9,08%, e relações C/N sob a faixa de 17,94 a 733,33. Com essas informações foram realizadas as valorações dos resíduos orgânicos em termos do conteúdo de carbono e nitrogênio a ser aproveitado nos processos de transformação desses resíduos em produtos de valor agregado.

Tabela 4.2 - Teor de carbono, nitrogênio e relação C/N contido nos diversos RO.

Resíduos Orgânico	%C	%N	C/N	Fonte
Cana de milho	35	1,3	26,92	VARNERO & ARELLANO (1990)
Palha de trigo	31	0,62	50,41	
Palha de aveia	20,5	0,53	38,68	
Palha de cevada	58	0,64	90,63	
Palha de arroz	41	0,65	63,08	
Palha de fava	30,5	1,7	17,94	
Tomate	28,5	2,6	10,96	
Batata	30	0,34	88,23	
Beterraba	30	2	15	
Rabanetes	30	2,5	12	
Folhas secas	37,5	1	37,5	
Serragem	44	0,06	733,33	

Continuação da Tabela 4.2

Resíduos Orgânico	%C	%N	C/N	Fonte
Restos de capina	48,84	2,29	21	LOUREIRO <i>et al.</i> (2007)
Folhas de jambeiro	50,26	0,88	57	
Folhas de mangueira	46,78	0,82	56	
Restaurante Universitário	45,37	2,97	15	
Esterco Bovino	44,44	2,04	22	
Rúmen	29,99	1,32	22,72	DA SILVA (2007)
Incubatório	11,68	2,55	4,58	
Cereais	48,31	2,08	23,23	
Lodos de lagoa	19,48	3,92	4,97	
Lodo de flotador	59,99	7,29	8,23	
Cinza de caldeira	7,79	0,08	97,38	FIORI <i>et al.</i> (2008)
Resíduos de vegetais de cereais	40,37	3	13,46	
Sólidos de peneira rotativa	35,69	4,5	7,94	
Cama de aviário	26,5	2,12	12,5	AIRES (2010)
Casca de arroz	23,68	0,21	112,76	
Serragem	28,28	0,08	353,5	
Palha de cana	23,05	0,05	461	
Casca de ovos	10,91	0,92	11,85	
Alface	48,6	2,7	18	KIEHL (2010)
Alfafa	48,6	2,7	18	
Alho	39,75	2,65	15	
Batata	25	1	25	
Cenoura	68,85	2,55	27	
Couve	53,75	2,15	25	
Nabo	44	1	44	
Repolho	43,2	3,6	12	
Tomate	39,6	3,3	12	
Restos de frutas	51,68	1,52	34	
Borra de café	50,6	2,3	22	
Bagaço de laranja	12,78	0,71	18	
Serragem crua	56,21	0,11	511	
Resíduos de alimentos	46,67	3,54	13,18	
Resíduos de suínos			4,8	
Caras de porco	36,2	2,74	13,21	JIANG <i>et al.</i> (2011)
Pé de milho	41,9	1,01	41,48	
Casca de Banana	25,48	0,52	49	PEDROSA <i>et al.</i> (2013)
Poda de Jurema-preta	29,37	0,89	33	
Poda de Marmeleiro	25,83	1,23	21	
Esterco ovino	28,89	1,07	27	
Desperdício de alimentos cru	56,3	2,3	24,5	ZHANG <i>et al.</i> (2013)
Resíduos sólidos de alimentos	51,8	2,9	17,9	
Resíduos líquidos de alimentos	72,5	1,3	55,8	
Esterco de coelho	33	3,6	9,16	BASSACO (2014)
Conteúdo de rúmen de bovinos	36	1,9	18,95	
Esterco de ovinos	28	2,2	12,73	
Esterco de bovinos	29	1,8	16,11	
Bagaço de carne	19,8	0,9	22	OSÉ (2014)
Esterco de frango			10	KAFLE & CHEN (2016)
Esterco de cavalo			23	
Esterco de cabra			20	
Esterco bovino leiteiro			25	
Esterco de suíno			12	

Continuação da Tabela 4.2

Resíduos Orgânico	%C	%N	C/N	Fonte
Talos de milho	42,43	0,82	51,74	SHEN <i>et al.</i> (2016)
Esterco de suíno	8,82	0,57	14,42	
Resíduos de alimento	44,4	2,36	18,81	GUERI <i>et al.</i> (2017)
Resíduos de frigoríficos	49,1	1,39	35,32	NUNES <i>et al.</i> (2017)
Cama de aviário	34,2	3,2	10,68	
Esterco de poedeira	30,7	4,21	7,29	
Resíduo de incubatório	22,6	2,62	8,63	
Torta de filtro de usinas de cana de açúcar	39,3	1,52	25,86	
Bagaço de cana de açúcar	46,1	0,29	158,97	
Lodo de caleiro - Indústria do couro	24,4	3,92	6,22	
Palha de café	48	1,2	40	VIONE <i>et al.</i> (2018)
Casca de Arroz	35,2	1,62	22	
Dejeto de Aves	26	3,38	8	
Dejetos de suínos	26,6	2,3	12	
Dejetos de bovinos	17,4	1,24	14	
Lodo de avícola	43,27	9,08	4,77	CONTE (2019)
FORSU	43,24	2,2	19,7	
25% de palha de milho + 75% esterco de bovino			22	MACIAS-CORRAL <i>et al.</i> (2019)
50% de palha de milho + 50% esterco de bovino			27	
75% de palha de milho + 25% esterco de bovino			38	
100% esterco de bovino			21	
Esterco de frango	37,63	4,33	8,69	CHANG <i>et al.</i> (2020)
Palha de trigo	62,35	0,73	85,41	
Pó de serra	67,70	0,41	165,12	
Casca de pinheiro	73,52	0,44	167,09	
Casca de amendoim	52,77	1,06	49,78	
Turfa lenhosa	62,84	0,59	106,51	
Resíduos de alimento	45,13	4,95	9,12	DE ARAÚJO <i>et al.</i> (2021)
Esterco de vaca	42,5	2,25	18,89	MENGQI <i>et al.</i> (2021)
Esterco de porco	45	3,5	12,86	
Esterco de aves	37,5	5,5	6,82	
Produtos Lácteos	29,72	2,06	14,46	SLOPIECKA <i>et al.</i> (2022)
Queijo	29,8	1,72	17,38	
Leite	5,39	1,63	3,32	
Leite de bebê	4,41	0,26	17,3	
Iogurte	12,8	0,92	14,06	
Queijo tipo cottage	51	2,95	17,31	
Manteiga	74,9	4,31	17,38	
Óleo vegetal	86,1	1,78	48,5	
Óleo vegetal usado	74,63	2,78	26,9	
Gorduras, óleos e graxas do processamento de alimentos	70,28	3,49	20,15	
Pele e polpa de maçã	47,6	2,94	16,22	
Pele e polpa de laranja	5,75	0,6	9,61	
Casca e polpa de banana	5,64	0,51	11,2	
Uvas	6,63	0,38	17,61	
Alface e Alface podre	41,7	2,54	16,48	
Batatas	11,1	0,29	38,89	

Continuação da Tabela 4.2

Resíduos Orgânico	%C	%N	C/N	Fonte
Tomates	4	0,22	18,39	
Repolho	46,8	5,88	7,96	
Cebola	38,4	5,15	7,47	
Produto de cereais	41,79	2,02	20,7	
Produtos de padaria	43,14	2,18	19,85	
Carne mista	25,01	1,39	18,06	
Carne cozida	22,8	1,31	17,46	
Carne de porco cozido	29	1,48	19,72	
Carne de frango cozido	21,73	1,35	16,21	
Cordeiro cozido	26,51	1,5	17,69	SLOPIECKA <i>et al.</i> (2022)
Pedaços de presunto	44,2	2,5	17,7	
Carne fatiada	46,1	3,73	12,39	
Miudezas	32,66	1,99	16,43	
Produtos à base de pescado	17,72	1,01	17,59	
Ovo inteiro	11,25	1,07	10,57	
Ovos cozidos	19,37	1,22	15,99	
Ovos em conserva	19,63	1,16	16,94	
Ovos crus	14,8	0,87	17,14	
Especiarias e sopas	23,85	1,73	13,82	
Casca de Ovo	3,11	0,238	13,06	
Polpa de mandioca	39,35	0,69	56,57	RUANGJANDA <i>et al.</i>
Substrato de cogumelo gasto	38,52	0,321	112,58	(2022)
Casca de fruta	22,95	0,349	65,81	

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados da sistematização do teor de umidade em diversos resíduos orgânicos. Os resultados alcançados nesse cenário, demonstram que os resíduos orgânicos domésticos apresentaram o maior conteúdo de umidade tendo uma faixa de umidade de 69,79 a 97,79 %, no caso dos resíduos industriais apresentaram umidades sob a faixa de 0,5 a 87 %, no caso dos resíduos de animais apresentaram umidades sob a faixa de 36,16 a 75 %, e no caso dos resíduos provenientes de atividades rurais apresentaram baixas umidades sob a faixa de 7,14 a 36,47 %. Com essas informações se realizaram a valoração dos resíduos orgânicos em base ao conteúdo de matéria seca a ser aproveitado nos processos de transformação desses resíduos em produtos de valor agregado.

Tabela 4.3 – Teor de umidade dos resíduos orgânicos

Tipo de Resíduo	Umidade %	Fonte
Restos de capina	18,4	
Folhas de jambeiro	14,1	
Folhas de mangueira	15	LOUREIRO <i>et al.</i> (2007)
Restaurante universitário	80,4	
Esterco bovino	65,5	
Rúmen	87	
Resíduos de Incubatório	34	DA SILVA (2007)
Cereais	11,09	
Lodo de lagoa	80,15	

Continuação da Tabela 4.3

Tipo de Resíduo	Umidade %	Fonte	
Lodo de flotador	55,7	DA SILVA (2007)	
Cinza de caldeira	0,5		
Esterco de suíno	70	SEDIYAMA <i>et al.</i> (2008)	
Casca de arroz	14,46	AIRES (2010)	
Serragem	24,47		
Palha de cana	18,12		
Casca de ovos	2,93		
Caras de porco	71,2	JIANG <i>et al.</i> (2011)	
Pé de milho	8,9		
Casca de Banana	85,36	PEDROSA <i>et al.</i> (2013)	
Poda de Jurema-preta	31,3		
Poda de Marmeleiro	36,47		
Esterco ovino	36,18		
Esterco de coelho	63	BASSACO (2014)	
Conteúdo de rúmen de bovinos	82		
Esterco de ovinos	54		
Esterco de bovinos	75		
Estrume de porco	76,33	SHEN <i>et al.</i> (2016)	
Talos de milho	13,37		
Resíduos de frigoríficos	81,2	NUNES <i>et al.</i> (2017)	
Cama de aviário	11,6		
Esterco de poedeira	60,1		
Resíduo de incubatório	31,7		
Torta de filtro de bagaço	77,2		
Bagaço	40,4		
Lodo de caleiro – Indústria de couro	60,8		
Palha de café	5,8		
Acelga	97,79		LEITE <i>et al.</i> (2017)
Banana	85,82		
Batata	87,72		
Berinjela	94,84		
Cenoura	87,78	LEITE <i>et al.</i> (2017)	
Chuchu	96,02		
Coentro	92,24		
Couve	93,28		
Jerimum	93,35		
Melancia	95,28		
Melão espanhol	91,82		
Melão português	94,74		
Mamão	93,87		
Pepino	97,59		
Pimentão	95,88		
Repolho	96,35		
Tomate	97,21		
Lodo de Avícola	94,92		CONTE (2019)
FORSU	69,79		
Casca de batatas	70,7	CATHERINE & TWIZERIMANA (2022)	

Continuação da Tabela 4.3

Tipo de Resíduo	Umidade %	Fonte
Estrume de frango	81,28	CHANG <i>et al.</i> (2020)
Palha de trigo	7,14	
Pó de serra	8,33	
Casca de pinheiro	8,79	
Casca de amendoim	7,85	
Turfa lenhosa	14,04	

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados da sistematização do potencial hidrogeniônico (pH) nos diversos resíduos orgânicos. Os resultados apresentaram que nesse cenário, os resíduos orgânicos domésticos apresentaram um pH desde valores ácidos até alcalinos sob a faixa de 3,55 a 9,41, no caso dos resíduos industriais apresentaram um pH desde valores ácidos até alcalinos sob a faixa de 4,9 a 11,9 e no caso dos resíduos de animais apresentaram um pH com valores alcalinos sob a faixa de 7,62 a 9,4. Com essas informações se realizaram a valoração dos resíduos e seu potencial de aproveitamento nos processos de transformação desses resíduos em produtos de valor agregado.

Tabela 4.4 – Potencial hidrogeniônico dos resíduos orgânicos

Tipo de Resíduo	pH	Fonte
Rúmen	8,5	DA SILVA (2007)
Resíduos de Incubatório	9	
Cereais	8,7	
Lodo de lagoa	8,9	
Lodo de flotador	8,6	
Cinza de caldeira	8,8	
Resíduos de vegetais de cereais	5	FIORI <i>et al.</i> (2008)
Sólidos de peneira rotativa	5,3	
Cama de aviário	7	
Resíduos de alimentos	6,5	ZHANG <i>et al.</i> (2011)
Resíduos de suínos	7,62	
Desperdício de alimentos crus	4,2	ZHANG <i>et al.</i> (2013)
Resíduos sólidos de alimentos	4,4	
Resíduos líquidos de alimentos	4,1	
Esterco de coelho	9,4	BASSACO (2014)
Conteúdo de rúmen de bovinos	9,3	
Esterco de ovinos	9,4	
Esterco de bovinos	8,7	
Resíduos de suínos	7,87	KAFLE & CHEN (2016)
Esterco de frango	7,95	
Esterco de cavalo	8,24	
Esterco de cabra	8,13	
Esterco bovino leiteiro	8,16	
Resíduos de frigoríficos	6,6	NUNES <i>et al.</i> (2017)
Cama de aviário	8,5	
Esterco de poedeira	7,9	
Resíduo de incubatório	7,4	

Continuação da Tabela 4.4

Tipo de Resíduo	pH	Fonte
Resíduo de incubatório	5,6	NUNES <i>et al.</i> (2017)
Torta de filtro de bagaço	5,5	
Lodo de caleiro – Indústria de couro	11,9	
Palha de café	4,9	
Acelga	7,97	LEITE <i>et al.</i> (2017)
Banana	3,71	
Batata	3,81	
Berinjela	7,55	
Cenoura	4,26	
Chuchu	5,5	
Coentro	8,49	
Couve	8,01	
Jerimum	5,61	
Melancia	4,26	
Melão espanhol	4,44	
Melão português	4,31	
Mamão	3,67	
Pepino	5,39	
Pimentão	5,58	
Repolho	7,67	
Tomate	5,58	
Lodo de Avícola	7,95	CONTE (2019)
FORSU	5,76	
Casca de batata	4,9	CATHERINE & TWIZERIMANA (2022)
Substrato de cogumelo gasto	7,45	RUANGJANDA <i>et al.</i> (2022)
Azola (planta aquática)	7,35	
Cascas de ovo	9,41	
Casca de fruta	4,94	
Polpa de mandioca	5,77	
Produtos Lácteos	6,29	SLOPIECKA <i>et al.</i> (2022)
Gorduras, óleos e graxas	3,55	
Sorvete	4,84	
Frutas e Vegetais	5,69	
Produtos de cereais	5,84	
Produtos de padaria	5,5	
Produtos à base de carne	6,2	
Produtos à base de pescado	6,49	
Produtos à base de ovos	7,43	
Adoçantes e doces	5,49	
Bebidas	4,25	

Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, os resultados apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 mostram as características dos resíduos orgânicos em termos do teor de carbono, teor de nitrogênio, potencial hidrogeniônico e a umidade. Com base nesses dados é possível identificar as potencialidades de aproveitamento nos processos de transformação desses resíduos em produtos de valor agregado.

Na Tabela 4.5 são apresentados a concentração dos resultados do levantamento de dados referente ao teor médio de carbono, nitrogênio, a relação C/N e o pH nos resíduos orgânicos comumente gerados na área urbana e na área rural. Os resultados demonstraram que dos 6 resíduos selecionados: a) a maior concentração de carbono foi encontrada nos resíduos provenientes das verduras, seguido dos legumes, carne, dejetos de suíno, frutas, e ovos; b) com relação à maior concentração de nitrogênio foram encontrados nos resíduos provenientes das verduras, seguido dos dejetos de suíno, legumes, carne, ovos, e frutas; c) no caso da relação de carbono/nitrogênio o maior valor foi encontrado nos resíduos provenientes das frutas, verduras, carne, legumes, ovos, e dejetos de suínos; e d) no caso do potencial de hidrogênio as frutas, os legumes e a carne possuem características ácidas e os ovos, os dejetos de suínos e as verduras possuem características alcalinas.

Tabela 4.5 – Teor médio de carbono, nitrogênio, a relação C/N e o potencial hidrogeniônico (pH) dos resíduos orgânicos comumente gerados na área urbana e rural no Brasil

Tipo de Resíduo	% de Carbono	% Nitrogênio	Relação C/N	pH
Frutas	20,86	0,67	31,14	4,11
Carne	28,56	1,72	16,61	6,21
Legumes	34,76	2,2	15,8	5,96
Verduras	46,3	2,64	17,54	7,69
Ovos	13,18	0,92	14,33	7,83
Dejeto de Suínos	26,6	2,3	11,57	7,74

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados referentes a disponibilidade de conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos do Brasil. Os resultados demonstraram que no Brasil: i) a maior quantidade de carbono gerado nos ROD é proveniente dos desperdícios de frutas alcançando valores de 24.209,31 t.dia⁻¹, seguido pelos desperdícios de legumes (5.244,15 t.dia⁻¹), carne (4.639,35 t.dia⁻¹), verduras (2.686,76 t.dia⁻¹) e ovos (152,94 t.dia⁻¹); ii) a maior quantidade de nitrogênio gerado nos ROD é proveniente dos desperdícios de frutas alcançando valores de 771,56 t.dia⁻¹, seguido pelos desperdícios de legumes (330,72 t.dia⁻¹), carne (278,82 t.dia⁻¹), verduras (153,2 t.dia⁻¹) e ovos (10,6 t.dia⁻¹); e iii) a relação média de C/N dos resíduos orgânicos domésticos gerados no Brasil atinge aos 23,90. Esse valor está abaixo da faixa ótima de 25 a 35 recomendada para o tratamento por processos de biodigestão.

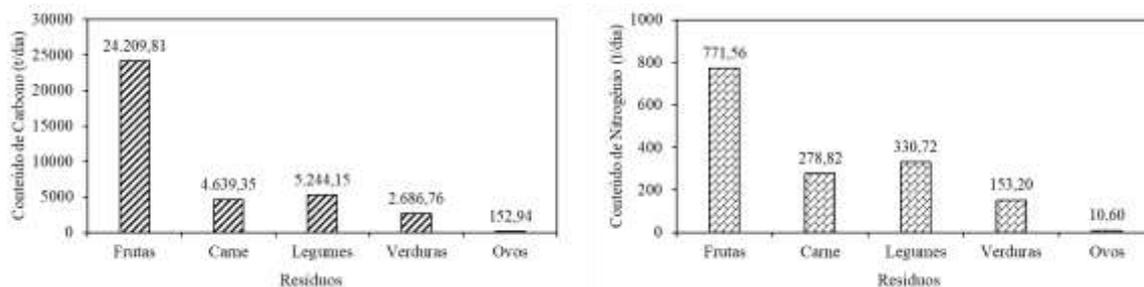


Figura 4.10 - Representação gráfica do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos em Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados referentes a disponibilidade de conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos no Estado do Paraná. Os resultados mostram que, no Estado de Paraná,: i) a maior quantidade de carbono gerado nos ROD é proveniente dos desperdícios de frutas alcançando valores de 876,76 t.dia⁻¹, seguido pelos desperdícios de legumes (283,46 t.dia⁻¹), carne (250,77 t.dia⁻¹), verduras (145,23 t.dia⁻¹) e ovos (8,27 t.dia⁻¹); ii) a maior quantidade de nitrogênio gerado nos ROD é proveniente dos desperdícios de frutas alcançando valores de 27,94 t.dia⁻¹, seguido pelos desperdícios de legumes (17,88 t.dia⁻¹), carne (15,07 t.dia⁻¹), verduras (8,28 t.dia⁻¹) e ovos (0,57 t.dia⁻¹); e iii) a relação média de C/N dos resíduos orgânicos domésticos gerados no Estado do Paraná atinge aos 22,43. Esse valor está abaixo da faixa ótima de 25 a 35 recomendada para o tratamento por processos de biodigestão.

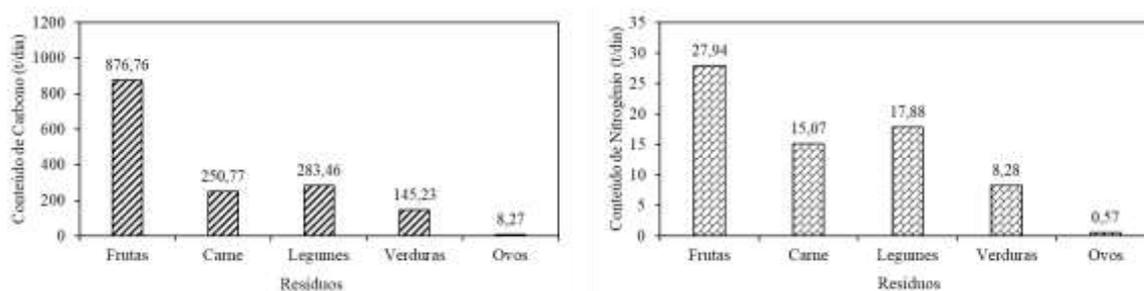


Figura 4.11 - Representação gráfica do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos no Estado do Paraná.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados referentes a disponibilidade do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos e numa atividade de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR. Os resultados mostram que no município de Toledo-PR: i) a maior quantidade de carbono gerado nos ROD é proveniente dos desperdícios de frutas alcançando valores de 10,86 t.dia⁻¹, seguido pelo dejetos de suínos

(5,64 t.dia⁻¹), seguido pelos desperdícios de legumes (3,51 t.dia⁻¹), carne (3,11 t.dia⁻¹), verduras (1,8 t.dia⁻¹) e ovos (0,1 t.dia⁻¹); ii) a maior quantidade de nitrogênio gerado nos ROD é proveniente do dejetos de suíno alcançando valores de 0,49 t.dia⁻¹, seguido pelos desperdícios de frutas (0,35 t.dia⁻¹), seguido pelos desperdícios de legumes (0,22 t.dia⁻¹), carne (0,19 t.dia⁻¹), verduras (0,1 t.dia⁻¹) e ovos (0,01 t.dia⁻¹); e iii) a relação média de C/N dos resíduos orgânicos domésticos gerados no Município de Toledo/PR atinge aos 18,51. Esse valor está abaixo da faixa ótima de 25 a 35 recomendada para o tratamento por processos de biodigestão.

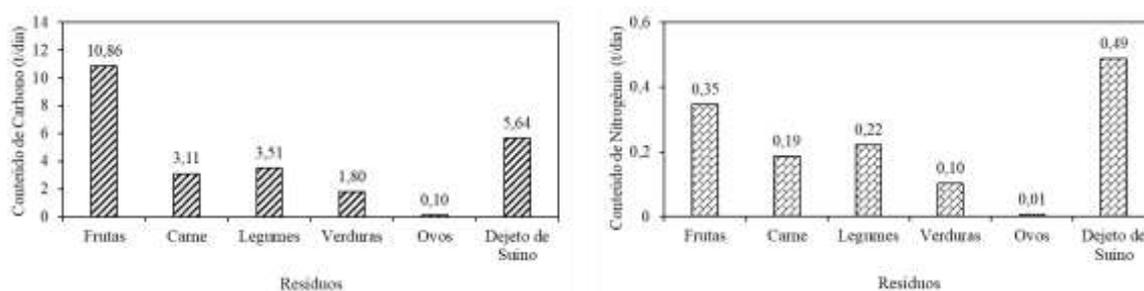


Figura 4.12 - Representação gráfica do conteúdo de carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos domésticos e em uma atividade de criação e engorda de suínos no município de Toledo-PR.

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 pode-se constatar que a geração de resíduos orgânicos domésticos e a sua composição representam importantes fontes de carbono e nitrogênio. Especificamente, a fonte de carbono se encontra, em maior quantidade, nos resíduos provenientes das frutas, na sequência segue os dejetos de suíno, as legumes, a carne, as verduras, e ovos. Com relação as fontes de Nitrogênio, os resíduos orgânicos com maiores quantidades são os dejetos de suíno, na sequência segue as frutas, os legumes, a carne, as verduras e os ovos. A relação média de C/N calculados se encontram abaixo da faixa recomendada para ser tratados por processos de biodigestão.

Estas informações expostas mostram que a caracterização dos resíduos orgânicos domésticos e os resíduos provenientes de atividades de criação e engorda de animais é fundamental para definir a melhor composição na dosagem da matéria prima, uma vez que quando não levado em conta esta situação o processo de transformação biológica, em produtos de valor agregado, pode ser comprometido. De modo geral os resultados apontam que a eficiência de conversão depende da dosagem do tipo de resíduo orgânico em função do conteúdo de carbono e nitrogênio.

4.2.4. Caracterização dos resíduos orgânicos para a alternativa de processamento distribuído

Na Figura 4.13 se apresenta o resultado do levantamento do número de bairros no município de Toledo-PR, com base na utilização do Google Maps. Os resultados mostram que, até o mês de julho de 2022, o Município de Toledo contava com 1.859 bairros.



Figura 4.13 – Levantamento do número de bairros no município de Toledo utilizando o Google Maps.
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.14 se apresenta o resultado do levantamento de dados referente ao número de lotes (residências) em um bairro do município de Toledo-PR. No levantamento de dados foram contabilizadas o número de residências utilizando uma amostra de 5 bairros. Os resultados demonstraram que existe uma média de 19 residências por bairro.



Figura 4.14 – Levantamento de dados referente ao número de casas em um bairro localizadas no município de Toledo utilizando o Google Maps.
Fonte: Elaboração própria.

Com base dos resultados referente ao número de quarteirões (1.859) e a média do número de residências por quarteirão (19), pela multiplicação desses resultados, a estimativa de residências existentes no município de Toledo/PR é da ordem de 35.321 residências.

Considerando que cada residência abriga uma família, podemos deduzir que existem 35.321 famílias no total. Logo, a quantidade de pessoas por família é obtida com base da divisão da população estimada pelo IBGE (de 142.645 habitantes) pelo número de residências, cujo resultado foi, aproximadamente, 4 pessoas por família (residência).

Considerando que por dia são gerados $1,04 \text{ kg}\cdot\text{dia}^{-1}\cdot\text{hab.}^{-1}$ de RSU, então cada família aproximadamente, consegue gerar $4,16 \text{ kg}\cdot\text{dia}^{-1}$ de RSU, dos quais $2,18 \text{ kg}\cdot\text{dia}^{-1}$ são resíduos orgânicos.

Dessa forma, os resultados obtidos nesta caracterização possibilitam determinar o número de fontes de geração de resíduos orgânicos (RO) e a quantidade diária de RO gerada por fonte (residência). Esses resultados são utilizados no planejamento e projeto das tecnologias do processamento distribuído dos resíduos orgânicos domésticos (processamento em cada residência).

4.2.5. Especificação da disponibilidade da carga de resíduos orgânicos gerados para a alternativa de processamento centralizado

Na Tabela 4.6 são apresentados os dados referentes à quantidade de RO gerados na área doméstica e em atividades de criação e engorda de animais do município de Toledo-PR.

Tabela 4.6 – Quantidade de RO gerados no município de Toledo/PR

Procedência do RO	Quantidade	Geração de RO (t/dia)
Área doméstica	35.321 famílias	77,69
Núcleo regional de Toledo	Atividade de criação e engorda de suínos/bovinos	1.980,59
Total		2.058,28

Fonte: Elaboração própria.

Com base aos dados apresentados na Tabela 4.6, pode-se concluir que, aproximadamente, a capacidade de geração de RO por dia no município de Toledo-PR atinge aos $2.058,28 \text{ t}\cdot\text{dia}^{-1}$.

Desse total, com base dos resultados apresentados na Figura 4.15 e o uso do *software* descrito no item 4.4.1, foi realizado o cálculo da relação carbono/nitrogênio para a mistura de RO a ser processados utilizando processos de biodigestão para o caso do município de Toledo/PR. Verificou-se que é possível processar a totalidade dos resíduos orgânicos domésticos ($77,69 \text{ t.dia}^{-1}$) juntamente com a mesma quantidade de resíduos orgânicos provenientes de processos de criação e engorda de suínos/bovinos. No entanto, para alcançar os valores ideais de relação C/N (recomendada entre 25 e 35) foi necessário ajustar a relação C/N da mistura para 25,27. Para isso, foi acrescentada à mistura anterior uma quantidade de $34,11 \text{ t.dia}^{-1}$ de resíduos compostos por resíduos provenientes da poda de árvores representando o 10% do total da mistura, seguido da palha de trigo com 35%, da serragem de madeira com 20% e dos talos de milho com 35%. A adição desses resíduos tem como principal objetivo aumentar o valor da relação C/N da mistura total.

Na Figura 4.15 se apresenta o cálculo da capacidade de processamento do processo centralizado, neste caso utilizando o *Software* desenvolvido no item 4.4.1, relacionado com o cálculo da relação C/N ideal para o processamento desses resíduos.

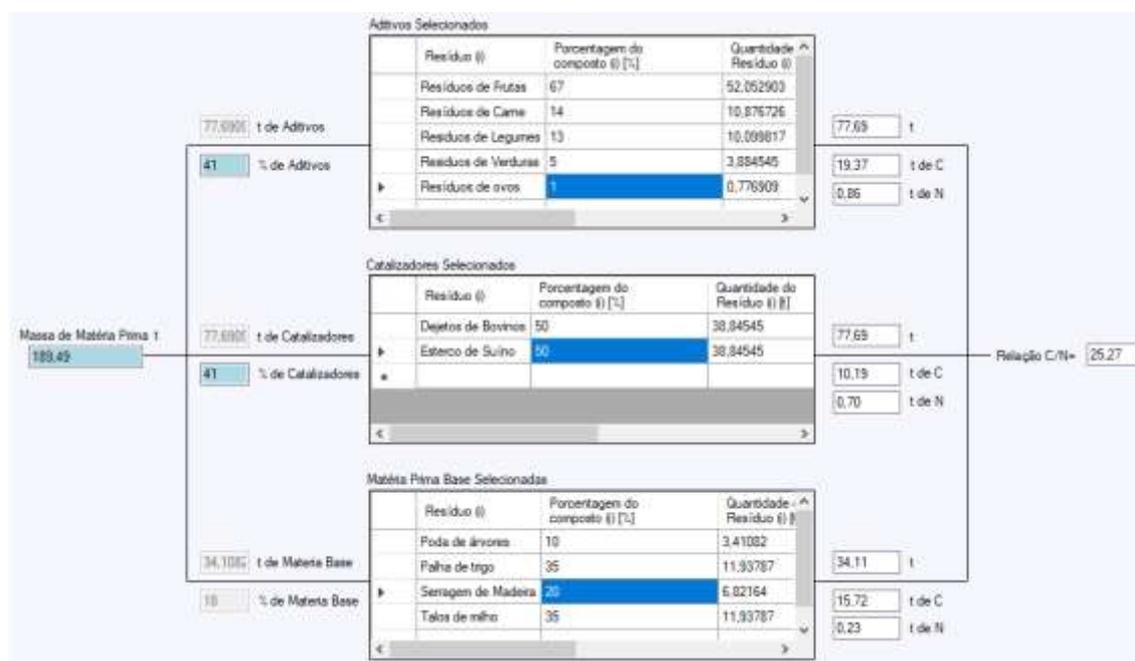


Figura 4.15 – Cálculo da capacidade de processamento num processo centralizado utilizando o Software para o cálculo da relação C/N ideal para o processamento desses resíduos.

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados apresentados na Figura 4.15, demonstram que, para obter uma relação ideal de C/N de 25,27 são necessários a mistura de $77,69 \text{ t.dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos domésticos, $77,69 \text{ t.dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos provenientes de atividades de criação e

engorda de suínos/bovinos e 34,11 t.dia⁻¹ de uma mistura de resíduos proveniente da poda de árvores, seguido da palha de trigo, serragem de madeira e talos de milho.

Desta forma, a capacidade da unidade industrial centralizada, para o processamento de resíduos orgânicos seria de 189,49 t.dia⁻¹. O excedente de resíduos orgânicos da área rural pode também justificar a implantação de 10 unidades industriais com capacidade de 189,49 t.dia⁻¹.

4.3. Resultados da avaliação das vantagens e desvantagens dos métodos, processos e tecnologias convencionais para o processamento de resíduos orgânicos

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados da avaliação das vantagens e desvantagens do processo de compostagem de resíduos orgânicos. Os resultados dessa etapa demonstram as características do processo, bem como os fatores operacionais que devem ser levados em conta na proposição das novas tecnologias.

Tabela 4.7 – Vantagem e Desvantagem do processo compostagem para o processamento de resíduos orgânicos.

Critérios	Vantagem	Desvantagem
1) construção, implantação e manutenção do processo.	É um processo econômico, não precisa de equipamentos sofisticados.	Precisa de um espaço grande para a realização do tratamento de grandes volumes de RSO.
2) elementos biológicos para a transformação de resíduos orgânicos.	Os elementos biológicos compostos por microrganismos aeróbicos são gerados de forma natural no meio, sem a necessidade de uma inoculação biológica externa (SÁNCHEZ <i>et al.</i> , 2017).	
3) temperatura de operação.	O processo não depende da temperatura de operação devido a que acontecem reações de decomposição de ordem exotérmico (BERTOLDI <i>et al.</i> , 1988).	
4) Relação C/N de operação.		O funcionamento do processo de compostagem depende do conteúdo de C, N e a relação C/N nos resíduos orgânicos a serem transformados. Para um funcionamento ótimo, essa relação deverá de ficar entre 25 e 35 (KIEHL, 2012).
5) pH de operação.	O processo não depende do pH (FRITSCH, 2006).	

Continuação da Tabela 4.7

Critérios	Vantagem	Desvantagem
6) umidade de operação.		O processo precisa de um teor de umidade ótimo para evitar a inibição microbiana. Para um funcionamento ótimo a umidade deverá de ficar entre 50 e 60% (FERNANDES & SILVA, 1999).
7) tempo de operação.		Precisa de tempos de residência longos para a biodegradação (28 a 77 dias), o tempo de operação é dependente da relação de C/N nos resíduos orgânicos (JIA <i>et al.</i> , 2021; DELGADO <i>et al.</i> , 2019).
8) necessidade de sistemas de controle.		Necessita de sistemas que permitam a aeração dos RSO para fornecer ar aos microrganismos aeróbicos. Precisa de sistemas de controle para manter a umidade do substrato sobre a faixa ótima de umidade.
9) sistemas de moagem.	O processo não precisa de sistemas de moagem para reduzir o tamanho dos RSO. O processo trabalha otimamente com partículas de 25 e 75 mm (FERNANDES & SILVA, 1999)	
10) capacidade em termos de volume de resíduos a serem degradados.		O processo é utilizado para o tratamento de pequenos volumes de resíduos orgânicos.
11) controle de patógenos.	Maximiza a morte de patógenos altamente perigosos (SINGH <i>et al.</i> , 2012).	
12) redução de metais pesados nos produtos digeridos.		Não consegue reduzir o conteúdo de metais pesados no produto resultante. Para realizar a redução desses metais precisa de uma inoculação microbiológica para realizar a passivação desses metais (WU <i>et al.</i> , 2022).
13) redução da porcentagem de massa de resíduos orgânicos pelo processo.	Permite reduzir a massa dos resíduos orgânicos até um 61,7% (CHAVEZ-RICO <i>et al.</i> , 2022).	
14) produtos.	Permite a transformação dos RSO em compostos orgânicos estáveis, podendo ser utilizados como fertilizantes.	
15) o custo do processo.	É econômico opera ao ar livre.	

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados da avaliação das vantagens e desvantagem do processo de biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos. O resultado dessa etapa demonstra as características do processo, bem como os fatores operacionais.

Tabela 4.8 – Vantagem e Desvantagem do processo de biodigestão anaeróbica para o processamento de resíduos orgânicos.

Critérios	Vantagem	Desvantagem
1) construção de equipamentos para o processo.		A construção, instalação e a manutenção são elevadas. Segundo CARRILHO (2012), menciona que em alguns casos esse processo não são viáveis financeiramente.
2) elementos biológicos para a transformação de resíduos orgânicos.	Os elementos biológicos compostos por microrganismos anaeróbicos são gerados de forma natural no meio, sem a necessidade de uma inoculação biológica externa.	
3) temperatura de operação.	O processo pode acontecer numa ampla faixa de temperatura de 0 a 97°C (MALINOWSKY, 2016).	A produção de biogás, a reprodução de microrganismos como o tempo de operação precisa de temperaturas estáveis no processo de biodigestão anaeróbica (ZOHOROVIC <i>et al.</i> , 2016).
4) Relação C/N de operação.		O funcionamento do processo de biodigestão anaeróbica depende do conteúdo de C, N e a relação C/N nos resíduos orgânicos a serem transformados. NGHIEM <i>et al.</i> , (2017) mencionam que quando não é regulado a composição do carbono e nitrogênio nos resíduos orgânicos, este pode gerar substâncias inibidoras (amônia) para o processo de biodigestão anaeróbica. Para um funcionamento ótimo essa relação deverá de ficar entre 20 e 30.
5) pH de operação.		O processo precisa do controle do pH e o pH ótimo de operação deverá de ficar entre 6,5 e 7,2 (APPELS <i>et al.</i> , 2008).
6) umidade de operação.	Não precisa ser controlado.	

Continuação da Tabela 4.8

Critérios	Vantagem	Desvantagem
7) tempo de operação.		O tempo de operação depende da temperatura de operação, em temperaturas sob a faixa de 30 a 42°C o tempo de estabilização dos RO é de 30 a 40 dias (SEADI <i>et al.</i> , 2008).
8) necessidade de sistemas de controle.		Precisa de: a) medidores de temperatura, pressão e pH para o controle do processo; b) sistemas para a alimentação de resíduos; e c) mecanismos mecânicos para a agitação dos resíduos orgânicos no processo.
9) sistemas de moagem.		Precisa de sistemas de moagem para facilitar a mistura e contato entre o RO com os microrganismos anaeróbicos (ISHA <i>et al.</i> , 2020).
10) capacidade em termos de volume de resíduos a serem degradados.	Pode realizar o tratamento de grandes volumes de resíduos orgânicos.	
11) controle de patógenos.		Não consegue eliminar patógenos como a circovirose suína e outros (FONGARO <i>et al.</i> , 2014).
12) redução de metais pesados nos produtos digeridos		Não consegue reduzir o conteúdo de metais pesados no produto resultante. Esses metais podem causar a inibição do processo de biodigestão (CARRILHO, 2012).
13) redução da porcentagem de massa de resíduos orgânicos pelo processo.	Permite reduzir a massa dos resíduos orgânicos até um 47,15% (CHAVEZ-RICO <i>et al.</i> , 2022).	
14) produtos.	O processo de biodigestão anaeróbica pode transformar os RO em Biogás e em compostos estáveis podendo ser utilizados como fertilizantes.	
15) o custo do processo.		Pode-se tornar caro devido a que os equipamentos instalados no processo deverão de passar por etapas de manutenção.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados da avaliação das vantagens e desvantagem do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos. O resultado dessa etapa demonstra as características do processo, bem como os fatores operacionais.

Tabela 4.9 – Vantagem e Desvantagem do processo de vermicompostagem para o processamento de resíduos orgânicos.

Critérios	Vantagem	Desvantagem
1) construção de equipamentos para o processo.	Não precisa de equipamentos sofisticados devido a que as minhocas atuam como elementos que permitem a aeração, a trituração, e a degradação química dos RO (SINHA <i>et al.</i> , 2002).	
2) elementos biológicos para a transformação de resíduos orgânicos.	O processo de vermicompostagem utiliza microrganismos e minhocas para a degradação biológica dos RO.	
3) temperatura de operação.	O processo funciona de forma ótima a 30°C (ZHOU <i>et al.</i> , 2021).	Os resíduos orgânicos deverão de passar obrigatoriamente por um processo de estabilização térmica antes de ser inseridas as minhocas no processo de vermicompostagem.
4) Relação C/N de operação.		O funcionamento do processo de vermicompostagem depende do conteúdo de C, N e a relação C/N nos resíduos orgânicos a serem transformados. De acordo com as informações encontradas na literatura as minhocas podem suportar relações de C/N de 8 a 30, porém, os resíduos deverão de passar por um processo de termoestabilização (SINGH <i>et al.</i> , 2011).
5) pH de operação.	Pode trabalhar sem problemas em resíduos orgânicos com pH que estejam sob a faixa de 5 a 9 (PANDIT <i>et al.</i> , 2012).	Resíduos orgânicos que apresentem pH ácidos influenciam diretamente na atividade das minhocas, tornando ao processo tempos prolongados de operação (SINGH <i>et al.</i> , 2005).
6) umidade de operação.		O processo precisa de um teor de umidade ótimo para evitar a morte das minhocas e a inibição microbiana. Para um funcionamento ótimo a umidade deverá de ficar entre 60 e 70% (AQUINO, 2009).
7) tempo de operação.		O tempo de operação depende do conteúdo de C/N nos resíduos orgânicos, dependendo dessa relação o tempo de estabilização dos RO pode variar de 30 a 120 dias (RAMOS <i>et al.</i> , 2022).

Continuação da Tabela 4.9

Critérios	Vantagem	Desvantagem
8) necessidade de sistemas de controle.		Precisa de medidores de temperatura, pressão e pH para controle do processo como também de sistemas de alimentação de resíduos orgânicos.
9) sistemas de moagem.	Não precisam de sistemas de moagem. As minhocas agem como elementos trituradores dos RO (SINHA <i>et al.</i> , 2002).	
10) capacidade em termos de volume de resíduos a serem degradados.	Pode realizar o tratamento de grandes volumes de resíduos orgânicos.	
11) controle de patógenos.	Consegue inibir tanto a bactérias como patógenos (WANG <i>et al.</i> , 2021).	
12) redução de metais pesados nos produtos digeridos	Consegue reduzir o conteúdo de metais pesados no produto resultante (SINGH & KALAMDHAD, 2016).	
13) redução da porcentagem de massa de resíduos orgânicos pelo processo.	Permite reduzir a massa dos resíduos orgânicos até um 72% (TEDESCO <i>et al.</i> , 2019)	
14) produtos.	O processo de vermicompostagem pode transformar os RO em compostos estáveis podendo ser utilizados como fertilizantes e permite a reprodução de minhocas os quais podem ser utilizados como iscas para a pesca de peixes ou podem ser transformados em outros produtos.	
15) o custo do processo.	O processo é econômico.	

Fonte: Elaboração própria.

A partir das informações apresentadas nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, conclui-se que mesmo sendo métodos, processos e tecnologias já conhecidas, ainda precisam de melhorias. Com base nas vantagens e desvantagens encontradas, foi possível encontrar novas oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias para o processamento distribuído de RO e também para processamento centralizado de RO. Neste caso, potencializando o aproveitamento dos RO para a obtenção de produtos inovadores com elevado valor agregado.

4.4. Resultados do desenvolvimento e da proposição dos processos e das tecnologias alternativas para a industrialização diferenciada dos resíduos orgânicos visando a obtenção de produtos de elevado valor agregado

4.4.1. Software para o cálculo da relação carbono/nitrogênio no processamento de resíduos orgânicos

Na Figura 4.16 se apresenta o diagrama de fluxo utilizado no balanço de massa para o cálculo das propriedades da mistura dos resíduos orgânicos.

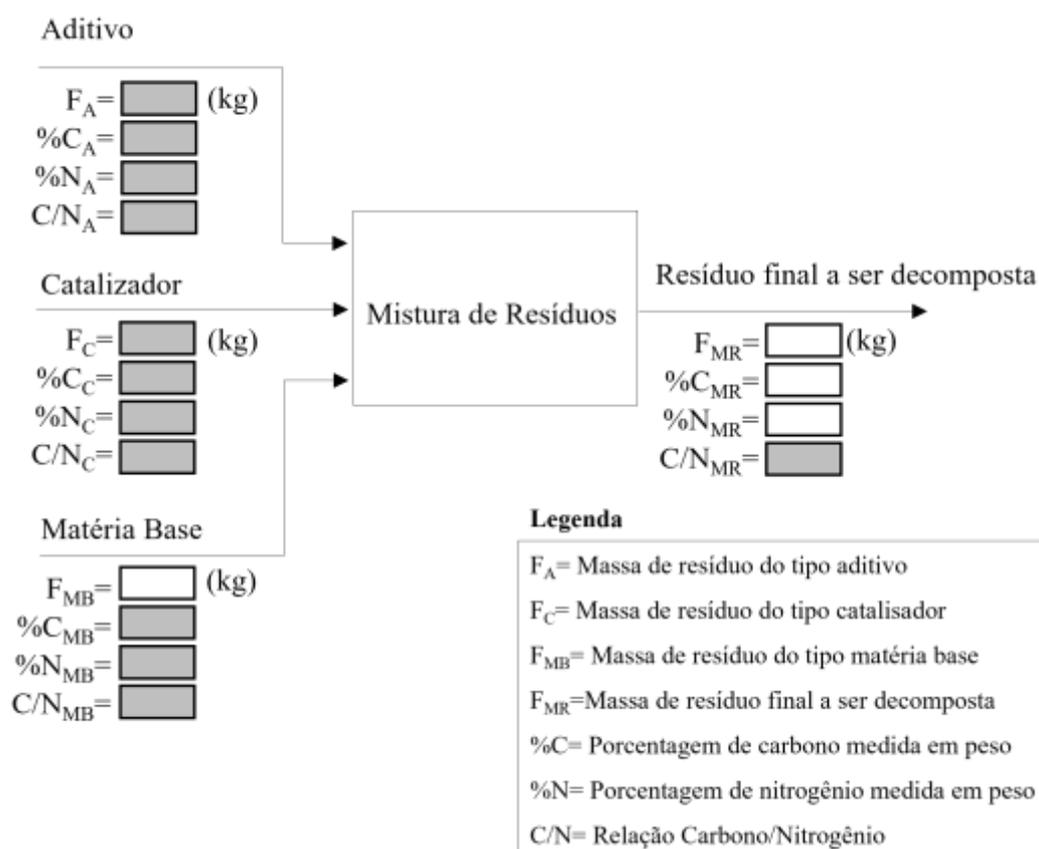


Figura 4.16 - Representação gráfica do diagrama de fluxo utilizado no balanço de massa para o cálculo das propriedades da mistura de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.17 se apresenta o resultado da janela inicial (interface) do programa desenvolvido. Na Figura 4.18 se apresenta a janela estruturada para a busca rápida e seleção dos RO. Na Figura 4.19 se apresenta a janela esquematizada para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de matéria prima total, a quantidade de porcentagem de aditivos, catalisadores e matéria base de RO a serem utilizados para seu processamento. Na Figura

4.20 se apresenta a janela estruturada para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de matéria prima de RO para serem utilizados para seu processamento.



Figura 4.17 – Janela de apresentação do programa desenvolvido.
Fonte: Elaboração própria.

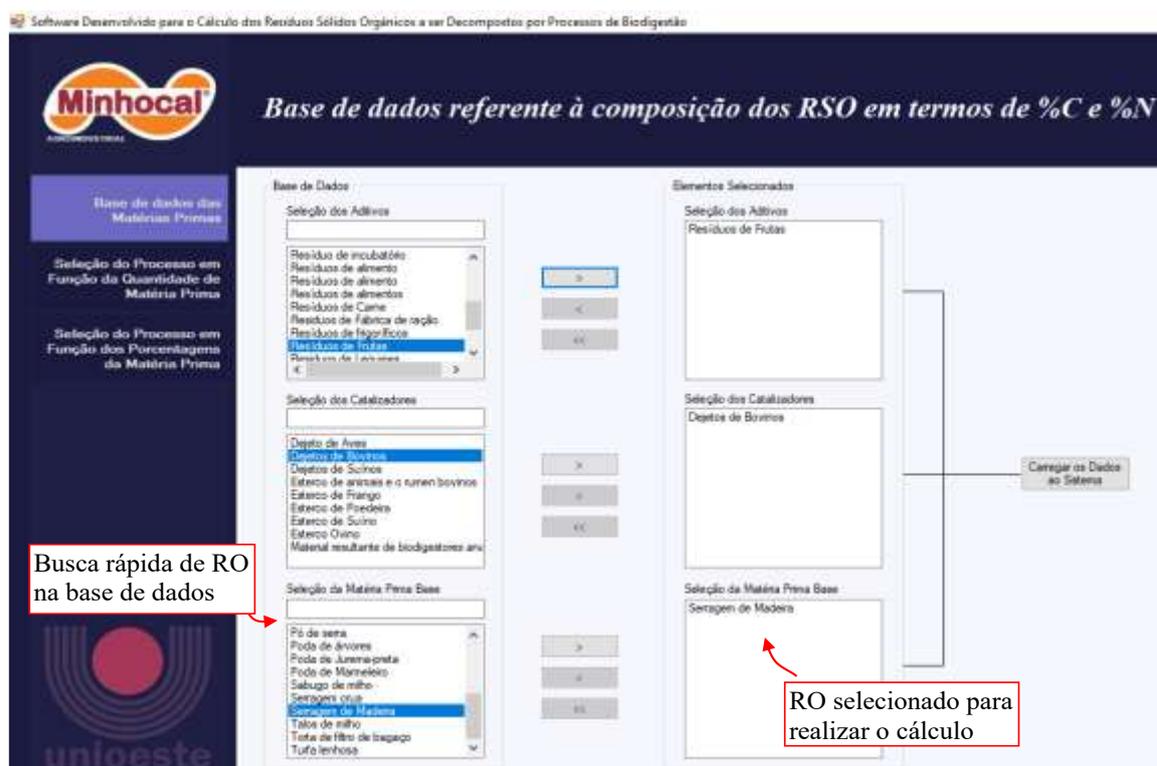


Figura 4.18 – Janela para a busca e seleção de RO na base de dados do programa desenvolvido.
Fonte: Elaboração própria.



Figura 4.19 – Janela desenhada para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de matéria prima total, a quantidade de porcentagem de aditivos, catalizadores e matéria base de RO a serem utilizados para seu processamento.
Fonte: Elaboração própria.

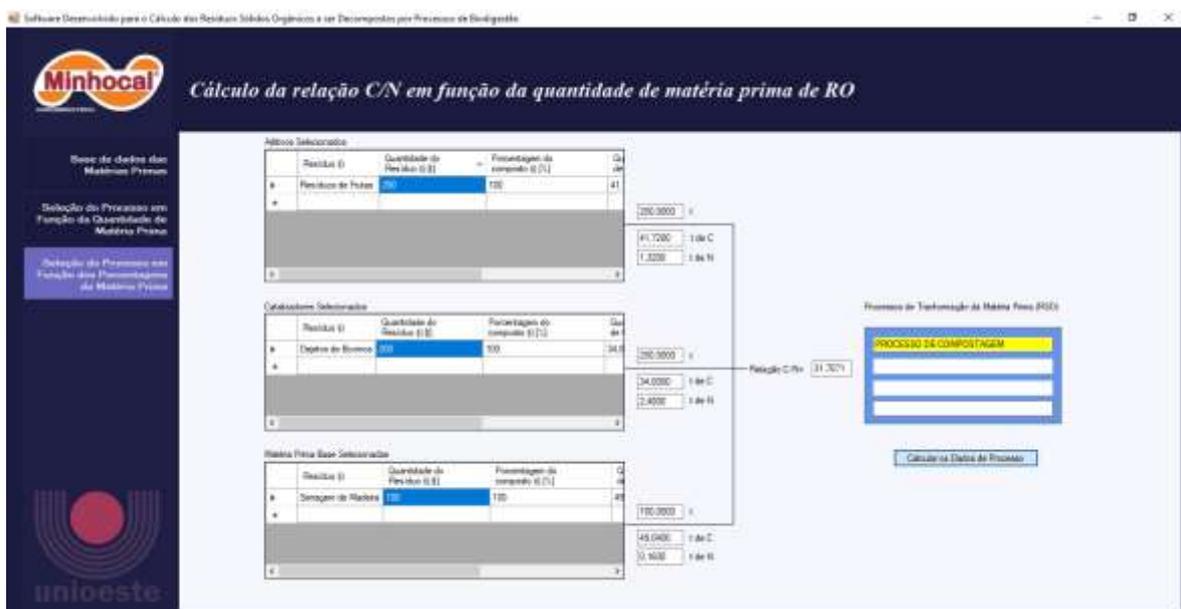


Figura 4.20 – Janela desenhada para o cálculo da relação C/N em função da quantidade de matéria prima de RO a serem utilizados para seu processamento.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 pode-se constatar a operacionalização e funcionalidade do programa desenvolvido. Do ponto de vista do desenvolvimento, o programa contempla uma base com 456 dados referente ao conteúdo de carbono e nitrogênio presentes em diversos RO. O programa desenvolvido

possibilita um manejo intuitivo para seu uso e aplicabilidade, tanto para o desenvolvimento de processos produtivos como para a realização de testes experimentais, tendo em vista que o programa fornece até informações relacionadas com o tipo de processo (mais adequado) que pode ser utilizado para processar os resíduos orgânicos. Além do mais, o programa possibilita a atualização por meio da complementação de novas informações relacionadas ao conteúdo de carbono e nitrogênio de outros resíduos orgânicos.

4.4.2. Tecnologia para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos

4.4.2.1. Prospecção das tecnologias de processamento distribuído de resíduos orgânicos em bases de patentes

De modo geral, os resultados da prospecção tecnológica realizada nas bases de patentes revelaram as seguintes características e limitações das tecnologias patenteadas:

- a) Apresentam limitações técnicas relacionadas ao controle do tempo de residência necessário para transformar os resíduos orgânicos em produtos de valor agregado;
- b) Não consideram o deslocamento natural das minhocas como método de separação dos produtos digeridos (húmus) livres de minhocas vivas;
- c) Em alguns casos, os equipamentos patenteados não apresentam elementos que permitam a recuperação do líquido orgânico gerado na transformação dos RO;
- d) Em alguns casos, os equipamentos precisam de energia elétrica para seu funcionamento;
- e) Por estarem constituídos por mecanismos mecânicos, precisam de manutenções periódicas; e
- f) Não possibilitam seu funcionamento contínuo, uma vez que possuem compartimentos únicos para o recebimento dos resíduos orgânicos, podendo chegar a saturar a capacidade do equipamento.

Nas Tabelas 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, e 4.16 são apresentados, respectivamente, os resultados da prospecção tecnológica em bancos de patentes, relacionados com as tecnologias de vermicompostagem em sistemas de processamento distribuído.

Tabela 4.10 – Avaliação técnica da patente CN215819684U.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um equipamento para criação de minhocas e tratamento de uma mistura de resíduos orgânicos compostos por esterco de porco e gado.</p> <p>A tecnologia possui: i) mecanismos que acionam dispositivos para a alimentação e pulverização dos resíduos por meio de um motor; ii) dispositivos de controle; e iii) mecanismos compostos por hastes e para realizar a mistura e agitação dos resíduos a serem transformados pelas minhocas utilizando um segundo motor e elementos de descarga.</p>	<p>A tecnologia como tal:</p> <p>a) utiliza dispositivos mecânicos que precisam de uma manutenção periódica;</p> <p>b) precisa de energia elétrica para sua funcionalidade; e</p> <p>c) não possibilita a sua operabilidade de forma contínua.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, apresenta as seguintes limitações:</p> <p>a) não considera o tempo de residência necessário para realizar a transformação completa dos resíduos orgânicos; e</p> <p>b) não possibilita o processamento contínuo dos RSO.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de YONGZHEN *et al.* (2022).

Tabela 4.11 – Avaliação técnica da patente CN216292677U.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um equipamento composto por uma caixa para a criação de minhocas dotado de dispositivos que possibilitam o ajuste da umidade.</p> <p>A tecnologia se encontra constituído por: i) portas de proteção com abertura frontal; ii) tanques de armazenamento de água interna; iii) placas com esponja; iv) tanque de água externo para alimentar aos atomizadores; v) atomizadores; vi) bomba de água; vii) sensor de umidade; viii) lâmpada de aquecimento; ix) dispositivos de controle e outros elementos.</p>	<p>A tecnologia como tal não possibilita um funcionamento contínuo na transformação dos RO.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, não permite a transformação contínua dos resíduos sólidos orgânicos.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de SHIJUAN & SHIXIN (2022).

Tabela 4.12 – Avaliação técnica da patente CN215684311U.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um desenho de uma caixa para a criação de minhocas.</p> <p>A tecnologia se encontra constituído por: 4 caixas dispostas verticalmente com elementos deslizantes para a retirada dos resíduos digeridos; e placas base composta por furos e filtros que possibilitam a ventilação entre cada compartimento.</p>	<p>A tecnologia como tal não possibilita a transformação de um elevado volume de RO.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, não considera o tempo de residência necessário para a transformação contínua dos resíduos sólidos orgânicos.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de YONGZHEN *et al.* (2022).

Tabela 4.13 – Avaliação técnica da patente CN216147049U.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um equipamento que possibilita o deslocamento tridimensional referente a compartimentos dotados de caixas para a criação de minhocas.</p> <p>A tecnologia se encontra constituído por: i) caixas dispostas verticalmente onde são colocadas tanto os resíduos como as minhocas; e ii) dispositivos mecânicos que permitem rotacionar o conjunto de caixas dispostas verticalmente para um formato horizontal.</p>	<p>A tecnologia como tal não possibilita a transformação de um elevado volume de RO.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, não considera o tempo de residência necessário para a transformação contínua dos resíduos sólidos orgânicos.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de LIWU (2022).

Tabela 4.14 – Avaliação técnica da patente CN113828624A.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um equipamento e método para realizar a vermicompostagem do lixo de cozinha e produção de minhocas.</p> <p>A tecnologia se encontra constituído por: i) dispositivos de desidratação por compressão; ii) peneiras para a classificação de tamanho de partículas dos resíduos, com orifícios de 0,5 a 1 cm; iii) dispositivos para realizar a trituração; iv) carrinhos para a coleta do material moído dispostos num sistema elíptico; v) recipiente hermético para aumentar e criar minhocas de forma contínua; vi) dispositivos de controle de temperatura, umidade e ligação da luz led no dispositivo; vii) isolantes térmicos; viii) exaustores para ventilação; ix) ar condicionado; x) umidificadores de ar e outros elementos. O autor menciona que o equipamento devera de considerar como parâmetros de trabalho: uma temperatura do ar no recipiente hermético de 26 a 27 °C, uma umidade de 60 a 80%, uma ventilação onde devera de funcionar de 2 a 4 vezes por dia por um lapso de tempo de 10 a 15 minutos.</p>	<p>A tecnologia como tal utiliza:</p> <p>a) dispositivos que precisarão de manutenção periódica; e</p> <p>b) precisa de energia elétrica para sua funcionalidade.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, não considera o deslocamento natural das minhocas para a obtenção de um produto digerido livre de minhocas.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de JIANQUI (2021).

Tabela 4.15 – Avaliação técnica da patente CN113826586A.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um equipamento em formato de uma caixa para a criação de minhocas.</p> <p>A tecnologia se encontra constituído por: i) uma entrada em formato cônico localizada na parte superior do equipamento para a alimentação dos resíduos; ii) um tanque de água; iii) tubos para realizar a alimentação da água na parte interna do equipamento; iv) aspersores; v) suportes; vi) hastes giratórias; vii) engrenagens; e viii) outros dispositivos que permitem o ingresso dos resíduos na parte interna do equipamento.</p>	<p>A tecnologia como tal não considera o tempo de residência necessário para decompor os resíduos orgânicos considerando um processamento contínuo.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, a tecnologia não possibilita a transformação contínua e eficiente dos RO alimentados, devido a que os resíduos são alimentados a um mesmo local de transformação, variando desta forma as características do processo referentes ao tempo de decomposição necessário desses resíduos e além de mais podem chegar a saturar a capacidade do equipamento.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de KEJIAN (2021).

Tabela 4.16 – Avaliação técnica da patente BR112015029412-0B1.

Característica	Problema(s) técnico(s) da tecnologia já existente	Possibilidade de uso no sistema distribuído
<p>A tecnologia refere-se a um equipamento para produzir húmus.</p> <p>A tecnologia se encontra constituído por: i) um recipiente fechado onde são depositados os resíduos a serem decompostos; ii) dispositivos de ventilação para fazer o arejamento dos resíduos; iii) uma tampa que permite a coleta de água da chuva; e iv) dispositivos que possibilitam o dreno e a alimentação da água coletada ao compartimento interno do recipiente.</p>	<p>A tecnologia como tal não considera o tempo de residência necessário para decompor os resíduos orgânicos, devido a que os resíduos são acumulados no mesmo local.</p>	<p>Considerando a sua aplicabilidade em sistemas de processamento distribuído, a tecnologia não possibilita um controle eficiente do tempo necessário para realizar a transformação dos RO em húmus, devido a que os RO são acumulados no mesmo local (lugar onde são depositados os RO) de processamento.</p>

Fonte: Elaboração própria utilizando as informações de HAGENER (2014).

De modo geral, os resultados da prospecção apontam a necessidade da incorporação de critérios técnicos que possam garantir o atendimento do tempo de residência (na biodigestão da matéria orgânica) em condições de melhor desempenho das minhocas. Neste caso, considerando a altura do leito, a umidade, a ausência de luz, a coleta e aproveitamento do resíduo líquido, a mobilidade das minhocas, a separação e a classificação das minhocas. Constata-se também a necessidade da incorporação de elementos que resultem na praticidade da alimentação da carga (RO) e também na retirada dos produtos resultantes da vermicompostagem (Humos e minhocas vivas).

4.4.2.2. Cinética de decomposição dos resíduos orgânicos domésticos

Na Tabela 4.17 se apresenta a relação mássica de mistura de resíduos orgânicos utilizadas para o cálculo da relação C/N final de mistura.

Tabela 4.17 – Relação mássica de resíduos orgânicos para o cálculo da relação C/N final de mistura.

Relação mássica de mistura	Resíduos Orgânicos							
	Aditivos					Catalizadores		Matéria base
	Frutas	Carnes	Legumes	Verduras	Ovos	Dejeto bovino	Esterco Suíno	
	67%	14%	13%	5%	1%	50%	50%	100%
Mistura 1			1,2			1,2		0,1
Mistura 2			1			1		0,5
Mistura 3			0,8			0,8		0,9

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.21, 4.22 e 4.23 se apresenta os resultados referente ao cálculo da relação C/N em função da relação mássica da mistura de resíduos orgânicos oferecidos na Tabela 4.17.



Figura 4.21 – Resultado do cálculo da relação C/N em função da relação mássica da primeira mistura de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

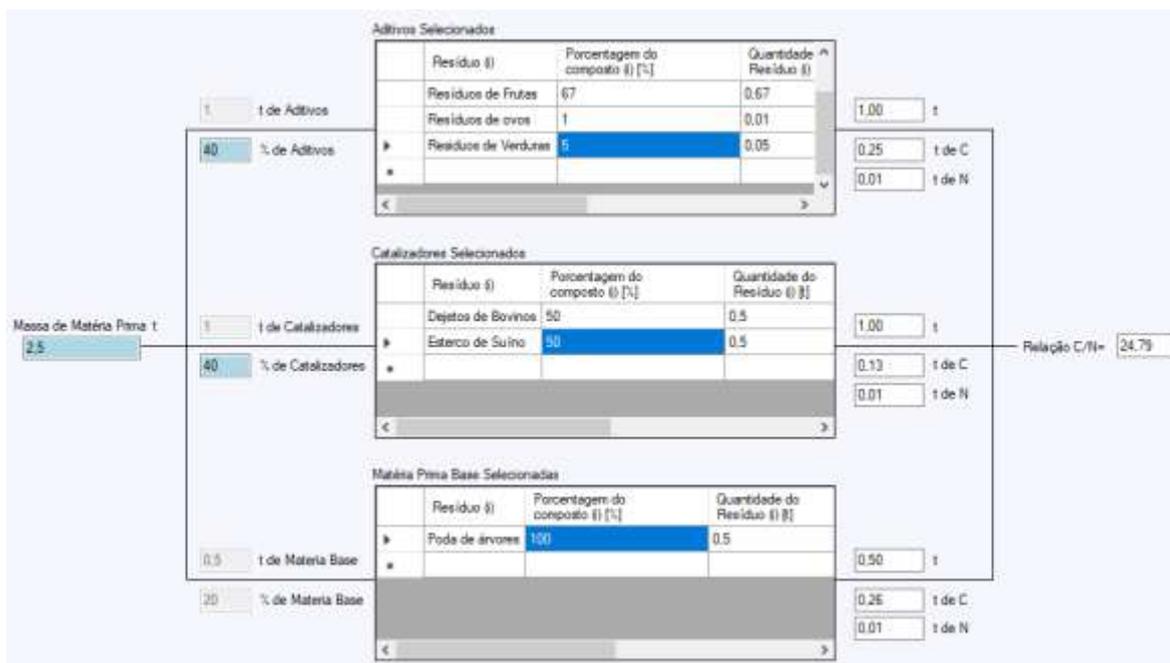


Figura 4.22 - Resultado do cálculo da relação C/N em função da relação mássica da segunda mistura de resíduos orgânicos.
Fonte: Elaboração própria.



Figura 4.23 – Resultado do cálculo da relação C/N em função da relação mássica da terceira mistura de resíduos orgânicos.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme os dados apresentados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, os resultados demonstram que: a) a primeira relação mássica de mistura, consegue alcançar uma relação C/N de 20,09; b) no caso da segunda relação mássica de mistura, a relação C/N alcançou a

valores de 24,79, este fenômeno aconteceu devido a que a porcentagem de matéria base aumentou em um 19% comparado com a anterior mistura; e c) no caso da terceira relação mássica de mistura, a relação C/N aumentou a um valor de 29,35, este fenômeno aconteceu devido a que a porcentagem de matéria base aumentou 16% comparado com a anterior mistura. Em base aos resultados expostos, é possível concluir que os resíduos do tipo matéria base favorece ao aumento da relação C/N, este fenômeno acontece devido a que esse resíduo possui concentrações elevadas de carbono.

Na Figura 4.24 são apresentados os resultados referentes à simulação do comportamento da variação da porcentagem de carbono no processo de vermicompostagem em função do tempo. Na Figura 4.25 são apresentados os resultados referentes à simulação do comportamento da variação da porcentagem de nitrogênio no processo de vermicompostagem em função do tempo. Na Figura 4.26 são apresentados os resultados referentes à simulação do comportamento da variação da relação C/N no processo de vermicompostagem em função do tempo.

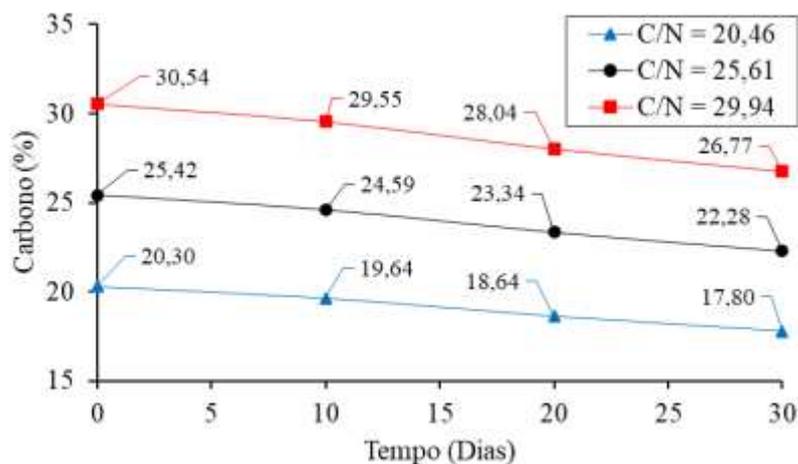


Figura 4.24 - Representação gráfica referente à simulação do comportamento da variação da porcentagem de carbono no processo de vermicompostagem.

Fonte: Elaboração própria.

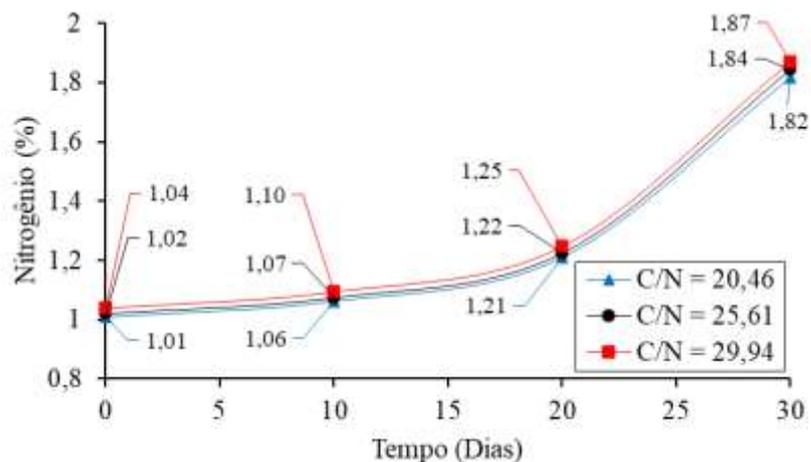


Figura 4.25 – Representação gráfica referente à simulação do comportamento da variação da porcentagem de nitrogênio no processo de vermicompostagem.
Fonte: Elaboração própria.

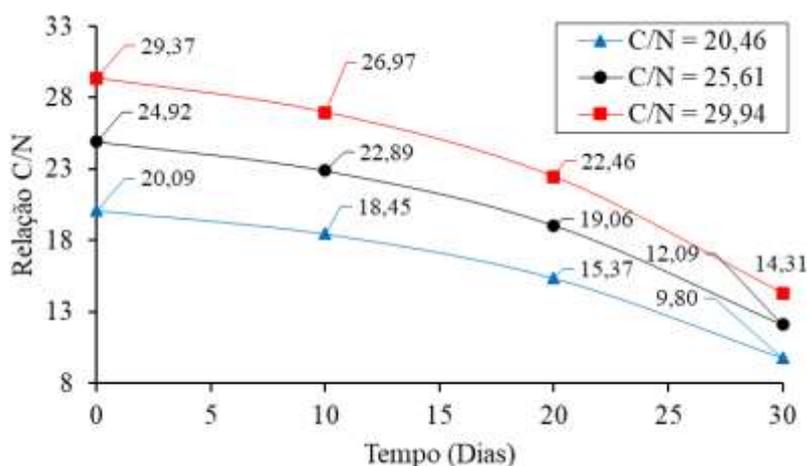


Figura 4.26 – Representação gráfica referente à simulação do comportamento da variação da relação C/N no processo de vermicompostagem.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26, pode-se identificar que nas três simulações realizadas: i) a concentração do conteúdo de carbono nos resíduos digeridos pelas minhocas, diminui até 12,34%; ii) no caso da concentração do nitrogênio nos resíduos digeridos, aumenta até os 80,23%; e iii) para o caso da relação C/N, existe uma redução dessa relação até os 51,33%, alcançando desta forma valores abaixo dos limites máximos permitidos referente à relação C/N (relação máxima de C/N de 20) os quais podem ser utilizados como fertilizantes orgânicos, conforme a Instrução Normativa N°61,

de 08 de julho de 2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2020).

Com base nos resultados encontrados, pode-se indicar que dependendo da mistura de resíduos gerados de forma diária, o tempo necessário para realizar a decomposição e transformação dos resíduos orgânicos precisará de 30 dias, porém, deve-se de considerar que a mistura dos resíduos orgânicos a serem decompostos deverá de ter relações C/N inferiores a 29,94.

4.4.2.3. Planilhas eletrônicas para cálculo das dimensões da tecnologia utilizada no processo distribuído

Na Figura 4.27 se apresenta o fluxo das informações utilizadas para a construção da planilha eletrônica. Na Figura 4.28 se apresenta o fluxo de informações utilizadas referente às características operacionais para realizar o dimensionamento das células de vermicompostagem. Na Figura 4.29 se apresenta o fluxo de informações referente as variáveis de desenho para realizar o cálculo geométrico e dimensionamento da tecnologia.

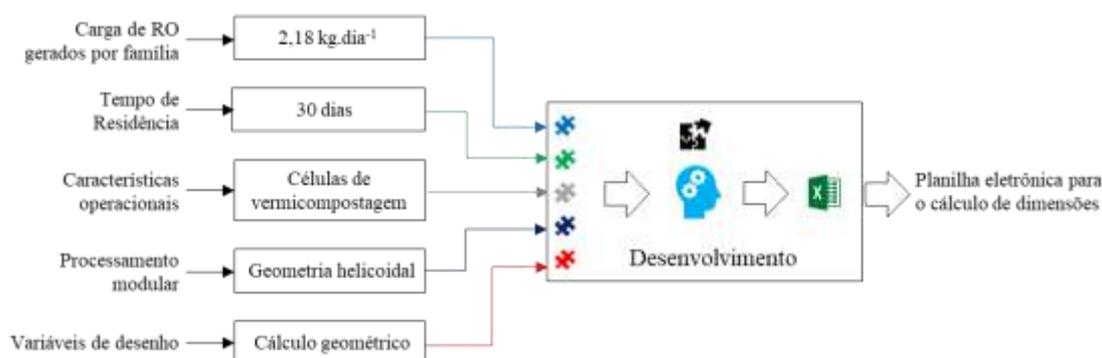


Figura 4.27 – Informações utilizadas para a construção da planilha eletrônica.
Fonte: Elaboração própria.

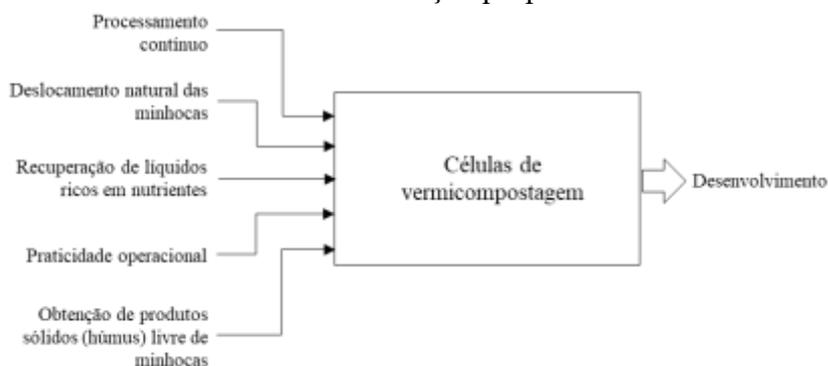


Figura 4.28 – Características operacionais para o dimensionamento das células de vermicompostagem.
Fonte: Elaboração própria.

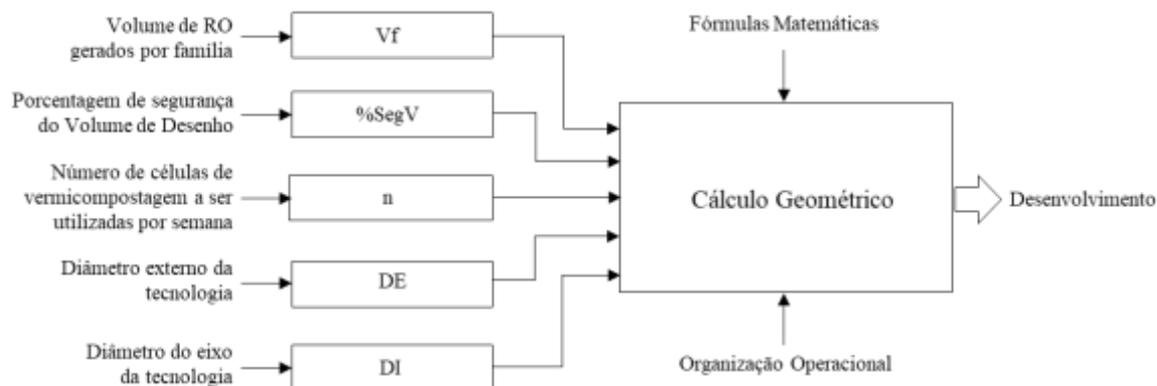


Figura 4.29 – Variáveis de desenho para o cálculo geométrico no dimensionamento da tecnologia.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme o fluxo das informações apresentadas nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29, a construção da planilha eletrônica resume as seguintes etapas:

- 1) Primeiro, a planilha eletrônica como tal, foi construída em função da carga de resíduos orgânicos gerados de forma diária por cada família, o qual se encontra medida em kg por dia;
- 2) Na sequência, a carga de resíduos orgânicos gerados por dia é convertida a unidades de volume, utilizando a densidade média dos RO;
- 3) No caso de existir um aumento na geração da carga de resíduos orgânicos, foi considerado uma porcentagem de segurança de desenho para contornar possíveis eventualidades;
- 4) Com relação ao tempo de residência, este dado foi considerado para o cálculo do número de células de vermicompostagem e a altura do conjunto de células dispostas num formato helicoidal;
- 5) No caso do diâmetro externo, este dado se refere ao diâmetro externo da tecnologia e é considerado como um dado de desenho que poderá ser modificado em função das necessidades do local onde será implantado a tecnologia;
- 6) No caso do diâmetro interno, este dado se refere ao diâmetro interno do eixo que suportara a todo o conjunto de células de vermicompostagem;
- 7) No caso do processamento modular o conjunto de células foi disposto considerando um formato geométrico helicoidal, onde cada segmento do helicoide foi dividido em 7 partes, definindo assim a que cada parte foi considerada como uma célula de vermicompostagem que poderá receber um determinado volume de RO;

8) A partir dos dados acima, foi considerado como base de cálculo um segmento do helicóide (composto por 7 partes ou peças) e por meio das equações matemáticas foram calculados: os perímetros externos e internos do segmento helicoidal, o comprimento da célula de vermicompostagem considerando os raios internos e externos da tecnologia, a área e volume do segmento do helicóide onde serão depositados os RO, o cálculo da altura do segmento do helicóide, o porcentagem de segurança referente à altura do helicóide, o cálculo da altura do helicóide considerando o porcentagem de segurança, o cálculo do volume total do helicóide considerando o porcentagem de segurança, e o cálculo do volume das células de vermicompostagem.

Na Figura 4.30 são apresentados os dados de entrada necessários para realizar os cálculos de dimensionamento da tecnologia utilizando a planilha eletrônica desenhada. Na Figura 4.31 são apresentados a planilha eletrônica desenvolvida.

	D	E	F	G	H	I
Planilha eletrônica para o cálculo de dimensões da tecnologia						
Carga de RO gerados por família		QT	2,18	kg/dia		
Volume de RO gerados por família		VT	0,0022	m ³ /dia	2,2245	L/Dia
% de segurança RO		% Seg RO	100	%		
Volume de RO gerado mais o % segun		VRO (desenho)	4,449	L/Dia		
Tempo de Residência		TR	30	dias		
Número de células de Vermicompostagem por semana		n	7			
Diâmetro externo da tecnologia		Dexterno = DE	70	cm	700	mm
Diâmetro do eixo para o suporte das peças		Dinterno = DI	5	cm	50	mm
Volume de RO armazenados em cada célula de vermicompostagem		Vpeça = VRO	4,449	L	4449	cm ³

Figura 4.30 – Dados de entrada para a realização dos cálculos de dimensionamento da tecnologia utilizando a planilha eletrônica desenhada.

Fonte: Elaboração própria.

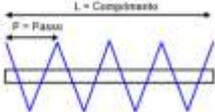
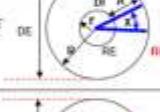
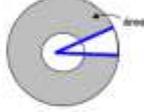
	C	D	E	F	G	H	I	
1								
2		Planilha eletrônica para o cálculo de dimensões da tecnologia						
3		Carga de RO gerados por família	QF	2,18 kg/dia				
4		Volume de RO gerados por família	VF	0,00222 m³/dia	2,22449 L/Dia			
5		% de segurança RO	% Seg RO	100%				
6		Volume de RO gerado mais o % segurança	VRO (desenho)	4,44898 L/Dia				
7								
8		Tempo de Residência	TR	30 dias				
9								
10		Número de células de Vernicompostagem por sistema	n	7				
11								
12		Diâmetro externo da tecnologia	Distenso = DE	70 mm	700 mm			
13		Diâmetro do eixo para o suporte das peças	Distenso = DE	5 mm	50 mm			
14		Volume de RO armazenados em cada célula de vernicompostagem	Vpeça = VRO	4,44898 L	4448,98 cm³			
15								
16		Comprimento do passo do helicóide		19 mm	190 mm			
17		Cálculo do A	$A = \frac{D_{\text{externo}} - D_{\text{interno}}}{2}$ 	32,5 mm	325 mm			
18		Cálculo do perímetro interno do helicóide RE	$RE = \sqrt{D_{\text{externo}}^2 \cdot \pi^2 + P^2 \cdot \cos^2 \beta}$ 	24,6524 mm	246,524 mm			
19		Cálculo do perímetro externo do helicóide RU	$RU = \sqrt{D_{\text{externo}}^2 \cdot \pi^2 + P^2 \cdot \cos^2 \beta}$ 	220,731 mm	2207,31 mm			
20		Raio maior	$r = \frac{A \cdot RE}{RU - RE}$ 	4,08613 mm	40,8613 mm			
21		Raio menor	$R = r + A$ 	36,5861 mm	365,861 mm			
22		Perímetro do raio maior	$\Delta = 2 \pi R$	229,877 mm	2298,77 mm			
23		Ângulo beta	$\beta = \frac{RU \cdot 180}{\Delta}$	345,676 graus	6,03318 rad			
24		Ângulo X	$X = 360 - \beta$	14,3242 graus	0,25001 rad			
25		Cálculo da área do helicóide	$A_g = \frac{(D_{\text{externo}}^2 - D_{\text{interno}}^2) \cdot \beta}{8}$ 	3676,47 cm²	367647 mm²			
26		Volume de resíduos no helicóide	$V_{\text{RHelicóide}} = n V_{\text{peça}}$	31142,9 cm³				
27		Cálculo da altura do helicóide	$h = \frac{V_{\text{RHelicóide}}}{A_g}$	8,47086 cm	8470,86 mm			
28		Porcentagem de segurança para o cálculo da altura	%segurança	30%				
29		Altura da peça mais a porcentagem de Segurança	$h_{\text{total}} = h \cdot \left(1 + \frac{\% \text{segurança}}{100}\right)$	11,0121 cm	110,121 mm			
30		Volume total do resíduo no helicóide com a porcentagem Segurança	$V = A_g \cdot h_{\text{total}}$	40485,7 cm³				
31		Volume total de RO a depositar na célula de vernicompostagem considerando a porcentagem de segurança	$V_{\text{total}} = \frac{V}{n}$ 	5783,67 cm³	5,78367 L			

Figura 4.31 – Planilha eletrônica desenvolvida para o cálculo de dimensões.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.30 e 4.31 foi possível incorporar os dados para o dimensionamento do equipamento. Nessas planilhas, os cálculos realizados e o manejo de variáveis de desenho foram direcionados para atender aos gargalos tecnológicos identificados na etapa de prospecção tecnológica.

De modo geral, foram incorporadas configurações e dimensões para atendimento do tempo de residência (na biodigestão da matéria orgânica), considerando a altura do leito, a umidade, a ausência de luz, a coleta e aproveitamento do resíduo líquido, a mobilidade das minhocas, a separação e a classificação das minhocas.

Nesse desenvolvimento, foi também incorporado os elementos que garantem a praticidade da alimentação da carga (RO) e também a retirada dos produtos resultantes da vermicompostagem (Humos e minhocas vivas).

O equipamento modular possui um formato helicoidal, com compartimentos ou células dispostas ao longo do seu eixo. Cada célula deve receber a carga de RO gerados no dia. Desta forma, o volume de cada célula foi calculado em função da carga de geração de resíduos orgânicos (item 4.2.4) e o conjunto de células dependerá do tempo de residência. Para finalizar, todos os dados de desenho foram concentrados numa planilha de interface, para realizar a vinculação dos dados de desenho com o programa de desenho tridimensional AUTODESK INVENTOR. Esta forma de trabalho possibilita a atualização automática, quando forem realizados ajustes/modificações na especificação da carga de RO.

4.4.2.4. Desenho tridimensional da tecnologia e descrição do funcionamento

Na Figura 4.32 são apresentadas as informações utilizadas para o desenho tridimensional da tecnologia. Na Figura 4.33 é apresentada a planilha eletrônica direcionada para realizar a vinculação dos dados dimensionados com o programa de desenho tridimensional. Na Figura 4.34 é apresentado o desenho da célula de vermicompostagem. Na Figura 4.35 é apresentado o desenho e a montagem de um conjunto de 7 células de vermicompostagem distribuídas no formato helicoidal. Na figura 4.36 é apresentado o desenho final da tecnologia denominado como minhocário modular helicoidal para o processamento distribuído de RO.

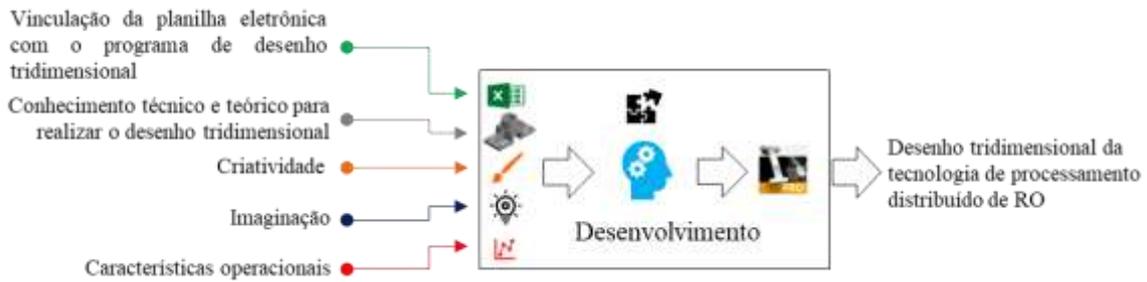


Figura 4.32 – Informação utilizada para o desenvolvimento do desenho tridimensional da tecnologia.

Fonte: Elaboração própria.

	A	B	C	D	E
1					
2		Nome da variável	Valor	Unidades	Comentário
3		Dia1	24,15	mm	Raio externo do eixo de suporte do manômetro
4		L1	375	mm	Comprimento da célula de vernicopostagem
5		Alt1	151,83	mm	Altura da célula de vernicopostagem
6		N1	7	su	Número de células por helicoide
7		Altura	190	mm	Comprimento do passo do helicoide
8		EspCh	5	mm	Espessura da chapa
9		Dar	10	mm	Espacamento superior para a abertura da chapa móvel
10		Dab	10	mm	Espacamento inferior para a abertura da chapa móvel
11		Est	1,5	mm	Espessura da chapa móvel
12		Dar1	3	mm	Espacamento superior para o encaste da chapa móvel
13		Dab1	3	mm	Espacamento inferior para o encaste da chapa móvel
14		CompCh	375	mm	Comprimento da chapa móvel
15		A1	5	mm	Espacamento superior da chapa que possibilita a comunicação entre células
16		A2	5	mm	Espacamento inferior da chapa que possibilita a comunicação entre células
17		DMM	20	mm	Diâmetro dos furos para a passagem das ranhocas na célula de vernicopostagem
18		DMM	20	mm	Diâmetro dos furos para a passagem das ranhocas na chapa móvel
19		Nfura	4	su	Número de furos na linha
20		EF1	89,75	mm	Comprimento total dos furos localizados na linha
21		Ncoluna	1	su	Número de furos na coluna
22		EC1	85,125427	mm	Comprimento total dos furos localizado na coluna
23		PX	16	mm	Eixo x para o deslocamento do furo para dar mobilidade à ranhoca na célula da ranhoca
24		PY	76,79673	mm	Eixo y para o deslocamento do furo para dar mobilidade à ranhoca na célula da ranhoca
25		PXM	36	mm	Eixo x do diâmetro da ranhoca mais a porcentagem da abertura na chapa móvel
26		PYM	36,79673	mm	eixo y do diâmetro da ranhoca mais a porcentagem da abertura na chapa móvel
27		LL1	375	mm	comprimento da chapa móvel
28		AA1	121,82718	mm	Altura da peça da chapa móvel
29		AB1	111,82718	mm	Altura da peça da chapa móvel que permite a comunicação entre células
30		Lrubo	993	mm	Comprimento do eixo
31		Dchap	880	mm	Diâmetro do chapéu
32		Dcana	880	mm	Diâmetro do reservatório do chorume líquido
33		Acana	100	mm	Altura do reservatório de chorume líquido
34		Acocanana	100	mm	Altura da base cônica do reservatório de chorume líquido
35		Arubocaida	50	mm	Altura da tubulação de saída de líquidos
36		Arubocua	200	mm	Altura dos suportes do manômetro
37		AlturaCH	250	mm	Altura do suporte do chapéu
38		Dtampa	420	mm	Diâmetro da tampa do reservatório do chorume líquido
39		Dflange	100	mm	Diâmetro do flange
40		Dpara	5	mm	Diâmetro dos parafusos
41		EsDpara	40	mm	Raio de localização dos furos no flange
42		NfurosFlan	8	su	Número de furos no flange

Figura 4.33 – Planilha eletrônica direcionada para realizar a vinculação de dados dimensionados da tecnologia com o programa de desenho tridimensional.

Fonte: Elaboração própria.

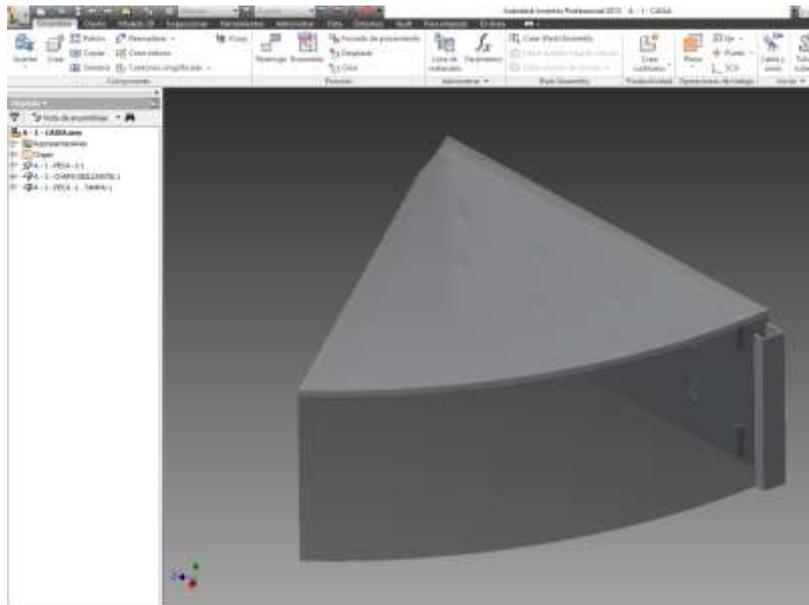


Figura 4.34 – Desenho da célula de vermicompostagem.
 Fonte: Elaboração própria.

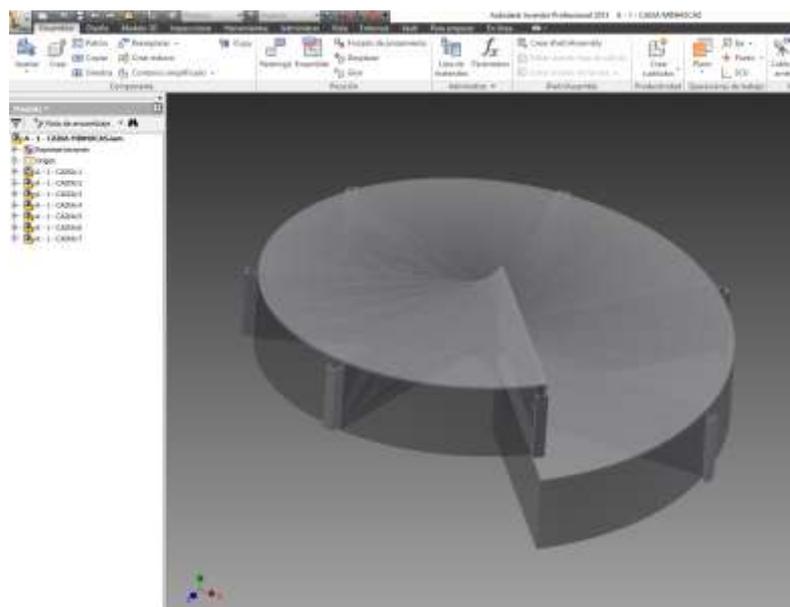


Figura 4.35 – Desenho e montagem de um conjunto de 7 células de vermicompostagem distribuídas em formato helicoidal.
 Fonte: Elaboração própria.

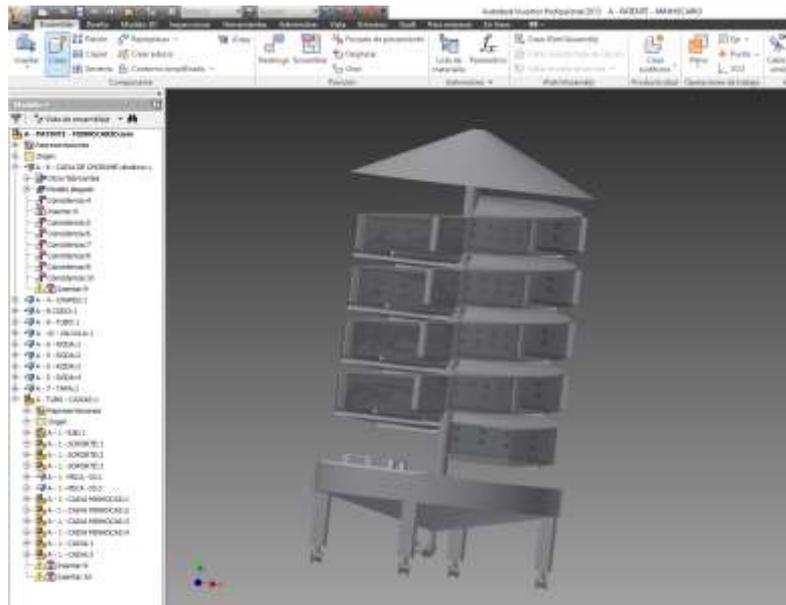


Figura 4.36 – Desenho final da tecnologia denominada como minhocário modular helicoidal para o processamento distribuído de RO.

Fonte: Elaboração própria.

Por meio das Figuras 4,32, 4,33, 4,34, 4,35 e 4,36 se ilustra os resultados referentes ao desenvolvimento do desenho da tecnologia. Para melhor entendimento, os desenhos realizados, foram direcionados em função: i) do dimensionamento realizado nas planilhas eletrônicas construídas para esta finalidade tomando como base a carga gerada de RO por dia e o tempo de residência; ii) das características operacionais do processo de vermicompostagem, considerando como base a recreação da vida natural das minhocas por meio de uma tecnologia composta por um conjunto de dispositivos que permitem a vida natural das minhocas sem causar estresse; iii) dispositivos que permitem a recuperação e armazenamento do líquidos concentrados gerados; e iv) além de mais possui dispositivos que permitem a mobilidade das minhocas de forma natural sem causar estresse entre cada célula.

Na Figura 4.37, 4.38 e 4.39 são apresentados à vista lateral e a vista explodida do resultado da tecnologia, em cada figura são explicitadas as peças que formam parte da tecnologia denominada como minhocário modular helicoidal para o processamento distribuído de RO, neste caso para seu uso na escala doméstica.

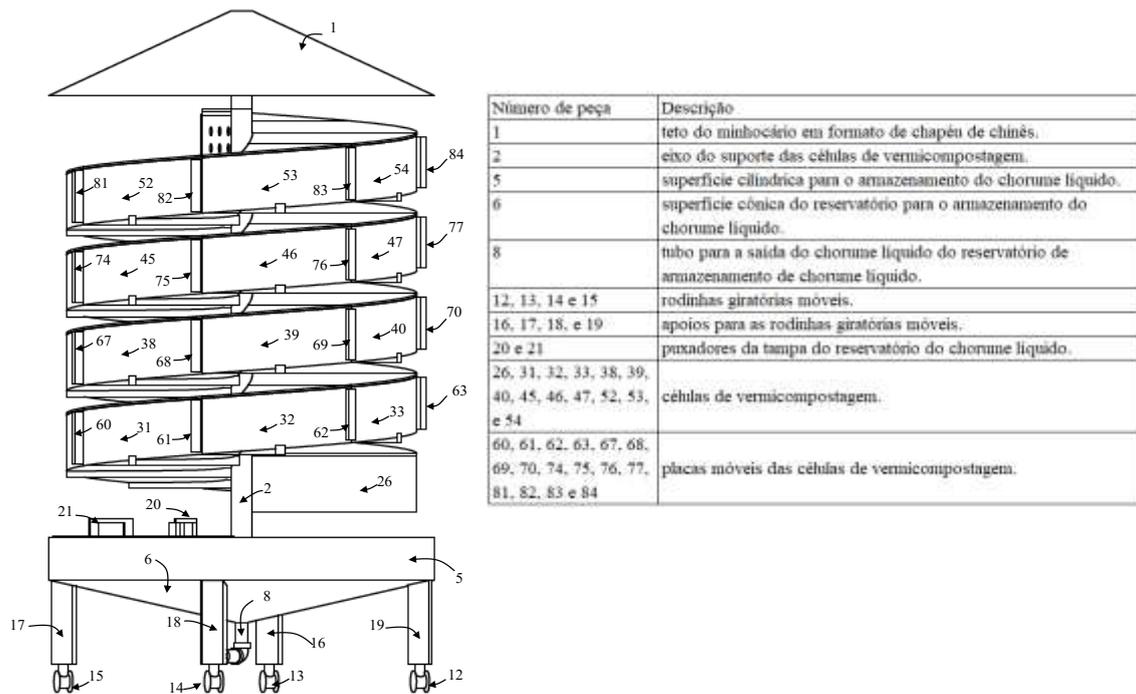


Figura 4.37 - Esquema tridimensional com vista lateral dos elementos principais e auxiliares e o arranjo final do sistema que compreende o minhocário modular helicoidal para processamento distribuído de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

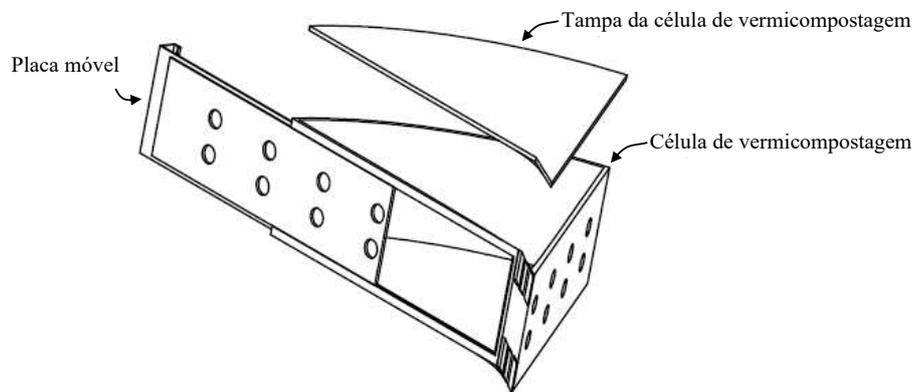


Figura 4.38 - Esquema tridimensional com vista superior lateral explodido dos elementos principais e auxiliares da célula de vermicompostagem.

Fonte: Elaboração própria.

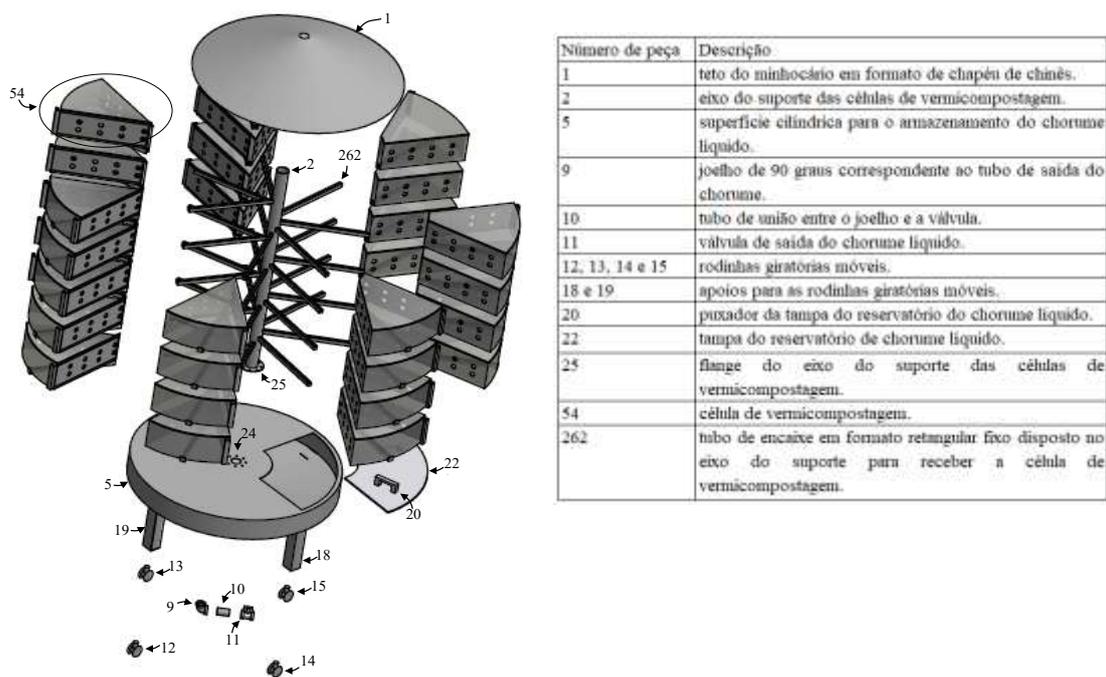


Figura 4.39 - Esquema tridimensional com vista superior lateral explodido dos elementos principais e auxiliares e o arranjo final da tecnologia que compreende o minhocário modular helicoidal para processamento distribuído de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

A tecnologia em questão, produz húmus, chorume líquido e minhocas excedentes por meio do processo de vermicompostagem, no qual prevalecem a praticidade do ponto de vista operacional, a montagem modular diferenciada, a praticidade na instalação, a operação contínua e, principalmente, a praticidade da alimentação dos resíduos orgânicos provenientes das refeições diárias, tendo em vista que esse material, acumulado diariamente, de forma contínua é alimentado em cada uma das células de vermicompostagem. Além do mais, pelo caráter modular, o sistema pode ser implementado em diversos tamanhos.

A instalação da tecnologia se encontra configurada pela conjunção de elementos fixos e móveis que estão dispostos da seguinte maneira:

- a) Os elementos fixos são compostos por um reservatório que possui uma geometria cilindro cônica que armazena chorume líquido que, por sua vez se encontra conectado por meio de um flange e esta peça se encontra ligada a um eixo equipado de suportes retangulares dispostos na forma helicoidal que servem para acomodar as células de vermicompostagem, além disso, o conjunto desses elementos incluem: rodinhas giratórias para suportar a tecnologia, um chapéu chinês e acessórios; e

- b) Os elementos moveis são compostos por 30 células de vermicompostagem, cada uma equipada com uma placa móvel projetada especificamente para abrir e fechar espaços circulares que permitem a comunicação entre as células, além disso, possuem um teto para proteção e cobertura das minhocas e os RO.

De forma geral, o minhocário modular helicoidal pela junção dos elementos depois de instalado pode: a) ficar exposto ao sol, chuva ou na sombra; e b) ser instalado em prédios, casas ou restaurantes.

O funcionamento da tecnologia ocorre da seguinte forma:

- i) Os resíduos orgânicos provenientes das refeições diárias serão alimentados e distribuídos diariamente nas células de vermicompostagem;
- ii) Para ter o controle do tempo de residência necessário para a transformação dos RO na tecnologia, foi disposto a utilização de 30 células, onde a cada dia poderão ser alimentados os resíduos gerados numa única célula;
- iii) Cada célula na pilha de vermicompostagem será nomeada de acordo com a sua posição vertical, começando pela célula mais próxima do chapéu chinês na parte superior da pilha. A primeira célula receberá o nome da trigésima célula de vermicompostagem, a segunda receberá o nome da vigésima nona célula, e assim por diante, até chegar à última célula na base da pilha, que receberá o nome da primeira célula de vermicompostagem;
- iv) A implementação da tecnologia começará com a alimentação dos RO gerados no dia na trigésima célula de vermicompostagem, juntamente com uma cultura inicial de minhocas. No dia seguinte, os resíduos gerados serão alimentados na célula vigésima nona e assim por diante, seguindo a sequência das células na pilha, até chegar à última célula na base da pilha;
- v) Após receber resíduos orgânicos, cada célula de vermicompostagem passará por um processo de estabilização e transformação dos RO em produtos. Esse processo terá a duração de 30 dias em cada célula da pilha;
- vi) Após o período de 30 dias de estabilização e transformação dos resíduos orgânicos, a célula de vermicompostagem correspondente, ou seja, a trigésima célula da pilha, terá que ser esvaziada para receber a próxima carga de resíduos, juntamente com uma nova cultura de minhocas, seguindo a ordem sequencial das células da pilha. Esse processo ocorrerá de forma contínua, com a retirada dos produtos e alimentação dos novos resíduos orgânicos;

- vii) Com relação às minhocas alimentadas na trigésima célula de vermicompostagem, a tecnologia conta com uma placa móvel que permite a comunicação entre as células de vermicompostagem. Cada placa móvel possui orifícios de comunicação, que possibilitam o deslocamento natural das minhocas para outra célula, caso haja falta de alimento suficiente na célula em que estão inicialmente. Esse processo é influenciado pela quantidade de alimento fornecido e pelo consumo das minhocas; e
- viii) Com relação à transformação dos RO, é possível obter também produtos em estado líquido, denominados como chorume, em cada célula de vermicompostagem. Devido ao ângulo de inclinação das células e à ação da gravidade, o líquido se moverá em direção ao suporte cilíndrico. Esse, por sua vez, conduzirá o líquido em direção ao reservatório cilindro cônico.

De forma geral, cada célula de vermicompostagem trabalha em batelada, com tempo de residência de 30 dias, cujo conjunto de 30 células de vermicompostagem operam de forma contínua. Descarregando o produto húmus e o chorume líquido, resultante do processo de vermicompostagem e na sequência carregando o resíduo orgânico doméstico. As minhocas são carregadas, apenas na trigésima célula de vermicompostagem, e após o tempo de residência, por meio da ativação dos orifícios das placas laterais das células de vermicompostagem, as minhocas migram de forma natural (pela falta de alimento) para as demais células de vermicompostagem. Nesse processo, além do húmus obtém-se as minhocas, e também o chorume líquido.

4.4.2.5. Consolidação da proposta do processamento distribuído de resíduos orgânicos

Na Figura 4.40 se apresenta os resultados consolidados da proposta referente ao processamento distribuído de resíduos orgânicos, neste caso aplicado ao Município de Toledo-PR. Nesse processo, com base no total de RO gerados no município de Toledo (77,69 t.dia⁻¹) pode gerar 46,61 t.dia⁻¹ de Húmus, 3,88 t.dia⁻¹ de Minhocas vivas e 7,77 t.dia⁻¹ de líquido rico em nutrientes para o solo. A tecnologia, de modo geral considera o aproveitamento total dos RO, possibilita a praticidade na hora da separação dos resíduos recicláveis e os rejeitos, os quais estarão livres de resíduos orgânicos. Desta forma, de forma indireta o uso da tecnologia possibilitará também a diminuição das fontes de contaminação ambiental, apresenta a possibilidade de geração de renda pela venda dos produtos

transformados, modelos de negócios para as empresas que utilizam como matéria prima a esses produtos, e modelos de negócios para empresas construtoras de equipamentos, considerando que seriam necessários aproximadamente 35.321 equipamentos a serem instalados no município de Toledo/PR.

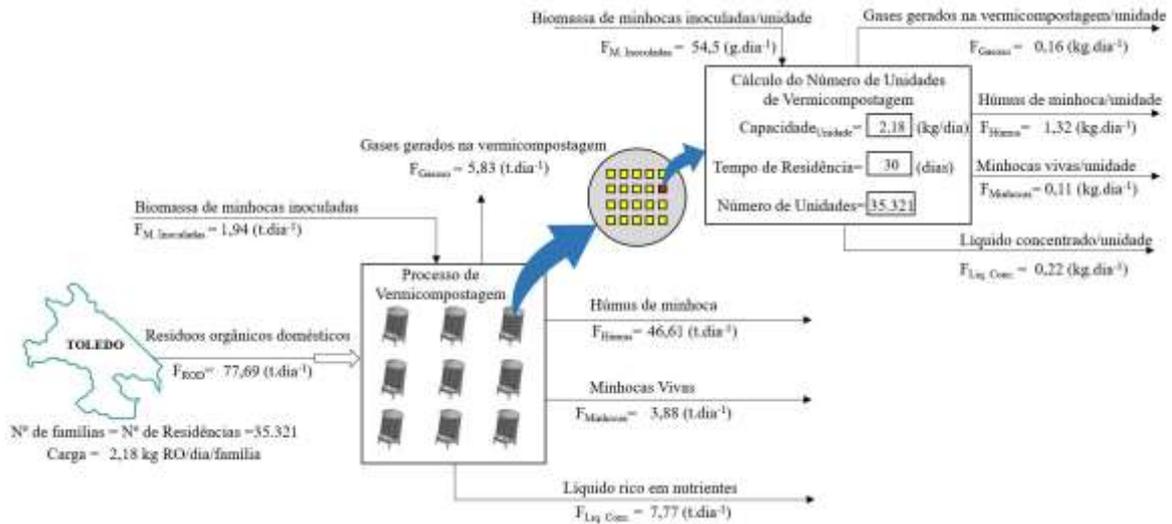


Figura 4.40 – Proposta referente ao processamento distribuído de resíduos orgânicos.
Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, apresenta-se a primeira opção para a industrialização dos resíduos orgânicos, por meio do qual pode-se viabilizar o aproveitamento do 100% dos “resíduos sólidos urbanos e rurais”.

Esta opção tecnológica deve promover as quebras de paradigmas na área ambiental, neste caso pela transformação dos resíduos orgânicos, que na atualidade são sinônimos de problemas, em oportunidades de novos modelos de negócios industriais com características sustentáveis e inovadoras, alinhados aos “17” Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

Os modelos de negócios envolvem a fabricação, comercialização, instalação e operação de equipamentos modulares. Assim, é possível oferecer uma alternativa tecnológica com expectativa de efeitos positivos nos âmbitos tecnológico, econômico e social. Nesse desafio, a questão ambiental se torna uma consequência positiva indireta.

4.4.3. Processamento centralizado de resíduos orgânicos

4.4.3.1. Processamento centralizado por meio da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos

Na Tabela 4.18 são apresentadas relações da produção de metano em função dos sólidos voláteis provenientes de processos de biodigestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos. Com base dos resultados encontrados foi identificado que resíduos de alimentos (frutas, vegetais, peixes e pão), resíduos de indústrias (soro de queijo, abate de bovinos e grãos de cervejaria) e resíduos de animais (esterco bovino, esterco de frango, esterco de cavalo, esterco de suíno e dejetos), conseguem produzir metano quando são tratados por meio de processos de biodigestão anaeróbica. De acordo com os dados encontrados, foi identificado que os resíduos de frutas (0,732) e os estercos de suínos na etapa de engorda (0,642) possuem elevadas relações para a produção de metano e resíduos como o esterco de humanos (0,112) possuem uma relação de produção de metano baixa. Nesse sentido pode-se concluir que tanto alimentos como estercos de suínos e bovinos podem ser elementos importantes para a geração de produtos utilizando processos de biodigestão na forma de combustíveis.

Tabela 4.18 – Relações da produção de metano em função dos sólidos voláteis provenientes de processos de biodigestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos.

Resíduos	Relação $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg. SV}$	Fonte
Esterco bovino	0,22 a 0,39	DONG <i>et al.</i> (2019)
Esterco + Urina de humanos	0,112	REGATTIERI <i>et al.</i> (2018)
Alimentos	0,311	GUERI <i>et al.</i> (2017)
Abate de bovinos	0,6416	WARE & POWER (2016)
Soro de queijo	0,168 a 0,174	ANTONELLI <i>et al.</i> (2016)
Esterco de frango	0,259	
Esterco de cavalo	0,155	
Esterco de cabra	0,159	KAFLE & CHEN (2016)
Esterco bovino leiteiro	0,204	
Esterco de suíno	0,323	
Esterco de suíno	0,385	JÚNIOR <i>et al.</i> (2009)
Esterco de suíno na etapa de gestação	0,170-0,310	
Esterco de suíno na etapa da maternidade	0,568	
Esterco de suíno na etapa de engorda	0,642	AMARAL <i>et al.</i> (2016)
Esterco de suíno na etapa de terminado	0,303	
Frutas e vegetais	0,43	SCANO <i>et al.</i> (2014)

Continuação da Tabela 4.18

Resíduos	Relação	Fonte
	m ³ CH ₄ /kg. SV	
Peixes	0,435 a 0,543	KAFLE <i>et al.</i> (2013)
Pão	0,306	
Grãos de Cervejaria	0,316-0,441	
Alimentos	0,4795	ZHANG, <i>et al.</i> (2011)
Suíno	0,2423	
Dejeto bovino	0,1-0,19	DONG <i>et al.</i> (2006)
Dejeto de suínos	0,29-0,48	
Frutas	0,180 a 0,732	GUNASEELAN (2004)
Vegetais	0,19 a 0,4	

Fonte: Elaboração própria.

Para identificar as potencialidades do biogás gerado nos processos de biodigestão anaeróbica, foi apresentado na Tabela 4.19 a composição química e as concentrações médias do biogás gerado em processos de biodigestão anaeróbica. Os resultados apresentaram que nesse cenário, dependendo da mistura de resíduos orgânicos e seu tratamento utilizando processos de biodigestão anaeróbica possibilita a geração de biogás apresentando concentrações entre 53 e 70% referente ao conteúdo de metano, entre 30 e 47% referente ao dióxido de carbono e entre 0 e 10.000 ppmv (0,1%v/v) de gás sulfídrico entre os mais importantes. Nesse sentido pode-se concluir que existe um grande potencial de aproveitamento desses gases para a obtenção de novos produtos.

Tabela 4.19 – Composição química e concentrações média dos gases gerados em processos de biodigestão anaeróbica.

Composto	Concentrações médias do biogás reportadas na literatura				
	MUÑOZ <i>et al.</i> (2015)	LINS <i>et al.</i> (2015)	REANSUWAN <i>et al.</i> , (2021)	CALBRY-MUZYKA <i>et al.</i> (2022)	CATHERINE & TWIZERIMANA (2022)
CH ₄	53-70 %	63,33%	68,10%	55,94%	64%
CO ₂	30-47 %	35,57%	26,59%	41,34%	32%
N ₂	0-3 %			2,675%	142-186 ppmv
H ₂ O	5-10 %				
O ₂	0-1 %			0,46%	2-4
H ₂ S	0-10000 ppm _v (cm ³ /m ³)	0,15%			

Continuação da Tabela 4.19

Composto	Concentrações médias do biogás reportadas na literatura				
	MUÑOZ <i>et al.</i> (2015)	LINS <i>et al.</i> (2015)	REANSUWAN <i>et al.</i> (2021)	CALBRY-MUZYKA <i>et al.</i> (2022)	CATHERINE & TWIZERIMANA (2022)
NH ₃	0 a 100 ppm _v (cm ³ /m ³)				
Hidrocarbonetos	0-200 mg/m ³				
Siloxanos	0-41 mg/m ³				

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.41 são apresentados os resultados (qualitativos e quantitativos) da transformação dos RO gerados no município de Toledo-PR em produtos gasosos e matéria orgânica digerida utilizando processos centralizados constituídos por processos de biodigestão anaeróbica de RO.

Na construção da Figura 4.41 prevaleceu o uso de dados referente: i) a capacidade de processamento centralizado calculado no item 4.2.5, onde se explicita que por dia são necessários realizar o tratamento de uma mistura de 77,69 t.dia⁻¹ de resíduos orgânicos domésticos, 77,69 t.dia⁻¹ de resíduos orgânicos provenientes de processos de criação e engorda de suínos/bovinos e a soma de 34,11 t.dia⁻¹ de resíduos proveniente da poda de árvores, palha de trigo, serragem de madeira e talos de milho; ii) a porcentagem de redução da massa resultante na forma de material digerido proveniente de processos de biodigestão anaeróbica (47,15%) reportados por CHAVEZ-RICO *et al.* (2022); iii) as relações mínimas referente à produção de metano em função dos sólidos voláteis dos resíduos orgânicos, reportadas na Tabela 4.18; e iv) foi considerado a concentração média dos compostos presentes no biogás a partir dos dados reportados por LINS *et al.* (2015), os quais se encontram na Tabela 4.19.

Os resultados apresentados na Figura 4.41 mostra que a alimentação de resíduos orgânicos domésticos, resíduos orgânicos provenientes de atividades de criação e engorda de animais e os resíduos considerados como matéria base (resíduos proveniente da poda de árvores, palha de trigo, serragem de madeira, talos de milho), tratados num processo centralizado, composto por um processo de biodigestão anaeróbica, podem gerar: a) 116,23 t.dia⁻¹ de resíduos orgânicos digeridos; e b) 21.979,66 m³.dia⁻¹ de biogás contendo 13.920

$\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$ de metano (CH_4), $7.818,2 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de dióxido de carbono (CO_2), $32,97 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de gás sulfídrico (H_2S) e $208,81 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de outros gases tendo a maior concentração na forma de vapores de água.

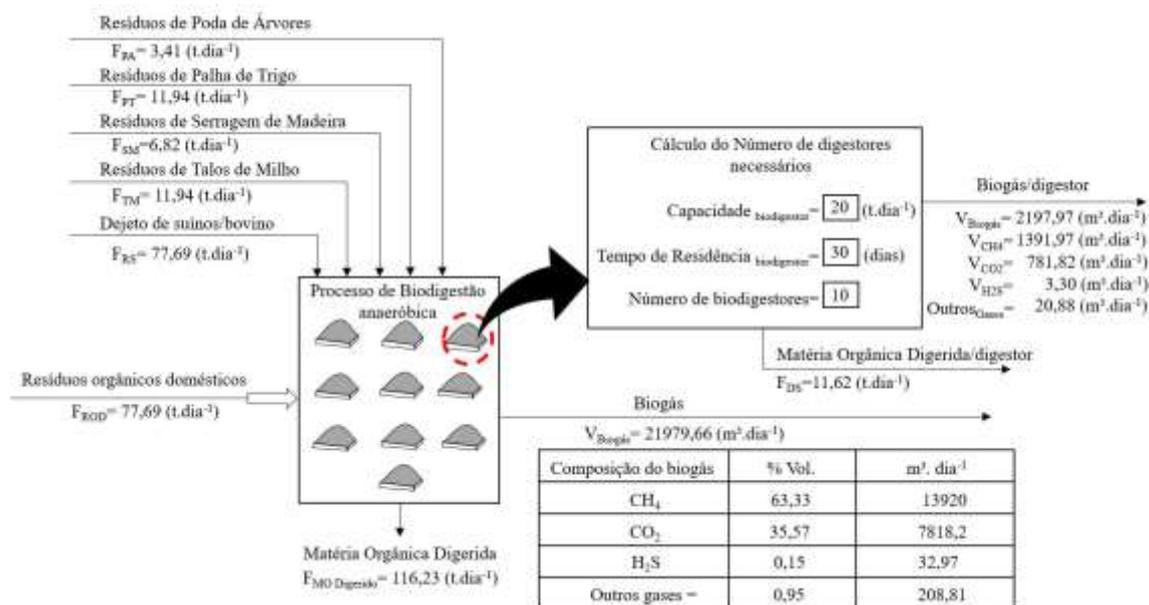


Figura 4.41 – Transformação dos RO gerados no município de Toledo-PR em produtos gasosos e matéria orgânica digerida utilizando processos centralizados constituídos por um processo de biodigestão anaeróbica de RO.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.41 e com relação à forma operacional para o manejo dos RO proveniente dessas atividades, considerando um processo centralizado, podem ser distribuídos os RO em um sistema de biodigestores.

De acordo com os cálculos, seriam necessários aproximadamente 10 biodigestores considerando para cada um uma capacidade de processamento de 20 t.dia^{-1} . Cada biodigestor terá a possibilidade de gerar: a) $11,62 \text{ t.dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos digeridos; b) $2.197,97 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de biogás; c) $1.391,97 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de metano (CH_4); d) $781,82 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de dióxido de carbono (CO_2); e) $3,30 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de gás sulfídrico (H_2S) e f) $20,88 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de outros gases, tendo a maior concentração na forma de vapor de água.

Com base nos resultados anteriores e com o objetivo de apresentar as possibilidades de aproveitamento referente aos produtos gerados no processo de biodigestão anaeróbica, neste caso considerando o biogás, foram realizados o cálculo do potencial de aproveitamento na forma econômica, referente à comercialização dos componentes presentes no biogás (CH_4 e CO_2) em seu estado puro, nesse contexto, foi encontrado que:

- i) Utilizando como base de cálculo a geração de $1.391,91 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de metano, gerado numa unidade de biodigestão (Figura 4.41), este em seu estado puro, pode ser comercializado como gás natural veicular (GNV composto por 88,5% de metano), considerando o custo de R\$ 4,85 o m^3 de GNV (COELHO, 2022), os $1.391,97 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ pode gerar uma renda R\$ 6.751 a cada dia, e considerando o volume de metano total gerado no processamento centralizado de $13.920 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de metano, este volume de gás poderia gerar uma renda de R\$ 67.511 a cada dia (equivalente a R\$ 2.025.319,26 ao mês); e
- ii) Utilizando como base de cálculo a geração de $781,82 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de CO_2 , gerado numa unidade de biodigestão (Figura 4.41), pode ser comercializado também em seu estado puro, e considerando o custo de R\$ 15,00 o kg de CO_2 equivalente a R\$ 29,64 o m^3 (GETEL, 2022), os $781,82 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ pode gerar uma renda R\$ 23.173,06 a cada dia (este valor é 3,4 vezes maior comparado com a renda calculada pela venda do metano), e considerando o volume de CO_2 total gerado no processamento centralizado de $7.818,17 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de CO_2 , este volume de gás poderia gerar uma renda de R\$ 231.730,56 a cada dia (equivalente a R\$ 6.951.916,76 ao mês).

Com base dos resultados anteriores e em função da necessidade da busca de soluções com relação as possíveis aplicações dos produtos gerados no processo de biodigestão, foi realizado o levantamento de dados referente as diversas possibilidades de aproveitamento desses produtos.

Nesse contexto, Na Figura 4.42 se apresenta, por meio de um diagrama de fluxo, o resultado da prospecção tecnológica referente aos tipos de produtos que podem ser gerados a partir dos produtos provenientes dos processos de biodigestão anaeróbica. Os resultados demonstraram que a partir dos produtos (biogás e sólido/líquido digerido) gerados na biodigestão anaeróbica, podem ser produzidos: 1) combustíveis com elevada concentração em metano, 2) dióxido de carbono puro, 3) gás sulfídrico e enxofre elementar, 4) amônia e ureia, 5) concentrados líquidos, e 6) sólidos orgânicos.

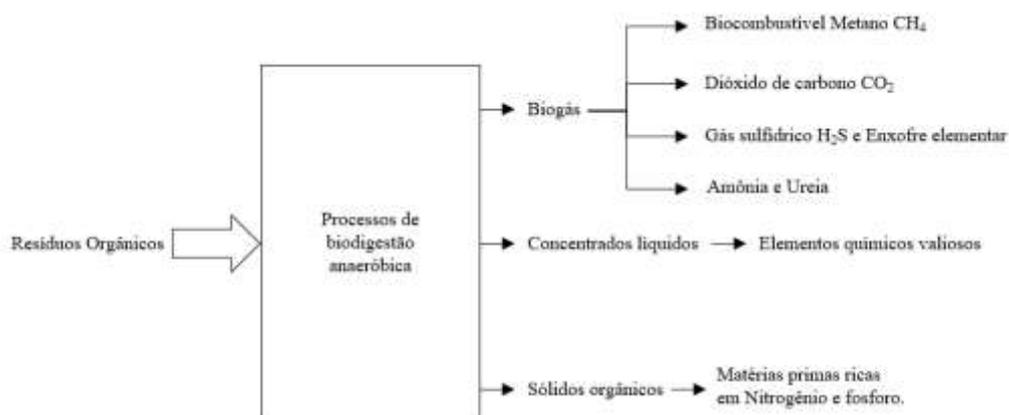


Figura 4.42 – Potencial de aproveitamento e transformação dos produtos gerados no processo de biodigestão anaeróbica para a obtenção de novos produtos.

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.42, na Tabela 4.20 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em bases de dados bibliográficos, relacionados com métodos e processos para aumentar a concentração do metano no biogás gerado em processos de biodigestão anaeróbica. Os resultados mostraram que:

- i) Existem métodos e processos que podem ser aplicados no mesmo local onde é gerado o biogás para aumentar a concentração do metano; e
- ii) Em outros casos, é possível instalar processos externos, que também demonstraram a capacidade de aumentar a concentração de metano no biogás, alcançando valores entre 82,4% e 99,99%.

Tabela 4.20 – Métodos e processos utilizados para aumentar a concentração do metano no biogás gerado em processo de biodigestão anaeróbica.

Local de aplicação do método/processo	Características do método/processo	Concentrações máximas alcançadas de CH ₄ no biogás tratado	Fonte
No biodigestor anaeróbico	O método refere-se à injeção de uma corrente gasosa de hidrogênio na fase líquida das unidades de biodigestão anaeróbica. No qual o hidrogênio injetado reage com o dióxido de carbono, formando um biometano e de forma paralela esta ação possibilita a redução do nível ácido da matéria orgânica, produzindo assim um material digerido com um pH próximo aos 7.	Este método consegue aumentar a concentração do metano no biogás tratado, alcançando concentrações de 95,2%.	DÍAZ <i>et al.</i> (2020)

Continuação da Tabela 4.20

Local de aplicação do método/processo	Características do método/processo	Concentrações máximas alcançadas de CH ₄ no biogás tratado	Fonte
No biodigestor anaeróbico	<p>O método refere-se à injeção de um mineral denominado como wollastonita (mineral a base de silício e cálcio) no lodo do biodigestor anaeróbico.</p> <p>O método consiste em sequestrar quimicamente ao CO₂ por meio da reação química entre o mineral e o CO₂, o resultado da reação é a formação de precipitados na forma de carbonatos.</p>	Este método consegue aumentar a concentração do metano no biogás tratado, alcançando concentrações de 81,7 a 82,4%.	ZHANG <i>et al.</i> (2019)
Processo externo	O processo refere-se a reduzir o conteúdo de CO ₂ e o H ₂ S no biogás, utilizando métodos de depuração química, o processo consiste em injetar o biogás bruto (produzido nos biodigestores) diretamente a um reator em formato de colunas onde se encontra depositado um solvente e pelo contato direto entre biogás e solvente acontece o fenômeno de absorção, onde gases como o CO ₂ e o H ₂ S são transferidos ao meio líquido, e desta forma é que se consegue aumentar o conteúdo de metano na corrente gasosa do biogás tratado.	Dependendo do tipo de solvente a ser utilizado, o processo consegue alcançar concentrações de 88,04% quando o biogás é tratado com NaOH e 85,9% com Ca(OH) ₂ .	VAN TRAN <i>et al.</i> (2022)
Processo externo	<p>O processo refere-se ao uso de colunas de absorção composta por membranas ocas de contato fabricado a base de polietileno.</p> <p>As membranas ocas têm a característica de separar fisicamente a corrente gasosa com a corrente líquida (composta por soluções absorventes como o NaOH), onde por meio dos poros da membrana, são difundidos seletivamente os gases como o CO₂ e H₂S em direção ao meio líquido.</p>	Este método consegue aumentar a concentração do metano no biogás tratado, alcançando concentrações de 99,99%.	PETUKHOV <i>et al.</i> (2022)

Continuação da Tabela 4.20

Local de aplicação do método/processo	Características do método/processo	Concentrações máximas alcançadas de CH ₄ no biogás tratado	Fonte
	O processo refere-se ao uso de colunas de adsorção (em base seca) compostas por leitos que conseguem capturar seletivamente ao CO ₂ provenientes de correntes gasosas. O material adsorvente pode estar constituído por: zeólitas modificadas (produzidas a partir das cinzas provenientes de usinas termelétricas), carvão ativado granulado CAG, sílica gel ou zeólitas 13X.	Este processo consegue aumentar a concentração do metano no biogás tratado, porém, este processo depende do tipo de adsorvente a ser utilizado, por exemplo, i) as zeólitas modificadas conseguem alcançar concentrações de 98%; ii) a sílica gel alcança aos 97,3%; iii) o CAG alcança concentrações de 97,1%; e iv) as zeólitas 13X conseguem alcançar concentrações de 97%.	FERELLA <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.42, na Tabela 4.21 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em bases de dados de patentes e artigos, relacionados com métodos e processos de absorção e dessorção para recuperar o dióxido de carbono (CO₂) capturado tanto em adsorventes líquidos como em adsorventes sólidos. Os resultados mostraram que:

- i) A maioria dos métodos/processos utilizam solventes à base de aminas para realizar a absorção e dessorção do CO₂;
- ii) Alguns métodos/processos empregam a mistura de solventes a base de aminas para aumentar a capacidade absorção e dessorção do CO₂;
- iii) O processo de absorção com solventes ocorre, em termos operacionais, em temperaturas de 20 a 60°C.
- iv) O processo de dessorção com solventes ocorre, em termos operacionais, em temperaturas de 70 a 150°C; e
- v) Verificou-se que os solventes à base de aminas apresentam uma alta capacidade de absorção de CO₂ em comparação com métodos que utilizam um gel semissólido para essa finalidade.

Tabela 4.21 – Métodos e processos de absorção/dessorção para recuperar o dióxido de carbono capturado tanto em solventes como em adsorventes

Tipo de documento	Características do método/processo	Tipo de adsorvente ou adsorbente	Temperatura de absorção e dessorção	Relação de absorção	de	Fonte
Artigo	O método refere-se a um gel que pode ser utilizado em processos de adsorção e dessorção do CO ₂ . O processo utilizado pelo autor descreve ao conjunto de etapas compostas por uma etapa de alimentação dos gases, uma etapa para realizar o preaquecimento dos gases, uma etapa composta por um reator que possibilita a absorção do CO ₂ , e depois de atingir a uma saturação do solvente, o mesmo reator pode ser utilizado para receber calor e ativar desta forma o processo de dessorção do CO ₂ .	Gel semissólido a base de quitosana, ácido acético, NaOH e impregnado com solventes orgânicos.	A temperatura de absorção é de 50°C e a temperatura de dessorção é de 90°C.	60-68 mg CO ₂ por g de adsorbente		KATAOKA <i>et al.</i> (2022)
Artigo	O método refere-se à utilização de um solvente constituído pela mistura de 3 aminas (monoetanolamina MEA, Butiletanolamina BEA e N,N-dietiletanolamina DEEA) com catalizadores sólidos comerciais. Em base as informações, os autores explicam que esta combinação de elementos pode ser utilizada em processos tradicionais de absorção e dessorção do CO ₂ .	Mistura de solventes orgânicos (MEA, BEA e DEEA) com catalizadores comerciais	A temperatura de absorção é de 298 a 323°K (24,5 a 49,85°C) e a temperatura de dessorção é de 70 a 85°C.	0,75-0,78 mol CO ₂ por mol de adsorbente		SHI <i>et al.</i> (2022)
Artigo	O método refere-se a um solvente a base de aminas misturadas com zeólitas que podem ser utilizadas em processos de absorção e dessorção do CO ₂ .	Solvente a base de aminas e zeólitas	A temperatura de absorção é de 303°K (29,85°C) e a temperatura de dessorção é de 363°K (89,85°C).	0,42-0,51 mol de CO ₂ por mol de adsorbente		ULUS <i>et al.</i> (2022)
Patente	Na patente US2021/0039040-A1 apresentam diversas combinações de solventes orgânicos que oferecem maior resistência fenômenos de desnaturação química (absorção de gases indesejáveis) e térmica (perda do solvente por evaporação) nos processos de absorção e dessorção do CO ₂ .	Solventes compostos por aminas e compostos a base de éter	A temperatura de absorção é de 20 a 60°C e a temperatura de dessorção é de 70 a 150°C.	50-90 g de CO ₂ por kg de adsorbente		LEE <i>et al.</i> (2021)

Continuação da Tabela 4.21

Tipo de documento	Características do método/processo	Tipo de adsorvente ou absorvente	Temperatura de absorção e dessorção	Relação de absorção	Fonte
Artigo	O método refere-se ao uso de catalizadores em processos de dessorção do CO ₂ . Os catalizadores estão constituídos por um material mesoporoso MCM-41 (elemento fabricado a base de silicato e aluminossilicatos) que foi modificado com oxido de ferro Fe ₂ O ₃ . De acordo com os resultados dos autores, este catalizador modificado consegue aumentar o rendimento da dessorção dos solventes comumente utilizados como absorventes de CO ₂ em correntes gasosas.	Solvente a base de MEA	A temperatura de absorção é de 40°C e a temperatura de dessorção é de 98°C.	0,356 mol de CO ₂ por mol de absorvente	ZHANG <i>et al.</i> (2020)
Patente	Na patente CN109351125A apresentam um diagrama de processo para a regeneração dos solventes a base de amina utilizados para na absorção do CO ₂ . O processo está composto por: i) uma etapa de alimentação dos gases a ser tratados, ii) etapas de absorção de CO ₂ , composta por colunas de adsorção, iii) etapas de dessorção, composta por uma coluna de dessorção para separar ao CO ₂ do solvente e na mesma coluna de dessorção se encontram dispostas duas colunas catalíticas que têm por finalidade a separação dos compostos químicos absorvidos denominados como elementos indesejáveis (H ₂ S) por meio da precipitação catalítica, trocadores de calor, bombas e condensadores.	Solventes orgânicos constituídos por aminas	A temperatura do processo é dependente das condições operacionais do solvente.	É dependente do tipo de solvente a utilizar no processo.	ZHIWU <i>et al.</i> (2019)
Artigo	O processo de dessorção do CO ₂ refere-se à utilização de dispositivos de ultrassom (sob atmosfera de nitrogênio) para acelerar o processo de dessorção do CO ₂ .	Solventes orgânicos a base de BTMG (2-terc-butil-1,1,3,3-tetrametilguanidina) e hexanol.	A temperatura de absorção é de 303°K (29,85°C) e a temperatura de dessorção é de 353°K (79,85°C).	1,05 mol de CO ₂ por mol de BTMG	ORHAN <i>et al.</i> (2017)
Patente	Na patente US200902082977-A1 descreve um processo de purificação de gases de combustão, composto por unidades de adsorção de CO ₂ , unidades de lavagem de gases, unidades de dessorção de CO ₂ e dispositivos complementares para produzir CO ₂ puro utilizando como líquido absorvente misturas de água com soluções orgânicas compostas por aminas.	Solventes a base da mistura de aminas com água.	A temperatura do processo é dependente das condições operacionais do solvente.	É dependente do tipo de solvente a utilizar no processo.	KOSS (2009)

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.42, na Tabela 4.22 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em bases de patentes, relacionados com métodos e processos para produzir gás sulfídrico e/ou enxofre elementar a partir do biogás, gerado no processo de biodigestão anaeróbica. Os resultados mostraram que:

- i) Existem um conjunto de métodos/processos que dependendo da característica do processo podem ser obtidos produtos como o H₂S e enxofre elementar; e
- ii) Com relação aos elementos que possibilitam a separação do H₂S do biogás, dependendo do processo podem ser utilizados solventes a base de água, solventes com material biológico ou membranas químico-catalíticas.

Tabela 4.22 – Métodos e processos para produzir gás sulfídrico e/ou enxofre elementar a partir do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbica.

Nº de Patente	Características do método/processo	Produtos	Fonte
WO2018/132884-A1	A patente refere-se a um processo de dessulfuração, constituído por: i) uma etapa de alimentação do gás; ii) uma etapa de preaquecimento do gás; iii) uma etapa de absorção onde o gás é tratado com água para diminuir o conteúdo de H ₂ S na corrente gasosa; iv) uma etapa catalítica para capturar o H ₂ S que não foi removido na etapa anterior, nesta etapa o H ₂ S capturado se converte em enxofre elementar; v) uma etapa de secagem do para retirar a umidade do gás tratado; vi) uma etapa de dessorção onde a mistura de água com H ₂ S são separados utilizando energia térmica produzindo assim o H ₂ S puro para sua industrialização.	Gás sulfídrico e Enxofre elementar.	REINERT (2018)
CN215209282U	A patente refere-se a um processo de dessulfuração, constituído por: i) uma etapa de absorção onde o gás é tratado com um líquido rico em atividade biológica provenientes de um biorreator; ii) uma etapa composta por um biorreator onde são cultivados microrganismos que transformam o H ₂ S em enxofre elementar; iii) uma etapa composta por um dispositivo de separação, nesta etapa são separados o enxofre elementar; iv) uma etapa de filtragem; e v) centrifugado para obter um pó puro composto por enxofre elementar.	Enxofre elementar.	ZHIGANG (2021)
CN114307617A	A patente refere-se a um processo de dessulfuração do tipo químico e catalítico. O processo está dotado de um dispositivo que possibilita a dessulfuração de combustíveis gasosos contendo H ₂ S e baixo conteúdo de oxigênio. O dispositivo possui uma membrana nanoporosa compostas por materiais ricos em carbono e óxido de cobre. De acordo com a informação encontrada na patente, o dispositivo atua como um composto químico e como um agente catalítico oxidando de forma seletiva ao H ₂ S e convertendo-o em enxofre elementar.	Enxofre elementar.	CHAO <i>et al.</i> (2022)

Continuação da Tabela 4.22

Nº de Patente	Características do método/processo	Produtos	Fonte
WO 2014/150196 A1	A patente refere-se a um processo de dessulfuração, constituído por: i) etapas de absorção de H ₂ S utilizando como líquido absorvente ao efluente líquido proveniente do processo de biodigestão anaeróbica; e ii) uma etapa de regeneração do absorvente, por meio da injeção direta de oxigênio no meio líquido, esta ação possibilita que o H ₂ S seja liberado em forma de gases que podem ser industrializados. Segundo as informações apresentadas pelos autores, a eficiência da remoção desse poluente gasoso pode alcançar aos 84%.	Gás sulfídrico.	KENNEDY <i>et al.</i> (2014); KENNEDY <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.42, na Tabela 4.23 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em bases de patentes e artigos, relacionados com métodos e processos para produzir ureia e amônia a partir do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbica. Os resultados indicaram o seguinte:

- i) Há pouca informação disponível sobre os processos produtivos para obtenção de amônia e ureia a partir do biogás;
- ii) Diante dessa falta de informação, foi necessário buscar alternativas para obter os insumos necessários para a produção de amônia e ureia. Nesse contexto, descobriu-se que a combustão do biogás pode ser uma fonte de matéria-prima para a produção desses produtos. Através da combustão, é gerado um produto gasoso composto por CO, N₂, CO₂, O₂, H₂ e CH₄, dos quais o H₂ e o N₂ podem ser aproveitados para produzir a amônia. Além disso, a reação entre a amônia e o CO₂ permite a produção de ureia;
- iii) Observou-se que os produtos gasosos gerados pela combustão do biogás requerem processos de absorção para purificar os gases utilizados na produção de amônia e ureia; e
- iv) Em termos operacionais, a síntese da amônia requer pressões de 80 a 90 bar e temperaturas de 450 a 500°C, enquanto a síntese da ureia requer pressões de 20 a 25 bar e temperaturas de 150 a 220°C.

Tabela 4.23 – Métodos e processos para produzir gás sulfídrico e/ou enxofre elementar a partir do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbica.

Tipo de documento	Matéria prima	Característica do método/processo	Produtos	Fonte
Artigo	Gases resultantes da combustão do biogás.	O processo está constituído por: i) uma etapa de recuperação dos gases (CO, N ₂ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ e CH ₄) provenientes da combustão de combustíveis (biogás); ii) na sequência os gases de combustão passam uma etapa composta por um reator onde acontecem reações químicas de deslocamento água-gás para formar produtos como o CO ₂ e H ₂ a partir da reação entre CO e H ₂ O; iii) na sequência o gás sem presença de CO e H ₂ O, passam a uma etapa de absorção de CO ₂ , utilizando adsorventes a base de hidrotalcita; iv) seguidamente o gás sem CO ₂ , em caso de que existisse compostos a base de enxofre, este gás devera de passar por uma etapa de adsorção utilizando leitos compostos por oxido de zinco; v) seguidamente o gás livre de enxofre, no caso da existência de oxigênio, este devera de ser removido utilizando processos de metanação (reação química entre CH ₄ e O ₂ para formar CO e H ₂); vi) na sequência o gás limpo entra a um reator, onde acontece a reação entre H ₂ e o N ₂ (por meio catalizadores a base de magnetita), para a obtenção da amônia; e vii) na sequência a amônia formada na anterior etapa pode ser alimentada junto com o CO ₂ puro para formar a ureia.	Amônia e Ureia.	DE KLEIJNE <i>et al.</i> (2020)
Artigo		Os processos utilizados para a obtenção de Amônia e Ureia obtidos a partir de matérias primas provenientes da combustão, utilizam pressões e temperaturas elevadas para sintetizar a amônia e a ureia, por exemplo, no caso da sintetização da amônia são necessários pressões de 80 a 90 bar e temperaturas de 450 a 500°C e no caso da sintetização a ureia são necessários pressões de 20 a 25 bar e temperaturas de 150 a 220°C	Amônia e ureia.	JEENCHAY & SIEMANOND (2018)
Patente	Amônia e CO ₂	Na patente US9732033-B2 apresentam um processo para realizar a sintetização da ureia. O processo está constituído por: i) uma etapa onde acontece a sínteses da ureia a partir da reação de sintetização entre a amônia e o CO ₂ , ii) uma etapa de evaporação para eliminar a água presente na ureia, iii) uma etapa de acabamento para a produção de uma ureia granulada, iv) uma etapa para a depuração da poeira, v) uma etapa de condensação do líquido evaporado na etapa de evaporação, vi) uma etapa para o tratamento do líquido condensado, e vii) condensadores e evaporadores adicionais.	Ureia	MENNEN & MEESSEN (2017)

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.42, na Tabela 4.24 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica em bases de dados bibliográficos, referente a busca das características e formas de aproveitamento do concentrado líquido, gerado em processos de biodigestão anaeróbica. Os resultados demonstraram que o concentrado líquido gerado no processo de biodigestão: i) não pode ser utilizado de forma direta como fertilizante, precisa de processos alternativos para realizar a eliminação de patógenos; ii) a partir do líquido concentrado, previa eliminação de patógenos, podem ser obtidos fertilizantes para processos hidropônicos no cultivo de alimentos; iii) a partir do líquido concentrado, mediante processos de dessorção e precipitação química podem ser obtidos como produtos ao sulfato de amônio; e iv) a partir de processos de separação fracionada podem ser obtidos compostos a base de potássio, cálcio, sódio, magnésio, amônia e fosforo.

Tabela 4.24 – Características e formas de aproveitamento do concentrado líquido gerado no processo de biodigestão anaeróbica.

Matéria prima	Característica	Possibilidade de aproveitamento	Fonte
Líquido concentrado gerado no processo de biodigestão anaeróbica		Pode ser aproveitado como fertilizante líquido, porém, não é possível seu aproveitamento de forma direta.	SÖDERGREN <i>et al.</i> (2022)
	Possui elevada carga de nutrientes, porém, possui patógenos.	Precisa de processos de nitrificação para eliminar aos patógenos. O produto resultante desse processo pode ser aproveitado como um fertilizante líquido podendo ser utilizados em processos de produção hidropônica de hortaliças	
	Possui concentrações elevadas de elementos como o potássio, cálcio, sódio e magnésio.	Por meio de processos de precipitação química e filtração, podem ser separados esses elementos e podem ser aproveitados como matérias primas para produzir novos produtos.	OLUGBEMIDE & LIKOZAR (2022)
	Possui amônia na sua composição química	Por meio de processos de dessorção e colunas de precipitação química utilizando ácido sulfúrico, a amônia pode ser recuperada na forma de sulfato de amônia.	LEVERENZ <i>et al.</i> (2021)

Continuação da Tabela 4.24

Matéria prima	Característica	Possibilidade de aproveitamento	Fonte
Líquido concentrado gerado no processo de biodigestão anaeróbica	Está constituído por elementos como o fosforo e a amônia	Por meio de processos de separação utilizando membranas, estes elementos podem ser separados de forma fraccionada e aproveitados como produtos.	ZACHAROF <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.42, na Tabela 4.25 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em bases de dados bibliográficos, referente a busca das características e formas de aproveitamento dos sólidos orgânicos resultantes do processo de biodigestão anaeróbica. Os resultados demonstraram que os sólidos orgânicos resultantes de processos de biodigestão anaeróbica não podem ser utilizados de forma direta como fertilizantes, por apresentar elevadas cargas de contaminantes na forma de atividade patogênica e metais pesados, nesse contexto, para aproveitar o conteúdo de macronutrientes compostos, principalmente, por fosforo e nitrogênio, o sólido orgânico devesa de ser tratado por processos térmicos para eliminar aos patógenos e processos adicionais para realizar a eliminação de todos esses elementos contaminantes, por exemplo, uma opção pode ser o uso de processos de compostagem e vermicompostagem.

Tabela 4.25 – Características e formas de aproveitamento dos sólidos orgânicos resultantes do processo de biodigestão anaeróbica.

Matéria prima	Característica	Possibilidade de aproveitamento	Fonte
Sólidos orgânicos resultante do processo de biodigestão anaeróbica	Possui macronutrientes (compostos por fosforo e nitrogênio) e patógenos.	Sua aplicação direta como fertilizante é inviável por apresentar atividade patogênica. Precisa de processos externos para realizar a eliminação desses patógenos. O produto resultante pode ser utilizado como biofertilizante.	NGHIEM <i>et al.</i> (2017)
	Possui metais pesados Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} , e Pb^{2+} .	Dependendo das matérias primas a serem tratadas nos processos de biodigestão anaeróbica, o sólido resultante pode apresentar metais pesados na sua composição.	VAISH <i>et al.</i> (2022)

Continuação da Tabela 4.25

Matéria prima	Característica	Possibilidade de aproveitamento	Fonte
	Possui metais pesados Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} , e Pb^{2+} .	Sua aplicação direta como fertilizante é inviável, precisa de processos adicionais para eliminar ou reduzir a concentração desses contaminantes.	KNOOP <i>et al.</i> (2017)
		Se for utilizando como fertilizante, as plantas podem chegar a absorver aos metais pesados.	ALVES <i>et al.</i> (2008),
Sólidos orgânicos resultante do processo de biodigestão anaeróbica	Possui elevadas concentrações de nitrogênio comparado com o líquido concentrado resultante do processo de biodigestão anaeróbica, devido a que organismos patogênicos como a <i>Salmonella</i> e a <i>Klebsiella spp</i> possibilitam a fixação do nitrogênio nos sólidos orgânicos.	Para aproveitar o nitrogênio a partir dessa matéria prima, esse material pode de passar por processos de tratamento térmico para eliminar a carga patogênica e por processos de separação para obter um produto concentrado a base de nitrogênio. O produto resultante pode ser utilizado como insumo para a fabricação de fertilizantes.	ALFA <i>et al.</i> (2014)

Fonte: Elaboração própria.

4.4.3.2. Processamento centralizado por meio da estabilização do material digerido nos sistemas biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem de resíduos orgânicos

Na Figura 4.43 são apresentados os resultados (quantitativos) da estabilização do material orgânico proveniente do sistema de biodigestão anaeróbica, por meio do processo de compostagem. Nesse processo prevaleceu o uso de dados referentes: i) a quantidade do material digerido (sólido/líquido orgânico) resultante do processo centralizado composto por processos de biodigestão anaeróbica, conforme os resultados do item 4.4.3.1; ii) ao tempo de residência de 30 dias como tempo necessário para realizar a estabilização dos RO; e iii) a porcentagem de redução dos RO (61,7%) utilizando processos de compostagem, reportados por CHAVEZ-RICO *et al.* (2022).

Os resultados apresentados na Figura 4.43, mostra que a quantidade mássica do material orgânico proveniente dos sistemas de biodigestão anaeróbica, quando tratados por

um processo de estabilização utilizando processos de compostagem, podem gerar 71,71 t.dia⁻¹ de matéria orgânica estabilizada e 44,52 t.dia⁻¹ de produtos gasosos.

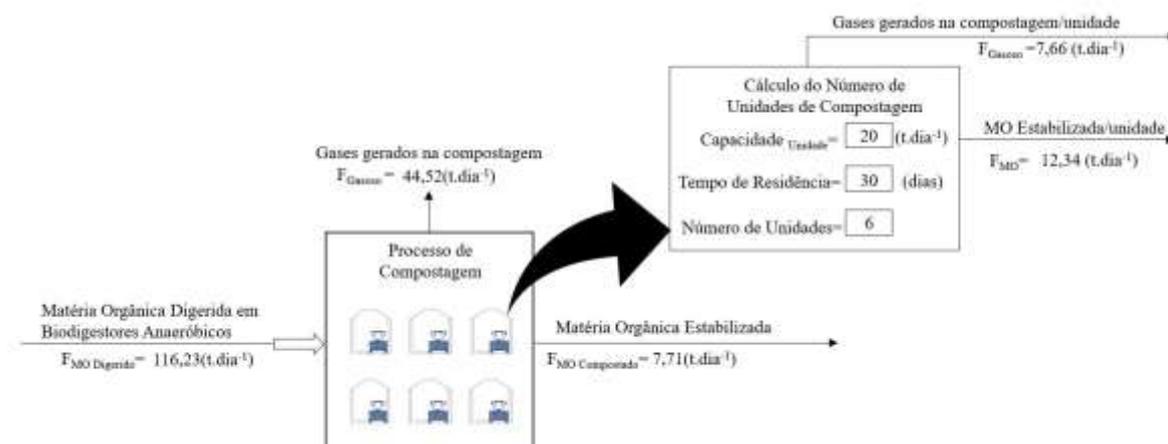


Figura 4.43 – Estabilização do material orgânico proveniente do sistema de biodigestão anaeróbica por meio do processo de compostagem.
Fonte: Elaboração própria.

Considerando um processamento centralizado, conforme os resultados apresentados na Figura 4.43 e com relação à forma operacional para o manejo do material orgânico proveniente do sistema de biodigestão anaeróbica podem ser distribuídos em sistemas constituídos por unidades de compostagem, segundo o cálculo aproximadamente são necessárias 6 unidades, considerando uma capacidade de processamento de 20 t.dia⁻¹, cada unidade de compostagem terá a possibilidade de gerar 12,34 t.dia⁻¹ de resíduos orgânicos estabilizados.

Devido às características dos materiais estabilizados por meio desse processo, não é possível utilizá-los diretamente como fertilizantes ou produtos derivados, uma vez que podem conter elementos contaminantes, incluindo patógenos e metais pesados em sua composição, nesse sentido, existe a necessidade de processos posteriores que possibilitem a sua limpeza tanto química como biológica, podendo ser utilizados processos centralizados por meio de processos de vermicompostagem.

4.4.3.3. Processamento centralizado por meio do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos

Na Figura 4.44 são apresentados os resultados (quantitativos) do processamento centralizado dos RO provenientes do processo de compostagem, por meio do processo de

vermicompostagem de resíduos orgânicos. Na construção desse processo prevaleceu o uso de dados referente: i) a quantidade de material orgânico estabilizado no processo de compostagem, conforme os resultados do item 4.4.3.2; ii) a porcentagem de produção de húmus (60%) a partir do RO processados pelo processo de vermicompostagem; iii) a relação de inoculação foi de 0,025kg de minhocas por cada kg de resíduos orgânicos; iv) o crescimento da biomassa, considerando como dado que no lapso de 30 dias, a massa das minhocas conseguem aumentar o dobro de seu peso inicial; e v) um tempo de residência de 30 dias de processamento.

Os resultados apresentados na Figura 4.44, mostrou que a quantidade mássica do material orgânico estabilizado proveniente do sistema de compostagem, quando tratados por um processo de vermicompostagem, podem gerar: 43,03 t.dia⁻¹ de húmus de minhoca, 3,59 t.dia⁻¹ de minhocas vivas, 7,17 t.dia⁻¹ de líquidos concentrados ricos em nutrientes e 5,38 t.dia⁻¹ de gases gerados no processo de vermicompostagem.

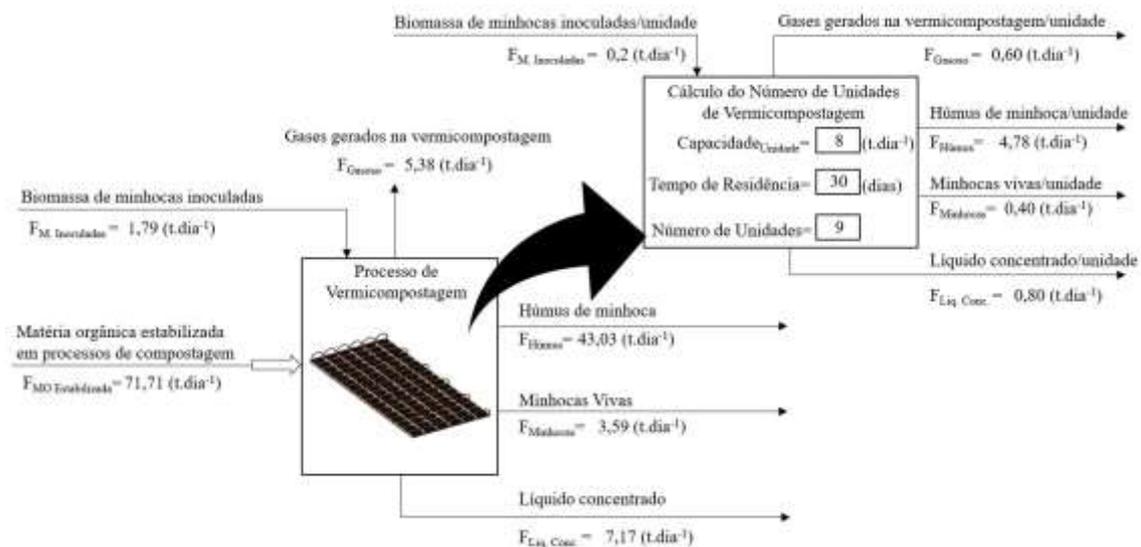


Figura 4.44 – Processamento centralizado por meio do processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.44 e com relação à forma operacional para o manejo do material orgânico estabilizado nos sistemas de compostagem, considerando um processamento centralizado, podem ser distribuídos em sistemas constituídos por unidades de vermicompostagem, segundo o cálculo aproximadamente são necessárias 9 unidades, considerando uma capacidade de processamento de 8 t.dia⁻¹, cada unidade de vermicompostagem terá a possibilidade de gerar 4,78 t.dia⁻¹ de húmus de

minhoca, 0,40 t.dia⁻¹ de minhocas vivas, 0,80 t.dia⁻¹ de líquidos concentrados ricos em nutrientes e 0,60 t.dia⁻¹ de gases gerados no processo de vermicompostagem.

Com base nos resultados anteriores e com o objetivo de apresentar as possibilidades de aproveitamento referente aos produtos gerados no processo de vermicompostagem, neste caso considerando o húmus gerado, foram realizados o cálculo do potencial de aproveitamento na forma econômica, referente a comercialização do húmus, neste contexto foi encontrado que: utilizando a base de cálculo da geração de 4,78 t.dia⁻¹ de húmus de minhoca, este pode ser comercializado como um biofertilizante, considerando o custo mínimo que pode ser encontrado no mercado de R\$ 9,2 o kg, os 4,78 t.dia⁻¹ de húmus de minhoca pode gerar uma renda R\$ 43.984,5 a cada dia (R\$ 1.319.536 por mês) e considerando o processo centralizado neste caso considerando todas as unidades de vermicompostagem, os 43,03 t.dia⁻¹ de húmus de minhoca pode gerar uma renda R\$ 395.861 a cada dia (R\$ 11.875.823,5 por mês).

Em função dos resultados anteriores foi realizado a busca de informação referente a ao potencial de aproveitamento do húmus gerado no processo de vermicompostagem, neste caso, para a obtenção de novos produtos. Na Tabela 4.26 são apresentados dados referentes ao potencial de aproveitamento do húmus gerado no processo de vermicompostagem. Na Tabela 4.27 são apresentados dados referentes ao potencial de aproveitamento do líquido rico em nutrientes gerado no processo de vermicompostagem.

Tabela 4.26 – Potencial de aproveitamento do Húmus de minhoca gerado no processo de vermicompostagem e as suas aplicações.

Matéria prima	Insumos	Processo	Produtos	Aplicação	Autor
	Soluções químicas	Extração	Fertilizante líquido	Fertilizante líquido	CULLINAN <i>et al.</i> (2021)
	Terras diatomáceas de água doce	Mistura	Terra com húmus	Cultivo de plantas	ROCHA (2018)
	Lodo de curtume e terra vermelha	Mistura		Produção de mudas de café	BERILLI <i>et al.</i> (2018)
Húmus	Fertilizante químico a base de NPK	Mistura	Substrato com húmus	Cultivos de tomate e repolho	GOSWAMI <i>et al.</i> (2017)
	Metro Mix 360	Mistura		Estimula o crescimento das plantas	BACHMAN & METZGER (2008)
	Água	Adsorção	Adsorvente	Remoção de metais pesados.	ARRUDA <i>et al.</i> (2003)

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4.27 – Potencial de aproveitamento do líquido concentrado rico em nutrientes gerado no processo de vermicompostagem e as suas aplicações.

Matéria prima	Insumos	Processo	Produtos	Aplicação	Fonte
Líquido concentrado rico em nutrientes	Fertilizante inorgânico solúvel em água a base de ureia, potássio, silicato de magnésio e outros.	Mistura	Fertilizante líquido	Cultivo de plantas.	YING <i>et al.</i> (2022)
		Lixiviação e filtração	Fertilizante líquido	Cultivo de plantas	SINGH & KALAMDHAD (2016)
	Húmus de minhoca e água	Lixiviação, mistura e filtração	Fertilizante líquido	Cultivo de plantas	FERREIRA (2009)
		Mistura	Fertilizante líquido	Cultivo de plantas	ALENCASTRO (2008)
	Água e ar	Mistura	Líquido para controle de doenças nas plantas	Controle de superficial de doenças e pragas nas plantas.	GARCIA (2005)
	Lignite e um agente extrator de nutrientes (NaOH)	Mistura, extração e filtração	Fertilizante líquido	Cultivo de plantas	OLVERA (2003)

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados nas Tabelas 4.26 e 4.27, na Figura 4.45 são apresentados, por meio de um diagrama de fluxo, a concentração de dados referente às diversas possibilidades de aproveitamento com relação aos principais produtos gerados no processo de vermicompostagem.

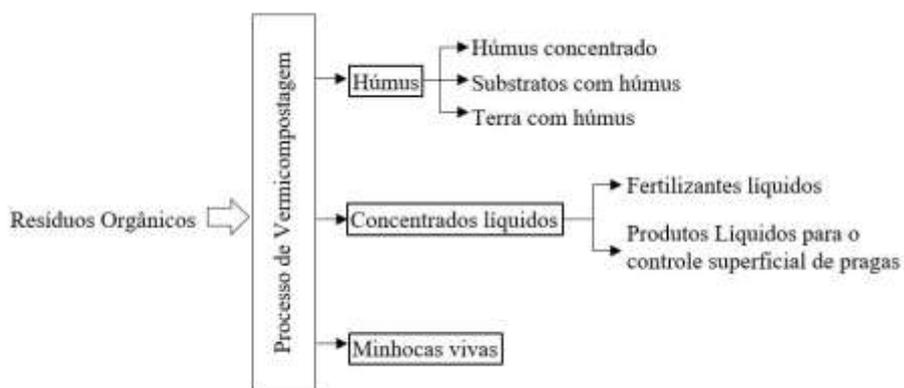


Figura 4.45 – Diversas Possibilidades do aproveitamento dos produtos gerados no processo de vermicompostagem.

Fonte: Elaboração própria.

4.4.3.4. Potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem de resíduos orgânicos

Na Tabela 4.28 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em base de dados bibliográficos, referentes a busca de informações relacionadas com o potencial de aproveitamento das minhocas vivas. Na construção da tabela prevaleceu a busca de informações referente a: i) matéria prima, ii) produtos, iii) aplicações e a iv) fonte. Os resultados demonstraram que a partir das minhocas vivas podem ser obtidos 2 tipos de produtos considerados como produtos primários: a) o primeiro produto primário, esta composta pela obtenção de farinha de minhoca, onde a partir deste produto podem ser obtidos 6 tipos de produtos secundários para a fabricação de suplementos alimentares para aves, suplementos alimentares para peixes, suplemento alimentares para suínos e insumos para a fabricação de remédios; e b) o segundo produto primário, esta composta pela obtenção do líquido celomático, onde a partir deste produto podem ser obtidos 8 tipos de produtos que podem ser utilizados como insumos para a fabricação de alimentos funcionais, insumos para a fabricação de cremes cicatrizantes e insumos para a fabricação de remédios.

Tabela 4.28 – Prospecção referente ao potencial de aproveitamento das minhocas.

Matéria prima	Produto	Aplicações	Fonte	
	Farinha de minhoca	Suplemento alimentar para aves	QIONG <i>et al.</i> (2022); ZANG <i>et al.</i> (2018)	
		Suplemento alimentar para peixes	LIMING & GUOFU (2022)	
		Suplemento alimentar para suínos	HAONAN (2021)	
		Insumo para a fabricação de remédios para reduzir o conteúdo de gorduras no sangue e para remover doenças cardiovasculares e cerebrovasculares	CHANGGUI (2022)	
		Minhocas Vivas	Insumo para a fabricação de remédios para aumentar a imunidade em humanos	DONGZE (2021)
			Insumo para a fabricação de cremes para controlar a velocidade de crescimento de tumores	YONG (2021)
Líquido celomático		Insumo para a fabricação de alimentos funcionais	SWIDERSKA <i>et al.</i> (2017)	
		Insumo para a fabricação de cremes cicatrizantes	XIAOHUI <i>et al.</i> (2022); AMARPAL <i>et al.</i> (2015)	
		Insumo para a fabricação de remédios direcionados para o tratamento de doenças trombóticas	(LIMING <i>et al.</i> 2022)	

Continuação da Tabela 4.28

Matéria prima	Produto	Aplicações	Fonte
		Insumo para a fabricação de remédios para controlar o câncer tumoral	DENG <i>et al.</i> (2019)
		Insumo para a fabricação de analgésicos e anti-inflamatórios	LI <i>et al.</i> (2017)
Minhocas Vivas	Líquido celomático	Insumo para a fabricação de fármacos do tipo antibacterianos	MURUGAN & UMAMAHESWARI, (2021)
		Insumo para controlar e reduzir o crescimento e a atividade de fungos parasitas nas plantas	PLAVŠIN <i>et al.</i> (2017)
		Insumo para a fabricação de remédios anticoncepcionais	MUKHERJEE <i>et al.</i> (2004)

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.46 são apresentados por meio de um diagrama de fluxo o potencial de aproveitamento das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem.

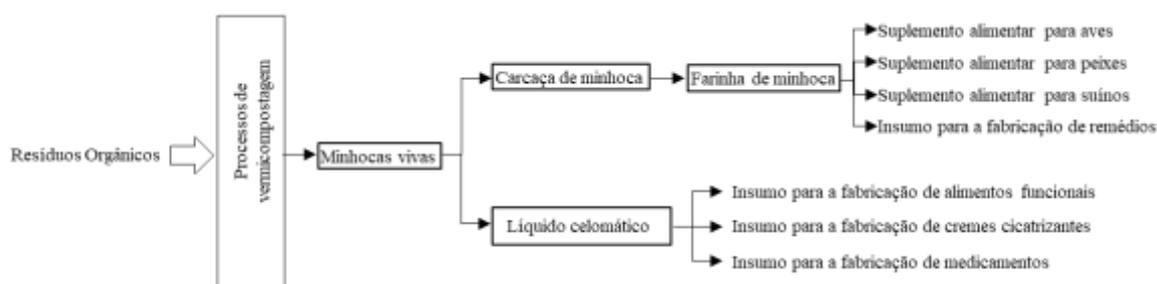


Figura 4.46 – Potencial de aproveitamento dos produtos gerados no processo de vermicompostagem.

Fonte: Elaboração própria.

Em função das informações apresentadas na Figura 4.46, na Tabela 4.29 são apresentados os resultados da prospecção tecnológica realizada em bases de patentes e artigos, relacionados com métodos e processos para a obtenção dos produtos primários provenientes das minhocas vivas. Na construção da tabela prevaleceu a busca de informações referente ao: i) tipo de documento, ii) a matéria prima, iii) método/processo, e iv) produto, v) rendimento (% de massa final resultante do processo), e vi) a fonte. Os resultados demonstraram que na literatura existem 9 tipos de métodos e processos para obter farinha de minhocas e 3 tipos de métodos e processos para obter o líquido celomático a partir das minhocas vivas.

Tabela 4.29 – Prospecção referente aos métodos/processos para obtenção de produtos primários a partir das minhocas vivas.

Tipo de Documento	Matéria prima	Insumos	Método/Processo	Produto	Rendimento	Fonte
Patente		Água pura	O processo está constituído por etapas de lavagem, secagem e moagem			YONG <i>et al.</i> (2022)
Artigo		Água pura	O processo está constituído por etapas de lavagem, congelamento a -28°C, liofilização e moagem.			TEDESCO <i>et al.</i> (2019)
Patente	Minhocas vivas	Soluções alcalinas, água e ácidos carboxílicos	O processo está constituído por etapas de: i) lavagem com soluções alcalinas, ii) lavagem com água, iii) lavagem com ácidos carboxílicos, iv) lavagem com água, v) moagem e vi) liofilização.			ISHII (2012)
Patente		Água pura	O processo está constituído por etapas de: i) lavagem a temperaturas entre 30 e 35°C, ii) congelamento a -20°C, iii) liofilização em câmaras sob vácuo a uma temperatura de -40°C, iv) moagem, v) embalagem, vi) esterilização com raios gama para eliminar agentes patógenos.	Farinha de minhoca		TABLAS (2001)
		Água pura	O método refere-se a expor as minhocas em água fervente, posteriormente passam para a etapa de secagem num forno a 95°C e moagem.		11,6	
		Não precisa de insumos	O método refere-se ao Congelamento, liofilização e moagem.		13,5	
Artigo	Minhocas vivas lavadas	Acetona	O método refere-se a expor as minhocas com acetona por 1h e secagem ao ar.		14,5	EDWARDS <i>et al.</i> (2011)
		Acetona	O método refere-se a expor as minhocas com acetona por 1h, secagem ao ar, e secagem forçada utilizando um forno a 95 °C.		12,8	
		Não precisa de insumos	O método refere-se a secagem direta das minhocas vivas num forno a 95°C.		15,2	

Continuação da Tabela 4.29

Tipo de Documento	Matéria prima	Insumos	Método/Processo	Produto	Rendimento	Fonte
Patente		Água destilada, ácido cítrico, e membranas orgânicas.	O processo está composto por etapas de: i) lavagem com água destilada, ii) separação do líquido de lavagem, iii) centrifugação, iv) separação do líquido sobrenadante obtido na anterior etapa é separado, v) extração do líquido celomático com ácido cítrico, vi) ultrafiltração utilizando uma membrana orgânica, nesta etapa é obtido o líquido celomático denominado no processo como o filtrado, e vii) na sequência o material filtrado passa por uma etapa de separação, purificação e secagem utilizando um processo de cromatografia líquida para obter o peptídeo.	Líquido celomático e material do tipo peptídeo.		LIMING <i>et al.</i> (2022)
Patente	Minhocas vivas	Água limpa, solução extratora, coluna cromatográfica Sephadex G200.	O método está composto por etapas de: i) lavado com água limpa, ii) remoção e expulsão dos resíduos sólidos que se encontram na parte interna das minhocas, utilizando água pura a uma temperatura de 2-8 °C por um tempo de 2 a 4 h, iii) lavagem e moagem úmido, iv) centrifugação para obter um líquido sobrenadante denominado como solução bruta (líquido celomático) de hemoglobina, v) na sequência a solução bruta de hemoglobina é misturado com uma solução extratora, vi) seguidamente a solução resultante da etapa anterior passa por um processo de separação da hemoglobina utilizando uma coluna cromatográfica utilizando Sephadex G200, e vii) na sequência o concentrado cromatográfico passa por uma etapa de liofilização para obter um pó de hemoglobina;	Líquido celomático, e hemoglobina de minhoca		HUIMIN <i>et al.</i> (2021)
Artigo		Água destilada	O processo está composto por etapas de: i) separação e lavado das minhocas maduras utilizando água destilada, e ii) eletroestimulação, utilizando eletrodos com tensões de saída de 6 V por um lapso de tempo de 60 s e utilizando 3 choques com intervalos de 30 s. O processo permite extrair aproximadamente 5 g de líquido celomático a partir de 30 g de minhocas vivas.	Líquido celomático.	16,66%	ZHANG <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Elaboração própria.

4.4.3.5. Caracterização das minhocas, extração do líquido celomático (com a utilização de solventes orgânicos) e obtenção da carcaça de minhocas

A Figura 4.47 se apresenta uma foto das minhocas vivas separadas do vermicomposto. Na sequência na Figura 4.48 são apresentadas as minhocas vivas previamente lavadas com água. Finalmente, na Figura 4.49 se ilustra as partes das minhocas para a sua caracterização



Figura 4.47 – Minhocas vivas separadas do vermicomposto.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 4.48 – Minhocas vivas previamente lavadas.

Fonte: Elaboração própria.

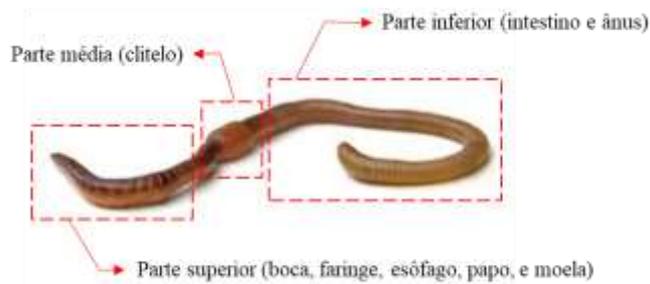


Figura 4.49 – Partes consideradas na caracterização das minhocas.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.30 são apresentados os resultados da caracterização das minhocas referente ao conteúdo de umidade, porcentagem de absorção de água e massa seca de minhocas contendo líquido celomático, carcaça de minhoca e sangue.

Tabela 4.30 – Caracterização mássica das minhocas – Porcentagem de Umidade, porcentagem de absorção de água e porcentagem dos elementos presentes na minhoca.

Descrição	Unidades	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Média	Desvio padrão amostral
M(CM+UM+LC+SM)	g	1,8163	0,9870	1,3852	1,3962	0,4148
M(CM+UM+LC+SM+AA)	g	2,2289	1,1816	1,8041	1,7382	0,5268
M(CM+LC+SM)	g	0,3850	0,1993	0,3223	0,3022	0,0945
M(UM)	g	1,4313	0,7877	1,0629	1,0940	0,3230
M(AA)	g	0,4126	0,1946	0,4189	0,342	0,1278
P(CM + LC + SM)	% p/p	21,1969	20,1925	23,2674	21,5523	1,5680
P(UM)	% p/p	78,8031	79,8075	76,7326	78,4477	1,5680
P(AA)	% p/p	22,717	19,716	30,241	24,495	5,4221

CM = carcaça de minhoca; UM = conteúdo de água na minhoca; LC = conteúdo de líquido celomático nas minhocas; SM = conteúdo de sangue nas minhocas; AA = água absorvida pela minhoca; P = Fração mássica; M = massa.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4.31 são apresentados os resultados da caracterização das minhocas referente ao conteúdo de resíduos orgânicos digeridos localizados na parte interna das minhocas, conteúdo do líquido celomático/sangue e o conteúdo da carcaça.

Tabela 4.31 – Caracterização da minhoca: Fração de resíduos orgânicos digeridos localizados na parte interna das minhocas, fração do líquido celomático/sangue e a fração da carcaça da minhoca.

Descrição	Unid.	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Média	Desvio padrão amostral
M(CM+UM+LC+SM+RDI)	g	1,2905	1,5124	0,9745	1,2591	0,2703
M(RDI)	g	0,0470	0,0551	0,0356	0,0459	0,0098
M(CM + UM + LC + SM)	g	1,2435	1,4574	0,9391	1,2133	0,2605
M(UM)	g	0,9755	1,1433	0,7367	0,9518	0,2043
M(PSM livre de UM, LC e SM)	g	0,0535	0,0627	0,0405	0,0522	0,0112
M(PMM livre de UM, LC e SM)	g	0,0478	0,0561	0,0362	0,0467	0,0100
M(PIM livre de UM, LC e SM)	g	0,0627	0,0735	0,0474	0,0612	0,0131
M(LC + SM)	g	0,1040	0,1219	0,0786	0,1015	0,0218
P(PSM livre de UM, LC e SM)	% p/p	4,3024	4,3022	4,3126	4,3057	0,0060
P(PMM livre de UM, LC e SM)	% p/p	3,8440	3,8493	3,8548	3,8494	0,0054
P(PIM livre de UM, LC e SM)	% p/p	5,0422	5,0432	5,0474	5,0443	0,0027
P (LC+SM)	% p/p	8,3637	8,3642	8,3697	8,3659	0,0033

RDI = resíduos orgânicos digeridos localizados na parte interna da minhoca; PSM = parte superior da minhoca; PMM = parte média da minhoca; PIM = parte inferior da minhoca.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os dados apresentados na Tabela 4.30 e 4.31, para um melhor entendimento na Figura 4.50 são apresentados os resultados da caracterização da minhoca. Os resultados demonstraram que:

- i) Do peso total da minhoca, 3,64% são compostos pelos resíduos orgânicos consumidos pelas minhocas, localizados internamente em seus corpos. Os restantes 96,36% são compostos por 13,19% de carcaça, 8,36% de líquido celomático e sangue, e 78,45% de água;
- ii) Com base na análise experimental do teor de água nas minhocas realizada neste trabalho e considerando os dados apresentados por EDWARDS *et al.*, (2011), os valores obtidos estão dentro da faixa esperada (teor de água entre 78-88%); e
- iii) Em relação ao teor de líquido celomático e sangue nas minhocas, identificou-se experimentalmente que os valores obtidos estão abaixo dos valores relatados por ZHANG *et al.*, (2016), onde, por meio do processo de eletrólise, foi possível extrair de 13,33 a 16,66% em peso de líquido celomático.

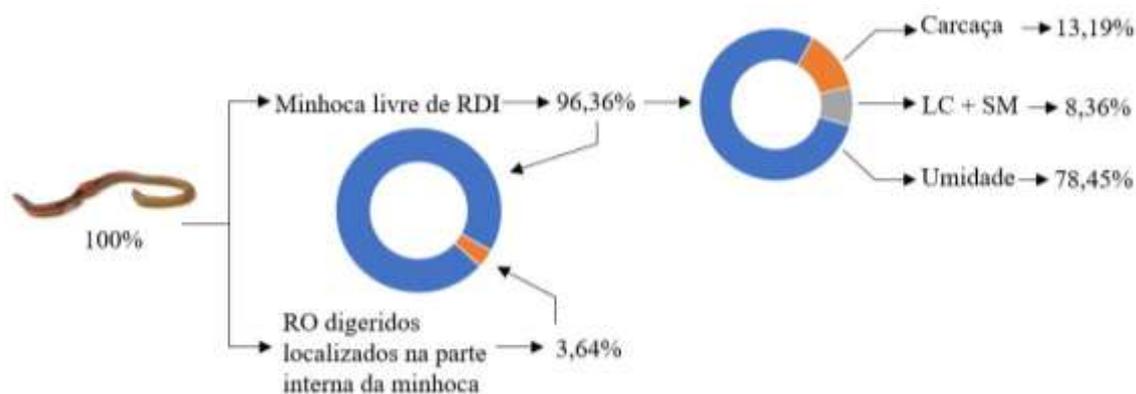


Figura 4.50 – Resultado da caracterização das minhocas.
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.51 são apresentadas a relação temporal das fotografias que registram o acompanhamento da biodegradação anaeróbica das minhocas quando foram submersas em um solvente orgânico (álcool etílico). Os resultados revelaram que, mesmo estando em um ambiente isolado e submersas no álcool etílico, as minhocas foram capazes de se decompor de forma anaeróbica. Isso foi evidenciado pela mudança na coloração do solvente, que se tornou mais escura. Além disso, ao abrir os recipientes, observou-se a geração de gases com mau odor decorrentes do processo de biodegradação. Embora este estudo tenha sido conduzido de forma qualitativa, ele demonstra que as minhocas não devem ser armazenadas em solventes.

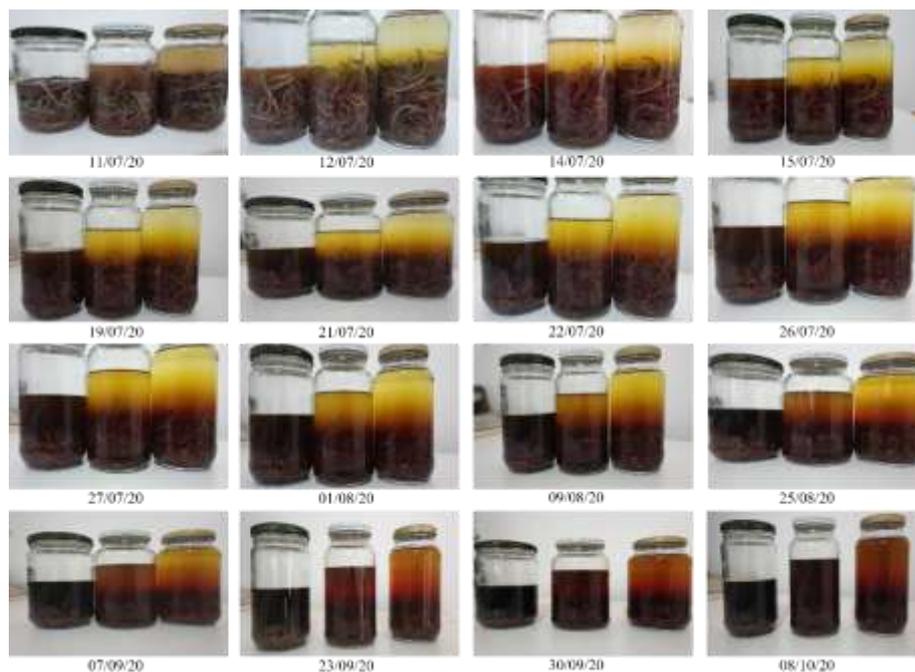


Figura 4.51 – Resultado da biodegradação anaeróbica das minhocas.
 Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.52 são apresentados os resultados referentes a extração do líquido celomático utilizando 2 tipos de solventes (solvente A - álcool isopropílico de 99,8% e solvente B - álcool etílico de 70%). Na Figura 4.53 são apresentados a variação da massa da carcaça das minhocas depois de ser realizado a extração do líquido celomático com os solventes (solvente A - álcool isopropílico de 99,8% e solvente B - álcool etílico de 70%) em função do tempo.

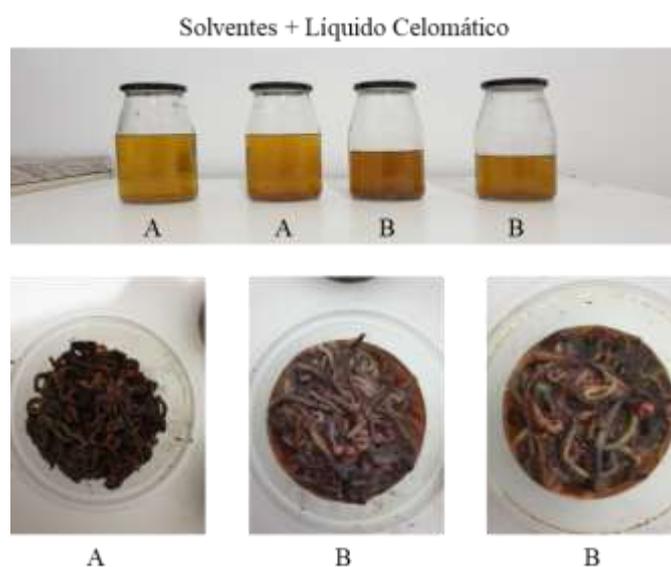


Figura 4.52 – Resultado referente a extração do líquido celomático utilizando 2 tipos de solventes (solvente A - álcool isopropílico e solvente B - álcool etílico).
 Fonte: Elaboração própria.

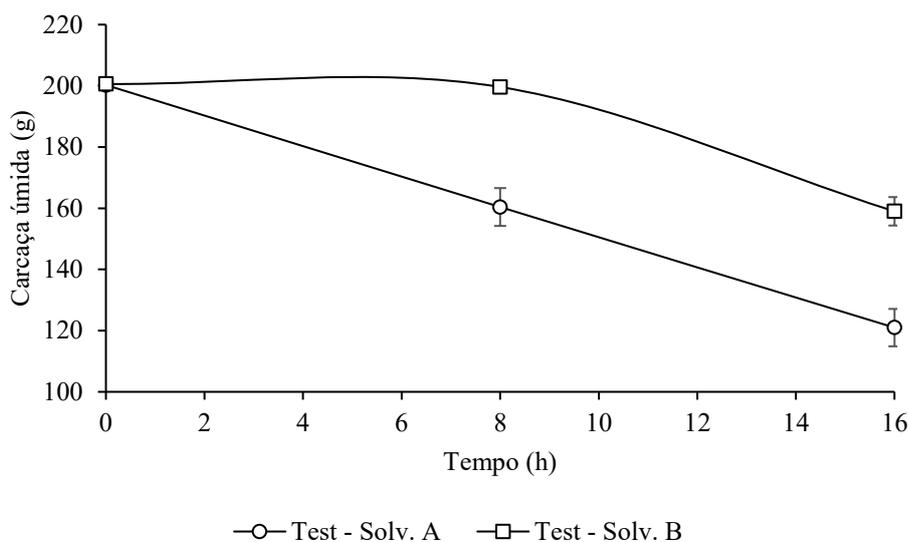


Figura 4.53 – Resultado referente variação da massa da carcaça das minhocas depois de ser realizado a extração do líquido celomático com os solventes (solvente A - álcool isopropílico e solvente B - álcool etílico em função do tempo.

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.52 e 4,53, foi identificado que:

- i) A extração do líquido celomático utilizando o solvente orgânico do tipo A (álcool isopropílico) permite uma expulsão mais rápida do LC em comparação com o solvente do tipo B (álcool etílico). Isso foi identificado devido ao fato de que o solvente A causa maior estresse nas minhocas. Ao mesmo tempo, pode-se observar que as minhocas resultantes apresentam baixo teor de umidade no produto final (carcaças com pouco conteúdo de umidade); e
- ii) No caso do solvente B, foi identificado que a minhoca atua como um adsorvente e nesse sentido não consegue expulsar rapidamente ao LC, isto foi percebido quando depois de realizar a separação do solvente e a minhoca utilizando meios filtrantes, a minhoca separada com o passar do tempo começava a expulsar um produto líquido conforme apresentado nas figuras acima. Este resultado prova que o solvente A em termos de operabilidade, consegue ser superior tanto na extração do líquido celomático como na obtenção de carcaças semiúmidas.

Para identificar as potencialidades dos solventes utilizados na extração do líquido celomático, foi realizado a análise qualitativa dos compostos químicos absorvidos pelos solventes utilizando um cromatógrafo de gases com espectrômetro de massas CG-MS da

Marca Agilent modelo 7890A. Para essa finalidade foi utilizada uma coluna do tipo DB-5MS com 30m x 0,25 mm x 0,25 μm , e hélio ultrapuro como gás de arraste.

Com rela o ao procedimento das condi es operacionais no CG-MS para a análise: a) a temperatura do injetor foi configurada para 260 $^{\circ}\text{C}$; b) a vazão do gás de arraste foi de 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; c) a corrida cromatográfica foi realizada a 60 $^{\circ}\text{C}$ por 2 min., na sequência uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ foi empregada até alcançar a uma temperatura de 300 $^{\circ}\text{C}$ permanecendo nesta por 6 min.; d) foi utilizado um detector de massas do tipo quadrupolo; e) a temperatura do quadrupolo e da fonte foi configurada para 150 $^{\circ}\text{C}$ e 250 $^{\circ}\text{C}$ respectivamente; e f) para a identifica o dos compostos foram utilizados os bancos de dados NIST08 e NIST11 de espectros de massa.

Nas Figuras 4.54 e 4.55 se apresentam os resultados dos cromatogramas das análises realizadas no cromatógrafo de gases com espectrômetro de massa a amostras resultantes do processo de extra o do líquido celomático utilizando solventes a base de álcool isopropílico e álcool etílico respectivamente.

Na Figura 4.56 são apresentados os resultados referentes aos compostos químicos identificados por meio da análise cromatográfica da amostra resultante da extra o do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool isopropílico e a descri o das aplica es desses compostos.

Na Figura 4.57 são apresentados os resultados referentes aos compostos químicos identificados por meio da análise cromatográfica da amostra resultante da extra o do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool etílico e, em cada caso, a descri o das aplica es desses compostos.

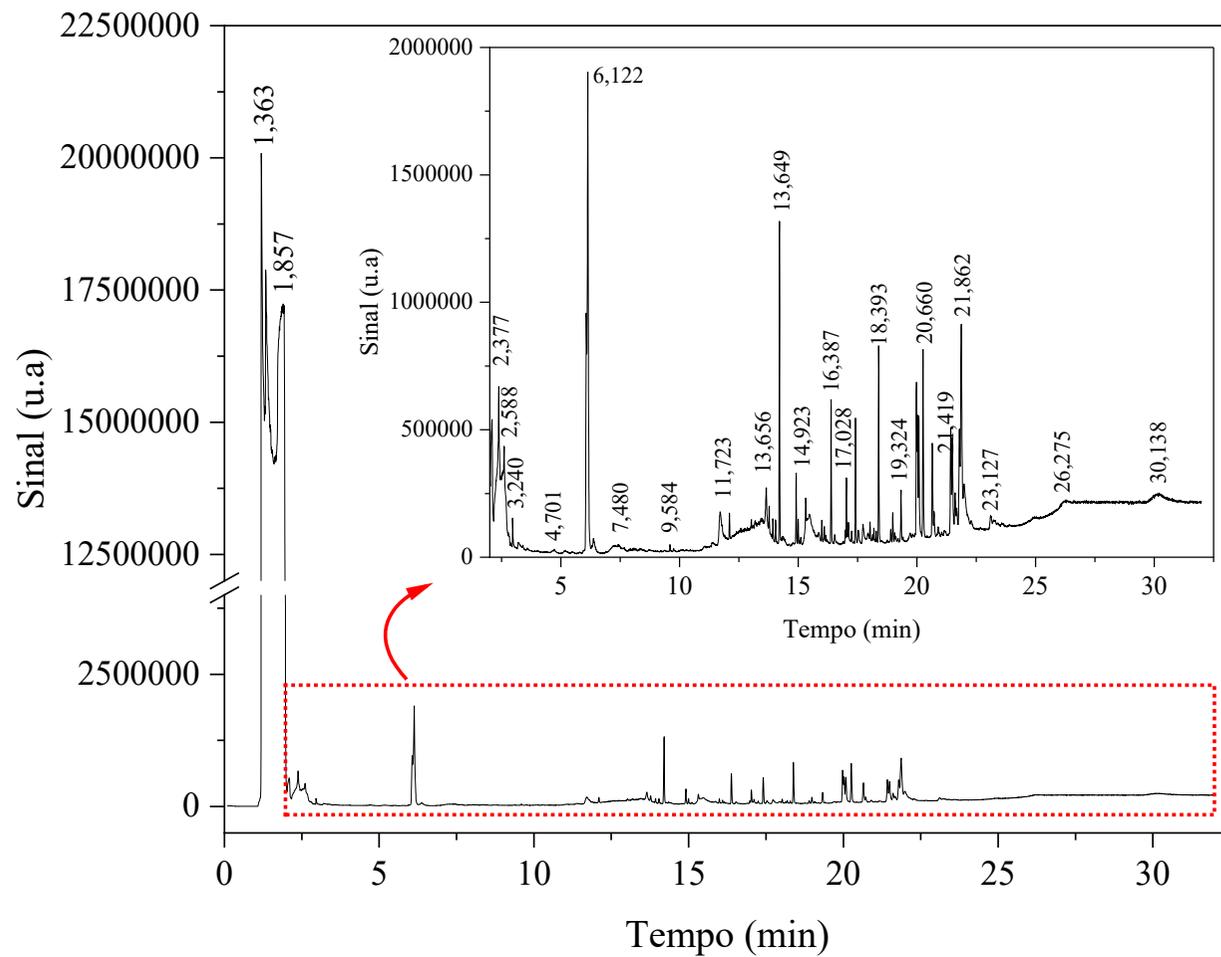


Figura 4.54 – Resultado das análises realizadas no cromatógrafo de gases com espectrômetro de massa a amostras resultantes do processo de extração do líquido celomático utilizando solventes a base de álcool isopropílico.

Fonte: Elaboração própria.

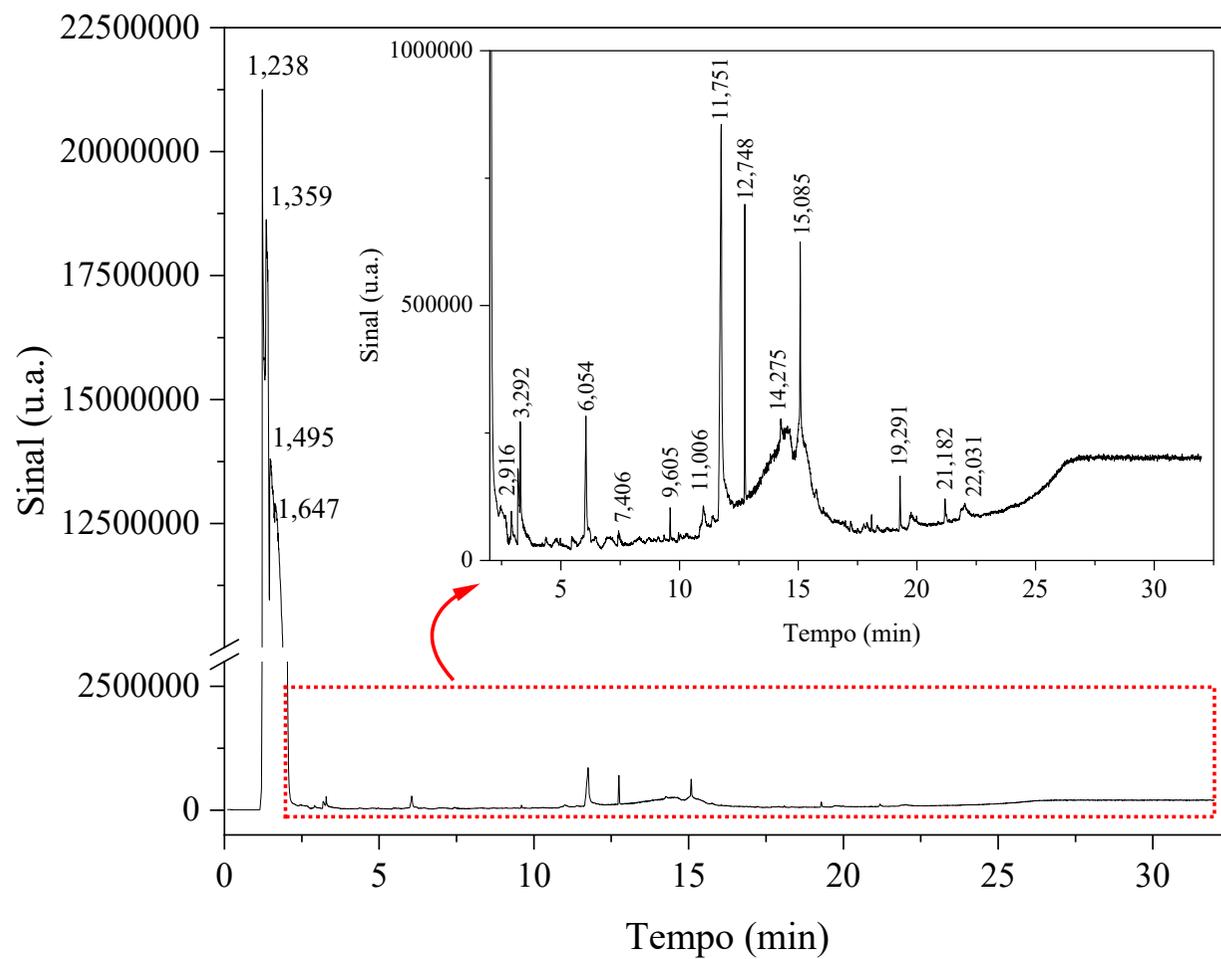


Figura 4.55 – Resultado das análises realizadas no cromatógrafo de gases com espectrômetro de massa a amostras resultantes do processo de extração do líquido celomático utilizando solventes a base de álcool etílico.

Fonte: Elaboração própria.

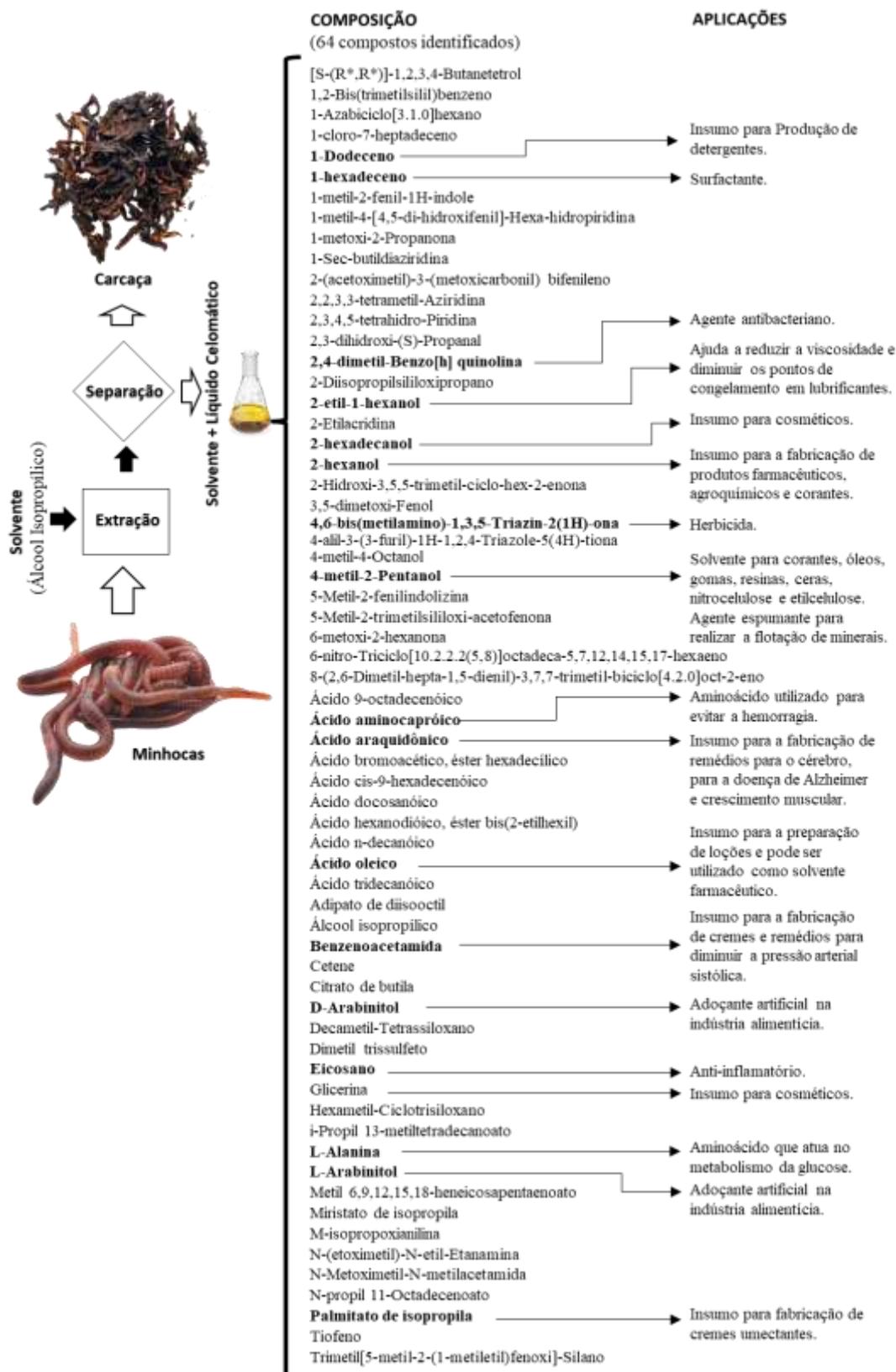


Figura 4.56 – Resultados referentes aos compostos químicos identificados por meio da análise cromatográfica da amostra resultante da extração do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool isopropílico e a descrição das aplicações desses compostos.

Fonte: Elaboração própria.

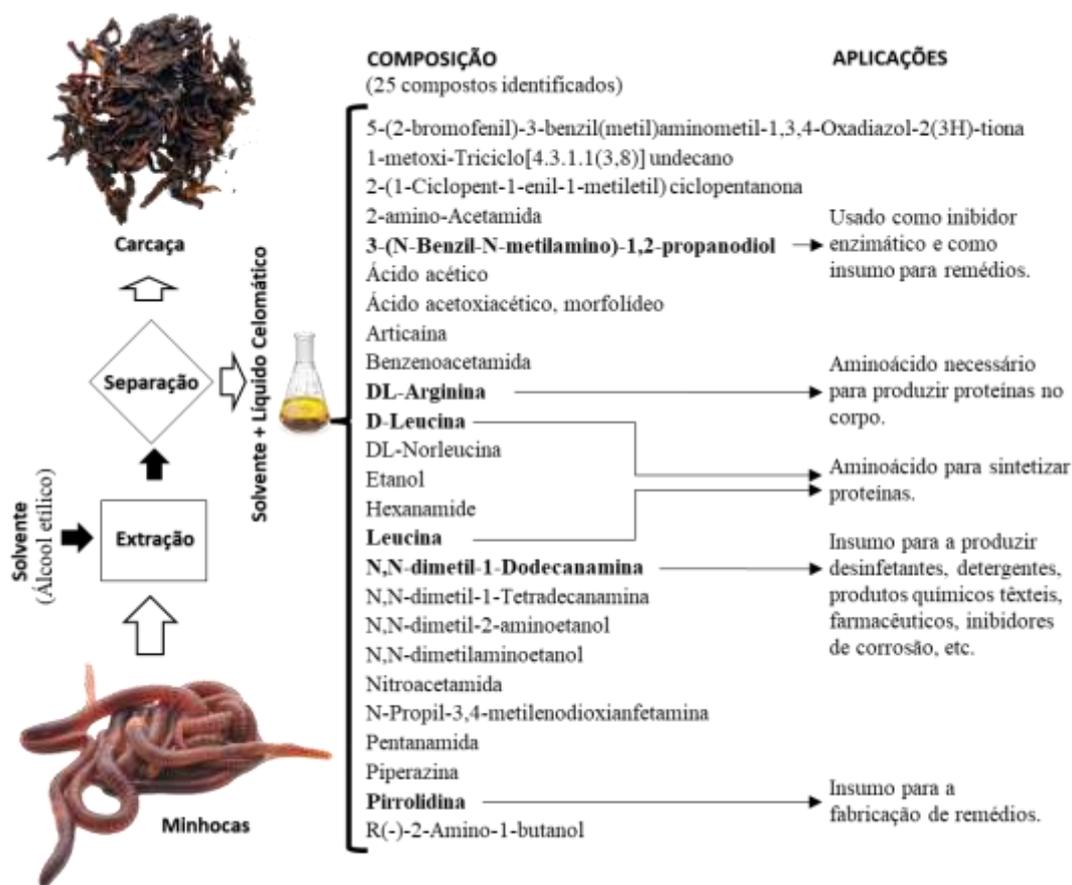


Figura 4.57 – Resultados referentes aos compostos químicos identificados por meio da análise cromatográfica da amostra resultante da extração do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool etílico e a descrição das aplicações desses compostos.

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.54, 4.55 4.56 e 4.57, foi identificado que: a) a extração do líquido celomático utilizando álcool isopropílico como solvente permitiu a identificação de 64 tipos de compostos orgânicos, enquanto que a extração com álcool etílico resultou em apenas 25 compostos identificados, a partir desses resultados, pode-se indicar que o álcool isopropílico é superior em relação à extração de compostos orgânicos quando comparado com o álcool etílico; e b) os compostos identificados nos solventes utilizados para a extração do líquido celomático apresentam diferenças, isto pode ter acontecido pela afinidade desses compostos aos solventes empregados.

Do ponto de vista da identificação dos compostos e suas aplicações, Segundo HE *et al.* (2015); LU *et al.* (2021); FAUJDAR *et al.* (2020); KITPHAITUN *et al.* (2022); NOORDMAN *et al.* (2002); BIOSYNTH (2023); PRATHIMA *et al.* (2020); DANDEKAR *et al.* (2022); BENCHCHEM (2023); NCBI (2023); PARK & WANG (2018); YIM *et al.*

(2019); CHEN *et al.* (2023); KOTANI *et al.* (2006); ORELLANA *et al.* (2018); TALLIMA & EL RIDI (2018); WANG *et al.* (2020); BANERJEE *et al.* (2023); MARTÍN-REYES *et al.* (2023); SHARMA *et al.* (2023); ZHAO *et al.* (2023); ESAM & ESMAEEL (2014); RAVIKUMAR *et al.* (2022); CANTÚ *et al.* (2017); MECKFESSEL (2022); ADACHI *et al.* (2018); JIANG *et al.* (2011); QI *et al.* (2017); CASTRO *et al.* (2019); HSU & TAIN (2019); LIU *et al.* (2022); e REGINATO *et al.* (2023) há uma ampla gama de possibilidades de aplicação seja na produção de cremes, detergentes, remédios, adoçantes, herbicidas, lubrificantes, inibidores de corrosão e até mesmo espumantes para a flotação de metais.

Na Figura 4.58, são apresentados os resultados das análises do teor de proteínas realizadas nas carcaças de minhocas, referente às amostras resultantes do processo de secagem, com e sem a extração prévia do líquido celomático, utilizando diferentes solventes.

Os resultados revelaram que, a maior porcentagem de proteínas em peso foi obtida quando as carcaças de minhocas foram tratadas por meio da extração prévia do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool isopropílico utilizando temperaturas de secagem de 95°C. Este resultado se encontra na faixa do teor de proteínas apresentados (60 a 70% de proteínas) por EDWARDS *et al.* (2011).

Com relação aos demais resultados, é observado que os teores de proteínas estão mais baixos, o que indica um teor elevado de gorduras nessas amostras em comparação com a amostra que possui um teor mais elevado de proteínas. Isso demonstra que o solvente utilizado (álcool isopropílico) é capaz de extrair parte das gorduras das amostras.

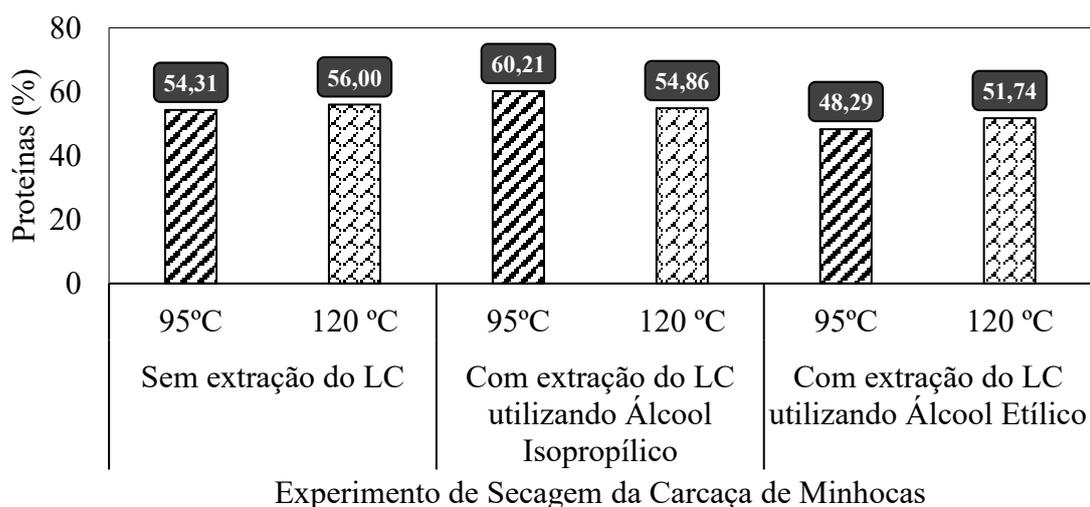


Figura 4.58 – Resultados das análises do teor de proteínas realizadas nas carcaças de minhocas, referente às amostras resultantes do processo de secagem, com e sem a extração prévia do líquido celomático, utilizando diferentes solventes.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.59, são apresentados os resultados das análises do teor de gorduras realizadas nas carcaças de minhocas, referente às amostras resultantes do processo de secagem, com e sem a extração prévia do líquido celomático, utilizando diferentes solventes.

Os resultados revelaram que, a menor porcentagem de gorduras em peso foi obtida quando as carcaças de minhocas foram tratadas por meio da extração prévia do líquido celomático utilizando como solvente ao álcool isopropílico utilizando temperaturas de secagem de 95°C. Este resultado se encontra abaixo dos dados apresentados (6 a 11% de gorduras) por EDWARDS *et al.* (2011).

Com relação aos demais resultados, é possível observar que tanto a temperatura quanto a extração prévia do líquido celomático utilizando solventes apresentam uma dependência na redução do teor de gorduras.

No caso da amostra que não passou pela etapa de extração do líquido celomático, verificou-se que quanto maior a temperatura, menor é o teor de gordura nessa amostra. Isso pode ser atribuído à volatilização das gorduras durante o processo de secagem a 120 °C.

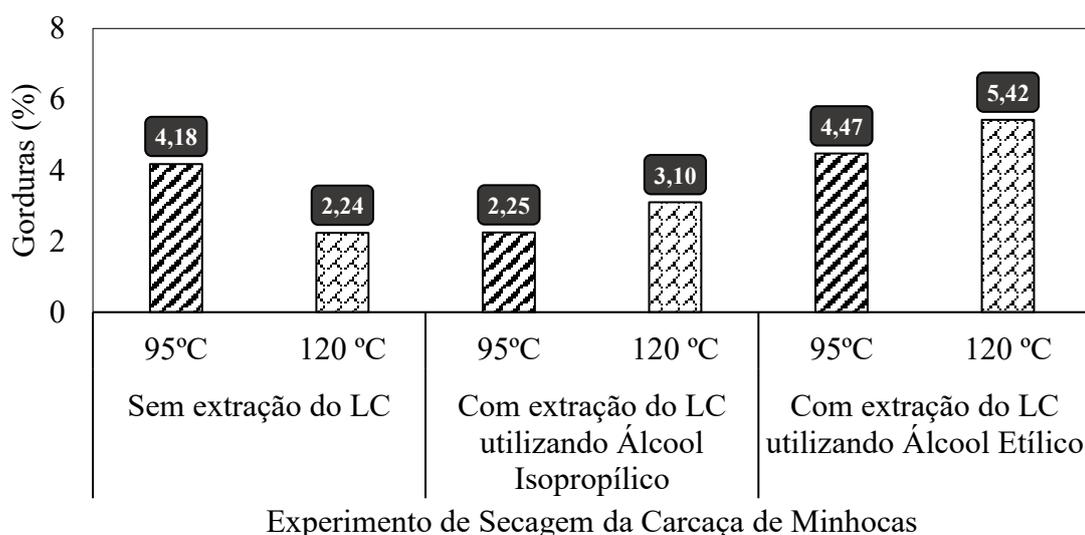


Figura 4.59 – Resultados das análises do teor de gorduras realizadas nas carcaças de minhocas, referente às amostras resultantes do processo de secagem, com e sem a extração prévia do líquido celomático, utilizando diferentes solventes.

Fonte: Elaboração própria.

Com base em todas as informações apresentadas até aqui, a seguir será apresentado o processo de extração do líquido celomático, a obtenção de carcaças de minhocas e os balanços de massa.

4.4.3.6. Processo extração do líquido celomático, obtenção de carcaças de minhocas e balanços de massa

Para maximizar o aproveitamento das minhocas vivas foi realizado a confecção de um diagrama de fluxo de processos para a obtenção de produtos, neste caso, farinha de minhocas, líquido celomático mais sangue, húmus e etapas de recuperação de líquidos de lavado e solventes. Na Figura 4.60 são apresentados a proposta referente ao diagrama de fluxo do processo para a obtenção de produtos a partir das minhocas vivas.

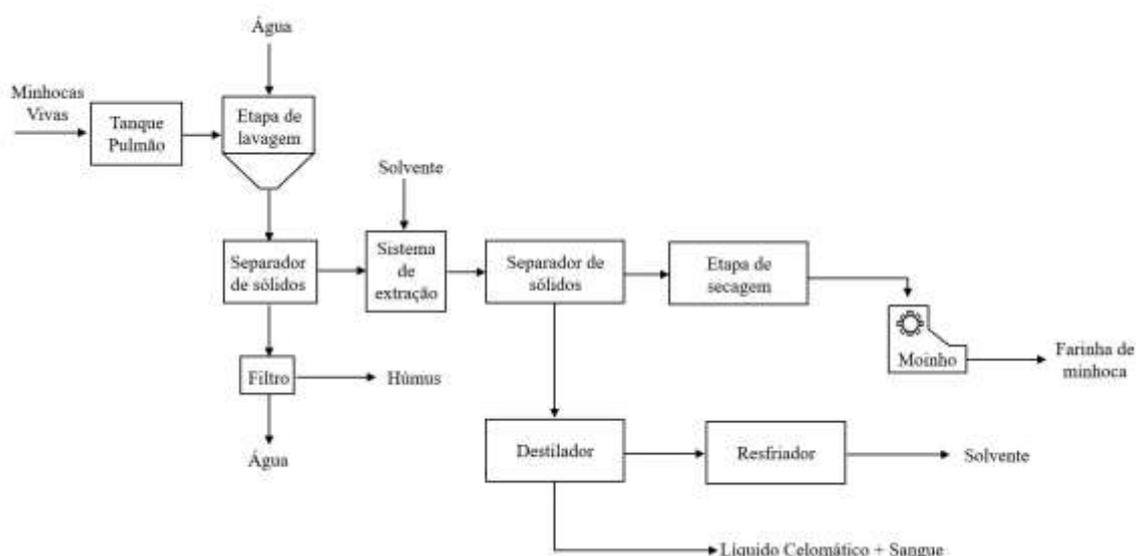


Figura 4.60 – Proposta de um diagrama de fluxo de processos para a obtenção de produtos a partir das minhocas.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.60, a presente proposta define a um processo que se encontra constituído por: i) um tanque pulmão para realizar o acúmulo das minhocas provenientes de processos anteriores; ii) uma etapa de lavagem para realizar a separação dos sólidos presentes nas minhocas vivas; iii) um separador de sólidos para realizar a separação das minhocas vivas e os sólidos; iv) um filtro para separar o húmus e a água proveniente da etapa do separador de sólidos; v) um sistema de extração para extrair o líquido celomático das minhocas utilizando solventes orgânicos; vi) um separador de sólidos para separar as carcaças das minhocas e o solvente rico em líquido celomático e sangue; vii) uma etapa de secagem para secar as carcaças das minhocas; viii) uma etapa de moagem para obter a farinha de minhoca; ix) um destilador para extrair o solvente do líquido celomático e a sangue; e x) um resfriador para recuperar o solvente utilizado no reator de extração, que posteriormente poderá ser reaproveitado na extração do líquido celomático.

Na Figura 4.61 são apresentados os resultados do potencial de aproveitamento das minhocas vivas considerando o diagrama de fluxo do processo anterior e o balanço de massa.

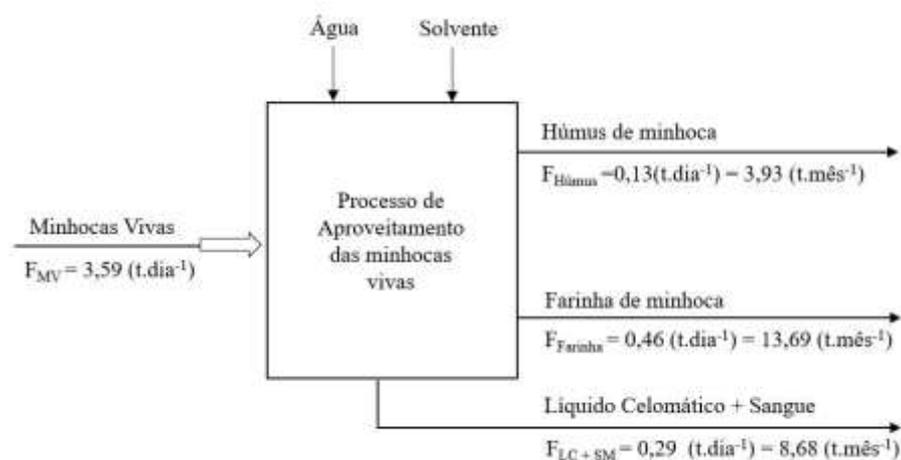


Figura 4.61 – Potencial de aproveitamento das minhocas vivas.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.61, foi identificado que a partir das minhocas vivas geradas no processo de vermicompostagem, quando processados, é possível obter: a) $0,13 \text{ t.dia}^{-1}$ ($3,93 \text{ t. mês}^{-1}$) de húmus de minhoca, b) $0,46 \text{ t.dia}^{-1}$ ($13,69 \text{ t. mês}^{-1}$) de farinha de minhoca, e c) $0,29 \text{ t.dia}^{-1}$ ($8,68 \text{ t. mês}^{-1}$) de líquido celomático mais sangue.

Com base nos resultados anteriores e com o objetivo de apresentar as possibilidades de aproveitamento referente aos produtos gerados no processamento das minhocas vivas, neste caso considerando o húmus gerado e a farinha de minhoca, foram realizados o cálculo do potencial de aproveitamento na forma econômica, referente a comercialização do húmus e a farinha de minhoca, neste contexto foi encontrado que:

- i) Utilizando a base de cálculo da geração de $0,13 \text{ t.dia}^{-1}$ de húmus de minhoca, este pode ser comercializado como um biofertilizante, considerando o custo mínimo que pode ser encontrado no mercado de R\$ 9,2 o kg, os $0,13 \text{ t.dia}^{-1}$ de húmus de minhoca pode gerar uma renda R\$ 1.203 a cada dia (equivalente a R\$ 36.077 por mês); e
- ii) Utilizando a base de cálculo da geração de $0,46 \text{ t.dia}^{-1}$ de farinha de minhoca, este pode ser comercializado como alimento para animais, considerando o custo mínimo que pode ser encontrado no mercado de R\$ 130 o kg, os $0,46 \text{ t.dia}^{-1}$ de farinha de minhoca pode gerar uma renda R\$ 59.285 a cada dia (equivalente a R\$ 1.778.544,17 por mês).

Considerando todos os resultados obtidos pode-se identificar o potencial que possui o tratamento e a transformação dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado

considerando um processamento centralizado composto por processos combinados de biodigestão e vermicompostagem. Com base em todas as informações apresentadas até aqui, a seguir será apresentado um processo centralizado para a industrialização dos resíduos orgânicos.

4.4.3.7. Consolidação da proposta de processamento centralizado para a industrialização dos resíduos orgânicos

Na Figura 4.62 são apresentados os resultados da proposta do processo industrial híbrido para transformação dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado. Nesse fluxograma são apresentados 17 tipos de produtos de valor agregado, constituídos por produtos como a) o dióxido de carbono CO_2 , b) o gás sulfídrico H_2S , c) a amônia e ureia, d) a energia elétrica, e) o combustível gasoso, f) o concentrado líquido proveniente da biodigestão anaeróbica de resíduos orgânicos, g) o substrato líquido para o controle superficial de pragas em lavouras, h) o biofertilizante líquido concentrado, i) o húmus concentrado, j) a terra rica com húmus, k) o substrato com húmus, l) o concentrado do líquido celomático como insumo de biofertilizantes, m) o extrato de minhoca como concentrado rico em princípios ativos para cosméticos, n) o extrato de minhoca como concentrado rico em princípios ativos para alimentos funcionais, o) o extrato de minhoca como concentrado rico em princípios ativos para medicamentos, p) a farinha de minhocas como proteína, e q) o excedente de minhocas vivas e melhoradas para inocular novos processos industriais, bem como para uso na pesca esportiva.

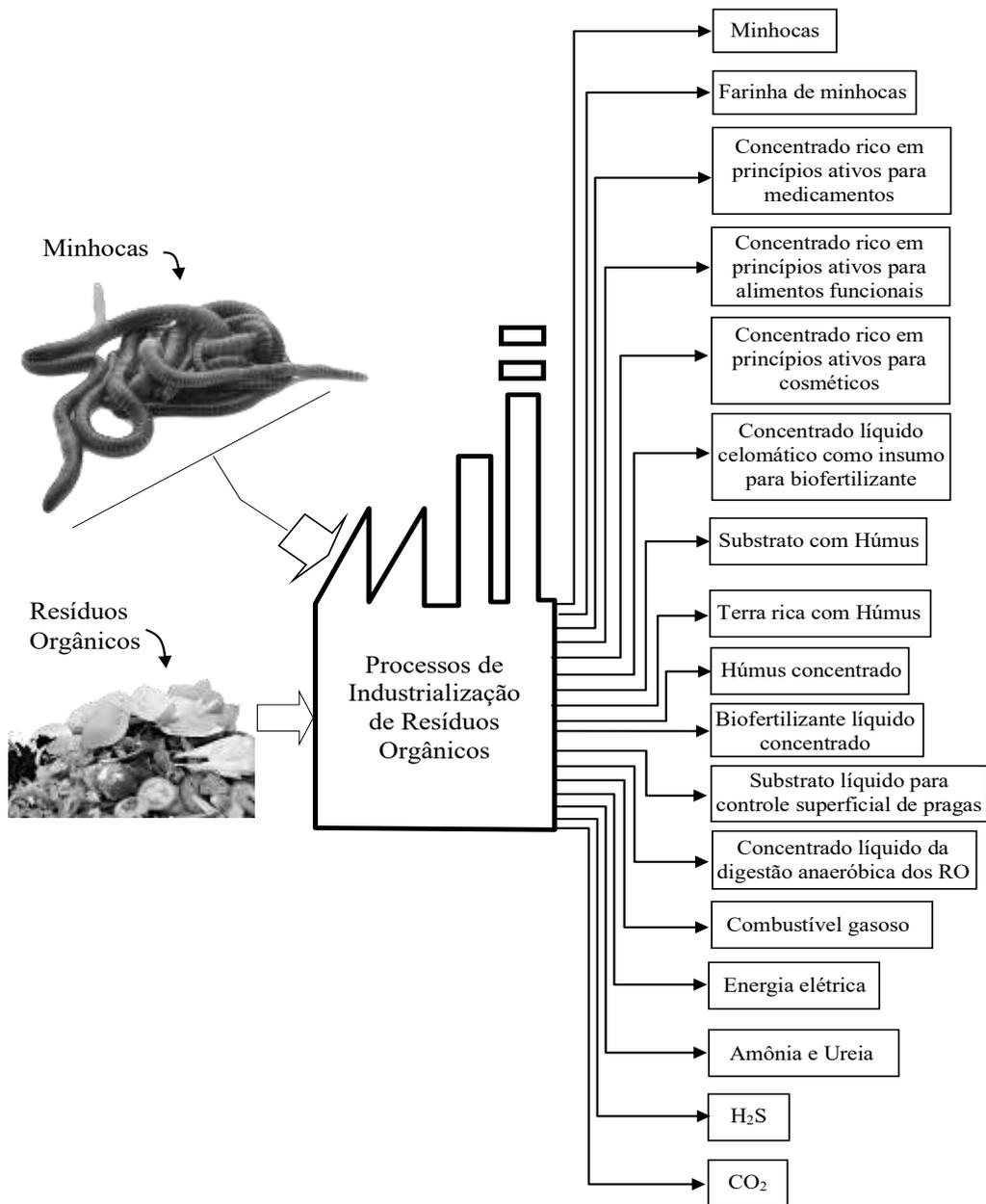


Figura 4.62 - Detalhamento do processo principal de obtenção de derivados a partir dos resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4.63 são apresentados o resultado da proposta do diagrama de fluxo detalhado do processo industrial híbrido para transformação dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado.

O funcionamento do "Processo industrial híbrido para a transformação dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado", conforme ilustrado na Figura 4.63, está dividido em etapas e ocorre da seguinte forma.

A matéria-prima é recebida na etapa de recepção, a qual é composta por um dispositivo de transporte responsável por movimentar os materiais até uma balança para pesagem. Após a pesagem, a matéria-prima é transportada para o dispositivo de descarregamento dos resíduos orgânicos. Em seguida, ela é encaminhada para os ambientes designados para o acondicionamento seletivo dos Resíduos Orgânicos.

Na sequência, os Resíduos Orgânicos (RO) acondicionados passam para a etapa de preparação. Essa etapa é iniciada com a movimentação dos RO acondicionados por meio de um dispositivo de transporte, que os leva até o dosador. Em seguida, a matéria-prima é deslocada através desse dispositivo até o tanque, onde ocorre a fragmentação e mistura dos resíduos orgânicos. Posteriormente, o material fragmentado é transportado pelo dispositivo até o alimentador de resíduos orgânicos.

Os Resíduos Orgânicos (RO) fragmentados e misturados, provenientes do alimentador, são enviados através de um dispositivo de transporte para a etapa principal do processo. Nessa etapa, ocorre a transformação física, química e biológica por meio de um sistema de biodigestão anaeróbica não convencional;

A partir dos produtos gasosos gerados no biodigestor não convencional, esses gases são conduzidos para uma etapa de processamento de CO₂. Nessa etapa, acontece:

- i) A depuração/separação de H₂S e CO₂;
- ii) O CO₂, separado é transportado por meio de um dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- iii) Seguidamente, o CO₂ é transportado para a área de embalagem por meio do dispositivo de transporte; e
- iv) Após o processo de embalagem, o CO₂ é transportado até a área de armazenamento e expedição, tornando-se o primeiro produto de valor agregado, o Gás Carbônico.

A partir dos produtos gasosos gerados no biodigestor não convencional, esses gases são conduzidos para uma etapa de processamento de H₂S. Nessa etapa, ocorre:

- i) A depuração/separação de H₂S e CO₂;

- ii) O H₂S separado é transportado por um dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- iii) Em seguida, o H₂S é levado por meio desse dispositivo até a área de embalagem; e
- iv) Posteriormente, o H₂S embalado é transportado novamente pelo dispositivo até a área de armazenamento e expedição, tornando-se o segundo produto de valor agregado.

A partir dos produtos gasosos gerados no biodigestor não convencional, esses gases são conduzidos para uma etapa de processamento de ureia. Nessa etapa, ocorre:

- i) A depuração/separação de H₂S e CO₂;
- ii) O CH₄ separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão de CH₄;
- iii) Em seguida, o metano é levado pelo mesmo dispositivo até o processo de transformação em amônia e ureia;
- iv) Posteriormente, a ureia produzida é transportada pelo dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- v) Depois disso, a ureia é encaminhada por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem; e
- vi) Em seguida, a ureia embalada é transportada pelo dispositivo de transporte até a área de armazenamento e expedição da ureia (CH₄N₂O), tornando-se o terceiro produto de valor agregado.

A partir dos produtos gasosos gerados no biodigestor não convencional, esses gases são conduzidos para uma etapa de processamento de energia elétrica. Nessa etapa, ocorre:

- i) A depuração/separação de H₂S e CO₂;
- ii) O CH₄ separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão específico para o metano;
- iii) Em seguida, o metano é conduzido pelo dispositivo de transporte até o motor que aciona uma turbina, gerando energia;
- iv) A energia gerada é transportada por meio do dispositivo de transporte específico para energia até a área de distribuição; e
- v) Posteriormente, a energia elétrica produzida é transportada pelo dispositivo de transporte até a área de expedição como produto de valor agregado, na forma de energia elétrica, tornando-se o quarto produto de valor agregado.

A partir dos produtos gasosos gerados no biodigestor não convencional, esses gases são conduzidos para uma etapa de processamento de combustível gasoso. Nessa etapa, ocorre:

- i) A depuração/separação de H_2S e CO_2 ;
- ii) O CH_4 separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão específico para o metano;
- iii) Em seguida, o metano é conduzido pelo dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- iv) Posteriormente, o metano é transportado pelo mesmo dispositivo até a área de armazenamento e distribuição; e
- v) Por fim, o metano é enviado por meio do dispositivo de transporte até a área de expedição como produto de valor agregado, na forma de gás metano veicular, tornando-se o quinto produto de valor agregado.

A partir dos produtos digeridos (sólidos e líquidos) gerados no biodigestor não convencional, esses produtos são conduzidos para uma etapa de processamento do concentrado líquido. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação do lixiviado;
- ii) O líquido separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento;
- iii) Em seguida, o líquido é levado pelo mesmo dispositivo até a área de processamento dos extratos líquidos;
- iv) Posteriormente, o extrato líquido é transportado pelo dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- v) Após essa etapa, o líquido é conduzido por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento; e
- vi) Por fim, o produto embalado é transportado pelo dispositivo de transporte até a área de expedição como concentrado líquido resultante da biodigestão anaeróbica dos resíduos orgânicos, tornando-se o sexto produto de valor agregado.

A partir dos produtos digeridos (sólidos e líquidos) gerados no biodigestor não convencional, esses produtos são conduzidos para uma etapa de processamento dos resíduos sólidos digeridos. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação dos sólidos digeridos;

- ii) Os sólidos separados são transportados por meio do dispositivo de transporte até o digestor semi-aeróbico; e
- iii) Em seguida, o material digerido no digestor semi-aeróbico é conduzido pelo dispositivo de transporte até o processo de vermicompostagem.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos líquidos são conduzidos para a etapa de processamento do extrato líquido utilizado para o controle superficial de pragas. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação dos líquidos gerados;
- ii) Os líquidos são transportados por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento;
- iii) Em seguida, o líquido acondicionado é conduzido pelo dispositivo de transporte até a área de processamento do extrato líquido;
- iv) Após o processamento, o líquido é transportado pelo dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade; e
- v) Em seguida, o líquido é transportado pelo mesmo dispositivo até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como substrato líquido utilizado para o controle superficial de pragas em lavouras, sendo o sétimo produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos líquidos são conduzidos para a etapa de processamento do extrato líquido utilizado como biofertilizante líquido concentrado. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação dos líquidos gerados;
- ii) Os líquidos são transportados por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento;
- iii) Em seguida, o líquido acondicionado é conduzido pelo dispositivo de transporte até a área de processamento do extrato líquido;
- iv) Após o processamento, o líquido é transportado pelo dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade; e
- v) Em seguida, o líquido é transportado pelo mesmo dispositivo até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como biofertilizante líquido concentrado, sendo o oitavo produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos sólidos digeridos são conduzidos para a etapa de processamento de húmus concentrado. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação dos sólidos digeridos na forma de húmus por meio de dispositivos de separação;
- ii) O húmus separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento;
- iii) Na sequência, o húmus acondicionado é conduzido pelo dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- iv) Posteriormente, o húmus é transportado pelo dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como húmus concentrado, sendo o nono produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos sólidos digeridos são conduzidos para a etapa de processamento de terra rica com húmus. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação dos sólidos digeridos por meio de dispositivos de separação;
- ii) O húmus separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento;
- iii) Na sequência, o húmus acondicionado é conduzido pelo dispositivo de transporte até o misturador;
- iv) O misturador recebe a dosagem de terra rica por meio do dispositivo de transporte;
- v) Em seguida, o produto produzido no misturador é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- vi) Posteriormente, a terra rica com húmus que passa pelo controle é transportada pelo dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como terra rica com húmus, sendo o decimo produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos sólidos digeridos são conduzidos para a etapa de processamento de substrato com húmus. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação dos sólidos digeridos por meio de dispositivos de separação;
- ii) O húmus separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento;

- iii) Na sequência, o húmus acondicionado é conduzido pelo dispositivo de transporte até o misturador;
- iv) O misturador recebe a dosagem de substrato por meio do dispositivo de transporte;
- v) Em seguida, o produto produzido no misturador é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade;
- vi) Posteriormente, o substrato com húmus que passa pelo controle é transportado pelo dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como substrato com húmus, sendo o décimo primeiro produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos na forma de minhocas vivas são conduzidos para a etapa de processamento do concentrado do líquido celomático como insumo de biofertilizantes. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação das minhocas vivas por meio de dispositivos de separação;
- ii) As minhocas vivas separadas são conduzidas por meio do dispositivo de transporte até área de acondicionamento de minhocas;
- iii) Na sequência, as minhocas acondicionadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o classificador de minhocas;
- iv) Na sequência, as minhocas classificadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão;
- v) Na sequência, as minhocas são transportadas do tanque pulmão por meio do dispositivo de transporte até o sistema de extração do líquido celomático;
- vi) O sistema de extração do líquido celomático recebe ao solvente por meio do dispositivo de transporte;
- vii) Na sequência, o produto resultante do sistema de extração do líquido celomático é conduzido por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo de separação do líquido celomático da carcaça;
- viii) Seguidamente, o líquido celomático separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do extrato rico em celoma;
- ix) Na sequência, o extrato rico em celoma é transportado por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo dessolventizador;
- x) Seguidamente, o líquido celomático livre de solvente é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do líquido celomático;

- xi) Na sequência, o líquido celomático acondicionado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade; e
- xii) O material que passa pelo controle é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como concentrado do líquido celomático como insumo de biofertilizantes, sendo o décimo segundo produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos na forma de minhocas vivas são conduzidos para a etapa de processamento do extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para cosméticos. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação das minhocas vivas por meio de dispositivos de separação;
- ii) As minhocas vivas separadas são conduzidas por meio do dispositivo de transporte até área de acondicionamento de minhocas;
- iii) Na sequência, as minhocas acondicionadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o classificador de minhocas;
- iv) Na sequência, as minhocas classificadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão;
- v) Na sequência, as minhocas são transportadas do tanque pulmão por meio do dispositivo de transporte até o sistema de extração do líquido celomático;
- vi) O sistema de extração do líquido celomático recebe ao solvente por meio do dispositivo de transporte;
- vii) Na sequência, o produto resultante do sistema de extração do líquido celomático é conduzido por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo de separação do líquido celomático da carcaça;
- viii) Seguidamente, o líquido celomático separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do extrato rico em celoma;
- ix) Na sequência, o extrato rico em celoma é transportado por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo dessolventizador;
- x) Seguidamente, o líquido celomático livre de solvente é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do líquido celomático;
- xi) Na sequência, o líquido celomático acondicionado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de processamento do líquido celomático;
- xii) O líquido celomático processado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade; e

xiii) O material que passa pelo controle é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para cosméticos, sendo o décimo terceiro produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos na forma de minhocas vivas são conduzidos para a etapa de processamento do extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para alimentos funcionais. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação das minhocas vivas por meio de dispositivos de separação;
- ii) As minhocas vivas separadas são conduzidas por meio do dispositivo de transporte até área de acondicionamento de minhocas;
- iii) Na sequência, as minhocas acondicionadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o classificador de minhocas;
- iv) Na sequência, as minhocas classificadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão;
- v) Na sequência, as minhocas são transportadas do tanque pulmão por meio do dispositivo de transporte até o sistema de extração do líquido celomático;
- vi) O sistema de extração do líquido celomático recebe ao solvente por meio do dispositivo de transporte;
- vii) Na sequência, o produto resultante do sistema de extração do líquido celomático é conduzido por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo de separação do líquido celomático da carcaça;
- viii) Seguidamente, o líquido celomático separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do extrato rico em celoma;
- ix) Na sequência, o extrato rico em celoma é transportado por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo dessolventizador;
- x) Seguidamente, o líquido celomático livre de solvente é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do líquido celomático;
- xi) Na sequência, o líquido celomático acondicionado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de processamento do líquido celomático;
- xii) O líquido celomático processado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade; e

xiii) O material que passa pelo controle é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para alimentos funcionais, sendo o décimo quarto produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos na forma de minhocas vivas são conduzidos para a etapa de processamento do extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para medicamentos. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação das minhocas vivas por meio de dispositivos de separação;
- ii) As minhocas vivas separadas são conduzidas por meio do dispositivo de transporte até área de acondicionamento de minhocas;
- iii) Na sequência, as minhocas acondicionadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o classificador de minhocas;
- iv) Na sequência, as minhocas classificadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão;
- v) Na sequência, as minhocas são transportadas do tanque pulmão por meio do dispositivo de transporte até o sistema de extração do líquido celomático;
- vi) O sistema de extração do líquido celomático recebe ao solvente por meio do dispositivo de transporte;
- vii) Na sequência, o produto resultante do sistema de extração do líquido celomático é conduzido por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo de separação do líquido celomático da carcaça;
- viii) Seguidamente, o líquido celomático separado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do extrato rico em celoma;
- ix) Na sequência, o extrato rico em celoma é transportado por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo dessolventizador;
- x) Seguidamente, o líquido celomático livre de solvente é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de acondicionamento do líquido celomático;
- xi) Na sequência, o líquido celomático acondicionado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de processamento do líquido celomático;
- xii) O líquido celomático processado é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de controle de qualidade; e

xiii) O material que passa pelo controle é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para medicamentos, sendo o décimo quinto produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos na forma de minhocas vivas são conduzidos para a etapa de processamento de farinha de minhocas. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação das minhocas vivas por meio de dispositivos de separação;
- ii) As minhocas vivas separadas são conduzidas por meio do dispositivo de transporte até área de acondicionamento de minhocas;
- iii) Na sequência, as minhocas acondicionadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o classificador de minhocas;
- iv) Na sequência, as minhocas classificadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o tanque pulmão;
- v) Na sequência, as minhocas são transportadas do tanque pulmão por meio do dispositivo de transporte até o sistema de extração do líquido celomático;
- vi) O sistema de extração do líquido celomático recebe ao solvente por meio do dispositivo de transporte;
- vii) Na sequência, o produto resultante do sistema de extração do líquido celomático é conduzido por meio do dispositivo de transporte até o dispositivo de separação do líquido celomático da carcaça;
- viii) As carcaças separadas são conduzidas por meio de um dispositivo de transporte até a área de acondicionamento das carcaças das minhocas;
- ix) Na sequência, as carcaças acondicionadas são conduzidas por meio de um dispositivo de transporte até a área de secagem;
- x) As carcaças secas são conduzidas por meio de dispositivos de transporte até a área de fragmentação;
- xi) As carcaças fragmentadas são conduzidas por meio de dispositivos de transporte até a área de controle de qualidade;
- xii) O material que passa pelo controle é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como farinha de minhocas (proteína de elevado valor comercial), sendo o décimo sexto produto de valor agregado.

A partir dos produtos gerados no processo de vermicompostagem, os produtos são conduzidos para a etapa de processamento de minhocas vivas. Nessa etapa, ocorre:

- i) A separação das minhocas vivas por meio de dispositivos de separação;
- ii) As minhocas vivas separadas são conduzidas por meio do dispositivo de transporte até área de acondicionamento de minhocas;
- iii) Na sequência, as minhocas acondicionadas são transportadas por meio do dispositivo de transporte até o classificador de minhocas;
- iv) As minhocas vivas são conduzidas por meio de dispositivos de transporte até a área de controle de qualidade;
- v) O material que passa pelo controle é transportado por meio do dispositivo de transporte até a área de embalagem e armazenamento, onde será expedido como minhocas vivas para diversas aplicações, sendo o décimo sétimo produto de valor agregado.

Dessa forma, apresentou-se acima a segunda opção tecnológica para a industrialização dos resíduos orgânicos, por meio do qual pode-se viabilizar o aproveitamento do 100% dos resíduos sólidos urbanos e rurais.

Essa opção tecnológica também deve promover a quebra de paradigmas na área ambiental, transformando os resíduos orgânicos, que atualmente são considerados problemas, em oportunidades para novos modelos de negócios industriais com características sustentáveis e inovadoras. Esses modelos de negócios envolvem a fabricação de equipamentos modulares, sua comercialização, instalação e operação, tudo alinhado com os “17” Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

Assim, consegue-se uma alternativa tecnológica com expectativa de efeitos positivos na questão tecnológica, econômica e social. Nesse desafio, a questão ambiental passa a ser, também uma consequência positiva indireta.

4.4.4. Tecnologia SCADA para o monitoramento, controle e processamento de dados no processo de industrialização centralizado de resíduos orgânicos

A Figura 4.64 apresenta o resultado do diagrama de fluxo dos sistemas eletrônicos que foram projetados no desenvolvimento da tecnologia SCADA, neste caso aplicada no processamento de resíduos orgânicos.

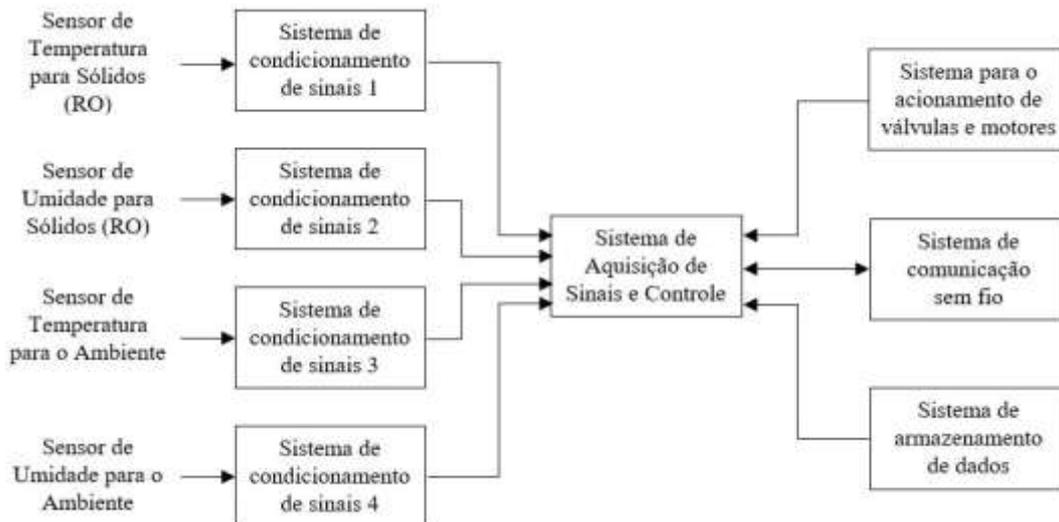


Figura 4.64 – Diagrama de fluxo dos sistemas eletrônicos projetados para o desenvolvimento da tecnologia SCADA direcionado para o processamento de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

O diagrama de fluxo apresentado na Figura 4.64 mostra de forma geral os sistemas principais da tecnologia. Com base nessa figura, a tecnologia se encontra constituída por seis sistemas eletrônicos: o primeiro se encontra dotado por um sistema de sensores para realizar a medição da temperatura e umidade correspondente ao ambiente e aos resíduos orgânicos, o segundo se encontra dotado por sistemas de condicionamento de sinais para cada sensor, o terceiro se encontra dotado de um sistema para a aquisição de sinais e controle, o quarto se encontra dotado por um sistema desenhado para o acionamento de válvulas e motores, o quinto se encontra dotado por um sistema de armazenamento de dados em um meio físico (memória SD) e por último o sistema de comunicação sem fio.

Com relação ao sistema de sensores projetados para seu uso na tecnologia, foi considerado: a) o uso de um sensor modelo DHT-22 para realizar a medição da temperatura e umidade do meio ambiente; b) o uso de um sensor do tipo infravermelho da marca OMEGA modelo OS-AE11 para realizar a medição da temperatura dos RO; e c) o uso de um sensor do tipo sonda modelo HD-38 para realizar a medição da umidade dos RO.

Para o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados e controle na tecnologia SCADA, foi necessário realizar a busca de um microcontrolador capaz de realizar as seguintes tarefas, por exemplo: a) medir sinais analógicos e digitais provenientes dos sensores; b) controlar o acionamento de elementos externos, tais como válvulas e motores; c) enviar dados através de sistemas de comunicação; e d) realizar o armazenamento de dados

em uma memória SD. Depois de avaliar as necessidades para o sistema SCADA, foi identificado que o microcontrolador PIC18F4550 é adequado para essas tarefas. No entanto, foi necessário escrever um código específico para o microcontrolador funcionar conforme as necessidades da tecnologia SCADA. Para essa finalidade, a codificação do microcontrolador foi realizada da seguinte forma:

- a) A codificação do microcontrolador foi desenvolvida no programa PIC-Compiler;
- b) A estrutura dos códigos desenvolvidos para o microcontrolador foi construída por meio da criação de funções específicas para atender diferentes finalidades na tecnologia;
- c) A primeira função implementada no código consistiu na recepção dos sinais analógicos e digitais provenientes dos sensores de temperatura e umidade, convertendo esses sinais em valores numéricos de forma contínua;
- d) A segunda função implementada no código consistiu na exibição das leituras dos sensores em uma tela LCD;
- e) A terceira função implementada no código consistiu na habilitação das portas digitais para realizar o envio de sinais para o sistema de acionamento de válvulas e motores;
- f) A quarta função implementada no código consistiu na habilitação de um módulo eletrônico denominado RTC “*Real time clock*” ou relógio de tempo real para o controle do tempo do armazenamento dos dados a serem monitorados e controlados em uma memória SD;
- g) A quinta função implementada no código consistiu na codificação de um menu para realizar a configuração do relógio referente ao tempo e ao calendário;
- h) A quinta função implementada no código consistiu na habilitação de um módulo SD para realizar o armazenamento dos dados monitorados em uma memória SD;
- e
- i) Por último, na sexta função implementada no código consistiu no envio das leituras dos sensores e a recepção de dados referente à ativação/desativação das portas digitais os quais permitem o acionamento tanto de válvulas como de motores por meio de um sistema de comunicação por rádio frequência entre o sistema eletrônico e a interface visual desenhada no computador.

A simulação computacional dos sistemas eletrônicos projetados foi realizada mediante o *software* PROTEUS 8.12. Na Figura 4.65 se apresenta o diagrama de fluxo do

sistema eletrônico desenvolvido para a realização da simulação computacional da tecnologia SCADA destinado ao processamento de resíduos orgânicos. Na Figura 4.66 se apresenta o resultado da simulação computacional do sistema eletrônico da tecnologia SCADA.

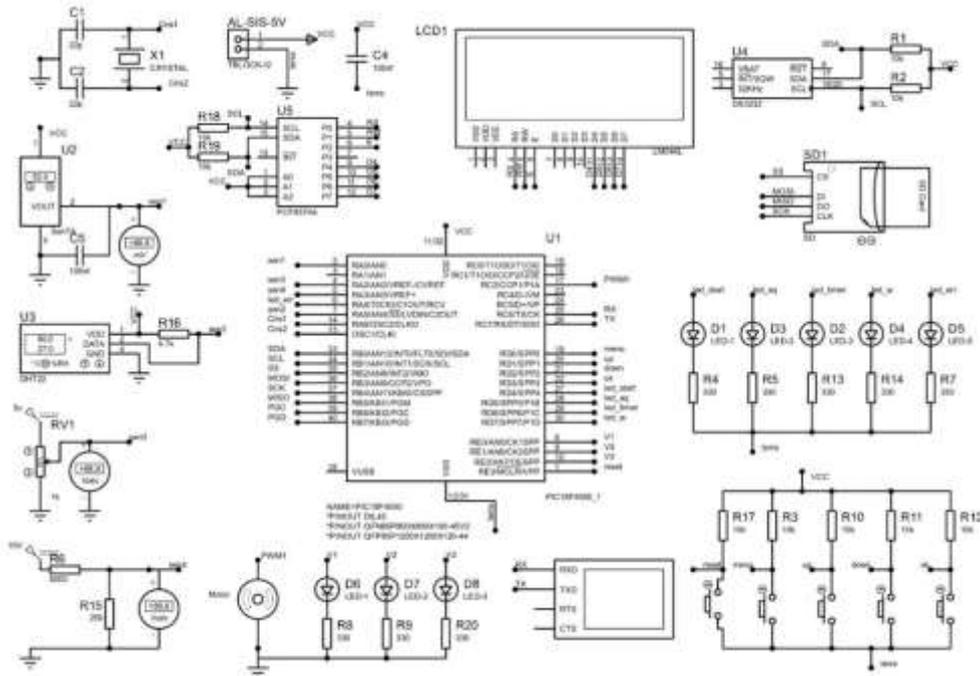


Figura 4.65 – Diagrama de fluxo do sistema eletrônico desenvolvido para a simulação computacional da tecnologia SCADA destinado para o processamento de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

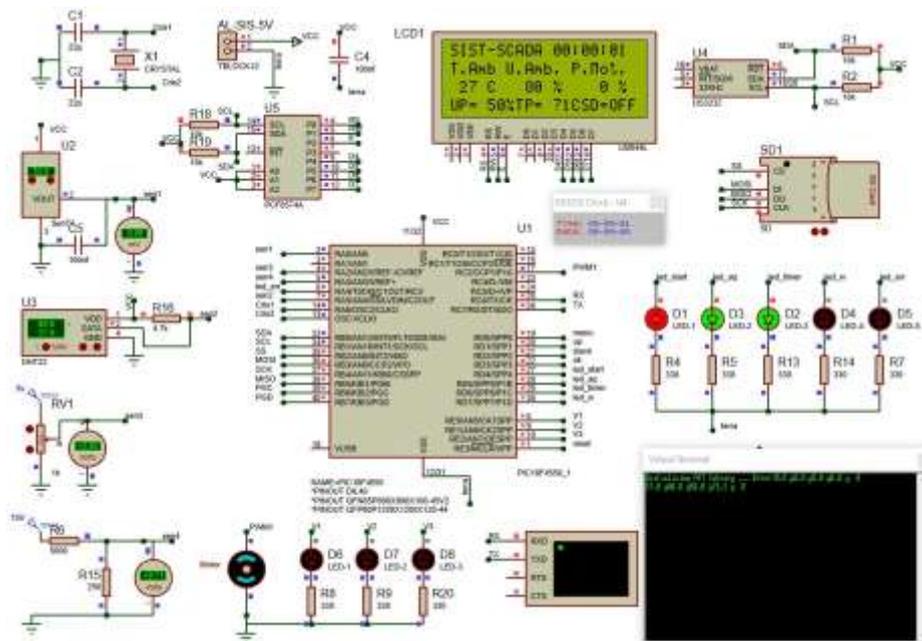


Figura 4.66 – Resultado: Simulação computacional do circuito eletrônico da tecnologia desenvolvida.

Fonte: Elaboração própria.

Considerando os resultados apresentados nas Figuras 4.65 e 4.66 é possível constatar que tanto o diagrama de fluxo quanto o código desenvolvido para o microcontrolador foram eficazes na conversão dos sinais provenientes dos sensores a valores numéricos, os quais são apresentados de forma contínua na tela LCD. Além disso, é possível verificar que o envio de dados também está funcionando corretamente, o que pode ser confirmado pela janela do Virtual Terminal do simulador.

Com base nos resultados anteriores, posteriormente, foi realizado o desenvolvimento do programa computacional para realizar a criação da interface visual para a tecnologia. Para essa finalidade foi contemplado o uso da linguagem Visual Basic, utilizando o *software* Visual Studio.net. Considerando a complexidade do código desenvolvido, o funcionamento pode ser resumido nas seguintes etapas:

- a) As linhas do código do programa desenvolvido quando executado, primeiramente apresenta uma tela de início do programa;
- b) Na sequência, o código desenvolvido realiza a busca automática das portas de comunicação habilitadas no computador;
- c) Seguidamente, o código permite a seleção da porta de comunicações para estabelecer a comunicação entre o sistema eletrônico desenhado e a interface visual da tecnologia SCADA;
- d) Posteriormente, antes de realizar a aquisição de dados e o controle do sistema eletrônico, o código verifica de forma automática se existe uma configuração pré-estabelecida da porta de comunicações;
- e) No caso afirmativo, o código começa a receber automaticamente uma linha de dados (nessa linha de dados se encontram os valores resultantes da medição da temperatura e umidade tanto do ambiente como dos resíduos orgânicos) proveniente do sistema eletrônico projetado para a tecnologia SCADA;
- f) Seguidamente, a linha de dados recebidos pelo programa desenvolvido (interface visual) divide e armazena esses dados em diferentes variáveis;
- g) Na sequência os dados armazenados nas variáveis são apresentados no diagrama de fluxo do processo que se encontra embutido na interface visual bem como em tabelas indicando o tempo e o dia da coleta dos dados;
- h) De forma simultânea o código desenvolvido permite o envio dos dados coletados a uma planilha do Excel;

- i) Posteriormente o código possui uma linha de códigos específicos para a temporização da aquisição de dados provenientes do sistema eletrônico;
- j) Depois de transcorridas o tempo do temporizador serão realizados novamente os pontos descritos em e, f, g, h e i de forma contínua;
- k) Independentemente do temporizador, a interface visual e o código desenvolvido permitem o envio de dados desde a interface visual para o sistema eletrônico para realizar a ativação tanto de válvulas como de motores;
- l) No caso em que se queira parar a comunicação entre a interface visual e o sistema de eletrônico da tecnologia SCADA, o código desenvolvido realizará de forma automática a desativação tanto das válvulas como dos motores antes de fechar a porta de comunicações; e
- m) Posteriormente o código salvará o arquivo gerado na planilha de Excel e por último deixará de funcionar.

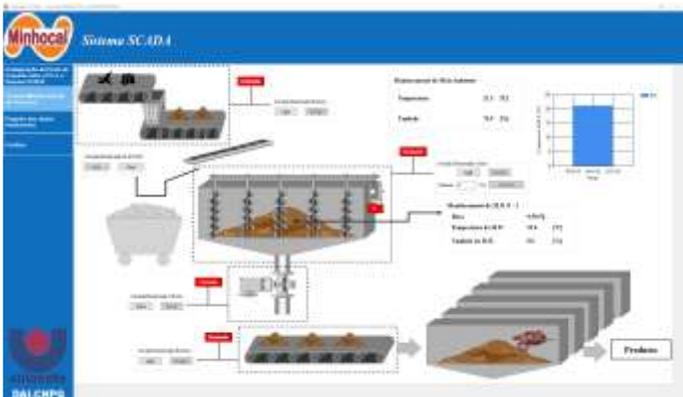
Na Figura 4.67 se apresenta o resultado do programa desenvolvido correspondente à interface visual da tecnologia SCADA. Na Figura 4.68 se apresenta o resultado da simulação referente à comunicação entre o programa desenvolvido e o sistema eletrônico.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.67 – Resultado: Programa desenvolvido correspondente à interface visual da tecnologia SCADA composto pela a) tela de apresentação; b) tela de configuração da porta de comunicações entre a interface visual e o sistema eletrônico; c) tela do diagrama de fluxo do processo bem como a apresentação da dados monitorados correspondentes à temperatura e umidade tanto do ambiente como dos resíduos orgânicos e o controle ou acionamento de válvulas e motores; e d) tela para o registro dos dados gerados na tecnologia.

Fonte: Elaboração própria.

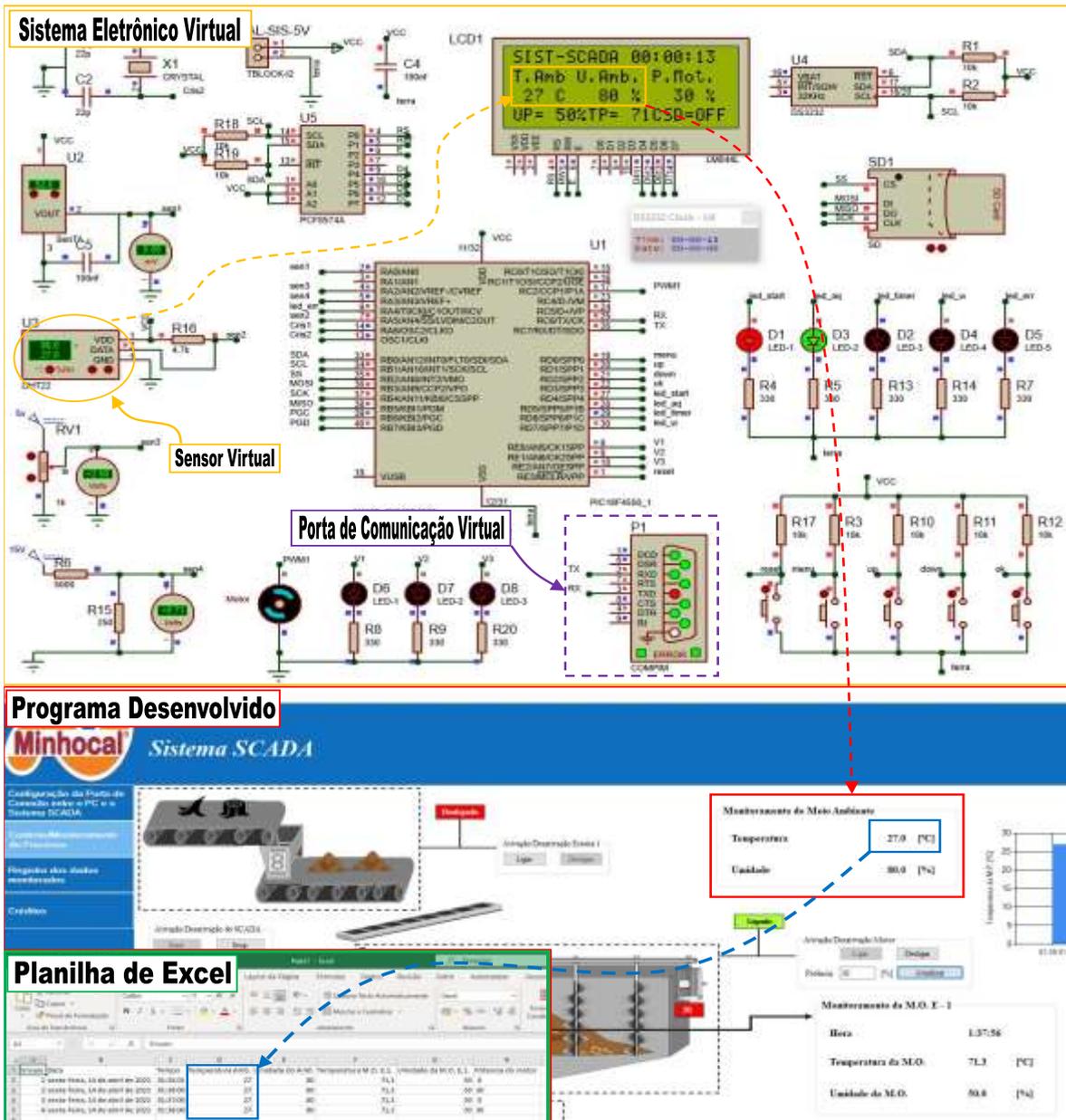


Figura 4.68 – Resultado: Simulação virtual da comunicação entre o programa e o sistema eletrônico desenvolvido.
 Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4.67 e 4.68 é possível constatar que o sistema eletrônico desenvolvido, juntamente com o código criado para o microcontrolador e o programa elaborado para a interface visual da tecnologia SCADA, são capazes de se comunicar de maneira adequada. Essa conclusão pode ser verificada por meio da comparação dos dados obtidos a partir do sensor virtual, da apresentação dos dados na tela LCD, do programa desenvolvido e da planilha de Excel, os quais apresentam uma concordância satisfatória.

Na Figura 4.69 se apresenta o teste experimental do sistema eletrônico projetado utilizando placas de prova. Na Figura 4.70 se apresenta as placas eletrônicas desenhadas. Na Figura 4.71 se apresenta as placas eletrônicas construídas. Na Figura 4.72 se apresenta o desenho da carcaça para a tecnologia SCADA. Na Figura 4.73 se apresenta a carcaça construída e a montagem da tecnologia desenvolvida. Na Figura 4.74 se apresenta o teste final da tecnologia desenvolvida.

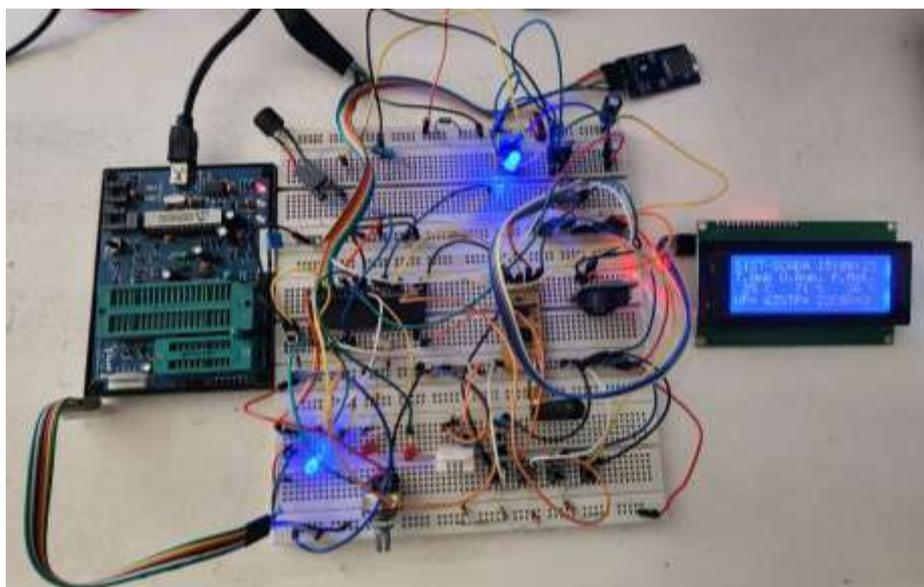


Figura 4.69 - Resultado do teste experimental do sistema eletrônico projetado utilizando placas de prova.

Fonte: Elaboração própria.

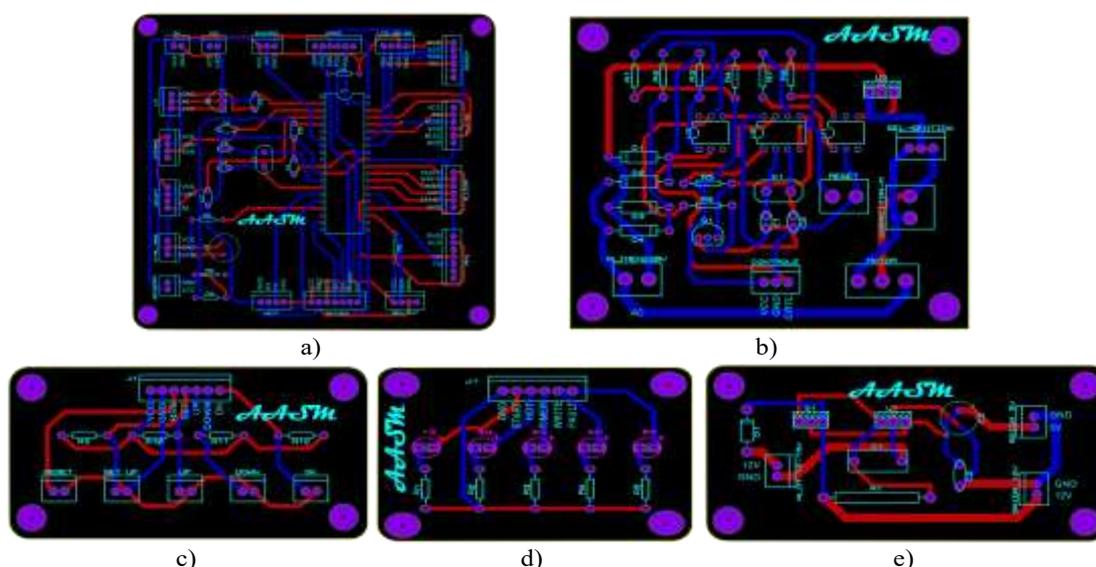


Figura 4.70 - Resultados: Placas eletrônicas desenhadas para realizar: a) o condicionamento de sinais, aquisição de dados e controle, b) o acionamento de válvulas e motores, c) a configuração do relógio eletrônico, d) ativar e desativar leds indicadores do funcionamento do sistema e e) a alimentação de corrente contínua.

Fonte: Elaboração própria.

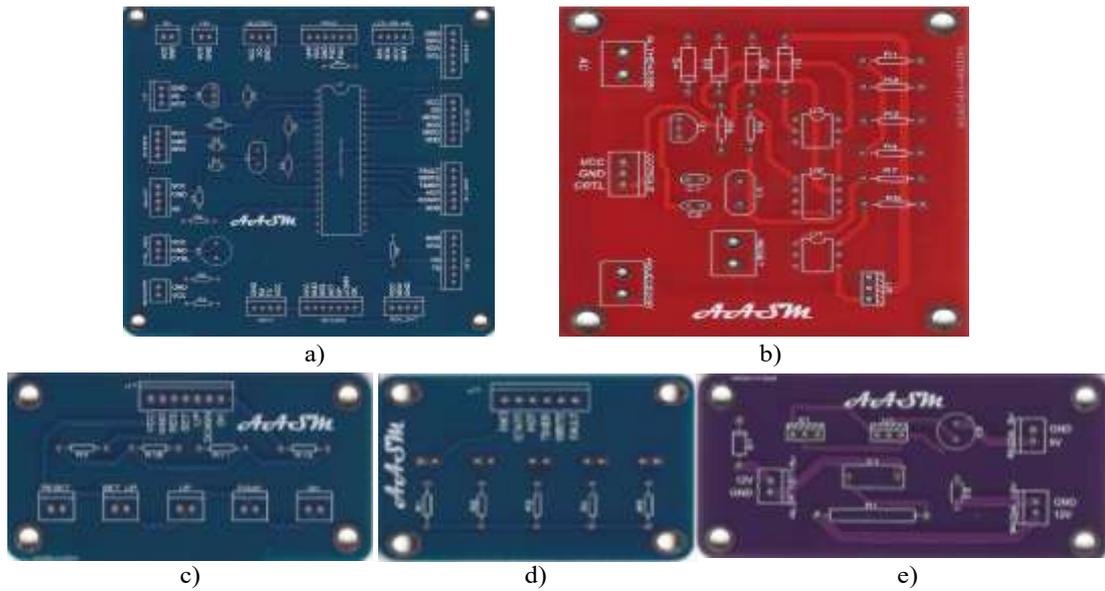


Figura 4.71 - Resultados: Placas eletrônicas construídas para realizar: a) o condicionamento de sinais, aquisição de dados e controle, b) o acionamento de válvulas e motores, c) a configuração do relógio eletrônico, d) ativar e desativar leds indicadores do funcionamento do sistema e e) a alimentação de corrente contínua.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 4.72 Resultado: Desenho da carcaça para a tecnologia SCADA.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 4.73 - Resultados: Construção da carcaça e montagem da parte física da tecnologia desenvolvida.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 4.74 - Resultado: Teste final da tecnologia desenvolvida.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.69 a 4.74 mostram que a tecnologia desenvolvida possui características operacionais relevantes, como monitoramento contínuo da temperatura e a umidade tanto do ambiente e dos resíduos orgânicos, o controle de válvulas e motores, o armazenamento de dados em uma memória SD e uma interface visual para realizar o monitoramento e controle dos processos de transformação dos resíduos orgânicos. Com esses elementos, a tecnologia permite um controle rigoroso das variáveis operacionais e possibilita a realização de estudos para otimizar os processos de transformação dos RO, bem como o estudo do comportamento de diferentes tipos de combinações de RO a serem transformados por esses processos. Esses

estudos geraram em um futuro resultados relevantes que, atualmente, não estão sendo mensurados.

Dessa forma, no desenvolvimento da tecnologia SCADA considerou-se:

- a) A necessidade da medição contínua da umidade e a temperatura, correspondente ao ambiente e ao resíduo orgânico a ser transformado pelos processos industriais. Nesse sentido, foi necessário a busca de sensores específicos para a medição desses parâmetros;
- b) A partir da busca dos sensores foi identificado que cada um deles precisa de um sistema de acondicionamento de sinais, neste caso, para converter sinais de saída de tensão ou corrente em sinais com o mínimo de ruído eletrônico e ao mesmo tempo que sejam mensuráveis pelo microcontrolador;
- c) Em função dos resultados da etapa anterior foi identificado a necessidade de um sistema que consiga realizar a aquisição de dados a partir dos sensores e ao mesmo tempo que consiga realizar o controle de válvulas e motores;
- d) A partir das características dos microcontroladores e as suas limitações, neste caso, considerando que o controle de válvulas e motores não pode ser realizado de forma direta, foi identificado a necessidade da busca de sistemas eletrônicos que permitam realizar o acionamento de válvulas e motores que funcionam com corrente alterna;
- e) Também foi identificado a necessidade do armazenamento dos dados monitorados por meio de sistemas físicos de armazenamento, neste caso, utilizando uma memória SD; e
- f) Por último, foi atendido a necessidade da busca de um sistema de comunicação sem fio que permita a comunicação entre o sistema eletrônico e a interface SCADA desenhado para o computador.

4.5. Produção Intelectual resultante da Tese de Doutorado

Na Figura 4.75 são apresentados os resultados relacionados com a produção intelectual resultante da Tese de Doutorado.

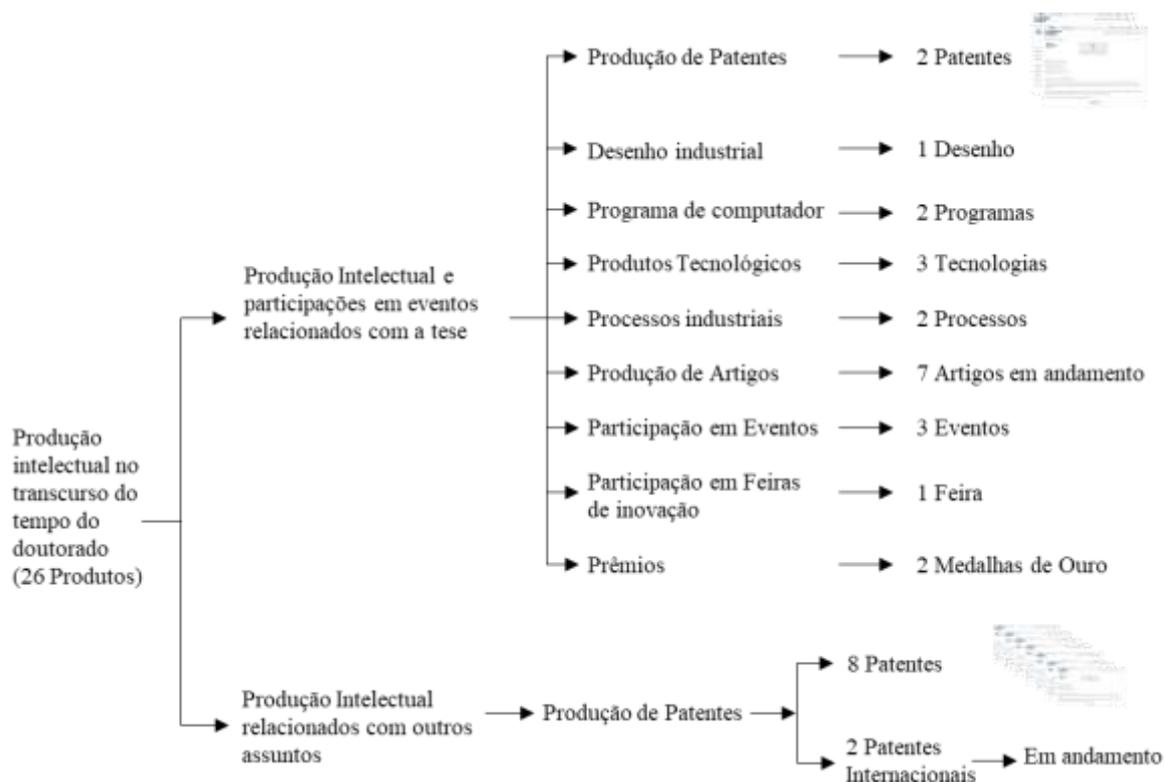


Figura 4.75 - Detalhamento de todas as etapas do processo de industrialização de resíduos orgânicos.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.75, no transcurso do tempo da realização do doutorado foram: a) desenvolvidos duas patentes, um desenho industrial, dois programas de computador, três produtos tecnológicos, dois processos industriais, e estão em andamento a produção de 7 artigos a partir da produção intelectual da tese; b) realizados três participações em eventos internacionais e nacionais, uma participação em uma feira de inovação e foram obtidos dois prêmios (duas medalhas de ouro) com a produção intelectual da tese; e c) depositados oito patentes relacionados com outros assuntos e duas patentes internacionais que atualmente se encontram no processo do tramite do depósito.

4.6. Impactos socioambientais da tese

No cenário acima, do Ponto de vista das ODS, sigla que define os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, pode-se afirmar que, os resultados da tese de doutorado, de maneira direta e indireta, estão em sintonia com os 17 ODS's, conforme argumentos apresentados na sequência:

ODS 1 – Erradicação da pobreza, tendo em vista que o projeto promove a geração de emprego e renda, seja na etapa da logística de coleta da matéria prima (resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes), no processo de produção/industrialização (transformação dos resíduos orgânicos em diversos produtos de valor agregado, a maioria deles não convencional) e na fase de inserção no mercado dos produtos de valor agregado conseguidos com as tecnologias incorporadas no processo de industrialização não convencional dos resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes;

ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável, tendo em vista que, de maneira indireta, dois produtos de valor agregado, resultantes do processo em questão, são insumos/biofertilizantes orgânicos que contribuem para potencializar e popularizar a produção saudável de alimentos e, com isso, no seu contexto consolidado, contribuir para acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhorar a nutrição por meio da promoção de uma agricultura sustentável;

ODS 3 – Saúde e bem-estar, tendo em vista que, de modo geral, o aproveitamento do resíduo orgânico como matéria prima de processos de agregação de valor, pelo não descarte dos mesmos no meio ambiente, evitando a contaminação dos corpos receptores (solo, ar e água) contribui para a geração de ambientes salubres e, dessa maneira se assegura uma vida saudável com a promoção do bem-estar da população em geral, neste último caso devido a sua característica de replicabilidade em diversos locais;

ODS 4 – Educação de qualidade, tendo em vista que o projeto em questão está inserido na academia e, no seu desenvolvimento, contempla também a cultura da educação inclusiva, equitativa e de qualidade, e, ao mesmo tempo, pela possibilidade da replicabilidade da experiência científica, tecnológica e de inovação promove também oportunidades de aprendizagem, ao longo da vida, para todos;

ODS 5 – Igualdade de gênero, tendo em vista que o projeto em questão promove oportunidades de empreendedorismo tanto para homens como para mulheres para a criação de empresas dedicadas à transformação dos resíduos orgânicos em produtos de valor agregado;

ODS 6 – Água potável e saneamento, tendo em vista que evitando a destinação inapropriada dos resíduos orgânicos, como consequência do aproveitamento destes como matéria prima de processos de industrialização, se garante a preservação dos corpos

receptores, principalmente dos recursos hídricos e, com isso, se garante a disponibilidade e o manejo sustentável da água e o saneamento;

ODS 7 – Energia limpa e acessível, tendo em vista que um dos vários produtos gasosos resultantes do processo de transformação, do projeto em questão, é o biogás pode-se constatar que, esse produto de valor agregado também apresenta grande potencial de produção e aplicação e, de maneira específica contribui com o acesso à uma energia barata, confiável, sustentável e renovável;

ODS 8 – Trabalho decente e crescimento econômico, tendo em vista que as tecnologias desenvolvidas para a transformação dos problemas ambientais em fontes de oportunidades de negócios sustentáveis, na atualidade, promoverão o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, gerando oportunidades de emprego pleno e produtivo, e também propicia o trabalho decente para os diversos atores que são contemplados nas diversas etapas do desenvolvimento do projeto. Seja no desenvolvimento/fabricação dos equipamentos, na instalação, na logística de prospecção das matérias primas que são os resíduos orgânicos, na operacionalização do processo de industrialização dos resíduos orgânicos e, também na inserção dos produtos de valor agregado no mercado;

ODS 9 – Indústria, inovação e infraestrutura, tendo em vista que o objetivo principal do projeto foi o desenvolvimento de tecnologia inovadora para concretizar a industrialização dos resíduos orgânicos de diversas fontes e, constata-se a contribuição explícita na construção de infraestrutura resiliente, se promove a industrialização inclusiva e sustentável, e, principalmente, se fomenta a inovação, neste caso, comprovado pelas tecnologias com proteção intelectual em forma de patentes, as quais conseguiram sua implementação na linha de produção em benefício da sociedade/mercado;

ODS 10 – Redução das desigualdades, tendo em vista que o assunto principal do projeto (tecnologias inovadoras para a industrialização de resíduos orgânicos), de maneira indireta, e pelo caráter de replicabilidade propicia também a redução das desigualdades. Num primeiro momento, no município onde está inserido o projeto (Região Oeste do Estado do Paraná) e depois, pela sua replicabilidade nos demais municípios dentro e fora do Brasil;

ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis, tendo em vista que o aproveitamento não convencional dos resíduos orgânicos, como matéria prima de processos de agregação de

valor, numa escala industrial, torna as cidades e aos assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e, principalmente, sustentáveis;

ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, tendo em vista que, de maneira indireta, os produtos de valor agregado que resultam do uso das tecnologias inovadoras desenvolvidas no projeto contribuem para assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis;

ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima, tendo em vista que a não destinação dos resíduos orgânicos aos lixões e/ou aos aterros sanitários contribui, de maneira direta e concreta o combate às mudanças climáticas e seus impactos;

ODS 14 – Vida na água, tendo em vista que a transformação do resíduo problema em matéria prima de um modelo de negócio sustentável e inovador deixa de contaminar os corpos receptores e, com isso, se contribui para a conservação e uso sustentável dos rios, oceanos, mares e, em geral, dos recursos marinhos, sempre em sintonia com o desenvolvimento territorial sustentável e inovador;

ODS 15 – Vida terrestre, tendo em vista que as consequências positivas do projeto, de maneira indireta, contribuem também para a proteção, recuperação e promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerindo de forma sustentável as florestas, e, com isso, também se combate à desertificação e/ou se consegue deter e reverter a degradação da terra, bem como deter a perda da biodiversidade;

ODS 16 – Paz, justiça e instituições eficazes, tendo em vista que os resultados do projeto promovem oportunidades de emprego, renda e qualidade de vida da população e com isso se concretiza o estabelecimento de sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável e, num ambiente de parceria entre Universidade, Empresa, Governo e Sociedade, se propicia ao acesso à justiça para todos, com instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis; e

ODS 17 – Parcerias e meios de implementação, tendo em vista que, a experiência do projeto, com resultados satisfatórios, demonstrou que é possível concretizar a parceria entre universidade, empresa, governo e sociedade e, com isso, se fortalece os meios de implementação e, a todo momento se revitaliza a parceria global para o desenvolvimento territorial sustentável e inovador.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Depois de realizar as caracterizações correspondentes à geração de resíduos orgânicos no Brasil, no Estado do Paraná e no município de Toledo, pode-se constatar o grande potencial de aproveitamento dos RO como matéria prima de processos de industrialização. Considerando uma capacidade de processamento de 155 toneladas por dia de RO, seria possível a implantação de 749 plantas de industrialização de RO no Brasil, das quais 41 plantas se encontrariam implantadas no estado do Paraná e além de contribuir com a mitigação dos problemas ambientais, seria possível, de maneira direta e indireta, à geração emprego e renda.

De acordo com o levantamento de dados realizados nos 50 municípios da região Oeste do Paraná e de acordo com o Análise do comportamento da geração de resíduos orgânicos, nessa região seria possível a implantação de 16 unidades para industrializar resíduos orgânicos os quais seriam distribuídas em 5 municípios âncoras (Santa Terezinha, Cascavel, Toledo, Nova Aurora e Céu Azul).

Foi também constatada a existência do grande potencial de geração de dejetos de suínos, no qual, somente o município de Toledo-PR seria responsável pela geração de 736.780 toneladas por ano de esterco de suínos e bovinos. A pesquisa também apontou que esses materiais podem ser utilizados como catalizadores dos processos de industrialização dos demais RO, neste caso para a obtenção de produtos de elevado valor agregado.

De acordo com o levantamento de dados, em termos do conteúdo de carbono, nitrogênio, relação C/N, umidade e o potencial de hidrogênio pH nos resíduos orgânicos, foi identificada a oportunidade da elaboração de programas computacionais para realizar a dosagem otimizada nos sistemas de processamento biológico. Desta forma foi possível a simulação do processamento desses resíduos em função da melhor formulação ou mistura no processo de industrialização.

Os resultados da especificação da carga de resíduos orgânicos gerados numa alternativa distribuída mostram que cada família (constituída por 4 pessoas do município de Toledo) consegue gerar ao redor de $2,18 \text{ kg.dia}^{-1}$ de resíduos orgânicos e esse valor define a capacidade de processamento dos equipamentos do sistema distribuído.

Os resultados com relação a especificação da capacidade de processamento considerando um processo centralizado mostrou que em Toledo são gerados diariamente

77,69 t.dia⁻¹ de resíduos orgânicos domésticos e 1.980,59 t.dia⁻¹ de resíduos de animais na forma de esterco de suínos e bovinos. Desse total foi encontrado a necessidade da implantação de processos centralizados considerando uma capacidade produtiva de 189,49 t.dia⁻¹, para realizar o tratamento e a transformação do 100% (77,69 t.dia⁻¹) dos ROD gerados no município de Toledo, acrescentando com 77,69 t.dia⁻¹ de esterco de suínos e bovinos e 34,11 t.dia⁻¹ de resíduos provenientes da poda de árvores, seguido da palha de trigo, serragem de madeira e talos de milho (insumos necessários para aumentar a relação C/N).

Os resultados da avaliação em torno dos processos de compostagem, biodigestão anaeróbica e a vermicompostagem foram fundamentais para avaliar o comportamento das variáveis operacionais, essas informações subsidiaram no desenvolvimento do processo e da tecnologia com base da combinação de processos de biodigestão e vermicompostagem.

O resultado do programa computacional possibilitou maior oportunidade para realizar cálculos de misturas de resíduos visando a obtenção de relações ótimas de carbono nitrogênio para seu aproveitamento no processamento dos resíduos orgânicos.

Os resultados da tecnologia, para o processamento distribuído dos resíduos orgânicos utilizando processos de vermicompostagem em uma escala doméstica, mostrou que há um grande potencial de aplicação e, nessa tecnologia (minhocário modular para uso doméstico), prevalece a praticidade tanto na montagem como na operação, o qual permite o processamento dos resíduos provenientes das refeições diárias e propicia sua transformação em húmus, fertilizante líquido e minhocas excedentes. Em função das características operacionais, formato geométrico, uso de fatores de desenho (cinética, condições operacionais), foi possível o seu patenteamento no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual INPI.

Considerando como base de estudo ao município de Toledo, os resultados do processo centralizado de resíduos orgânicos mostram o grande potencial no aproveitamento dos resíduos gerados. Também foi possível identificar que a combinação processos de biodigestão anaeróbica, processos de compostagem e processos de vermicompostagem possibilitam o aproveitamento do 100% dos resíduos orgânicos e, do ponto de vista ambiental, econômico e social o processo está em sintonia com os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável.

Os resultados da extração do líquido celomático das minhocas utilizando dois tipos de solventes mostram dados importantes para a realização de futuros trabalhos, mais

especificamente, na busca de processos de extração fracionada dos compostos orgânicos identificados, os quais são potenciais produtos (insumos) para a fabricação de alimentos, remédios e cremes entre os mais importantes.

Em função de toda a informação, foi possível concentrar todos os fundamentos teóricos, técnicos e científicos para desenvolver um processo centralizado direcionado à industrialização dos resíduos orgânicos proposto no presente trabalho, considerando a combinação das etapas de biodigestão, compostagem e vermicompostagem como método de industrialização dos resíduos orgânicos, o resultado da pesquisa demonstra a possibilidade da obtenção de 17 produtos de elevado valor agregado, sendo eles o dióxido de carbono, o gás sulfídrico, a ureia, a energia elétrica, combustíveis gasosos, concentrados líquidos provenientes da biodigestão anaeróbica, substratos líquidos para o controle de pragas, biofertilizante líquidos concentrados, húmus concentrado, terra rica com húmus, substrato com húmus, concentrado do líquido celomático, como insumo de biofertilizante, extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para cosméticos, extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para alimentos funcionais, extrato de minhocas como concentrado rico em princípios ativos para medicamentos, farinha de minhoca e minhocas vivas;

Os resultados do desenvolvimento da tecnologia SCADA (para o monitoramento, controle e processamento de dados no processo de transformação de resíduos orgânicos) possuem elementos diferenciados que tornam a sua aplicação possível tanto em setores industriais para o controle dos processos, quanto em áreas de pesquisa visando à otimização desses processos por meio do monitoramento e controle das variáveis operacionais.

Para finalizar, no transcurso da tese foi possível a) desenvolver duas patentes, um desenho industrial, dois programas de computador, três produtos tecnológicos, dois processos industriais, e estão em andamento a produção de 7 artigos a partir da produção intelectual da tese; b) realizar três participações em eventos internacionais e nacionais, uma participação em uma feira de inovação e foram obtidos dois prêmios (duas medalhas de ouro) com a produção intelectual da tese; e c) desenvolver oito patentes relacionados com outros assuntos e duas patentes internacionais que atualmente se encontram no processo do tramite do depósito. Dessa forma, se consegue contribuir com o desenvolvimento de inovações tecnológicas para viabilizar a industrialização de resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELALL, E.; ALAWNEH, L.; ELDAKROURY, M. A manufacturability-based assessment and design modification support tool. **Journal of applied research and technology**, México, v. 18, n. 6, p. 410–424, 2020.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10004: Resíduos sólidos – classificação**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019. *E-book*. Disponível em: www.abrelpe.org.br.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022.
- ADACHI, Y. *et al.* L-Alanine activates hepatic AMP-activated protein kinase and modulates systemic glucose metabolism. **Molecular Metabolism**, Neuherberg, v. 17, n. August, p. 61–70, 2018.
- ADEOGBA, E. *et al.* Waste-to-Resource Transformation: Gradient Boosting Modeling for Organic Fraction Municipal Solid Waste Projection. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, Washington, v. 7, n. 12, p. 10460–10466, 2019.
- AFRICA, A. D. M. *et al.* Design and Analysis of a Closed-Loop Temperature Engineering Control System using MikroC and Proteus. **2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application, DASA 2020**, Estados Unidos, p. 184–189, 2020.
- AGUILAR, M. G. *et al.* Governance challenges and opportunities for implementing resource recovery from organic waste streams in urban areas of Latin America: insights from Chía, Colombia. **Sustainable Production and Consumption**, Amsterdam, v. 30, p. 53–63, 2022.
- AIRES, A. M. **Caracterização Química e Orgânica dos Resíduos de Incubatório e Materiais Carbonáceos para sua Compostagem**. Buenos Aires, 2010. Disponível em: <https://pt.engormix.com/avicultura/artigos/residuos-incubatorio-carbonaceos-compostagem-t36871.htm>. Acesso em: 1 ago. 2021.
- ALENCASTRO, Y. M. S. **Tecnologia para produção de húmus líquido**. PI0704741-0A2. Concessão: 2008.

- ALFA, M. I. *et al.* Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. **Renewable Energy**, Oxford, v. 63, p. 681–686, 2014.
- ALIBARDI, L.; COSSU, R. Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production potentials. **Waste Management**, New York, v. 36, p. 147–155, 2015.
- ALVES, J. do C. *et al.* Absorção e distribuição de chumbo em plantas devetiver, jureminha e algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 1329–1336, 2008.
- AMARAL, A. C. *et al.* Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 168, p. 229–235, 2016.
- AMARPAL *et al.* Evaluation of the healing potential of earthworm coelomic fluid in full thickness skin wounds in rabbits. **Veterinarski Arhiv**, Zagreb, v. 85, n. 2, p. 189–200, 2015.
- ANDRADE, M. A. N. *et al.* Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL – AGRENER**, Campinas, v. 4, p. 12, 2002.
- ANGELIDAKI, I. *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009.
- ANTONELLI, J. *et al.* Biogas production by the anaerobic digestion of whey Produção de biogás por digestão anaeróbia do soro de leite. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa:, v. 39, n. 3, p. 463–467, 2016.
- APAYDIN, H.; SERTELLER, N. Microcontroller Training Kit Design Compatible with Drawings of the ISIS Simulation Program. **International Journal of Education and Information Technologies**, Nova Jersey, v. 14, p. 22–30, 2020.
- APPELS, L. *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 34, n. 6, p. 755–781, 2008.
- AQUINO, A. M. de. Vermicompostagem. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA**, Seropédica, p. 6, 2009.

AQUINO, A. M.; ALMEIDA, D. L.; DA SILVA, V. Utilização de minhocas na estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA**, Seropédica, n. 8, p. 1–6, 1992.

ARNAU, R. *et al.* Evaluation of hydraulic mixing performance in a full-scale anaerobic digester with an external liquid recirculation system using CFD and experimental validation. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 251, p. 117392, 2022.

ARRUDA, M. A. Z.; MATOS, G. D.; PEREIRA, M. G. **Utilização de vermicomposto como material adsorvente de metais para o tratamento de efluentes**. PI0201464-5A. Concessão: 2003.

ARUNACHALAPERUMAL, C. *et al.* Wireless supervisory controls for industrial automation. **International Journal of Wireless and Mobile Computing**, Reino Unido, v. 12, n. 2, p. 182–190, 2017.

ASHOKKUMAR, V. *et al.* Advanced technologies on the sustainable approaches for conversion of organic waste to valuable bioproducts: Emerging circular bioeconomy perspective. **Fuel**, Londres, v. 324, n. PB, p. 124313, 2022.

AYOUBMOUBARECK, C.; ALAWLAQI, B.; ALHAJRI, S. Characterization of Physico-Chemical Parameters and Bacterial Diversity of Composted Organic Food Wastes in Dubai. **Heliyon**, Londres, v. 9, n. 6, p. e16426, 2022.

AZIMIRAD, E.; MOVAHHED, S. R. Design of an electronic system for laser methane gas detectors using the tunable diode laser absorption spectroscopy method. **Journal of Laser Applications**, Toledo, Ohio, v. 34, n. 2, 2022.

BACHMAN, G. R.; METZGER, J. D. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. **Bioresource Technology**, Barking, v. 99, n. 8, p. 3155–3161, 2008.

BANERJEE, A. *et al.* Oleic acid prevents erythrocyte death by preserving haemoglobin and erythrocyte membrane proteins. **Free Radical Biology and Medicine**, USA, v. 202, n. March, p. 17–33, 2023.

BARBOSA, J. A. *et al.* Biocompatible Wearable Electrodes on Leaves toward the On-Site Monitoring of Water Loss from Plants. **ACS Applied Materials and Interfaces**, Washington, v. 14, n. 20, p. 22989–23001, 2022.

BARRETT, S.; PACK, D. **Microcontrollers fundamentals for engineers and scientists**.

1ra. ed. Estados Unidos: Morgan & Claypool Publishers, 2006.

BASSACO, A. C. **Uso de resíduos de origem animal biotransformados na produção de mudas de alface**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2014.

BATTISTA, F. *et al.* New insights in food waste, sewage sludge and green waste anaerobic fermentation for short-chain volatile fatty acids production: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 10, n. 5, p. 108319, 2022.

BENCHCHEM. **2-Hexadecanol**. USA, 2023. Disponível em: <https://www.benchchem.com/product/b079914>. Acesso em: 11 abr. 2023.

BERILLI, S. S.; BONAZINA, H. W.; MOURA, F. H. **Composição para produção de mudas de café conilon com aproveitamento de lodo de curtume e húmus**. BR102016029879-2A2. Concessão: 2018.

BERTOLDI, M.; ZUCCONI, F.; CIVILINI, M. Temperature, pathogen control and product quality. **BIOCYCLE**, Emmaus, n. February, p. 43–50, 1988.

BIANCO, T. S. **Modelo de gestão dos resíduos sólidos urbanos como elemento de desenvolvimento regional sustentável: uma análise dos municípios do oeste do Paraná**. 2018. 280 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018.

BIOSYNTH. **2,4-Dimethylbenzo[H]quinoline**. Reino Unido, 2023. Disponível em: <https://www.biosynth.com/p/AAA60567/605-67-4-24-dimethylbenzohquinoline>. Acesso em: 11 abr. 2023.

BISHOP, R. H. **Learning with Labview**. Nova Jersey: Pearson Education, 2015.

BOE, K. **Online monitoring and control of the biogas process**. 2006. 47 f. Thesis (Doctorate) - DTU Environment, Lyngby, 2006.

BORUAH, T. *et al.* Vermicomposting of citronella bagasse and paper mill sludge mixture employing *Eisenia fetida*. **Bioresource Technology**, Barking, v. 294, p. 8, 2019.

BOUŠKOVÁ, A. *et al.* Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactors treating sewage sludge. **Water Research**, Oxford, v. 39, n. 8, p. 1481–1488, 2005.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO - SNS. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos**

Sólidos Urbanos - Gestão Técnica dos Serviços. Ano de referência: 2020. Brasília: SNS/MDR, 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO - SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2018.** Brasília: SNS/MDR, 2019.

BRASIL. **Instrução Normativa Nº 61, de 08 de julho de 2020.** Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos.** 3. ed. Brasília: Edições Câmara, 2017.

BREIJO, E. **Compilador C CCS y simulador Proteus para Microcontroladores PIC.** 1. ed. Mexico: Alfaomega, 2008.

CALBRY-MUZYKA, A. *et al.* Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. **Renewable Energy**, Oxford, v. 181, p. 1000–1007, 2022.

CALDERON-CORDOVA, C. *et al.* Red de sensores inalámbricos para monitoreo en tiempo real de Temperatura, Humedad e Iluminancia en un orquideario. **Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI**, Cáceres, Espanha, p. 7, 2018.

CANTÚ, S. M. *et al.* El ácido araquidónico y sus derivados. Generalidades de los prostanoídes en relación con procesos inflamatorios. **Ciencia e Investigación**, Buenos Aires, v. 67, n. 4, p. 5–12, 2017.

CAROTENUTO, C. *et al.* Temperature and ph effect on methane production from buffalo manure anaerobic digestion. **International Journal of Heat and Technology**, Itália, v. 34, n. Special Issue 2, p. S425–S429, 2016.

CARRILHO, N. F. Q. **Valorização de Bio-Resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de Estudo : Campus da FCT / UNL.** 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

CASARIL, C. E. **Estudo da aplicação de vermicompostagem sobre fertilizantes orgânicos.** 2014. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso - UNIVATES, Lajeado, 2014.

CASCAVEL. **Plano municipal de coleta seletiva.** Cascavel: Prefeitura Municipal de

Cascavel/PR, 2014.

CASTRO-BELLO, M. *et al.* Packaged reactor monitoring system for the treatment of wastewater containing dyes. **Revista de la Universidad del Zulia**, Maracaibo, v. 13, n. 37, p. 65–75, 2022.

CASTRO, F. L. S. *et al.* L-Arginine supplementation enhances growth performance, lean muscle, and bone density but not fat in broiler chickens. **Poultry Science**, USA, v. 98, n. 4, p. 1716–1722, 2019.

CASTRO, L. R.; CORTEZ, L. A. B. Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 97–102, 1998.

CATHERINE, C.; TWIZERIMANA, M. Biogas Production from Thermochemically Pretreated Sweet Potato Root Waste. **Heliyon**, Londres, v. 8, n. May, p. 9, 2022.

CEBALLOS, J. **C/C++ Curso de programación**. 3. ed. Madrid: Ra-Ma, 2007.

CELESTINO, É.; CARVALHO, A.; PALMA-OLIVEIRA, J. M. Household organic waste: Integrate psychosocial factors to define strategies toward a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 378, n. October, 2022.

ČERNÝ, D.; DOBEŠ, J. Functional programming languages in computer simulation of electronics circuits. **Proceedings - 2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, CSCI 2014**, Praga, v. 1, p. 229–234, 2014.

CHANDRA, B. R. P.; GEEVARGHESE, K. P.; GANGADHARAN, K. V. Design and Implementation of Remote Mechatronics Laboratory for e-Learning Using LabVIEW and Smartphone and Cross-platform Communication Toolkit (SCCT). **Procedia Technology**, Amsterdam, v. 14, p. 108–115, 2014.

CHANG, R. *et al.* Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting. **PLoS ONE**, San Francisco, CA, v. 15, p. 1–14, 2020.

CHANGGUI, H. **Composition for eliminating cardiovascular and cerebrovascular diseases and reducing fat and preparation method thereof**. CN114246919A. Concessão: 2022.

CHAO, Y. T. *et al.* **Copper oxide composite desulfurizer as well as preparation method**

and application thereof. CN114307617A. Concessão: 2022.

CHAPMAN, S. J. **MATLAB Programming for Engineers**. 5. ed. USA: Cengage Learning, 2016.

CHAVEZ-RICO, V. S. *et al.* Producing organic amendments: Physicochemical changes in biowaste used in anaerobic digestion, composting, and fermentation. **Waste Management**, New York, v. 149, n. March, p. 177–185, 2022.

CHEN, X. J. *et al.* An aminocaproic acid-grafted chitosan derivative with superior antibacterial and hemostatic properties for the prevention of secondary bleeding. **Carbohydrate Polymers**, Reino Unido, v. 316, n. December 2022, p. 120988, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120988>.

CHEN, Y. *et al.* The contribution of earthworms to carbon mineralization during vermicomposting of maize stover and cow dung. **Bioresource Technology**, Barking, v. 368, n. October 2022, p. 128283, 2023.

CHITRA, M.; PAPPA, N.; ABRAHAM, A. Dissolved Oxygen Control of Batch Bioreactor using Model Reference Adaptive Control scheme. **IFAC-PapersOnLine**, Kidlington, v. 51, n. 4, p. 13–18, 2018.

COELHO, I. **GNV deve ficar mais barato em setembro com mudança na base de cálculo do ICMS**. Fortaleza, CE, 2022.

CONTE, G. **Comparação entre os processos mesofílicos e termofílico para digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU)**. 2019. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2019.

CORRÊA, C. T.; SANTOS, J. S. dos. Vermicompostagem no tratamento de resíduos orgânicos domésticos. **XI SEPesq - Semana de Extensão, Pesquisa e Pós-graduação - Centro Universitário Ritter dos Reis**, Porto Alegre, p. 11, 2015.

COTTA, J. A. de O. *et al.* Compostagem versus vermicompostagem: Comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 65–78, 2015.

CUDJOE, D.; ACQUAH, P. M. Environmental impact analysis of municipal solid waste incineration in African countries. **Chemosphere**, Oxford, v. 265, p. 129186, 2021.

CULLINAN, B. M.; CULLINAN, D. H.; BRUNO, R. A. **Fertilizer including**

vermicompost and method of manufacturing a fertilizer including vermicompost. US2021/0276928A1. Concessão: 2021.

DA SILVA, L. **Processo de compostagem com diferentes porcentagens de resíduos sólidos agroindustriais.** 2007. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste de Paraná, Cascavel, PR, 2007.

DAI, Q. *et al.* Research on the mechanism of synergistic-dehydration/detoxification for sludge under treatment with double-modified potato residue. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, n. October, p. 127699, 2020.

DANDEKAR, P.; ANTONY, F. M.; WASEWAR, K. L. Separation of 4-hydroxy-3-methoxybenzoic acid with 2-ethyl hexanol, isobutyl acetate and 1-butanol. **Chemical Data Collections**, Amsterdam, v. 39, n. February, p. 100858, 2022.

DE ARAÚJO, V. O. *et al.* New Compact Biogas Model for Organic Waste Treatment in Urban Residences and Buildings. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 147, n. 2, p. 8, 2021.

DE KLEIJNE, K. *et al.* Environmental benefits of urea production from basic oxygen furnace gas. **Applied Energy**, Barking, v. 270, n. May, p. 13, 2020.

DELGADO, M. D. M. *et al.* Assessment of the composting process of poultry manure using different mixtures of substrates. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, Mexico, v. 35, n. 4, p. 965–977, 2019.

DEMIRCI, O.; TASKIN, S. Development of measurement and analyses system to estimate test results for lead-acid starter batteries. **Journal of Energy Storage**, Oxford, v. 34, p. 13, 2021.

DENG, Z. *et al.* The effect of earthworm extract on mice S180 tumor growth and apoptosis. **Biomedicine and Pharmacotherapy**, New York, v. 115, p. 7, 2019.

DÍAZ, I. *et al.* Effect of operating pressure on direct biomethane production from carbon dioxide and exogenous hydrogen in the anaerobic digestion of sewage sludge. **Applied Energy**, Barking, v. 280, p. 9, 2020.

DIMIAN, A. C.; BILDEA, C. S. **Chemical Process Design: Computer-Aided Case Studies.** Weinheim: WILEY-VCH, 2008.

DOMÍNGUEZ, M. *et al.* Development of an educational tool in LabVIEW and its

integration in remote laboratory of automatic control. **IFAC Proceedings Volumes**, Londres, v. 42, n. 24, p. 101–106, 2010.

DOMÍNGUEZ, J. State-of-the-Art and New Perspectives on Vermicomposting Research. *In: EARTHWORM ECOLOGY*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004. p. 401–424.

DOMÍNGUEZ, J.; AIRA, M.; GÓMEZ-BRANDÓN, M. Vermicomposting: earthworms enhance the work of microbes. *In: MICROBES AT WORK: FROM WASTES TO RESOURCES*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 93–114.

DOMÍNGUEZ, J.; PÉREZ-LOSADA, M. Eisenia Fetida (Savigny, 1826) y Eisenia Andrei Bouché, 1972 son dos especies diferentes de lombrices de tierra. **Acta Zoológica Mexicana**, Mexico, v. 2, p. 321–331, 2010.

DONG, L. *et al.* Efficient biogas production from cattle manure in a plug flow reactor: A large scale long term study. **Bioresource Technology**, Barking, v. 278, n. January, p. 450–455, 2019.

DONG, H. *et al.* Emissions From Livestock and. *In: AGRICULTURE, FORESTRY AND OTHER LAND USE*. Kanagawa, Japão: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. p. 87.

DONGZE, L. **Traditional Chinese medicine composition for improving microcirculation of human body and preparation method thereof**. CN113521243A. Concessão: 2021.

DORES-SILVA, P. R.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. O. Chemical monitoring of vermicomposting from domestic sewage sludge. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 956–961, 2011.

DOS SANTOS, C.; MENEZES, M. Design para micro e pequena empresa: O desenho como abordagem do projeto. *In: UNESP (org.). Design e planejamento: aspectos tecnológicos*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. p. 93–108.

DUBEY, S. *et al.* **LabVIEW based Automation Guide for Microwave Measurements**. Nova Deli, India: Springer, 2018.

EDWARDS, C. A.; ARANCON, N. Q.; SHERMAN, R. **Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management**. Boca Raton, USA.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.

- EHSANI, B. **Data Acquisition using LabVIEW**. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2016.
- ELAHI, A. **Computer Systems: Digital design, fundamentals of computer, architecture and Assembly Language**. New Haven: Springer International Publishing, 2018.
- ENEBE, M. C.; ERASMUS, M. Mediators of biomass transformation – A focus on the enzyme composition of the vermicomposting process. **Environmental Challenges**, Amsterdam, v. 12, n. May, p. 100732, 2023.
- ESAM, M.; ESMAEEL, A. Study of the Effect of Capoten and Tenormin Drugs on Lipid Profile and Renal Function in Patients with Hypertension. **Journal of Al-Nahrain University Science**, Iraque, v. 17, n. 1, p. 76–81, 2014.
- EVANS, S. An integrated circular economy model for transformation towards sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 388, n. January, p. 135950, 2023.
- FAUJDAR, E. *et al.* Study on Biodegradable Poly(α -Olefins-co- α -Pinene) Architectures as Pour Point Depressant and Viscosity Index Improver Additive for Lubricating Oils. **Journal of Polymers and the Environment**, USA, v. 28, n. 11, p. 3019–3027, 2020.
- FERELLA, F. *et al.* Separation of carbon dioxide for biogas upgrading to biomethane. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 164, p. 1205–1218, 2017.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. **Manual prático para a compostagem de Biossólidos**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.
- FERREIRA, R. L. C. **Biofertilizante líquido preparado a partir de vermicomposto (humus) de minhocas**. PI0706128-5A2. Concessão: 2009.
- FIGUEIREDO, J.; BOTTO, M. A.; RIJO, M. SCADA system with predictive controller applied to irrigation canals. **Control Engineering Practice**, Oxford, v. 21, n. 6, p. 870–886, 2013.
- FILHO, R. S. *et al.* Compostagem de Dejetos de Suínos. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 6, n. 1, p. 46–78, 2013.
- FIORI, M. G. S.; SCHOENHALS, M.; FOLLADOR, F. A. C. Análise da evolução tempo-eficiência de duas composições de resíduos agroindustriais no processo de com postagem aeróbia. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 5, n. 3, p. 178–191, 2008.
- FITRIANI, S.; SOFYAN, Y. Simulator Human Machine Interface (HMI) using visual basic on the SCADA system. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**,

Bristol, v. 830, n. 3, p. 6, 2020.

FLÓREZ-RUIZ, J. *et al.* Diseño, Simulación y construcción de un modelo de laboratorio de Transporte de Pellets. **Iteckne**, Bucaramanga, v. 16, n. 2, p. 93–103, 2019.

FONGARO, G. *et al.* Utility of specific biomarkers to assess safety of swine manure for biofertilizing purposes. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 479–480, n. 1, p. 277–283, 2014.

FOZ DO IGUAÇU. **Plano municipal de saneamento básico município de Foz do Iguaçu/PR**. Foz de Iguaçu: Prefeitura Municipal de Foz de Iguaçu/PR, 2012. Disponível em: <http://www.cmfi.pr.gov.br/pdf/projetos/1664c.pdf>.

FRITSCH, P. **A temperatura como parâmetro acessível e possível de ser utilizado no controle do processo de compostagem em municípios de pequeno e médio porte**. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2006.

GARCIA, J. L. M. **Aparelho para produção de extrato aeróbico de composto e/ou vermicomposto (humus de minhoca)**. PI0303136-5A. Concessão: 2005.

GE, M. *et al.* Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure composting. **Bioresource Technology**, Barking, v. 304, n. 41, p. 122928, 2020.

GETEL. **Carga de Cilindro de CO2 (por kg)**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.getequipamentos.com.br/carga-para-cilindro-co2-por-kg>. Acesso em: 10 ago. 2022.

GIONGO, A. *et al.* Microbial communities in anaerobic digesters change over time and sampling depth. **Brazilian Journal of Microbiology**, Rio de Janeiro, v. 51, n. 3, p. 1177–1190, 2020.

GLAVIČ, P.; PINTARIČ, Z. N.; BOGATAJ, M. Process design and sustainable development—a european perspective. **Processes**, Basel, v. 9, n. 1, p. 21, 2021.

GORDILLO, G. *et al.* Novel design of reactor to grow CuSbS₂ films by chalcogenisation of metal precursors sequentially evaporated. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 15, p. 1642–1652, 2021.

GOSWAMI, L. *et al.* Application of drum compost and vermicompost to improve soil

health, growth, and yield parameters for tomato and cabbage plants. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 200, p. 243–252, 2017.

GOYENECHE, O. Y. R. *et al.* Mobilizing the Transformative Power of the Research System for Achieving the Sustainable Development Goals. **Research Policy**, Amsterdam, v. 51, n. 10, p. 18, 2019.

GUERI, M. V. D. *et al.* Digestão Anaeróbia De Resíduos Alimentares Utilizando Ensaio Bmp. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 08, 2017.

GUERMANDI, J. I. **Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dos fertilizantes orgânicos produzidos pelas técnicas de compostagem e vermicompostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada em estabelecimentos alimentícios de São Carlos/SP.** 2015. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

GUNASEELAN, V. N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 389–399, 2004.

HAGENEDER, W. **Dispositivo de produção de humus.** BR112015029412-0B1. Concessão: 2014.

HAIK, Y.; SHAHIN, T. **Engineering Design Process.** 2. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

HAONAN, X. **Feed formula.** CN113812536A. Concessão: 2021.

HE, Y. *et al.* Durability enhanced ionic liquid catalyst for Friedel-Crafts reaction between benzene and 1-dodecene: Insight into catalyst deactivation. **RSC Advances**, Reino Unido, v. 5, n. 76, p. 62241–62247, 2015.

HE, X. *et al.* Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials. **Bioresource Technology**, Barking, v. 218, p. 867–873, 2016.

HENRIQUE, J. P.; CASCIATORI, F. P.; THOMÉO, J. C. Automatic system for monitoring gaseous concentration in a packed-bed solid-state cultivation bioreactor. **Chemical Engineering Science**, Londres, v. 259, p. 13, 2022.

HERAS-CERVANTES, M. *et al.* Analysis and Comparison of Fuzzy Models and Observers for DC-DC Converters Applied to a Distillation Column Heating Actuator. **Mathematical**

and Computational Applications, Basel, v. 25, n. 3, p. 55, 2020.

HSU, C. N.; TAIN, Y. L. Impact of arginine nutrition and metabolism during pregnancy on offspring outcomes. **Nutrients**, Suíça, v. 11, n. 7, p. 1–15, 2019.

HUANG, K. *et al.* Feasibility of a novel vermitechnology using vermicast as substrate for activated sludge disposal by two epigeic earthworm species. **Agricultural Sciences**, Irvine, v. 04, n. 10, p. 529–535, 2013.

HUIMIN, Z. *et al.* **Earthworm hemoglobin separation and purification method**. CN113087787A. Concessão: 2021.

IBAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da Pecuária Municipal 2019. **IBGE**, Rio de Janeiro, p. 1–12, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 12 abr. 2021.

IBRAHIM, D. **Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F Series**. Burlington: Elsevier Ltd, 2008.

INOSTROZA, M. *et al.* Human-Machine Interface Development for Industrial Processes. **2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2021**, Estados Unidos, p. 1–5, 2021.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília: IPEA, 2012.

ISHA, A. *et al.* Development of stabilization methods using a pilot scale anaerobic digester for seasonal variations in kitchen wastes for improved methane production with zero breakdowns. **Cleaner Engineering and Technology**, Reino Unido, v. 1, n. November, p. 100015, 2020.

ISHII, K. **Método de fabricação de pó de minhoca seca**. BR112013003567-6B1. Concessão: 2012.

JACOB, A. *et al.* Integrating product function design, production technology optimization and process equipment planning on the example of hybrid additive manufacturing. **Procedia**

CIRP, Amsterdam, v. 86, p. 222–227, 2020.

JANSSON, A. T. *et al.* Effect of organic compounds on dry anaerobic digestion of food and paper industry wastes. **Bioengineered**, Austin, v. 11, n. 1, p. 502–509, 2020.

JASKULAK, M. *et al.* Species-specific Cd-detoxification mechanisms in lumbricid earthworms *Eisenia andrei*, *Eisenia fetida* and their hybrids. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 208, p. 10, 2021.

JEENCHAY, J.; SIEMANOND, K. **Ammonia/Urea Production Process Simulation/Optimization with Techno-Economic Analysis**. Amsterdam: Elsevier B.V., 2018. v. 43

JIA, X. *et al.* Inoculating with the microbial agents to start up the aerobic composting of mushroom residue and wood chips at low temperature. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 10, 2021.

JIANG, T. *et al.* Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. **Journal of Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 23, n. 10, p. 1754–1760, 2011.

JIANG, M. *et al.* Microbiological purification of L-arabitol from xylitol mother liquor. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, Emirados Árabes Unidos, v. 21, n. 1, p. 43–49, 2011.

JIANQUI, Z. **Equipment and method for on-site biological digestion of kitchen garbage and earthworm production**. CN113828624A. Concessão: 2021.

JOHANNESSON, P.; PERJONS, E. **An introduction to design science**. Switzerland: Springer, 2014.

JOSÉ, Á. H. M. **Avaliação de método para a implantação de uma usina de compostagem na escola de Engenharia de Lorena - USP**. 2014. Monografia - Universidad de São Paulo, Lorena, 2014.

JÚNIOR, M.; ORRICO, A.; JÚNIOR, J. Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 386–394, 2010.

JÚNIOR, M.; ORRICO, A.; JÚNIOR, J. Potencial de produção de biogás remanescente nos efluentes de biodigestores abastecidos com dejetos de suínos, com e sem separação da fração

sólida, e conduzidos sob diferentes tempos de retenção hidráulica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 679–686, 2009.

KAFLE, G. K.; CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. **Waste Management**, New York, v. 48, p. 492–502, 2016.

KAFLE, G. K.; KIM, S. H.; SUNG, K. I. Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics. **Bioresource Technology**, Barking, v. 127, p. 326–336, 2013.

KALINCI, Y.; DINCER, I. Waste Energy Management. *In*: **COMPREHENSIVE ENERGY SYSTEMS**. Amsterdam: Elsevier Inc., 2018. v. 5, p. 91–133.

KATAOKA, T.; ORITA, Y.; SHIMOYAMA, Y. CO₂ absorption and desorption using phase-separation gel. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 428, n. June 2021, p. 13, 2022.

KAYA, K. *et al.* Waste-to-Energy Framework: An intelligent energy recycling management. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, USA, v. 30, n. January, p. 100548, 2021.

KEJIAN, D. **Earthworm breeding box**. CN113826586A. Concessão: 2021.

KENNEDY, N. *et al.* **Methods and apparatuses for removal od hydrogen sulfide and carbon dioxide from biogas**. WO 2014/150196 A1. Concessão: 2014.

KENNEDY, N. *et al.* The selective removal of H₂S over CO₂ from biogas in a bubble column using pretreated digester effluent. **Separation and Purification Technology**, Amsterdam, v. 144, p. 240–247, 2015.

KERAMATI, M.; BEIKI, H. The effect of pH adjustment together with different substrate to inoculum ratios on biogas production from sugar beet wastes in an anaerobic digester. **Journal of Energy Management and Technology (JEMT)**, Tehran, v. 1, n. 2, p. 6, 2017.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres Ltda., 1985.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: Maturação e qualidade do composto**. 6. ed. Piracicaba: Degaspari, 2012.

KIEHL, E. J. **Novos fertilizantes orgânicos**. 1. ed. Piracicaba: Edmar José Kiehl, 2010.

KITPHAITUN, S.; TAKESHITA, H.; NOMURA, K. Analysis of Ethylene Copolymers with

Long-Chain α -Olefins (1-Dodecene, 1-Tetradecene, 1-Hexadecene): A Transition between Main Chain Crystallization and Side Chain Crystallization. **ACS Omega**, Washington, v. 7, n. 8, p. 6900–6910, 2022.

KIYASUDEEN S, K. *et al.* Composting: A Traditional Practice of Waste Treatment. *In: PROSPECTS OF ORGANIC WASTE MANAGEMENT AND THE SIGNIFICANCE OF EARTHWORMS*. Switzerland: Springer International, 2016. p. 45–68.

KIYASUDEEN S, K. *et al.* Prospects of Organic Waste Management and the Significance of Earthworms. *In: PROSPECTS OF ORGANIC WASTE MANAGEMENT AND THE SIGNIFICANCE OF EARTHWORMS*. Switzerland: Springer International, 2016. p. 23–44.

KNOOP, C.; DORNACK, C.; RAAB, T. Nutrient and heavy metal accumulation in municipal organic waste from separate collection during anaerobic digestion in a two-stage laboratory biogas plant. **Bioresource Technology**, Barking, v. 239, p. 437–446, 2017.

KOSS, P. U. **Gas purification system having provisions for CO₂ injection of wash water**. US200902082977 A1. Concessão: 2009.

KOTANI, S. *et al.* Dietary supplementation of arachidonic and docosahexaenoic acids improves cognitive dysfunction. **Neuroscience Research**, Irlanda, v. 56, n. 2, p. 159–164, 2006.

KRANTZ, W. B. *et al.* Prototype commercial evapoporometer instrument. **Journal of Membrane Science**, Amsterdam, v. 655, n. February, p. 13, 2022.

LAHLOUH, I. *et al.* Experimental implementation of a new multi input multi output fuzzy-PID controller in a poultry house system. **Heliyon**, Londres, v. 6, p. 12, 2020.

LARSEN, R. W. **LabVIEW for Engineers**. Nova Jersey, USA: Pearson Education, 2011.

LAURENT, A. *et al.* Assessing the sustainability implications of research projects against the 17 UN sustainable development goals. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 90, p. 148–153, 2020.

LEE, K. S. *et al.* **Carbon dioxide adsorbent and method for separating out carbon dioxide by using same**. US 2021/0039040 A1. Concessão: 2021.

LEITE, V. D. *et al.* Codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. **Revista DAE**, São Paulo, v. 65, n. 208, p. 35–46, 2017.

- LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento Dos Sólidos Totais No Processo De Digestão Anaeróbia De Resíduos Sólidos Urbanos E Industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 229–232, 1999.
- LEME, S. M.; JOIA, P. R. Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos domiciliares em Aquidauana-MS. **Geografia**, Rio Claro, v. 15, n. 1, p. 35–49, 2006.
- LENT, C. S. **Learning to Program with MATLAB: Building GUI tools**. USA: WILEY, 2013.
- LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. **Trends in Biotechnology**, Amsterdam, v. 19, n. 9, p. 363–370, 2001.
- LEVERENZ, H. *et al.* Continuous thermal stripping process for ammonium removal from digestate and centrate. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 4, p. 11, 2021.
- LI, W. *et al.* Effect of excess activated sludge on vermicomposting of fruit and vegetable waste by using novel vermireactor. **Bioresource Technology**, Barking, v. 302, n. January, p. 122816, 2020.
- LI, C. *et al.* Purification and function of two analgesic and anti-inflammatory peptides from coelomic fluid of the earthworm, *Eisenia foetida*. **Peptides**, New York, v. 89, p. 71–81, 2017.
- LIMA, J. S.; DE QUEIROZ, J. E. G.; FREITAS, H. B. Effect of selected and non-selected urban waste compost on the initial growth of corn. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 42, n. 4, p. 309–315, 2004.
- LIMING, J. *et al.* **Application of earthworm protein peptide in preparation of medicine for preventing and treating thrombotic diseases**. CN114344443A. Concessão: 2022.
- LIMING, L.; GUOFU, L. **A special compound feed for freshwater fish and production equipment thereof**. CN114424801A. Concessão: 2022.
- LINDNER, J. *et al.* Effect of different pH-values on process parameters in two-phase anaerobic digestion of high-solid substrates. **Environmental Technology**, Londres, v. 36, n. 2, p. 198–207, 2015.
- LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. **IV Simócio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, Rio de Janeiro, p. 4, 2015.
- LIU, T. *et al.* L-Arginine based polyester amide/hyaluronic acid hybrid hydrogel with dual

anti-inflammation and antioxidant functions for accelerated wound healing. **Chinese Chemical Letters**, China, v. 33, n. 4, p. 1880–1884, 2022.

LIWU, M. **Earthworm three-dimensional breeding frame**. CN216147049U. Concessão: 2022.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BIUDES, E. P. Nitrogênio orgânico e químico na cultura da alface. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 16, n. 4, p. 71–79, 2020.

LOPES, P. C.; RANGEL, R. L.; MARTHA, L. F. An interactive user interface for a structural analysis software using computer graphics techniques in MATLAB. **Computer Applications in Engineering Education**, USA, p. 21, 2021.

LÓPEZ, D. B. **MATLAB con aplicaciones a la Ingeniería, Física y Finanzas**. 1. ed. México: Alfaomega, 2006.

LOUREIRO, D. C. *et al.* Compostagem e vermicompostagem de resíduos domiciliares com esterco bovino para a produção de insumo orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 7, p. 1043–1048, 2007.

LU, W. *et al.* Synthesis of Linear Alkylbenzenes over Beta Zeolites with Enhanced Transport and Surface Activity. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, USA, v. 60, n. 33, p. 12275–12281, 2021.

LV, B.; XING, M.; YANG, J. Speciation and transformation of heavy metals during vermicomposting of animal manure. **Bioresource Technology**, Barking, v. 209, p. 397–401, 2016.

MA, W. *et al.* Introducing a classification framework to urban waste policy : Analysis of sixteen zero-waste cities in China. **Waste Management**, New York, v. 165, n. September 2021, p. 94–107, 2023.

MACIAS-CORRAL, M. A. *et al.* Effect of different initial C/N ratio of cow manure and straw on microbial quality of compost. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, Isfahan, v. 8, p. 357–365, 2019.

MALINOWSKY, C. **Tratamento Dos Resíduos Sólidos Orgânicos Da Ufsc Através De Biodigestor Anaeróbio**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARTÍN-REYES, F. *et al.* Oleic acid regulates the circadian rhythm of adipose tissue in

obesity. **Pharmacological Research**, Suíça, v. 187, n. November 2022, 2023.

MCCRADY, S. G. **Designing SCADA application software**. 1. ed. USA: Elsevier Inc., 2013.

MECKFESSEL, M. H. 35043 A moisturizing cream with panthenol, glycerin, and niacinamide provides superior skin barrier recovery. **Journal of the American Academy of Dermatology**, USA, v. 87, n. 3, p. AB131, 2022.

MEHTA, B. R.; REDDY, Y. J. SCADA systems. *In: INDUSTRIAL PROCESS AUTOMATION SYSTEMS*. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. v. 1, p. 237–300.

MELO, Â. C. A. de; BARROS, M. V. F.; FERNANDES, F. Diagnóstico da gestão de resíduos sólidos urbanos no município de rolândia (PR). **Revista Geografia**, Londrina, v. 20, n. 2, p. 5–28, 2011.

MENDOZA, A. A. S. **Tecnologia alternativa para o monitoramento de poluentes gasosos**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, Paraná, 2016.

MENGQI, Z. *et al.* Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Berlin, p. 24, 2021.

MENNEN, J. H.; MEESEN, J. H. **Urea production plant**. US9732033-B2. Concessão: 2017.

MONNET, F. **An introduction to anaerobic digestion of organic waste Remade Scotland**. Scotland: Remade Scotland, 2003.

MONTEIRO, M. J. **Sistema logístico reverso para destinação final adequada de resíduos sólidos urbanos, sob a visão do pensamento sistêmico**. 2017. 230 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MORAN, S. **An Applied Guide to Process and Plant Design**. USA: Elsevier Inc., 2015.

MOREIRA, M. L. **Um caminho alternativo e dinâmico para o ensino das oligoquetas**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Pelotas, 2016.

MOREJON, C. F. *et al.* New model of municipal solid waste management. **International Journal Environemnt and Sustainable Development**, Reino Unido, v. 11, n. 3, p. 238–

248, 2012.

MOREJON, C. F.; FABRIS, S. C.; LOUFER, A. Desenvolvimento de uma correlação para identificação do potencial de geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos da atividade doméstica. **Interagir: pensando a extensão**, Rio de Janeiro, v. 0, n. 9, p. 149–158, 2006.

MUKHERJEE, M. *et al.* **Protein from the celomic fluid of an Indian earthworm that causes immotility os sperms**. US2004/0081955A1. Concessão: 2004.

MUÑOZ, R. *et al.* A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, Dordrecht, v. 14, n. 4, p. 727–759, 2015.

MURUGAN, S.; UMAMAHESWARI, S. Identification of Lysenin Protein Function in Coelomic Fluid Of Eudrilus Eugeniae. **European Journal of Molecular & Clinical Medicine**, Barking, v. 8, n. 03, p. 687–696, 2021.

NAÇÕES UNIDAS. **Articulando os Programas de Governo com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Orientações políticas e a cidadania**. Brasília: Nações Unidas Brasil, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/97142-articulando-os-programas-de-governo-com-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel-e-os>.

NANDA, K. *et al.* Design and Development of Portable Supervisory Unit and Programmable Automation Controller (PUSPAC). **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Kyoto, Japão, p. 6, 2021.

NAYAK, A. K.; VARMA, V. S.; KALAMDHAD, A. S. Effects of various C/N ratios during vermicomposting of sewage sludge using eisenia fetida. **Journal of Environmental Science and Technology**, Pakistan, v. 6, n. 2, p. 63–78, 2013.

NCBI. **1,3,5-Triazin-2(1H)-one, 4,6-bis((1-methylethyl)amino)-**. USA, 2023. Disponível em: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/4_6-bis_propan-2-ylamino_-1H-1_3_5-triazin-2-one. Acesso em: 11 abr. 2023.

NEELAMEGAM, P.; KUMARAVEL, S.; RAGHUNATHAN, R. Microcontroller based distributed monitoring system for fresh water fish aquaculture. **Instrumentation Science and Technology**, New York, v. 36, n. 5, p. 515–524, 2008.

NETO, R. O.; SOUZA, L. E. De; PETTER, C. O. Avaliação da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos no Brasil em comparação com países desenvolvidos. **Revista do Centro do**

- Ciências Naturais e Exatas - UFSM**, Santa Maria-RS, v. 13, n. 5, p. 3702–3712, 2014.
- NGHIEM, L. D. *et al.* **By-products of Anaerobic Treatment: Methane and Digestate From Manures and Cosubstrates**. Amsterdam: Elsevier B.V., 2017.
- NOORDMAN, W. *et al.* The enhancement by surfactants of hexadecane degradation by *Pseudomonas aeruginosa* varies with substrate availability. **Journal of Biotechnology**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 195–212, 2002.
- NUNES, W. A. G. de A.; JÚNIOR, S. A. de L.; GUIMARÃES, F. F. **Caracterização de Resíduos Orgânicos de Cadeias Produtivas da Agropecuária na Região Centro- Oeste do Brasil**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2017.
- OLIVEIRA, P. A. V. de. **Manual de manejo e utilização dos dejetos suínos**. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1993.
- OLIVEROS-MUÑOZ, J. M. *et al.* Luus-Jaakola method and ADM1 based optimization of hydrogen sulfide in anaerobic digestion of cow manure. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 171, n. April, p. 10, 2021.
- OLUGBEMIDE, A. D.; LIKOZAR, B. Assessment of liquid and solid digestates from anaerobic digestion of rice husk as potential biofertilizer and nutrient source for microalgae cultivation. **Processes**, Basel, v. 10, n. 5, p. 14, 2022.
- OLVERA, A. A. **Method of obtaining a concentrated humic extract from organic and inorganic sources**. WO03/052028A1. Concessão: 2003.
- OMS. **Dioxinas e seus efeitos na saúde humana**. Ginebra, 2016. Disponível em: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- ORELLANA, P. *et al.* Efectos neuroprotectores del ácido araquidónico y del ácido docosahexaenoico en las etapas extremas de la vida: Una visión integradora. **Revista Chilena de Nutrición**, Chile, v. 45, n. 1, p. 80–88, 2018.
- ORHAN, O. Y. *et al.* Ultrasound-assisted Desorption of CO₂ from Carbon Dioxide Binding Organic Liquids. **Energy Procedia**, Oxford, v. 114, p. 66–71, 2017.
- PAIVA, E. C. R. *et al.* Avaliação da compostagem de carcaças de frango pelos métodos da composteira e de leiras estáticas aeradas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 961–970, 2012.

- PALHAIS, C. **Prototipagem: Uma abordagem ao processo de desenvolvimento de um produto**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.
- PALMIERI, A. M. *et al.* Sistema automatizado para coleta de dados de umidade relativa e temperatura do ar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 636–648, 2014.
- PANDE, N. *et al.* Real Time Distributed Control of Variable Speed Drive System in Cyber Physical Framework. **IFAC-PapersOnLine**, Kidlington, v. 48, n. 30, p. 357–362, 2015.
- PANDIT, N.; AHMAD, N.; MAHESHWARI, K. Vermicomposting Biotechnology: An Eco-Loving Approach for Recycling of Solid Organic Wastes into Valuable Biofertilizers. **Journal of Biofertilizers & Biopesticides**, Sunnyvale, v. 03, n. 01, p. 1–8, 2012.
- PARK, H.; WANG, L. Determination of the concentration of MIBC in coking coal flotation. **Minerals Engineering**, Reino Unido, v. 127, n. July, p. 74–80, 2018.
- PEDROSA, D. *et al.* Monitoramento Dos Parâmetros Físico-Químicos Na Compostagem De Resíduos Agroindustriais. **Nativa, Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Sinop, v. 01, n. 01, p. 44–48, 2013.
- PEREIRA, U.; ALEIXO, N. Os resíduos sólidos urbanos como condicionante de doenças na cidade de Manaus – Am. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 9, n. 31, p. 32–53, 2018.
- PESCADOR, F. **Tratamento de esgoto doméstico em reatores sequenciais em batelada anaeróbios (RSBAn)**. 2001. 136 f. Dissertação (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- PESSUTO SILVA, J. *et al.* Comparação da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de diferentes tipos de lodo. **Scientia cum Industria**, Caxias do Sul, v. 4, n. 2, p. 69–73, 2016.
- PETERS, M.; TIMMERHAUS, K.; WEST, R. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5. ed. New York: McGRAW-HILL, 2003. v. 7
- PETKOV, P. H.; SLAVOV, T. N.; KRALEV, J. K. **Design of embedded robust control systems using MATLAB®/Simulink®**. Londres: The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- PETUKHOV, D. I. *et al.* Nanoporous polypropylene membrane contactors for CO₂ and H₂S capture using alkali absorbents. **Chemical Engineering Research and Design**, Rugby, v. 177, p. 448–460, 2022.
- PIEROBOM, F. M.; DE OLIVEIRA ANDRADE, J. J. Application of product development

tools in equipment design for a technology-based small business. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 27, n. 2, p. 20, 2020.

PLAVŠIN, I. *et al.* Inhibitory effect of earthworm coelomic fluid on growth of the plant parasitic fungus *Fusarium oxysporum*. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 78, p. 1–6, 2017.

POSSA, R. D. **Tecnologia alternativa para a purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2013.

PRAJAPATI, H.; DESHMUKH, N. N. Design and development of thin wire sensor for transient temperature measurement. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Londres, v. 140, p. 582–589, 2019.

PRAKASH, A.; SINGH, H. P. A cost effective universal data monitoring system. **2016 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization, ICRITO 2016: Trends and Future Directions**, Noida, Índia, p. 286–291, 2016.

PRATHIMA, A. *et al.* Environmental effect of lubricity additives through dielectric molecular parameters. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 33, p. 3658–3663, 2020.

PYLAEVA, I. S. *et al.* A new approach to identifying high-tech manufacturing SMEs with sustainable technological development: Empirical evidence. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 363, n. May, p. 132322, 2022.

QI, D.; TODO, H.; SUGIBAYASHI, K. Purification of isopropyl fatty acids markedly changed the skin permeation of a model hydrophilic chemical. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, França, v. 39, p. 423–427, 2017.

QIONG, G.; DIANYOU, Y.; WANYING, W. **Compound feed for broiler chicken in later period**. CN114304425A. Concessão: 2022.

QUEIROZ, F. **Avaliação do aproveitamento de resíduos vegetais por meio da compostagem em leiras revolvidas. Estudo de caso de Londrina**. 2007. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

QUINTERO-POLANCO, J. D.; BETANCOURT, F. R.; MOLINA-MOSQUERA, J. Control of dissolved oxygen in water for intensive tilapia culture using IoT. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, Islamabad, v. 13, n. 24, p. 9509–9516, 2018.

- RAJENDRAN, K. *et al.* A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. **Bioresource Technology**, Barking, v. 168, p. 7–13, 2014.
- RAMÍREZ, M. *et al.* Estabilización anaerobia mesofílica y termofílica de lodos activados provenientes de la industria cervecera. mesophilic and termophilic anaerobic stabilization of activated sludges from brewing industry. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, Bogotá, v. 20, n. 1, p. 5–21, 2010.
- RAMOS, S. I. P. **Sistematização técnico-organizacional de programas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos em municípios do estado do Paraná**. 2004. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- RAMOS, R. F. *et al.* Vermicomposting of cow manure: Effect of time on earthworm biomass and chemical, physical, and biological properties of vermicompost. **Bioresource Technology**, Barking, v. 345, n. October 2021, p. 8, 2022.
- RASE, H. F.; BARROW, M. H. **Ingeniería de Proyecto para Plantas de Procesos**. 2da. ed. México, D.F.: Compañía Editorial Continental, S.A., 1975.
- RASHID, M. **Microelectronic Circuits: Analysis and Design**. 2. ed. USA: Cengage Learning, 2011.
- RAVEENDRA, P.; REDDY, V. S.; SUBBAIAH, G. V. Vision based weed recognition using LabVIEW environment for agricultural applications. **Materials Today: Proceedings**, Cambridge, v. 23, p. 483–489, 2020.
- RAVIKUMAR, Y. *et al.* Microbial hosts for production of D-arabitol: Current state-of-art and future prospects. **Trends in Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 120, n. April 2021, p. 100–110, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.029>.
- REANSUWAN, K. *et al.* Cost effective in-situ methane enrichment for chicken farm biogas system. **Bioresource Technology Reports**, Amsterdam, v. 15, n. April, p. 7, 2021.
- REBOUÇAS. **Plano municipal de gestão integrada dos resíduos sólidos - PMGIRS - Diagnostico da situação atual dos serviços**. Rebouças: Prefeitura Municipal de Rebouças, 2016.
- REGATTIERI, A. *et al.* Biogas micro-production from human organic waste-A research proposal. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 2, 2018.
- REGINATO, G. de S. *et al.* Differential benefits of physical training associated or not with

L-arginine supplementation in rats with metabolic syndrome: Evaluation of cardiovascular, autonomic and metabolic parameters. **Physiology and Behavior**, Suíça, v. 268, n. May, 2023.

REINERT, M. C. **Process for removing hydrogen sulphide gas (H₂S) from gaseous compounds**. WO2018/132884 A1. Concessão: 2018.

REYES, C. **Microcontroladores PIC programación en Basic**. 2. ed. Quito, Equador: RISPGRAF, 2006.

RICCI, M. D. S. F. **Manual de Vermicompostagem**. Rondônia: Embrapa, 1996.

ROBINSON, A. *et al.* Chemicals with increasingly complex modes of action result in greater variation in sensitivity between earthworm species. **Environmental Pollution**, Barking, v. 272, p. 11, 2021.

ROCHA, C. Z. **Organic powdered fertilizer based on 50% of sweet water diatomaceous soil minerals and 50% of organic material denominated vermicompost or California red earthworm humus**. MX2017000465A. Concessão: 2018.

RODRIGUES, A. **Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica**. 2005. 151 f. Dissertação (Mestrado em gestão ambiental) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

RODRIGUES, E. *et al.* Inovação tecnológica em produtos e processos: Estudo de caso em empresa de automação industrial. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 9, 2016.

RUANGJANDA, S. *et al.* Valorization of spent mushroom substrate in combination with agro-residues to improve the nutrient and phytohormone contents of vermicompost. **Environmental Research**, New York, v. 214, p. 8, 2022.

RUIZ-AYALA, D. C.; VIDES-HERRERA, C. A.; PARDO-GARCÍA, A. Monitoreo de variables meteorológicas a través de un sistema inalámbrico de adquisición de datos. **Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación**, Duitama, v. 8, n. 2, p. 333–341, 2018.

SALSA, N. S. *et al.* Caracterização física de resíduos sólidos domiciliares em diferentes formas de habitação. **Revista DAE**, São Paulo, v. 66, n. 212, p. 105–117, 2018.

SÁNCHEZ, M. del P.; CRUZ, J. G.; MALDONADO, P. C. Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. **Revista Finanzas y Política Económica**, Bogotá, v. 11, n. 2, p. 321–336, 2019.

SÁNCHEZ, Ó. J.; OSPINA, D. A.; MONTOYA, S. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. **Waste Management**, New York, v. 69, n. 26, p. 136–153, 2017.

SANTOS, D. F. dos; GUIMARÃES, W. F. F.; GONÇALVES, C. U. Biodigestores como alternativa à sustentabilidade ambiental no campo brasileiro: um balanço bibliográfico acerca dos modelos Indiano, Chinês e Batelada. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 15, p. 35, 2017.

SÃO PAULO. **Plano de gestão integrada de resíduos sólidos da cidade de São Paulo**. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>.

SASIDHARAN, S.; SRIVASTAVA, G. D.; KULKARNI, R. D. Design and Simulation of Microcontroller Based Power Electronic Converter for Nuclear Research Application. **2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing, IC4 2018**, Thiruvananthapuram, India, p. 95–100, 2018.

SCANO, E. A. *et al.* Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 77, p. 22–30, 2014.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond**. Genebra, 2016. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/> 1/16. Acesso em: 11 jul. 2022.

SCOPUS. **Analyze search results: Anaerobic Digester**. Amsterdam: Elsevier B.V., 2021.

SCOPUS. **Analyze search results: Composting**. Amsterdam: Elsevier B.V., 2021.

SCOPUS. **Analyze search results: vermicomposting**. Amsterdam: Elsevier B.V., 2021.

SEAB - SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Versão preliminar do levantamento da produção rural paranaense por município**. Paraná: SEAB, 2022.

SEADI, T. *et al.* **Biogas Handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

SEDIYAMA, M. A. N. *et al.* Fermentação de esterco de suínos para uso como adubo

orgânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 638–644, 2008.

SENABRE, C. *et al.* **Diseño mecánico con : Autodesk Inventor paso a paso**. 1. ed. Alicante: ECU, 2010. *E-book*. Disponível em: www.gamma.fm.

SENTHILKUMAR, E.; PAMELA, D. Remote Temperature Monitoring and Recording Using Bluetooth Wireless Technology. **International Journal of Engineering Research & Technology**, Ahmedabad, v. 2, n. 11, p. 2875–2880, 2013.

SHARMA, R. *et al.* Formulation and optimization of aceclofenac loaded hyaluronic-oleic acid based micellar gel for the management of osteoarthritis. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, França, v. 84, n. January, p. 104560, 2023.

SHARMA, P. *et al.* Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. **Bioresource Technology**, Oxford, v. 325, n. January, p. 124684, 2021.

SHEN, Y. *et al.* Effect of aeration rate, moisture content and composting period on availability of copper and lead during pig manure composting. **Waste Management and Research**, Londres, v. 34, n. 6, p. 578–583, 2016.

SHI, H. *et al.* The CO₂ desorption analysis of tri-solvent MEA+BEA+DEEA with several commercial solid acid catalysts. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, Amsterdam, v. 116, n. March, p. 12, 2022.

SHIJUAN, Y.; SHIXIN, Y. **Earthworm breeding box with humidity adjusting function**. CN216292677U. Concessão: 2022.

SHWETHA, N. *et al.* Efficient Usage of water for smart irrigation system using Arduino and Proteus design tool. **Proceedings - 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication, ICOSEC 2021**, Trichy, Índia, p. 54–61, 2021.

SILVA, A. S. **Avaliação do processo de compostagem com diferentes proporções de resíduos de limpeza urbana e restos de alimentos**. 2016. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SILVA, N. C. da. **Desidratação de resíduos do processamento de maracujá-amarelo por diferentes metodologias**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

SINGH, R. *et al.* **Arduino-Based Embedded Systems: Interfacing, Simulation, and Labview GUI**. Boca Raton, USA.: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.

SINGH, N. B. *et al.* Effect of initial substrate pH on vermicomposting using *Perionyx excavatus* (Perrier, 1872). **Applied Ecology and Environmental Research**, Budapest, v. 4, n. 1, p. 85–97, 2005.

SINGH, R. P. *et al.* Management of urban solid waste: Vermicomposting a sustainable option. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 55, n. 7, p. 719–729, 2011.

SINGH, W. R.; KALAMDHAD, A. S. Transformation of nutrients and heavy metals during vermicomposting of the invasive green weed *Salvinia natans* using *Eisenia fetida*. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, Isfahan, v. 5, n. 3, p. 205–220, 2016.

SINGH, R.; KIM, J.; JIANG, X. Heat inactivation of *Salmonella* spp. in fresh poultry compost by simulating early phase of composting process. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, v. 112, n. 5, p. 927–935, 2012.

SINHA, R. K. *et al.* Vermiculture and waste management: Study of action of earthworms *Elsinia foetida*, *Eudrilus euginae* and *Perionyx excavatus* on biodegradation of some community wastes in India and Australia. **Environmentalist**, Lausanne, v. 22, n. 3, p. 261–268, 2002.

SINNOTT, R.; TOWLER, G. **Chemical Engineering Design**. 6. ed. USA: Elsevier B.H., 2020.

SLOPIECKA, K. *et al.* Chemical and physical characterization of food waste to improve its use in anaerobic digestion plants. **Energy Nexus**, Londres, v. 5, n. January, p. 1–13, 2022.

SMITH, R. **Chemical Process Design and Integration**. Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

SOARES, E. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

SOBRINHO, A. S. . . *et al.* Response identification of air flow sensors using fuzzy system for embedded electronics. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Londres, v. 151, p. 1–15, 2020.

- SÖDERGREN, J. *et al.* Food waste to new food: Risk assessment and microbial community analysis of anaerobic digestate as a nutrient source in hydroponic production of vegetables. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 333, n. October 2021, p. 1–9, 2022.
- SOUSA, C. *et al.* Rede de sensores sem fio aplicada a irrigação agrícola. **Jornada de iniciação científica e extensão - Instituto Federal de Tocantins**, Palmas, p. 1–9, 2017.
- SOUZA, G. C.; GUADAGNIN, M. R. **Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos domiciliares: o método de quarteamento na definição da composição gravimétrica em Cocal do Sul-SC**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2009.
- STANKOV, S. P. Savremen način upravljanja procesom proizvodnje mineralne vune. **Hemijska Industrija**, Beograd, v. 67, n. 2, p. 375–384, 2013.
- SUBERO, A. **Programming PIC Microcontrollers with XC8**. Moruga, Trinidad e Tobago: APRESS, 2018.
- SULEIMAN, H. *et al.* Determination of the performance of vermicomposting process applied to sewage sludge by monitoring of the compost quality and immune responses in three earthworm species: *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* and *Dendrobaena veneta*. **Bioresource Technology**, Barking, v. 241, p. 103–112, 2017.
- SUNDARARAJAN, R. *et al.* Automatic Temperature Control of Electric Motor Using PIC Microcontroller. **2022 IEEE Delhi Section Conference, DELCON 2022**, New Delhi, India, p. 1–6, 2022.
- SUS, B. B. *et al.* Simulation of remote-controlled power supplies for laboratory and research work. **2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2021 - Proceedings**, Lviv, Ucrânia, p. 1–5, 2021.
- SUTHAR, S. Vermicomposting of vegetable-market solid waste using *Eisenia fetida*: Impact of bulking material on earthworm growth and decomposition rate. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 35, n. 5, p. 914–920, 2009.
- SUTHERLAND, D. L. *et al.* How microalgal biotechnology can assist with the UN Sustainable Development Goals for natural resource management. **Current Research in Environmental Sustainability**, Amsterdam, v. 3, p. 100050, 2021.
- SWATI, A.; HAIT, S. Fate and bioavailability of heavy metals during vermicomposting of various organic wastes—A review. **Process Safety and Environmental Protection**, Rugby, v. 109, p. 30–45, 2017.

SWIDERSKA, B. *et al.* Lysenin family proteins in earthworm coelomocytes – Comparative approach. **Developmental and Comparative Immunology**, New York, v. 67, p. 404–412, 2017.

TABLAS, M. C. **Processo de obtenção de farinha de minhoca para complementação alimentar humana**. MU7900807-0U. Concessão: 2001.

TALLIMA, H.; EL RIDI, R. Arachidonic acid: Physiological roles and potential health benefits – A review. **Journal of Advanced Research**, Egito, v. 11, p. 33–41, 2018.

TAVARES, R. C. **Composição gravimétrica: Uma ferramenta de planejamento e gerenciamento do resíduo urbano de Curitiba e região metropolitana**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia do Paraná, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2007.

TEDESCO, D. E. A. *et al.* Bioconversion of fruit and vegetable waste into earthworms as a new protein source: The environmental impact of earthworm meal production. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 683, p. 690–698, 2019.

TESSARINI, G.; SALTORATO, P. Impactos da indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Produção Online**, Brasil, v. 18, n. 2, p. 743–769, 2018.

THE WORLD BANK. **Tendências na gestão de Resíduos Sólidos**. Washington, 2022. Disponível em: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html. Acesso em: 15 abr. 2023.

THIRUNAVUKKARASU, A. *et al.* A business canvas model on vermicomposting process: Key insights onto technological and economical aspects. **Bioresource Technology Reports**, Amsterdam, v. 18, n. May, p. 101119, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101119>.

TICKOO, S. **Autodesk Inventor 2016 for Designers**. 16. ed. Indiana, USA: CADCIM Technologies, 2015.

TOLEDO. **Plano municipal de coleta seletiva**. Toledo: Prefeitura Municipal de Toledo/PR, 2015.

TOLEDO. **Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos de Toledo-PR**. Toledo: Prefeitura do Município de Toledo, 2011.

TPE DESIGN ENGINEERING. **Diseño de Procesos**. Gauteng, 2021. Disponível em: <https://www.tpede.co.za/old-copies/process-design>. Acesso em: 25 set. 2021.

TRIPATHI, G.; BHARDWAJ, P. Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg). **Bioresource Technology**, Barking, v. 92, n. 3, p. 275–283, 2004.

TROVÒ, A. Battery management system for industrial-scale vanadium redox flow batteries: Features and operation. **Journal of Power Sources**, Lausanne, v. 465, p. 12, 2020.

TUPAC-YUPANQUI, M. *et al.* Exploiting Arduino Features to Develop Programming Competencies. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 20602–20615, 2022.

UDEZE, C. C. *et al.* Reactor full automation in temperature system. **IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology, ICAST**, Accra, Ghana, p. 8, 2018.

ULUS, N.; YUKSEL ORHAN, O. Reduced energy consumption and enhanced CO₂ desorption performance of non-aqueous ionic-liquid-containing amine blends with zeolites. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 359, p. 13, 2022.

ÜNAL, İ. *et al.* Design and development of the PLC based sensor and instrumentation system for self-propelled pruning residue mulcher prototype. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 186, n. December 2020, 2021.

VAISH, B. *et al.* Explicating the fertilizer potential of anaerobic digestate: Effect on soil nutrient profile and growth of *Solanum melongena* L. **Environmental Technology and Innovation**, Amsterdam, v. 27, p. 1–13, 2022.

VAMBE, M. *et al.* Potential role of vermicompost and its extracts in alleviating climatic impacts on crop production. **Journal of Agriculture and Food Research**, Amsterdam, v. 12, n. December 2022, p. 100585, 2023.

VAN TRAN, G. *et al.* Simultaneous carbon dioxide reduction and methane generation in biogas for rural household use via anaerobic digestion of wetland grass with cow dung. **Fuel**, Londres, v. 317, n. December 2021, p. 123487, 2022.

VARNERO, M. T.; ARELLANO, J. **Aprovechamiento racional de desechos orgánicos**. Santia: FIA, 1990.

VINDIS, P. *et al.* The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**,

Poland, v. 36, n. 2, p. 192–198, 2009.

VIONE, E. L. B. *et al.* Caracterização química de compostos e vermicompostos produzidos com casca de arroz e dejetos animais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 65, n. 1, p. 65–73, 2018.

WANG, Q. *et al.* Arachidonic Acid Promotes Intestinal Regeneration by Activating WNT Signaling. **Stem Cell Reports**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 374–388, 2020.

WANG, Q. *et al.* Design and simulation for temperature measurement and control system based on PT100. **Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2019**, Chengdu, China, p. 2301–2304, 2019.

WANG, Y. *et al.* Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 193, p. 200–205, 2015.

WANG, Y. *et al.* Speciation of heavy metals and bacteria in cow dung after vermicomposting by the earthworm, *Eisenia fetida*. **Bioresource Technology**, Barking, v. 245, n. August, p. 411–418, 2017.

WANG, N. *et al.* Variations in bacterial taxonomic profiles and potential functions in response to the gut transit of earthworms (*Eisenia fetida*) feeding on cow manure. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 787, p. 10, 2021.

WANG, W.; DI MAIO, F.; ZIO, E. Hybrid fuzzy-PID control of a nuclear Cyber-Physical System working under varying environmental conditions. **Nuclear Engineering and Design**, Amsterdam, v. 331, n. March, p. 54–67, 2018.

WARE, A.; POWER, N. Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. **Renewable Energy**, Oxford, v. 97, p. 541–549, 2016.

WEI, L. *et al.* Comprehensive aging assessment of pitch systems combining SCADA and failure data. **IET Renewable Power Generation**, Hoboken, v. 16, n. 1, p. 198–210, 2022.

WILMSHURST, T. **Designing embedded system with PIC microcontrollers: Principles and Applications**. 1. ed. Grã-Bretanha: Elsevier Ltd, 2007. v. 1999

WU, R. *et al.* Microbiological inoculation with and without biochar reduces the bioavailability of heavy metals by microbial correlation in pig manure composting. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, USA, v. 248, n. July, p. 114294, 2022.

XIAOHUI, L. *et al.* **Selenium-rich earthworm protein composition for promoting fracture healing and preparation method thereof.** CN114028535A. Concessão: 2022.

YANG, Zhendong *et al.* Optimizing SCND with carbon-rich hydrolysates from typical organic wastes: Material composition, augmentation performance, microbiome response, and life cycle impact. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 340, n. April, p. 117966, 2023.

YIM, J. H. *et al.* Liquid-Liquid Equilibrium Measurements for the Ternary System of Water/2,3-Butanediol/4-Methyl-2-pentanol at Various Temperatures. **Journal of Chemical and Engineering Data**, USA, v. 64, n. 9, p. 3882–3888, 2019.

YING, L. *et al.* **Method for improving growth vitality of field crops in early and middle growth periods.** CN114287300A. Concessão: 2022.

YONG, W. *et al.* **Earthworm powder processing system.** CN114130509A. Concessão: 2022.

YONG, Z. **Tea flower and earthworm protein cream for cancer prevention and adjuvant therapy.** CN113456762A. Concessão: 2021.

YONGZHEN, R. *et al.* **Drawing type earthworm breeding box.** CN215684311U. Concessão: 2022.

YONGZHEN, Z. *et al.* **Pig and cattle manure mixing treatment equipment for earthworm breeding.** CN215819684U. Concessão: 2022.

ZACHAROF, M. P. *et al.* Nutrient recovery and fractionation of anaerobic digester effluents employing pilot scale membrane technology. **Journal of Water Process Engineering**, Amsterdam, v. 31, p. 10, 2019.

ZAKARYA, I. A.; KHALIB, S. N. B.; MOHD RAMZI, N. Effect of pH, temperature and moisture content during composting of rice straw burning at different temperature with food waste and effective microorganisms. **E3S Web of Conferences**, Essonne, v. 34, p. 4–11, 2018.

ZANG, Y. T. *et al.* Effects of Dietary Supplementation With Earthworm Powder on Production Performance, Blood Characteristics, and Heavy Metal Residues of Broiler Pullets. **Journal of Applied Poultry Research**, Athens, GA, v. 27, n. 4, p. 609–615, 2018.

ZHANG, X. *et al.* Amine-based CO₂ capture aided by acid-basic bifunctional catalyst:

Advancement of amine regeneration using metal modified MCM-41. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 383, p. 12, 2020.

ZHANG, Y. *et al.* Carbon dioxide sequestration and methane production promotion by wollastonite in sludge anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, Barking, v. 272, p. 194–201, 2019.

ZHANG, D. *et al.* Earthworm epidermal mucus: Rheological behavior reveals drag-reducing characteristics in soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 57–66, 2016.

ZHANG, T. *et al.* Effects of microorganism-mediated inoculants on humification processes and phosphorus dynamics during the aerobic composting of swine manure. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 416, n. November 2020, p. 0–2, 2021.

ZHANG, L.; LEE, Y. W.; JAHNG, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. **Bioresource Technology**, Barking, v. 102, n. 8, p. 5048–5059, 2011.

ZHANG, C.; SU, H.; TAN, T. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system. **Bioresource Technology**, Barking, v. 145, p. 10–16, 2013.

ZHAO, Y.; CHEN, F.; WANG, Y. Demulsification of peanut emulsion by aqueous enzymatic extraction using a combination of oleic and citric acids. **Lwt**, USA, v. 180, n. 100, p. 114658, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114658>.

ZHIGANG, F. **Processing and utilizing system for biological desulfurization by products**. Concessão: 2021.

ZHIWU, L.; XIAOWEN, Z.; YUFEI, H. **CO₂-enriched amine solution regeneration energy consumption reducing novel catalytic desorber**. CN109351125A. Concessão: 2019.

ZHOU, L. *et al.* Automatic fine-grained access control in SCADA by machine learning. **Future Generation Computer Systems**, Amsterdam, v. 93, p. 548–559, 2019.

ZHOU, B. *et al.* Earthworm biomass and population structure are negatively associated with changes in organic residue nitrogen concentration during vermicomposting. **Pedosphere**, Beijing, v. 31, n. 3, p. 433–439, 2021.

ZHOU, Y. *et al.* Evaluation of temperature on the biological activities and fertility potential during vermicomposting of pig manure employing *Eisenia fetida*. **Journal of Cleaner**

Production, Oxford, v. 302, p. 1–10, 2021.

ZOHOROVIC, M. *et al.* Defining key parameters to control the anaerobic digestion of organic matter. **4th International Symposium on Environmental Management**, Zagreb, n. December, p. 7–9, 2016.