



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –
CAMPUS GOIÂNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLÓGICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS
SUSTENTÁVEIS

LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIODIGESTÃO
AERÓBIA: O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO EM CONSONÂNCIA COM A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

GOIÂNIA-GO

2021

LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA A
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIODIGESTÃO
AERÓBIA: O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO EM CONSONÂNCIA COM A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação Profissional e Tecnológica do Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis.

Área de Concentração: Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá.
Coorientadora: Profa. Dra. Elisângela Cardoso de Lima Borges.

GOIÂNIA

2021

M838r Moreira, Luciana Lopes Kuramoto.

Reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos para a geração de energia elétrica a partir da biodigestão aeróbia: o processo de urbanização em consonância com a eficiência energética / Luciana Lopes Kuramoto Moreira. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

103f.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá.

Coorientadora: Profa. Dra. Elisângela Cardoso de Lima Borges.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Tratamento de resíduos sólidos. 2. Biodigestão aeróbia. 3. Eficiência energética. I. Sá, Fernando Pereira (orientador). II. Borges, Elisângela Cardoso de Lima (coorientadora). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica:

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: | |

Nome Completo do(a) Autor(a): **LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA**

Matrícula: **20182011140100**

Título do Trabalho: **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIODIGESTÃO AERÓBIA: O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO EM CONSONÂNCIA COM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:

Não

Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 02/12/2021

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 07 de dezembro 2021.

(Assinado eletronicamente)

LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA

Documento assinado eletronicamente por:

■ **Luciana Lopes Kuramoto Moreira, LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA - ESTUDANTE - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225)**, em 07/12/2021 12:19:04.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/12/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 226673

Código de Autenticação: 0801e0dd20



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 22/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA
BIODIGESTÃO AERÓBIA: O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO EM CONSONÂNCIA COM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Aprovada em: 02/12/2021

Orientador e Presidente: Prof. Dr. FERNANDO PEREIRA DE SÁ – PPGTPS IFG

Coorientadora: Profa. Dra. ELISANGELA C. DE LIMA BORGES – IFG Câmpus Inhumas

Avaliador: Prof. Dr. FERNANDO SCHIMIDT – PPGTPS IFG

Avaliadora: Profa. Dra. INDIANARA C. OSTROSKI – UFG – Instituto de Química

Suplente: Prof. Dr. DAYWES PINHEIRO NETO – PPGTPS IFG

Documento assinado eletronicamente por:

- **Indianara Conceição Ostroski**, INDIANARA CONCEIÇÃO OSTROSKI - DOCENTE - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 09/12/2021 09:59:12.
- **Fernando Schmidt**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/12/2021 14:11:44.
- **Elisangela Cardoso de Lima Borges**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/12/2021 12:19:32.
- **Fernando Pereira de Sa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/12/2021 09:41:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 189294

Código de Autenticação: 47112029c0



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

AGRADECIMENTOS

Essa dissertação de mestrado é fruto não apenas de um esforço pessoal, mas, também, do apoio de diversas pessoas que participaram direta ou indiretamente, me dando incentivo intelectual e emocional, em um dos momentos mais difíceis por mim vividos. Sendo assim, registro aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

Aos professores Dr. Fernando Pereira de Sá e Dra. Elisângela Cardoso de Lima Borges, orientadores competentes, pela orientação inegavelmente paciente, eficiente e segura, pelos valiosos ensinamentos e estímulos dados, pela dedicação e, acima de tudo, por acreditarem desde o início no sucesso deste projeto.

A todos os professores do Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, por compartilharem seus tão ricos conhecimentos, pelo interesse e esforços em prol da pesquisa e do crescimento acadêmico da instituição, em especial ao Professor Dr. Fernando Schimidt, integrante desta banca examinadora, e à Professora Dra. Regina Célia Bueno da Fonseca, que muito me auxiliaram no momento delicado que foi a minha gestação, durante o mestrado.

Aos professores Dra. Indianara C. Ostroski e Dr. Daywes Pinheiro Neto, por se disporem a participar desta banca, dedicando seu precioso tempo para contribuírem com o enriquecimento e validação desta pesquisa.

Aos coordenadores e funcionários do Mestrado do Instituto Federal de Goiás, Campus Goiânia, ao apoio sempre concedido frente a tantas dificuldades vivenciadas durante essa caminhada.

Aos colegas Marcos Aurélio e Lara Lysse, por compartilharem das pesquisas práticas em laboratório, dos conhecimentos e das dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa, sempre tão solícitos e atenciosos.

Aos meus pais, que me trouxeram à vida e sempre me apoiaram nos meus desejos infindáveis de contribuir de alguma forma para um mundo melhor.

Ao meu marido e meus filhos, pela paciência e compreensão pela minha ausência, em muitos momentos em que precisei me dedicar obstinadamente à pesquisa.

A Deus, minha fonte inesgotável de sabedoria e coragem, de onde vem a minha força para ter chegado até aqui; no qual continuarei buscando estímulos para não desistir... nunca.

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem, ou que seus planos nunca vão dar certo, ou que você nunca vai ser alguém (...). Se você quiser alguém em quem confiar, confie em si mesmo. Quem acredita, sempre alcança!”

Renato Russo

RESUMO

Tendo em vista a indiscutível necessidade de redução da disposição de resíduos sólidos no meio ambiente e do grande potencial energético advindo do tratamento destes, em um país continental como o Brasil, o uso destes rejeitos é uma opção extremamente interessante para a produção de energia renovável. A partir disso, o objetivo deste trabalho é apresentar um processo de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos orgânicos, tendo em vista que o processo de urbanização, além de gerar uma quantidade expressiva de resíduos, também exige a potencialização do sistema energético. Para tanto, foi realizado e analisado o processo de biodigestão aeróbia a partir de resíduos sólidos orgânicos no Instituto Federal de Goiás – Câmpus Inhumas – e desenvolvido um sistema para sua conversão de energia térmica em elétrica, utilizando-se de um protótipo em escala laboratorial de motor Stirling. Os resultados mostraram que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, uma vez que foi possível realizar a biodigestão dos resíduos de alimentos de forma adequada, segura e com um bom produto final. O biocomposto atingiu o resultado organoléptico esperado, chegando ao final do processo de biodigestão aeróbia com uma média de 14 dias de monitoramento, confirmando uma otimização considerável do processo em relação à compostagem, que leva, em média 120 dias para ser concluída. Foram atingidos bons níveis de poder calorífico inferior (PCI), 14,5 MJ/Kg, confirmando a expectativa inicial para a geração de energia térmica. Além disso, a utilização do motor Stirling confirmou a possibilidade de geração de energia elétrica a partir de pellets biodigeridos aerobiamente, com o acionamento de uma lâmpada, alcançando uma voltagem de 4,35 V.

Palavras-chave: biodigestão aeróbia; urbanização; sustentabilidade; resíduos sólidos; eficiência energética; motor Stirling.

ABSTRACT

Given the indisputable need to reduce the disposal of solid waste in the environment and the great energy potential arising from their treatment, in a continental country such as Brazil, the use of this waste is an extremely interesting option for the production of renewable energy. From this, the objective of this work is to present a process of electric power generation from organic urban solid waste, considering that the urbanization process, besides generating a significant amount of waste, also requires the potentialization of the energy system. To this end, the process of aerobic biodigestion from organic solid waste is being carried out and analyzed at the Federal Institute of Goiás – Inhumas Campus – and a system for its conversion of thermal energy into electrical energy is being developed, using a laboratory-scale prototype engine. The partial results show that part of the objectives proposed in this work was achieved, since it was possible to carry out the biodigestion of food residues in an adequate, safe way and with a good final product. The biocompost reached the expected organoleptic result, reaching the end of the aerobic biodigestion process with an average of 14 days of monitoring, confirming a considerable optimization of the process in relation to composting, which takes an average of 120 days to complete. Good levels of lower calorific value (PCI) were also achieved, 14,5 MJ/Kg, confirming the initial expectation for the generation of thermal energy. Furthermore, the use of Stirling motor confirmed the possibility of generating electrical energy from aerobically biodigested pellets, with the activation of a lamp, reaching a voltage of 4,35 V.

Keywords: aerobic biodigestion; urbanization; sustainability; solid waste; energy efficiency; Stirling motor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição Final de RSU, por Tipo de Destinação (Toneladas/Dia)	19
Figura 2 - Consumo Final de Energia por Fonte (Participação).....	21
Figura 3 - Gravimetria dos Resíduos Coletados.....	26
Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira em 2020.....	34
Figura 5 - Participação de Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira.....	35
Figura 6 - Participação dos renováveis na Matriz Elétrica Brasileira de 2011 até 2020.....	35
Figura 7 - Matriz Elétrica Brasileira em 2029.....	41
Figura 8 - Matriz Energética Prevista para 2029.....	42
Figura 9- Consumo final de energia por setor	42
Figura 10 - Processo de fabricação dos pellets.....	54
Figura 11 - Motor Stirling configuração Alfa	61
Figura 12 – Desenho em Corte de Motores Stirling de Tipo Gama.....	61
Figura 13 – Desenho em Corte de Motores Stirling de Tipo Beta	62
Figura 14- Lixeira Utilizada na Coleta de Amostras para o Projeto	64
Figura 15 - Biodigestor Aeróbio Utilizado no Projeto	66
Figura 16 - Resíduo Orgânico “ <i>In Natura</i> ” Triturado	66
Figura 17 - Adição de Serragem ao Resíduo Orgânico Alimentício Triturado.....	66
Figura 18 - Resíduo Orgânico Alimentício Biodigerido	72
Figura 19 - Compactação do Composto, Juntamente com os Aditivos Propostos, para Formação dos Pellets	72
Figura 20- Motor Stirling tipo Gama utilizado no Projeto.	76
Figura 21 - Pellet Compactado	77
Figura 22 - Resíduo Biodigerido	77
Figura 23- Espectro de Absorção na Região do Infravermelho para os Compostos Biodigeridos	79
Figura 24 – Curvas de TG e DTA para os Compostos Biodigeridos	81
Figura 25- Lâmpada de LED sendo acionada por motor/gerador Stirling tipo gama utilizado no projeto.....	85
Figura 26- Tensão elétrica atingida entre os terminais do gerador.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia.	17
Quadro 2 – Características Físico-Químicas do Lixo da Cidade de São Paulo.....	37
Quadro 3 – Exemplo básico de cada categoria de resíduos sólidos urbanos.....	38
Quadro 4 – Padrões de Qualidade na Produção de Pellets na Alemanha.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução dos Indicadores.....	22
Tabela 2 - Oferta Interna 2018/2017	22
Tabela 3 - Poder Calorífico Inferior (PCI) de Alguns Resíduos Sólidos Urbanos.....	39
Tabela 4 - Detalhamento dos Resíduos Orgânicos de Alimentos Utilizados	64
Tabela 5 - Resultados de PCS e PCI das Amostras de RSOBA.....	77
Tabela 6 - Resultados de PCI de Diversos Materiais	77
Tabela 7 - Estimativa do Potencial Energético dos Resíduos Domiciliares no Brasil	78
Tabela 8 - Análise Química Elementar Obtida por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado	83

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BEM	Biomassa Energia Materiais
CEMPRE	Compromisso Empresarial Para Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DrX	Difração de raios X
DTA	Termogravimetria derivada
ETA	Estação de Tratamento de Água
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FT-IR	Espectrofotometria infravermelho
GDL	Gás do lixo
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP/OES	Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente)
IPCC/UN	Intergovernmental Panel on Climate Change by United Nations (Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas)
LDRS	Locais de disposição de resíduos sólidos
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e de Abastecimento
MME	Ministério de Minas e Energia
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PIB	Produto interno bruto
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RSOBA	Resíduo sólido orgânico biodigerido aerobiamente
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SEMA	Secretaria Especial de Meio Ambiente
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TEP	Tonelada equivalente de petróleo
TG	Termogravimetria
UE	União Europeia
WTE	<i>Waste to energy</i> (desperdício de energia)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. JUSTIFICATIVA.....	19
3. PROBLEMA DA PESQUISA	24
4.1 OBJETIVO GERAL.....	27
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
5. REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
5.1 A PROBLEMÁTICA DO CRESCIMENTO DAS CIDADES E DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	29
5.1.1 CONTEXTO GERAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NO MUNDO.....	29
5.1.2 POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL (POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS).....	30
5.1.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	32
5.1.4 O MERCADO DE VALORIZAÇÃO E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU	33
5.1.5 GERAÇÃO PER CAPTA	36
5.1.6 PARÂMETROS QUÍMICOS	37
5.1.7 COMPOSIÇÃO	37
5.1.8 GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	39
5.2 DEMANDA ENERGÉTICA.....	40
5.2.1 A DEPENDÊNCIA DA ENERGIA ELÉTRICA E A BUSCA POR MELHOR EFICIÊNCIA.....	40
5.3 BIODIGESTÃO AERÓBIA	43
5.3.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO AERÓBIA	43
5.3.2 FATORES QUE AFETAM O PROCESSO DE DIGESTÃO AERÓBIA	44
5.3.2.1 TEOR DE UMIDADE	44
5.3.2.2 TEMPERATURA.....	45
5.3.2.3 TAXA DE OXIGENAÇÃO (AERAÇÃO).....	46
5.3.2.4 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES	47
5.3.2.5 TAMANHO DAS PARTÍCULAS	48
5.3.2.6 pH	48
5.4 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DAS AMOSTRAS	49
5.4.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR (PCS e PCI).....	49
5.4.2 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR).....	50
5.4.3 TERMOGRAVIMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL (TG E DTA).....	51
5.4.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP OES)	51
5.5 PELETIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS.....	52
5.6 GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA A PARTIR DA QUEIMA DE PELLETS	57
5.7 CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA, A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO MOTOR STIRLING	58

6. METODOLOGIA.....	62
6.1 ETAPAS.....	62
6.2 CARACTERIZAÇÕES.....	73
6.2.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR (PCS e PCI).....	73
6.2.2 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR).....	73
6.2.3 TERMOGRAVIMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL (TG E DTA).....	74
6.2.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP OES).....	75
6.3 CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ELÉTRICA.....	76
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
7.1 CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO BIODIGERIDO.....	77
7.1.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR (PCS E PCI).....	77
7.1.2 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR).....	79
7.1.3 TERMOGRAVIMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA DERIVADA (TG E DTA).....	80
7.1.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES).....	83
7.2 CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ELÉTRICA.....	84
7.3 APLICAÇÕES DA PESQUISA.....	86
8. SUGESTÕES DE ATIVIDADES FUTURAS.....	86
9. CONCLUSÃO.....	87
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
11. APÊNDICE.....	96

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, a humanidade intensificou o processo de urbanização e o desenvolvimento industrial, sem se preocupar, porém, com o uso racional dos recursos naturais. Com efeito, a crescente expansão das cidades evidencia hoje a necessidade de mobilizações por medidas suscetíveis de fomentar um desenvolvimento urbano sustentável.

Entre os inúmeros aspectos relacionados à sustentabilidade, destaca-se a implementação de destinos mais apropriados aos resíduos, ou seja, que não causem tantos danos ambientais, como, também, a ampliação da matriz energética para suprir as enormes e crescentes demandas da sociedade.

Relativamente aos resíduos, ressalta-se que o processo de urbanização em todo o mundo incrementa a geração per capita de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), principalmente em regiões metropolitanas, nas quais a geração de resíduos inorgânicos tende a apresentar um crescimento considerável quando comparada às demais localidades (MOTTA, 2006 *apud* PEREIRA, CURI e CURI, 2018).

No modelo de desenvolvimento econômico não sustentável, há uma excessiva produção de resíduos, o que é claramente percebido no Brasil. O uso de tecnologias para o tratamento de RSU, com ou sem aproveitamento energético, como solução aos problemas do resíduo urbano ainda é incipiente no país, e tem-se como agravante o fato de a grande maioria dos aterros sanitários e das estações de tratamento apenas coletar e queimar o biogás gerado, sem aproveitamento do seu potencial energético (ROSA *et al*, 2016; BORGES, 2016).

De acordo com relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), em 2018, das 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos que foram geradas no Brasil, 92% (72,7 milhões) foram coletadas. O relatório mostra ainda que, em relação a 2017, a coleta teve crescimento um pouco maior que a geração. Em todo caso, 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração, o que suscita preocupações quanto à infraestrutura dos serviços de limpeza urbana (ABRELPE, 2019).

Ainda segundo o relatório, no mesmo ano, 59,5% dos resíduos sólidos urbanos coletados (43,3 milhões de toneladas) foram adequadamente destinados a aterros sanitários. Embora o dado represente um pequeno avanço em relação ao ano anterior, destaca-se que o restante dos resíduos (40,5%) teve destino inadequado nos 3.001 municípios brasileiros, alcançando lixões

ou aterros controlados, cuja estrutura precária reverbera em prejuízos diversos ao meio ambiente e às pessoas (ABRELPE, 2019).

Essa realidade está em patente desacordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 – e, portanto, vigente há mais de uma década -, segundo a qual somente os rejeitos (material restante dos processos de tratamento) devem ser dispostos em aterros sanitários – disposição parcialmente cumprida na prática, como demonstrado.

Relativamente à questão energética, em primeiro lugar considera-se a crescente demanda brasileira por energia em virtude da intensa dinamização da economia do país, o que torna indispensável a busca por fontes alternativas (SILVA, 2015). A crise da energia elétrica e o plano de racionamento de 2001 trouxeram à tona necessidade de diversificar as fontes de energia no Brasil, tendo-se inúmeras pesquisas que apontam para a viabilidade da geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (SILVA e SOEIRO, 2014).

Existem tecnologias para resolução simultânea da escassez de energia elétrica e da falta de áreas para disposição final dos resíduos, que são baseadas em processos físicos, biológicos e térmicos com geração de energia a partir de RSU (E-RENEWABLES, 2007; FEAM, 2012), sendo os métodos mais utilizados a incineração, a gaseificação, a utilização do gás do lixo (GDL) ou gás de aterro sanitário, a tecnologia biomassa-energia-materiais (B.E.M.) e a tecnologia de plasma, possuindo, cada um, suas particularidades em termos de vantagens e melhor adaptação para situação de cada local (E-RENEWABLES, 2007; EESI, 2009; ABRELPE, 2012). O Quadro 1 mostra as tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia por cada método.

Quadro 1 – Tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia.

MÉTODO	TECNOLOGIA
Físico	Combustível derivado de resíduo
Térmico	Incineração Pirólise Gaseificação Tecnologia de plasma
Biológico	Fermentação Gás de aterro sanitário

Fonte: Adaptado de E-Renewables (2007, p. 38).

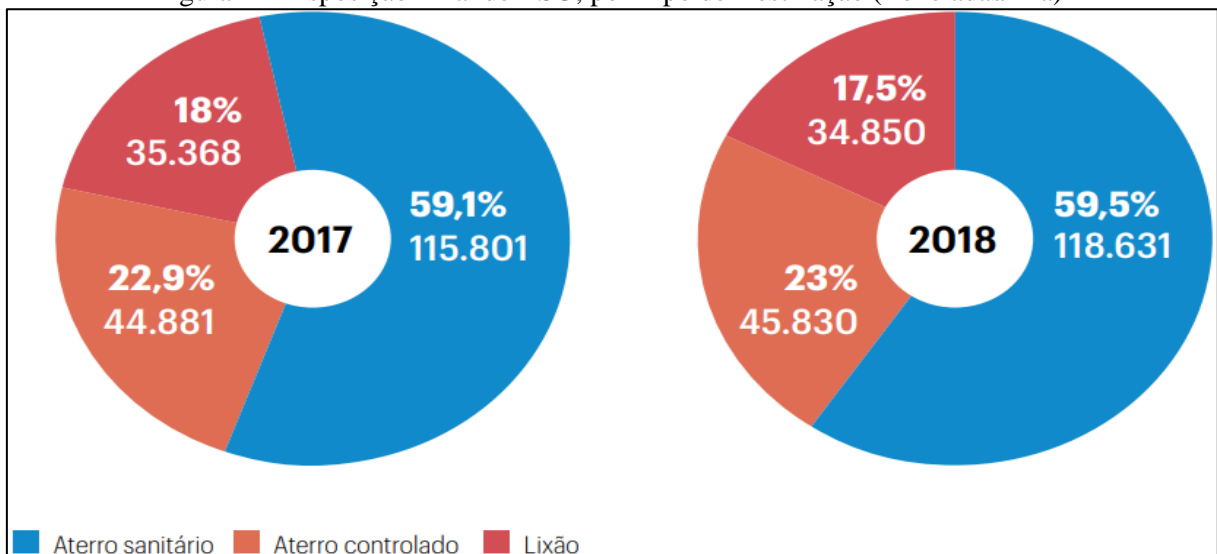
Os materiais presentes nos RSU utilizados para geração de energia são os de origem orgânica. Já as frações de vidro, metal e inertes têm destinos mais viáveis como reciclagem — para os dois primeiros — e aterros. Assim, se faz necessária a análise de dados sobre o potencial energético da matéria orgânica, correspondente à quase metade da totalidade dos RSU, dos plásticos e papéis, em seus diversos tipos, além de madeira e tecidos, que aparecem em quantidades menores (CARVALHO, 2013)

O aproveitamento energético dos resíduos, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, também traz benefícios para a sociedade, uma vez que promove a utilização ou reaproveitamento de recursos “descartáveis” e/ou de baixo custo; colabora com a não dependência da fonte de energia de combustíveis fósseis, oferecendo maior variedade de combustíveis; possibilita a geração descentralizada de energia, aumentando sua oferta; possibilita a geração local de empregos; reduz os odores e as toxinas do ar; diminui a emissão de poluentes pela substituição dos combustíveis fósseis; colabora com a viabilidade econômica dos aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes; otimiza a utilização local de recursos; e aumenta a viabilidade do saneamento básico no país, permitindo o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energéticas (PECORA, 2006).

2. JUSTIFICATIVA

Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2019) demonstram que, entre 2017 e 2018, a geração de RSU no Brasil aumentou quase 1% e chegou a 216.629 toneladas diárias. Como a população também cresceu no período (0,40%), a geração per capita teve elevação um pouco menor (0,39%). Ou seja: em média, cada brasileiro gerou pouco mais de 1 quilo de resíduo por dia. Das 72,7 milhões de toneladas coletadas no Brasil em 2018, 59,5% tiveram disposição final adequada, sendo encaminhadas para aterros sanitários – uma expansão de 2,4% em relação ao valor total do ano anterior. Porém, unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda têm participação significativa (23% e 17,5%, respectivamente, conforme mostra a Figura 1). Tais unidades estão presentes em todas as regiões e recebem mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde.

Figura 1 - Disposição Final de RSU, por Tipo de Destinação (Toneladas/Dia)



Fonte: ABRELPE, 2019, p. 16.

Embora o excesso de resíduos seja um problema, com manejo e administração adequados, ele pode se tornar uma solução. Diversos países no mundo aproveitam o potencial energético do metano gerado em processos anaeróbios como uma maneira de tornar os sistemas de tratamento sustentáveis ou até mesmo autossuficientes energeticamente, visando não

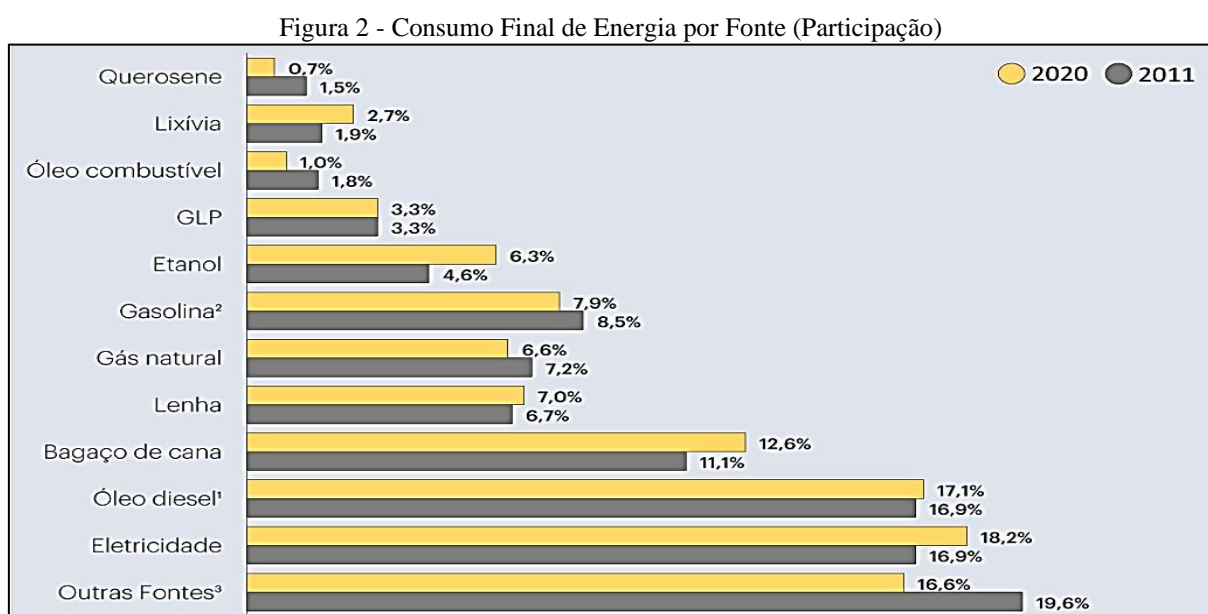
somente a geração de energia, mas também uma eficaz disposição e utilização dos resíduos sólidos gerados. Nos Estados Unidos, por exemplo, mais de 1000 estações de tratamento aproveitam seu potencial energético, sendo que 74 chegam a gerar mais energia do que consomem, vendendo-a para o sistema elétrico (BILOTTA e ROSS, 2016).

Visando a mitigação dos impactos ambientais oriundos da poluição atmosférica e dos resíduos urbanos, a Organização das Nações Unidas (ONU, 2013) recomenda, a nível mundial, além da reciclagem dos resíduos sólidos, a utilização de biomassa com cogeração de energia renovável, a qual é o foco deste projeto, que objetiva, além das contribuições bibliográfica e técnica, aprofundar os estudos e produção de relatórios técnicos sobre a biodigestão aeróbia dos resíduos sólidos orgânicos – processo ainda inexplorado nos estudos divulgados - e a cogeração de energia a partir dos seus produtos.

Estudos que abordam os temas sobre gerenciamento inteligente dos resíduos urbanos e energias renováveis são, sobremaneira, relevantes e essenciais para a realidade enfrentada pelas sociedades, em qualquer região do mundo, no momento atual. No Brasil, a matriz elétrica tem sido tema recorrente em diversos debates nos últimos anos. Dificuldades na execução de obras de planejamento energético, as irregularidades dos efeitos climáticos, como a escassez de chuvas em bacias hidrográficas estratégicas para o bom funcionamento do sistema, e a necessidade de se reduzir o uso de combustíveis fósseis para usinas termoeletricas, reforçam, reiteradamente, a necessidade de se aumentar a participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2021- relatório publicado anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), instituição ligada ao Ministério de Minas e Energia -, a oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) atingiu 287,6 Mtep em 2020, registrando uma queda de 2,2% em relação ao ano anterior e, seguindo a tendência verificada na oferta, o consumo final, energético e não energético, recuou 2,0% em relação a 2019. No entanto, o setor industrial apresentou um acréscimo de 3,0 milhões de tep em valores brutos. Destaque para o crescimento de 41,3% na produção de açúcar, que impactou o segmento de alimentos e bebidas, aumentando seu consumo total energético em 26,9% em relação a 2019. O consumo residencial de energia sofreu um aumento de 3,9% em relação ao mesmo ano, com destaque para o crescimento do consumo de gás natural em 8,9%.

Por seu turno, a demanda nacional de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN) foi de 37.711 GWh, com crescimento de 0,5% em relação ao mesmo período de 2017. O aumento do consumo de energia aumentou em três das cinco regiões do país, com destaque para o Centro-Oeste que teve crescimento de 4,8%, sendo o mês analisado dezembro de 2018. Já para o crescimento acumulado de 1,1% ao longo de 2018, houve expansão em quatro das cinco regiões na comparação com 2017. O Centro-Oeste foi a região que registrou maior alta no consumo (2,3%), seguido pelo Sul (1,7%), Sudeste (1,6%) e Nordeste (1,5%). A Figura 2 compara o consumo de energia por fonte dos anos de 2020 e 2011.



Fonte: BEN, 2021.

Notas: 1) Inclui biodiesel.

2) Inclui gasolina de aviação.

3) Inclui gás de refinaria, coque de carvão mineral, de carvão vegetal e de petróleo, alcatrão, nafta, carvão mineral, outros energéticos de petróleo, asfalto, lubrificantes e solventes.

Ao avaliar o comportamento do mercado de energia elétrica no país em 2018, a EPE ressaltou o fato de que a tônica ao longo do ano, do ponto de vista econômico, foi o quadro de lenta recuperação no mercado de trabalho, atribuindo-se a isso, portanto, a principal influência para o crescimento de 1,2% do consumo residencial. Em paralelo e contrariamente a isso, a EPE (2019), no Balanço Energético Nacional, informa que, no ano de 2018, a oferta interna de energia apresentou um decréscimo em relação ao ano anterior (como retrata a Tabela 1), mas,

em se tratando da energia elétrica, houve um ligeiro acréscimo, apesar desta ainda contar com produção de importação.

Tabela 1 - Evolução dos Indicadores da Oferta Interna de Energia (OIE)

Parâmetros	Unidade	1970	1980	1990	2000	2010	2017	2018
Oferta Interna de Energia(OIE)	10 ⁶	66,9	114,7	141,9	190,1	268,8	293,3	288,4
Oferta Interna de Energia Elétrica(OIEE)	TWh	45,7	139,2	249,4	393,2	550,4	625,7	636,4
População	10 ⁶ hab	95,7	122,2	148,1	174,7	196,4	207,6	209,3
PIB (2010) ¹	10 ⁹ US\$	567,3	1.297,7	1.517,1	1.953,0	2.803,6	2.892,2	2.924,5
Indicadores	Unidade	1970	1980	1990	2000	2010	2017	2018
PIB per capita	US\$/hab	5.928	10.619	10.244	11.179	14.275	13.928	13.972
OIE per capita	tep/hab	0,699	0,939	0,958	1,088	1,369	1,412	1,378
OIE por PIB(2010)	tep/10 ³ US\$	0,118	0,088	0,094	0,097	0,096	0,101	0,099
OIEE per capita	kWh/hab	478	1.139	1.684	2.251	2.802	3.013	3.040
OIEE por PIB(2010)	kWh/10 ³ US\$	81	107	164	201	196	216	218

Fonte: EPE, 2019, p. 60.

Notas: 1) Valores em reais constantes de 2010 convertidos para dólares em paridade de poder de compra (ppc) de 2010.

E, apesar da oferta interna de energia renovável ter apresentado aumento no período de 2017 a 2018 (Tabela 2), a fonte proposta nesta pesquisa, a partir de resíduos sólidos orgânicos, encontra-se caracterizada como “outras renováveis”, que apresentou acréscimo de 11,8% de 2017 para 2018, que ainda não é considerada relevante ou sequer é citada como existente, uma vez que o termo “outras” não especifica quais fontes são abordadas dentro deste aspecto.

Tabela 2 - Oferta Interna de Energia 2018/2017

Fonte (Mtep) ¹	2017	2018	Δ18/17
Renováveis	126,2	130,5	3,4%
Energia hidráulica ²	35,0	36,5	4,1%
Biomassa de cana	49,8	50,1	0,7%
Lenha e carvão vegetal	24,0	24,1	0,6%
Eólica	3,6	4,2	14,4%
Solar	0,072	0,298	316,1%
Lixívia e outras renováveis	13,8	15,4	11,8%

Fonte: EPE, 2019, p. 20.

Notas: 1) Milhões de toneladas equivalente de petróleo.

2) Inclui importação e autoprodução.

Os dados apresentados acerca da conjuntura do setor energético no país reiteram a importância de estudos como o proposto para otimizar e ampliar as opções de geração de energia renovável.

3. PROBLEMA DA PESQUISA

O processo de urbanização descontrolado degrada estruturalmente os ecossistemas, uma vez que, além de se construir sobre áreas de vegetação, há uma enorme demanda de utilização de recursos naturais e geração exorbitante de resíduos sólidos, diariamente. Estes, quando não coletados, tratados e dispostos da forma correta, tendem a contaminar o solo, os lençóis freáticos, os corpos hídricos e a atmosfera, alterando expressivamente a qualidade de vida das populações locais, o que pode ser notado nos diversos lixões encontrados pelo país (JATOBÁ, 2011).

Não há dúvidas de que o capitalismo foi a mola propulsora do desgaste ambiental refletido atualmente, ou seja, em razão da progressiva produção de bens de consumo, explora-se de forma demasiadamente depredadora os recursos naturais. É sabido que a relação do homem com o meio ambiente sempre foi de exploração, desde a antiguidade. Contudo, com o passar do tempo, esta relação tornou-se cada vez mais inconsequente, visto que a produção de bens de consumo e o apelo ao consumismo fazem gerar resíduos sólidos de maneira exacerbada e com números cada vez mais alarmantes (FLORES E VIEIRA, 2012). Tal fato é corroborado por Fernandes (2014), o qual leciona que a questão dos resíduos sólidos é cada vez mais recorrente tendo recebido especial destaque nos últimos anos, e relaciona o aumento na sua geração e no descarte sem tratamento ao crescimento populacional somado a um modelo capitalista que adota a lógica do consumo como modo de vida.

Essa tendência à urbanização é crescente nos países em desenvolvimento, notadamente no Brasil, atualmente com 213.317.639 pessoas (IBGE, 2021). O PNAD (IBGE, 2015) mostra que a população em todo o território nacional é, predominantemente, urbanizada e mais urbanizada que na década anterior: em 2000, 81% dos brasileiros viviam em áreas urbanas. Em 2010, apenas 15,65% da população (29.852.986 pessoas) viviam em situação rural, contra 84,35% em situação urbana (160.879.708 pessoas). Esta situação coloca os municípios, principalmente as cidades médias, diante do desafio da adequada gestão dos resíduos sólidos municipais, uma vez que é crescente o entendimento sobre a necessidade de propiciar às comunidades um serviço de limpeza urbana de qualidade, que satisfaça os usuários e minimize os riscos à saúde e à degradação ambiental, decorrente da gestão inadequada dos resíduos

sólidos urbanos.

É importante ressaltar que os dados do SNIS (BRASIL, 2018) confrontam os dados dispostos pela ABRELPE (2019), citados anteriormente, informando que, quanto à destinação das 62,78 milhões de toneladas de resíduos coletados em 2018, o diagnóstico aponta 46,68 milhões de toneladas dispostas em aterros sanitários, o que corresponde a 75,6% do total aproximado (61,73 milhões de toneladas). Além disso, contabilizou-se 15,05 milhões de toneladas dispostas em unidades de disposição final consideradas inadequadas (aterros controlados e lixões), que correspondem juntas a 24,4% do total disposto em solo em 2018, enquanto a ABRELPE aponta que 40,5% foram despejados em lugares inapropriados.

Essa situação se dá não apenas pelo esgotamento de algumas áreas, devido ao volume ocupado, mas, também, pela falta de áreas para construção de novos aterros e pelos altos investimentos necessários para tais obras, além do fato de, em inúmeras lugares ao redor do mundo, os aterros estarem localizados cada vez mais distantes das cidades, aumentando o custo com transporte (CHENG e HU, 2010).

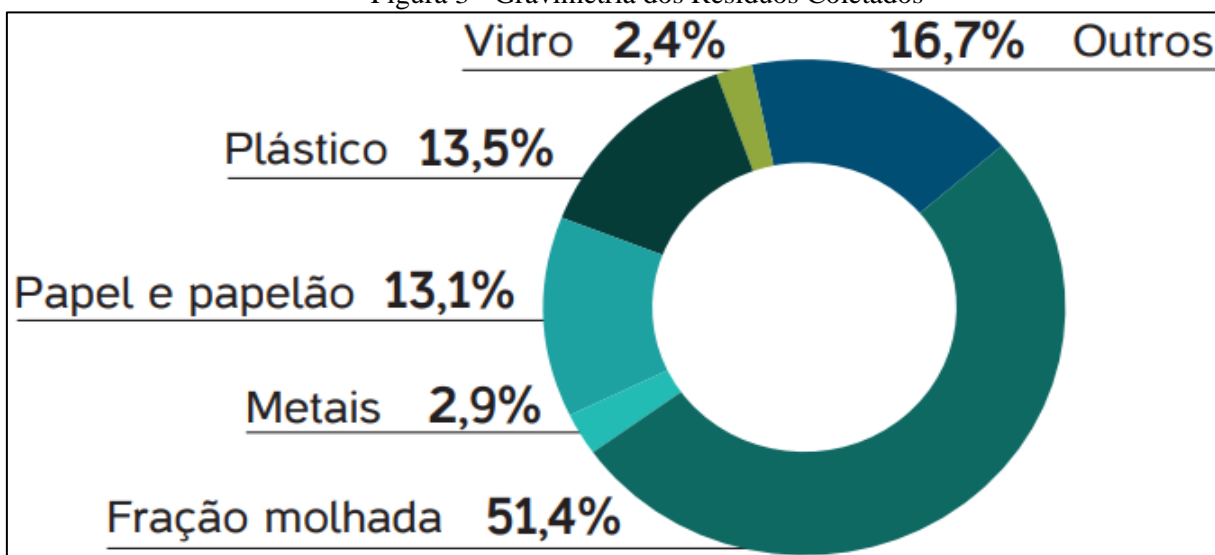
Novos aterros sofrem da síndrome conhecida como “*NIMBY: not in my backyard*” – não no meu quintal, que se trata da tendência das sociedades de se livrar de problemas individuais como o lixo e transferi-los para a coletividade (GOMES, 2019), além dos custos envolvidos para o monitoramento dos aterros que já foram concluídos, uma vez que eles continuam a produzir gases e líquidos poluentes e, ainda, outros tipos de contaminação que podem repercutir na saúde pública. De acordo com Leite e Belchior (2012), o desenvolvimento experimentado pela sociedade nos tempos atuais compõe-se pela autolimitação, ou seja, não é suficiente para gerir as consequências do modelo de produção que vigora.

Contudo, ao se analisar os modelos de Gestão de Resíduos Sólidos utilizados em países desenvolvidos e, até mesmo, alguns casos presentes no Brasil, é possível atestar que existem meios de lidar com os resíduos de forma mais inteligente, gerando valor socioeconômico e ambiental ao processo. Em linha com relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas (IPCC/UN) que explicitam a crescente conscientização para a imprescindibilidade do equilíbrio dos ecossistemas, do ativo posicionamento de cada indivíduo para que este objetivo seja atingido e da necessidade de desenvolvimento de fontes de energia

que sejam renováveis e limpas.

A relevância deste trabalho situa-se em face do potencial de valorização dos RSU como fonte energética sustentável e ao total enquadramento deste estudo à atual política governamental e tendências mundiais em rever paradigmas nessa área. Ademais, no Brasil, cerca de 32% dos resíduos coletados são recicláveis e 51% é matéria orgânica, conforme explicitado na Figura 3 (CEMPRE, 2019). Porém, somente 4% da matéria orgânica é destinada a processos de compostagem (CEMPRE, 2018), o único tratamento atual a que este tipo de matéria orgânica é submetido. Isso reforça a pertinência de se pesquisarem formas de melhor aproveitamento desses resíduos.

Figura 3 - Gravimetria dos Resíduos Coletados



Fonte: Adaptado de Cempre (2019).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho foi apresentar um processo de geração de energia elétrica, a partir de resíduos sólidos urbanos orgânicos de alimentos, para isso foi utilizado um sistema de biodigestão aeróbia, em que o composto biodigerido será transformado em pellets que, posteriormente, serão utilizados na geração de energia térmica por combustão que, por sua vez, será convertida em energia elétrica, visando a efetiva implantação deste recurso como meio indispensável e atenuador para os problemas de energia e meio ambiente em nossa sociedade.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar, por meio de pesquisas bibliográficas, a evolução do processo de urbanização, suas consequências e as diversas vantagens ecológicas, econômicas e sociais que podem ser obtidas com a adoção do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para a geração de energia;
- Caracterizar os substratos que podem ser usados como matéria-prima para geração de energia elétrica a partir do processo de biodigestão aeróbia, visando designar os de melhor poder calorífico para otimização do potencial da energia gerada, bem como as amostras oriundas do processo de biodigestão, a fim de caracterizá-las como eficientes ou não, tóxicas ou não e quantitativo de resíduos (cinzas) após combustão;
- Realizar experimentos utilizando um biodigestor de digestão aeróbia, para a produção de compostos que integrarão os pellets, intencionando sua boa compactação e, com os pellets gerados, realizar testes a fim de validar sua eficácia na conversão de energia térmica em energia elétrica, a partir de um protótipo baseado no motor Stirling, visando o acionamento de uma lâmpada de baixa potência.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste âmbito é relevante e imprescindível salientar a escassez de estudos similares ao em desenvolvimento. A princípio, a digestão aeróbia não é executada da forma proposta e nem mesmo para os fins propostos neste estudo. Há semelhanças entre esta e o processo de compostagem mecanizada, mas este, por sua vez, não é designado para a produção de produtos utilizados na geração de energia, e sim para a produção final de biofertilizantes ou, simplesmente, para reduzir ao mínimo os resíduos, a fim de não enviá-los diretamente aos aterros. Ainda assim, utilizaremos referências de publicações sobre compostagem para embasamento nos parâmetros e técnicas mais eficazes para o procedimento, uma vez identificada a similaridade dos processos.

Intenciona-se, após o processo de biodigestão aeróbia, compactar o seu produto e criar pellets, que serão utilizados para a geração de energia térmica. Mundialmente, a sua utilização têm visado este fim, mas os pellets, habitualmente, são compostos de resíduos sólidos advindos de restos de podas ou florestais, o que facilita não só o processo de peletização mas, também, o aumento do poder calorífico do produto, o que justifica a sua ampla utilização já consolidada no mercado europeu.

Assim como o processo de digestão aeróbia, não foram identificadas referências bibliográficas científicas sobre o processo de peletização de resíduos sólidos orgânicos, e também sobre a geração de energia térmica a partir da queima dos pellets e sua conversão em energia elétrica, a partir da utilização do motor Stirling.

O processo de geração de energia elétrica, utilizando-se do motor Stirling, já vem sendo empregado desde sua criação, em 1816 por Roberto Stirling, apresentando elevado rendimento térmico, boa eficiência energética, além dos motores serem silenciosos, com baixa vibração devido à combustão ser contínua e externa, podem operar utilizando qualquer fonte de calor e combustível, têm pouca necessidade de manutenção e baixo desgaste interno (BEATO, 2018). Porém, não foram identificados relatos de utilização de matérias-primas advindas de resíduos sólidos orgânicos.

Portanto, serão referenciadas bibliografias sobre o processo de geração de energia a partir de resíduos sólidos, e sobre os processos técnicos utilizados no estudo, abordados

individualmente e da forma como são comumente aplicados, tendo-se em vista que, ainda que não haja estudos neste formato, há bastante similaridade entre os processos propostos.

5.1 A PROBLEMÁTICA DO CRESCIMENTO DAS CIDADES E DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

5.1.1 CONTEXTO GERAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NO MUNDO

Com as evoluções tecnológicas, o aumento do poder aquisitivo da população e o consequente aumento do consumo, a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados nos municípios cresce exponencialmente. Isso traz, como resultado, um enorme impacto ambiental decorrente do grande volume de resíduos gerados e, também, da má gestão relacionada ao descarte desses resíduos.

O Brasil possui uma área total de 8.514.876,599 km² e é o 5º maior país em extensão territorial do mundo, com uma população atual total de 211.820.963 habitantes (IBGE, 2020), dos quais cerca de 85% correspondem à população urbana (IBGE, 2015).

A economia do país vinha apresentando uma crescente evolução ao longo dos últimos anos, o que fez o Brasil alcançar o posto de 9ª economia mundial, apesar de já ter ocupado a 6ª posição, em 2013. Neste sentido, observa-se que no ano de 2018 o PIB cresceu 1,3% e, em 2019, 1,17%, gerando um maior poder de compra da população.

O Sudeste, diferentemente das demais regiões, produz resíduos em proporção maior que sua participação na população brasileira: concentra 42% dos habitantes, mas gera 50% dos RSU, com um índice per capita de 1,23 quilo por dia.

O aumento na geração de RSU pela população tem sido discutido em diversos aspectos, principalmente naqueles que afetam a sua qualidade de vida. Apesar disso, a gestão dos resíduos sólidos, que é considerada um dos setores básicos do saneamento, ainda não tem recebido a atenção necessária por parte dos gestores públicos, resultando nos atuais grandes problemas de cunho social, ambiental, econômico e de saúde.

Infere-se, portanto, que atualmente o meio ambiente é degradado tanto durante a produção de bens tecnológicos, com a extração de recursos naturais, quanto no descarte de produtos cujo uso não é mais necessário, possível ou viável, o que gera outra ação de impacto sobre o mesmo. Num rápido e lógico raciocínio, é irrefutável a percepção de que tudo o que é ou foi fabricado ou construído, um dia será descartado, tornando-se resíduo e necessitando ter um fim ambientalmente adequado.

Porém, de uma forma geral, a legislação internacional relativa aos RSU, caminha para um mesmo marco institucional baseado na implantação de estímulos seletivos que inibem tanto a capacidade de geração, por meio da promoção da redução, quanto o mau gerenciamento do volume gerado dos resíduos sólidos, o que é, a princípio, o preâmbulo para guiar a sociedade por caminhos mais sustentáveis (FADE, 2013).

5.1.2 POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL (POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS)

No Brasil, os principais marcos legais da política pública nacional, na área de RSU, são a Lei de Consórcios Públicos, a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), de 2010 e que, em termos gerais, atribui responsabilidades recíprocas e o gerenciamento integrado nas diferentes etapas do processo, envolvendo a cooperação da sociedade, do setor empresarial e dos governos federal, estadual e municipal. Essas legislações são integradas e complementares para a gestão dos RSU, constituindo a base do sistema jurídico-ambiental brasileiro, no âmbito federal, voltado para a regulamentação da gestão de RSU. A PNRS prevê que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a ordem de prioridade: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. De acordo com o referido dispositivo, uma política de reciclagem e tratamento dos resíduos, por exemplo, deve estar necessariamente atrelada a medidas de não geração, redução e reutilização (LEITE e BELCHIOR, 2012).

A política ambiental brasileira se desenvolveu nos últimos quarenta anos como resultado da ação de movimentos sociais locais e de pressões externas. Somente em 1973, após a Conferência de Estocolmo, foi criada no Brasil a Secretaria Especial de Meio Ambiente

(SEMA), especializada em tratar assuntos ambientais, sob a coordenação do Ministério do Interior (FADE, 2013).

A PNRS prediz a utilização de instrumentos econômicos como forma de induzir o cumprimento de objetivos e metas determinadas. Os instrumentos previstos pela PNRS priorizam os sistemas de incentivos fiscais, financeiros e creditícios. Deste modo, há o incentivo a “fazer” e não a “deixar de fazer”, com base em instrumentos econômicos de incentivo, e não de punição (FADE, 2013). A PNRS define, ainda, conceitos de “responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto” e a “logística reversa”, assim como estabelece que os resíduos devem ser tratados e recuperados por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis (ABRELPE, 2017), sendo, assim, um marco regulatório que possui como base a diretriz sequencial de não geração, redução, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos (ALBUQUERQUE E ESTEVES, 2018).

É relevante dizer que, para a destinação final ser considerada ambientalmente adequada, os resíduos devem ser valorizados mecanicamente, biologicamente e/ou energeticamente. Para FADE (2013), atualmente, a gestão de RSU aponta para sistemas que privilegiam a gestão colegiada, o controle externo e a divisão de responsabilidades. A gestão dos serviços e manejo dos resíduos sólidos e a prestação dos serviços públicos de limpeza urbana devem ser pensados e implementados por meio dos denominados “arranjos institucionais”, na sua forma mais adequada para a aplicabilidade e sustentabilidade das tecnologias. Neste quesito, ainda há muito caminho a ser percorrido no Brasil.

5.1.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A Lei nº 12.305/10 classifica os resíduos segundo a origem e segundo a periculosidade. Quanto à origem, podem ser: resíduos sólidos urbanos (que englobam os domiciliares e os de limpeza urbana); gerados por estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; gerados pelos serviços de saneamento básico; industriais; de serviços de saúde; da construção civil; originados das atividades agrossilvipastoris; dos serviços de transporte e os originados das atividades de mineração. Quanto à periculosidade, a Lei nº 12.305/10 classifica os resíduos em perigosos e não perigosos. Uma das formas de classificação dos resíduos pode ser por geração e por destinação final.

A definição mais ampla e técnica de resíduos sólidos em geral é dada pela Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, na qual o resíduo sólido é tido como:

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por: [...] XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. [...] (BRASIL, 2010).

O conhecimento ordinário de resíduo sólido, que engloba “lixo” residencial e comercial, é correto de acordo com a PNRS, posto que o resíduo comercial está incluso na definição genérica de resíduos sólidos do art. 3º. Mais que isso, o art. 13º da mesma Lei traz a classificação dos resíduos, e para tanto nos importa transcrever as alíneas “a”, “b”, “c” e “d” do inciso I, in verbis: Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação: I - quanto à origem: a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas; b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana; c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”; d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades [...]

Existem outras classificações dos resíduos sólidos, como as referentes à sua composição química (ABNT NBR 10004) e quanto ao risco à saúde pública e à sua periculosidade (Art. 13º, II, Lei 12.305/2010). Porém, para o presente estudo é relevante delimitar quais as classes de resíduos que estão incluídas entre aqueles cuja destinação pode levar ao tratamento e recuperação dos mesmos por meio do aproveitamento energético. Portanto, apenas resíduos que podem ter como destinação final o aterro sanitário estão incluídos entre os que serão objeto de aproveitamento. São basicamente todos os resíduos sólidos urbanos, assim considerados os domiciliares, os de limpeza urbana e de varrição e os comerciais e de prestação de serviços, desde que sejam resíduos não perigosos e atendam às especificações exigidas pelo ente Municipal quanto à sua natureza, composição, volume e origem.

5.1.4 O MERCADO DE VALORIZAÇÃO E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU

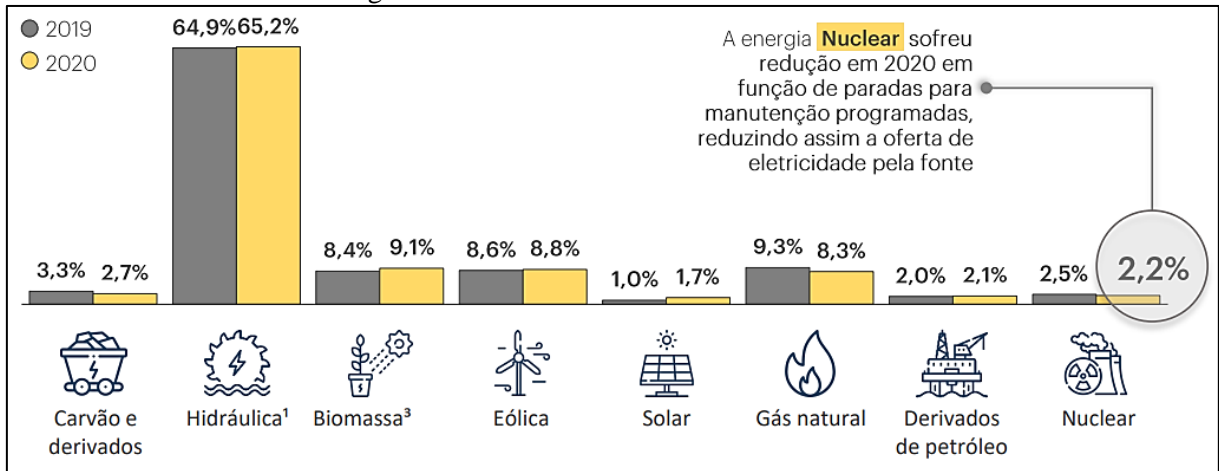
A urbanização é um processo que ocorre no Brasil, paralelamente à industrialização, desde 1930, quando os interesses urbanos industriais se tornam importantes na política econômica, mas sem o abandono das relações antigas, alicerçadas na propriedade fundiária. Esse acelerado crescimento tem causado uma extensa degradação socioambiental (MARICATO, 2013).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hidráulica, que responde a 65,2% da oferta interna (Figura 4). As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional acrescida às importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2021). A bioenergia tem se tornado cada vez mais importante no setor energético brasileiro, no âmbito da produção de eletricidade, como o bagaço da cana, e da produção de biocombustíveis líquidos, como o etanol, advindo da cana.

O aproveitamento energético de RSU, desde que utilize rotas tecnológicas apropriadas e devidamente analisadas quanto aos riscos de implementação, é uma alternativa ambientalmente correta de tratamento dos resíduos sólidos e uma oportunidade de negócios, além de ser uma ótima opção para a crescente demanda de energia, enfatizando que esse tipo

de resíduos deve ser visto como um recurso, e não como algo passível de eliminação (FEAM, 2012).

Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira em 2020



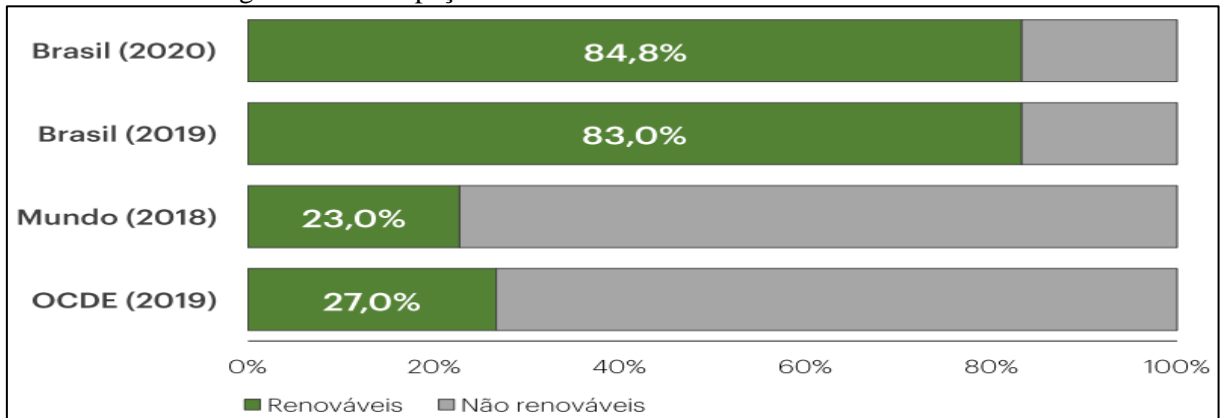
Fonte: EPE, 2021.

Em países desenvolvidos há plantas comerciais para o aproveitamento energético de RSU, principalmente utilizando as tecnologias de incineração, coprocessamento e biogás de aterro. No Brasil, a prática usual para tratamento dos RSU ainda tem sido a disposição no solo, havendo poucos aterros sanitários com aproveitamento energético. Porém, para resíduos industriais e de serviços de saúde existem unidades de incineração (principalmente nos estados da Bahia, São Paulo e Rio de Janeiro) e de coprocessamento de resíduos industriais (FEAM, 2012).

Apesar de, antes do início da Pandemia do Covid-19, estar vivenciando um momento histórico de crescimento econômico, desenvolvimento tecnológico e consequente elevação da geração de resíduos, o Brasil ainda não consegue atender adequadamente à necessidade de tratamento e destinação dos seus resíduos, o que implica em impactos ambientais crescentes em todas as fases dos processos produtivos e demais atividades humanas.

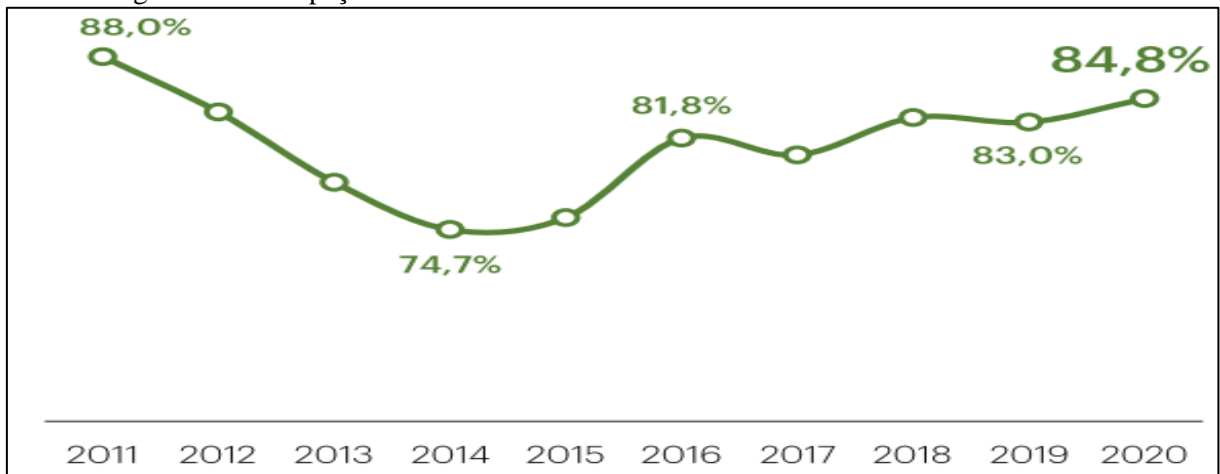
Não obstante os reconhecidos efeitos danosos ao meio ambiente, há de se considerar que a gestão adequada dos resíduos representa uma oportunidade de geração de riqueza para o país por meio do seu aproveitamento e valorização. Porém, a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira atingiu 84,8% de renovabilidade em 2020 (Figura 5) e ficou mais próxima do patamar de renovabilidade de 10 anos atrás (Figura 6) (EPE, 2021).

Figura 5 - Participação de Renováveis na Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: EPE, 2021.

Figura 6 - Participação dos renováveis na Matriz Elétrica Brasileira de 2011 até 2020



Fonte: EPE, 2021.

É possível identificar pelo menos três formas de valorização dos resíduos sólidos, as quais envolvem processos de reciclagem e transformação. A reciclagem dos materiais busca a transformação de resíduos em insumos ou produtos com características similares aos produtos originais e é o processo de valorização mais difundido e praticado no país.

Além da reciclagem, a valorização dos resíduos nos processos de tratamento permite ainda a produção de composto derivado do tratamento da matéria orgânica e o aproveitamento energético para a produção de eletricidade e calor, intenção esta abordada neste estudo, considerando-se a fração orgânica, com a possibilidade, ainda, de geração de créditos de carbono. Isso é corroborado por Godecke (2010), que afirma que a valoração econômica pode

ser obtida por diversas rotas que combinam a reciclagem, compostagem, aproveitamento energético direto pela incineração ou indireto através do biogás obtido nas ETE e locais de disposição de resíduos sólidos (LDRS).

Já praticada no Brasil de forma mais organizada, desde a década de 1980, a reciclagem dos resíduos é prevista no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos como uma das atividades prioritárias para garantir a gestão e gerenciamento adequado dos resíduos.

Em relação à valorização energética dos resíduos sólidos urbanos, é importante reiterar que a evolução no consumo de energia acompanha as tendências de crescimento econômico do país, a oferta interna tem apresentado uma forte correlação com o PIB nacional e ambos têm evoluído em direção a uma tendência de crescimento ao longo do tempo. Tal aumento tem sido mais acentuado nas fontes não renováveis em razão do consumo de derivados de petróleo na indústria, embora reciprocamente se acredite numa retomada do uso de fontes renováveis, devido às previsões pessimistas que indicam uma escassez das primeiras em um médio prazo e ao apelo mundial por processos produtivos mais sustentáveis (EPE, 2019).

A geração de energia não é uniforme entre as regiões, devido a fatores como o nível de atividade econômica, densidade demográfica e capacidade de geração. Para atender ao crescimento previsto da demanda, pressupõe-se a necessidade de expansão da oferta e modificações na matriz energética nacional, as quais foram previstas no Plano Nacional de Energia, tomando como base o cenário retrospectivo (FADE, 2013). Estima-se que, até o ano 2030, haverá um aumento de 39,3% na produção de energia no país, distribuída por fonte em hidrelétricas (69,5%), térmicas (17,7%), importadas (0,6%) e alternativas (3,7%), dos quais 6,4% correspondem ao uso dos resíduos urbanos, representando uma estimativa de participação de 0,6% na matriz energética.

5.1.5 GERAÇÃO PER CAPTA

A geração per capita relaciona a quantidade de resíduos sólidos urbanos produzidos por uma população definida durante determinado período. A geração per capita dos resíduos sólidos urbanos é expressa em Kg/dia/hab (FUNASA, 1999, apud BUTTENBENDER, 2004) e classifica a geração per capita em função da faixa de população, sendo de 0,4 para o contingente

de até 100 mil pessoas; 0,5 para a faixa de 100 a 200 mil; 0,6 para a de 200 a 500 mil e 0,5 acima de 500 mil (BUTTENBENDER, 2004), o que ratifica a extrema necessidade de maiores investimentos em limpeza urbana e gestão de resíduos no Brasil, tendo em vista a quantidade significativa de metrópoles em todo o país.

5.1.6 PARÂMETROS QUÍMICOS

Os parâmetros químicos dos resíduos sólidos urbanos são utilizados na definição da forma mais adequada de tratamento e disposição final, assim como na avaliação de sistemas de compostagem. Normalmente são analisados os seguintes parâmetros: N, P, K, S, C, relação C/N, pH e sólidos voláteis (CEMPRE, 2018). O Quadro 2 ilustra as características físico – químicas dos resíduos sólidos gerados na cidade de São Paulo.

Quadro 2 – Características Físico-Químicas do Lixo da Cidade de São Paulo

Componente	Unidade	Valor	Fonte/referência
Relação carbono/nitrogênio	C/N	25,80	IPT, 1976
Peso específico	Kg/m ³	192,00	Ducan, 1972
Umidade	%	61,20	Giacobbo, 1976
Sólidos voláteis	%	32,30	Giacobbo, 1976
Inertes	%	6,50	Giacobbo, 1976
Poder calorífico superior	Kcal/Kg	4267,00	IPT, 1976
Poder calorífico inferior	Kcal/Kg	1285,00	IPT, 1976

Fonte: LIMA, 1991 *apud* BUTTENBENDER, 2004.

5.1.7 COMPOSIÇÃO

O conhecimento da composição fornece subsídios e informações para uma correta avaliação das potencialidades econômicas dos resíduos sólidos urbanos, de acordo com cada categoria. O Quadro 3 ilustra os materiais que comumente são encontrados no lixo urbano,

ressaltando que a matéria orgânica proveniente de restos de alimentos é a categoria escolhida para utilização neste trabalho.

Quadro 3 – Exemplo básico de cada categoria de resíduos sólidos urbanos

Categoria	Exemplo
Matéria orgânica putrescível	Restos de alimentos, cascas de frutas e verduras, borra de café, erva de chimarrão, flores, grama, poda de árvores, etc.
Plástico	Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, esponjas, isopor, utensílios de cozinha, látex.
Papel e papelão	Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas.
Vidro	Copos, garrafas de bebidas, pratos, espelhos, embalagens de produtos de beleza, embalagens de produtos de limpeza, embalagens de produtos alimentícios.
Metal ferroso	Palha de aço, alfinetes, agulhas, embalagens de produtos alimentícios.
Metal não ferroso	Latas de bebidas, restos de cobre e chumbo, fiação elétrica
Madeira	Caixas, tábuas, palitos de fósforo e picolé, tampas, móveis, lenha.
Panos, trapos, couro e borracha	Roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas, mochilas, sapatos, tapetes, luvas, cintos, balões.
Contaminante químico	Pilhas, medicamentos, lâmpadas, inseticidas, raticidas, colas em geral, cosméticos, vidro de esmaltes, embalagens de produtos químicos, latas de óleo de motor, latas com tintas, embalagens pressurizadas, canetas com carga, papel carbono, filme fotográfico.
Contaminante biológico	Papel higiênico, cotonetes, algodão, curativos, gazes e panos com sangue, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, seringas, lâminas de barbear, cabelos, pêlos, embalagens de anestésicos, luvas.
Pedra, terra e cerâmica	Vasos de flores, pratos, restos de construção, terra, tijolos, cascalhos, pedras decorativas.
Diversos	Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens longa vida, embalagens metalizadas, sacos de aspirador de pó, lixas, e outros materiais de difícil identificação.

Fonte: BUTTENBENDER, 2004, p. 30.

Pode-se dizer que a composição é de fundamental importância para o planejamento e avaliação da eficiência dos sistemas de coleta e disposição final e, ainda, extremamente relevante para o projeto em questão, uma vez que interfere diretamente no tempo e na qualidade

da decomposição, além de ser imprescindível para o maior poder calorífico da amostra no momento da geração da energia térmica.

É possível verificar na Tabela 3 o poder calorífico dos principais materiais componentes dos resíduos sólidos urbanos com viabilidade de aproveitamento como combustível para geração de energia.

Tabela 3 - Poder Calorífico Inferior (PCI) de Alguns Resíduos Sólidos Urbanos

RSU	PCI (BASE SECA) kcal/kg	UMIDADE (%)	CINZAS (%)	PCI (BASE ÚMIDA SEM CINZAS) kcal/kg
Matéria orgânica	4.300	66	25	712
Papel e papelão	3.800	21	5	2.729
Têxteis e couro	4.200	36	10	1.921
Madeira	3.700	25	5	2.490
Plástico	10.300	17	3	8.193
Borracha	9.700	5	6	8.633

Fonte: Adaptado de BRASIL (2012) e CODESC (2003) apud FEAM (2012).

5.1.8 GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos consiste em um conjunto de ações educativas, normativas, operacionais, financeiras e de planejamento, baseados em critérios sanitários, ambientais e econômicos visando a segregação, coleta, triagem, tratamento e destinação final adequada dos resíduos sólidos urbanos a nível municipal (IPT, 1995).

A necessidade das administrações municipais em adequarem-se à legislação ambiental, a dificuldade em encontrar áreas para disposição final do lixo urbano e os custos elevados para implantação de aterros sanitários tem levado tais administrações ao desenvolvimento de políticas voltadas para a redução da quantidade dos resíduos sólidos que necessitam ser aterrados. Dentre essas práticas destaca-se a implantação de sistemas de coleta seletiva a nível municipal.

A implantação de sistemas de coleta seletiva vem sendo apontada como uma alternativa não só para o problema da disposição dos resíduos sólidos domiciliares produzidos, mas,

também, através da organização em cooperativas de catadores, para a geração de novos empregos.

A segregação dos materiais presentes nos resíduos sólidos urbanos tem como objetivo principal a reciclagem de seus componentes. Reciclagem é o resultado de uma série de atividades pelas quais materiais que se tornariam lixo são desviados, coletados, separados e processados para serem usados como matéria prima na manufatura de novos produtos (CEMPRE, 2018).

Existem diversas formas de se operar um sistema de coleta seletiva a nível municipal. Cada município deve avaliar e adotar a que for mais conveniente à sua realidade. Em alguns casos, a combinação de diferentes modelos poderá gerar melhores resultados.

5.2 DEMANDA ENERGÉTICA

5.2.1 A DEPENDÊNCIA DA ENERGIA ELÉTRICA E A BUSCA POR MELHOR EFICIÊNCIA

Baseando-se em dados de 2019, o MME (2020) afirma que aproximadamente 85% da energia elétrica produzida no Brasil é oriunda de fontes renováveis, que incluem hidráulica, eólica, solar e bioenergia. A demanda total de energia chegou a 294 milhões TEP, mostrando crescimento de 1,4% sobre 2018, acima da taxa do PIB (1,1%), e respondendo por 2% da energia mundial. A energia solar cresceu 92% e a eólica, 15,5%, no ano de 2019, fontes que, somadas, contribuíram com 50% do aumento da participação das renováveis na matriz. As usinas hidrelétricas no país representavam 63,7% da produção de energia elétrica em 2018. A bioenergia tem se tornado cada vez mais importante no setor energético brasileiro, para a produção de eletricidade e de biocombustíveis líquidos.

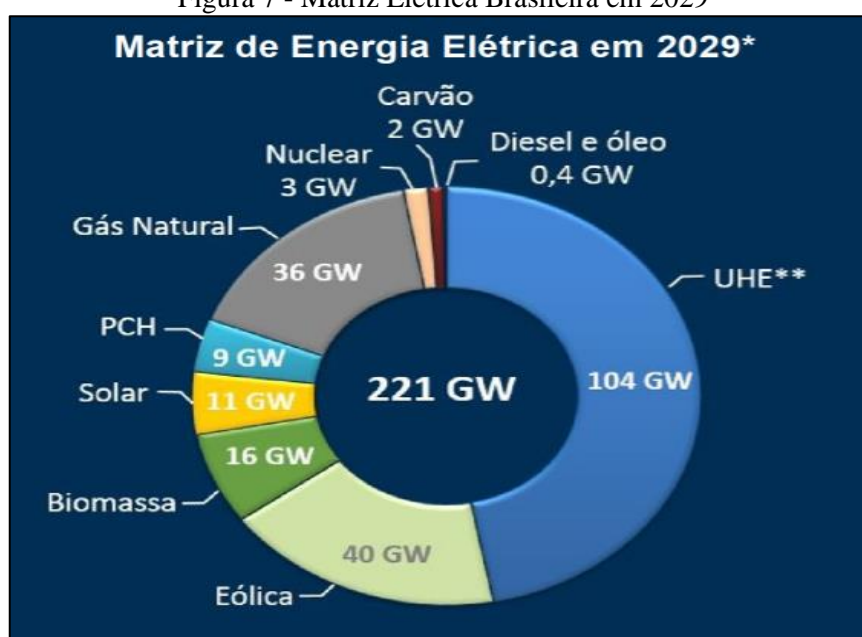
Nos indicadores associados ao consumo das famílias, o consumo residencial de energia elétrica cresceu 3,5% e o consumo comercial cresceu 4,5%. Outro indicador importante, o de consumo de energia em veículos leves (gasolina, etanol e gás natural), cresceu 4,5% em 2019. A construção civil também teve bom desempenho, quando avaliada pelo consumo de energia na produção de cimento, que cresceu 2,9% (MME, 2020).

O ministro de Minas e Energias, Bento Albuquerque, salientou o Plano Decenal de Energia 2027, que prevê um crescimento médio do Produto Interno Bruto de cerca de 2,8% ao ano, o que evidencia a necessidade de investimentos, nos próximos dez anos, de cerca de R\$400 bilhões no setor elétrico (MME, 2019).

A redução da participação das hidrelétricas atualmente responde por 60,1% da capacidade do parque gerador, como detalhado anteriormente na Figura 4 e, em breve, será compensada pelo crescimento das termelétricas (de 14% para 19%), principalmente a gás natural, devido ao potencial de recursos oriundos do pré-sal, e outras fontes renováveis, como eólica e solar (de 22% para 32%), o que reduz a dependência de chuvas, podendo chegar a 12% em 2029, como previsto pela EPE (2020) (Figura 7).

A energia elétrica pode ter sua geração e distribuição comprometida devido às condições climáticas, o que pôde ser ratificado no estudo realizado para investigar as possíveis vulnerabilidades do setor brasileiro de energia aos efeitos da mudança climática.

Figura 7 - Matriz Elétrica Brasileira em 2029

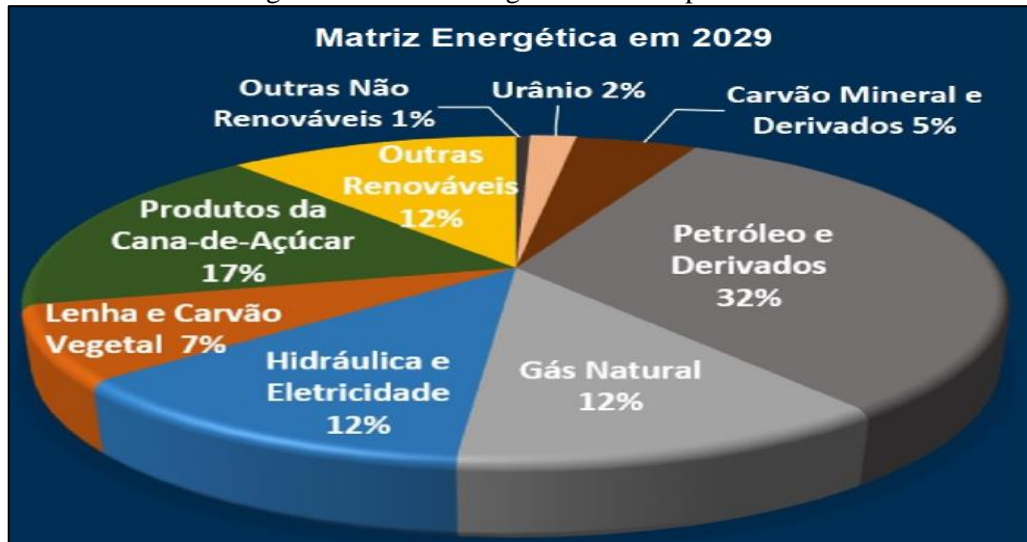


Fonte – EPE, 2020.

A região Nordeste sofrerá o maior impacto com o aumento das temperaturas e com a redução das vazões na bacia do Rio São Francisco. A demanda de energia elétrica com temperaturas elevadas também requer maior uso de aparelhos, utilizados para diminuir os

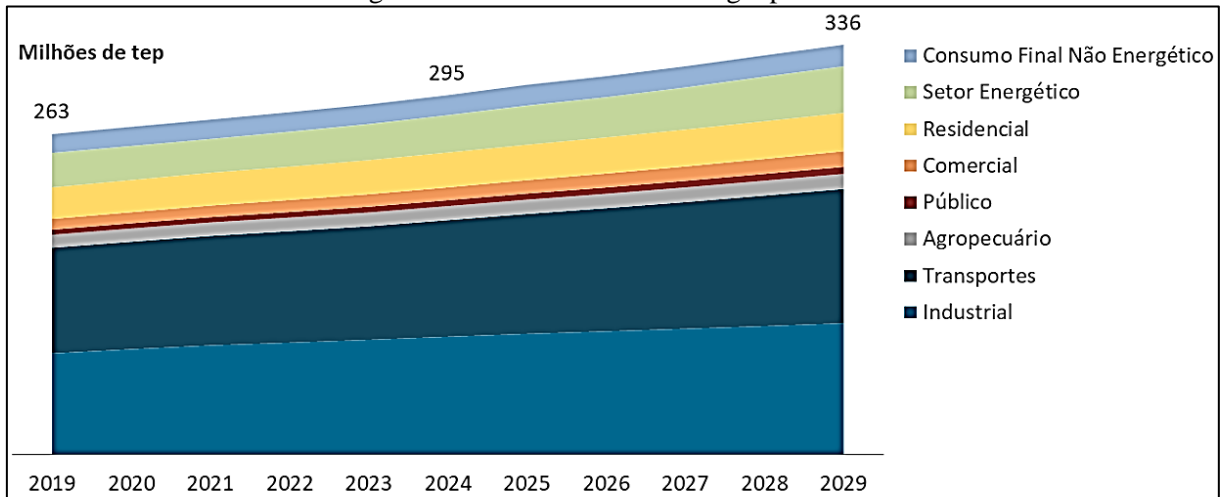
efeitos das altas temperaturas, como o ar condicionado (COPPE, 2008). No Brasil, a mudança do clima pode aumentar em até 8% o consumo total de eletricidade projetado até 2030. Na Figura 9 verifica-se o aumento no consumo final de eletricidade por setor, previsto até 2029.

Figura 8 - Matriz Energética Prevista para 2029



Fonte: EPE, 2020.

Figura 9- Consumo final de energia por setor



Fonte: EPE, 2020

5.3 BIODIGESTÃO AERÓBIA

5.3.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO AERÓBIA

Como descrito no início deste tópico, a escassez de estudos similares ao em desenvolvimento implicou na necessidade da busca por estudos e processos que pudessem fornecer embasamento científico para um melhor entendimento e otimização do projeto proposto. A biodigestão aeróbia é um dos assuntos que serão tratados desta forma, uma vez que seu processo é bastante semelhante ao de compostagem, a fim de que haja embasamento para os parâmetros e técnicas mais eficazes para o procedimento.

A compostagem é definida como sendo um processo biológico, aeróbio e controlado de tratamento, higienização e estabilização de resíduos orgânicos para a produção de húmus (STENTIFORD *et al.* 1985; PEREIRA NETO, 1989; PEREIRA NETO, 1996, apud BUTTENBENDER, 2004), enquanto a biodigestão aeróbia possui a mesma definição, porém, não objetiva a produção do fertilizante citado. O processo de compostagem é desenvolvido por uma população mista de microrganismos e efetuada em duas fases distintas: a 1ª onde ocorrem as reações de oxidação bioquímicas mais intensas, na sua grande maioria exotérmicas atingindo temperaturas na faixa termofílica e a 2ª de maturação onde ocorre o processo de humificação com a produção do composto propriamente dito. Na biodigestão aeróbia, somente a primeira fase fará parte do processo, uma vez que não são utilizados anelídeos para a produção de húmus.

A compostagem, se entendida como um processo biológico, torna implícita e indiscutível a necessidade de controle dos parâmetros intervenientes no processo, que tem como objetivo maximizar a degradação e propiciar a eliminação de patógenos (STENTIFORD, PEREIRA NETO, 1992, apud BUTTENBENDER, 2004), tendo a biodigestão aeróbia o mesmo objetivo.

O sucesso operacional de sistema de compostagem, com a obtenção de um produto estabilizado, isento de microrganismos patogênicos e metais pesados, assim como o da biodigestão aeróbia, deve respeitar princípios e limites de cada parâmetro relacionados às atividades biológicas. Os principais fatores que interferem na operação dos sistemas de compostagem e biodigestão aeróbia são teor de umidade, temperatura, taxa de oxigenação

(aeração), concentração de nutrientes, tamanho das partículas e pH, os quais serão medidos e monitorados durante todo o estudo.

5.3.2 FATORES QUE AFETAM O PROCESSO DE DIGESTÃO AERÓBIA

O processo de digestão aeróbia, se entendido como um processo biológico, torna implícita e indiscutível a necessidade de controle dos parâmetros intervenientes no processo, que tem como objetivo maximizar a degradação dos resíduos e propiciar a eliminação de patógenos (BUTTENBENDER, 2004).

A eficiência do processo de compostagem depende da ação e da interação de microrganismos, os quais são dependentes da ocorrência de condições favoráveis, como a de temperatura, a umidade, a aeração, o pH, dos tipos de resíduos orgânicos existentes, a relação carbono-nitrogênio e da granulometria do material (SILVA *et al.*, 2017), devendo respeitar princípios e limites de cada parâmetro relacionado à atividade biológica. Os principais fatores que podem interferir na operação do processo de digestão aeróbia são descritos a seguir.

5.3.2.1 TEOR DE UMIDADE

A decomposição da matéria orgânica depende, sobretudo, da umidade, uma vez que esta garante a atividade microbiológica. Do ponto de vista teórico, o teor de umidade ideal para propiciar a degradação dos resíduos orgânicos é 100%. Isto porque, dentre outros fatores, a própria estrutura dos microrganismos consiste em, aproximadamente, 90% de água (PEREIRA NETO, 1989, apud BUTTENBENDER, 2004).

O controle do excesso de umidade, muitas vezes negligenciado, é um fator necessário e importantíssimo para o controle dos impactos ambientais gerados pela atividade, além de garantir a boa qualidade esperada do produto final.

Elevados teores de umidade fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que ocasionará a anaerobiose e, conseqüentemente, redução da velocidade de degradação, queda da temperatura, produção de mau cheiro, atração de vetores e geração de líquidos percolados.

A umidade tende a diminuir durante o processo de compostagem, sendo necessária a irrigação toda vez que a umidade ficar abaixo ou próxima de 40% (BRITO, 2006, apud SILVA *et al.*, 2017). Isso reitera a necessidade de controle integral dos teores de umidade durante todo o decorrer do processo.

Trabalhos e pesquisas sobre compostagem de diferentes materiais e processos, concluem que o teor de umidade deve situar-se em torno de 55% (PEREIRA NETO E CUNHA, 1995; PEREIRA NETO, 1996; NEVES LELIS, 1998 apud BUTTENBENDER, 2004). A manutenção de teores nesta faixa de umidade, considerada como ótima, objetiva a maximização da velocidade de degradação associada ao fluxo de oxigênio nos poros arejados.

Já para a fase de combustão, na geração de energia a partir da biomassa, um parâmetro que deve ser rigorosamente controlado é o teor de umidade (GONÇALVES *et al.*, 2009). Isso é necessário porque, quanto menor o teor de umidade, maior será a produção de calor por unidade de massa (VALE *et al.*, 2000 apud GONÇALVES *et al.*, 2009), haja vista que a presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água e se o teor de umidade for muito variável, poderá dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema. Neste sentido, Farinhaque (1981 apud GONÇALVES *et al.*, 2009), sugere um teor de umidade de 20% para a queima, visto que os valores superiores reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape.

5.3.2.2 TEMPERATURA

A temperatura é um parâmetro que indica o equilíbrio biológico, de fácil monitoramento e diz sobre a eficiência do processo (NASCIMENTO, 2015 apud SILVA *et al.*, 2017), principalmente quanto a dinâmica das populações de microrganismos que vão surgindo durante a compostagem (OLIVEIRA, 2003 apud SILVA *et al.*, 2017).

A temperatura deve estar na ordem de 40 a 60°C no segundo ou terceiro dia do processo, caracterizando um ecossistema bem equilibrado. Caso contrário, é sinal de que algum ou alguns dos parâmetros físico-químicos (pH, relação C/N, umidade, concentração de nutrientes) não estão sendo respeitados, limitando a atividade microbiológica (FERNANDES *et al.*, 1999, apud BUTTENBENDER, 2004).

Na biodigestão aeróbia, o desenvolvimento de temperaturas termofílicas é consequência da atividade microbiológica durante o processo de oxidação da matéria orgânica. O ideal é conseguir-se manter temperaturas controladas (40 – 65°C) em toda a massa de biodigestão pelo período mais longo possível, a fim de obter maior eficiência do processo. Tão logo a fonte de carbono mais disponível tenha sido exaurida, a temperatura da pilha cai para valores baixos (35 – 38°C), indicando o fim da primeira fase do processo (Quadro 5). Em seguida, o material deve ser posto para a maturação, a fim de que continue seu processo de estabilização, permitindo que o carbono remanescente (ligando as estruturas mais resistentes como a lignina e celulosas) seja mineralizado (PEREIRA NETO, 1989 apud BUTTENBENDER, 2004).

Segundo Pereira Neto (2007 apud SILVA *et al.*, 2017), os principais fatores que influenciam o bom desenvolvimento da temperatura nos processos de biodigestão são:

- as características da matéria prima;
- o tipo de sistema utilizado;
- o controle operacional (teor de umidade, ciclo de reviramento, temperatura);
- a configuração geométrica das leiras/biodigestores.

5.3.2.3 TAXA DE OXIGENAÇÃO (AERAÇÃO)

Pela própria definição, a compostagem, assim como o processo de biodigestão proposto, é um processo aeróbio, sendo, portanto, o fornecimento de ar vital à atividade microbiana, pois os microrganismos aeróbios têm necessidade de O₂ para oxidar a matéria orgânica.

A circulação de ar na massa de resíduos é fundamental para a otimização do processo de biodigestão. A circulação de ar no interior do biodigestor depende da confecção do mesmo, da estrutura e da umidade da massa.

A aeração é o principal mecanismo capaz de promover o aumento da velocidade de oxidação do material orgânico e diminuir a emissão de odores. No sentido de favorecer a aeração durante o processo, procura-se adicionar resíduos estruturantes, que demoram mais para se decompor, sendo muito utilizados resíduos de poda vegetal e o reviramento proposto por vários estudiosos, como cita Silva *et al.* (2017), ressaltando que este deve ser realizado por

meio de revolvimentos manuais ou mecânicos, possibilitando que as camadas externas se misturem às internas, que estão em decomposição mais adiantada.

5.3.2.4 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES

Os nutrientes, principalmente carbono e nitrogênio, são fundamentais para o crescimento bacteriano. O carbono, dentre outras funções, serve como fonte básica de energia para as atividades vitais dos microrganismos. Já o nitrogênio é a fonte básica para a reprodução protoplasmática dos microrganismos. A atividade de degradação dos resíduos orgânicos na biodigestão aeróbia está diretamente relacionada à reprodução celular dos microrganismos. Na ausência de nitrogênio, não há reprodução celular dos microrganismos (PEREIRA NETO, 1996 apud BUTTENBENDER, 2004).

A eficiência dos processos aeróbios sobre os processos anaeróbios na estabilização de resíduos orgânicos vem sendo cientificamente provada ao longo dos anos. Este fato foi particularmente observado nos processos de compostagem, em que várias pesquisas, utilizando diferentes tipos de resíduos orgânicos, concluíram que o consumo máximo de oxigênio ocorre quando a temperatura da pilha está em torno de 55°C, fase em que se torna necessário encontrar um mecanismo de aeração capaz de satisfazer a tal demanda (PEREIRA NETO, 1989 apud BUTTENBENDER, 2004).

Quando a massa de compostagem apresenta maior concentração de nitrogênio com relação à concentração de carbono, há uma perda de nitrogênio por meio da volatilização da amônia, até que a relação carbono/nitrogênio seja satisfatória ao processo (PEREIRA NETO, 1996 apud BUTTENBENDER, 2004).

Na biodigestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, bem como dos resíduos orgânicos de fontes especiais (restaurantes, feiras, centrais estaduais de abastecimento - CEASA, entre outras) a relação carbono/nitrogênio já se encontra dentro da faixa ótima de projeto, isto é, 30 a 40:1.

Independente da relação C/N inicial, no final do processo de compostagem a relação C/N converge para um mesmo valor, entre 10 e 20, devido às perdas maiores de carbono que de nitrogênio, no decorrer do processo (FERNANDES *et al.*, 1999 apud BUTTENBENDER, 2004).

Fósforo e enxofre também são importantes, porém seu papel no processo é pouco conhecido. Os microrganismos têm necessidade dos mesmos micronutrientes requeridos pelas plantas: Cu, Ni, Mo, Fe, Mg, Zn e Na, que são utilizados nas reações enzimáticas, porém os detalhes deste processo são poucos conhecidos (FERNANDES, 1999 apud BUTTENBENDER, 2004).

5.3.2.5 TAMANHO DAS PARTÍCULAS

A granulometria é uma importante característica a ser considerada, pois interfere no processo de compostagem. A decomposição da matéria orgânica é um fenômeno microbiológico cuja intensidade está relacionada à superfície específica do material a ser compostado, sendo que quanto menor a granulometria das partículas, maior será a área que poderá ser atacada e digerida pelos microrganismos, acelerando o processo de decomposição (KIEHL, 1985; KEENER; DAS, 1996; FERNANDES; SILVA, 1999 apud SILVA *et al.* 2017).

Materiais triturados e peneirados, com granulometria fina e maior homogeneidade, garantem uma melhor distribuição da temperatura e menor perda de calor (NOGUEIRA *et al.*, 2011 apud SILVA *et al.*, 2017), melhoram a questão da aeração, visto que pequenas partículas alteram a densidade do material (KIEHL, 2005, apud SILVA *et al.*, 2017) e conseqüentemente, aumenta a velocidade do processo.

De modo geral o tamanho das partículas deverá estar entre 25 e 75mm, para ótimos resultados.

5.3.2.6 pH

De acordo com Fernandes *et al.* (1999 citado por BUTTENBENDER, 2004), níveis de pH muito baixos ou muito altos reduzem ou até inibem a atividade microbiana. Nos processos de biodigestão onde a relação C/N da mistura for conveniente, o pH geralmente não é um fator crítico do processo.

Quando são utilizadas misturas próximas à neutralidade, o início da compostagem é marcado por uma queda sensível de pH, variando de 5,5 a 6,0, devido à produção de ácidos orgânicos. A passagem pela fase termofílica é acompanhada por uma rápida elevação do pH,

justificada pela hidrólise das proteínas e liberação da amônia. Assim, normalmente o pH se mantém alcalino (7,5 – 9,0).

5.4 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DAS AMOSTRAS

5.4.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR (PCS e PCI)

O estudo do poder calorífico (PC) dos resíduos sólidos urbanos permite a análise da viabilidade da utilização desse material como fonte energética, conseqüentemente, afirmando o desvio desse material de aterros para plantas de geração de energia e os inúmeros benefícios pelo ganho de uma matriz energética, redução de impactos ambientais e menor requisição de áreas para construção de aterros (QUEIROZ, 2014).

O poder calorífico é um excelente parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassa (BRAND, 2010; FRIEDL et al., 2005; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984 apud PROTÁSIO *et al.* 2011), sendo definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível.

Determinar o poder calorífico e o potencial energético, por cogeração de energia, de cada fração de RSU é um trabalho complexo, pois deve ser realizada uma separação que nunca dará total representatividade pelo fato de cada uma ser formada por um número elevado de materiais com composições variáveis (QUEIROZ, 2014). Entre as técnicas do grupo das “Termoanálises” existem algumas que podem fornecer dados sobre o comportamento térmico dos RSU.

O poder calorífico indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor, quando submetido à queima, sendo extremamente importante nos processos de tratamento térmico dos resíduos. O método de medição do poder calorífico baseia-se no balanço de energia, na combustão completa da amostra, em geral com oxigênio puro, a volume constante, e na transferência de calor para a água do calorímetro. A diferença entre o poder calorífico superior (PCS) e o inferior (PCI) resulta da consideração do estado final

da mistura de gases de combustão e do vapor d'água que se forma na queima de substâncias hidrogenadas. O PCS é a soma do valor total da energia libertada na forma de calor e da energia gasta na vaporização da água presente ou formada por uma amostra sólida ou líquida. Este é calculado a partir da massa da amostra, poder calorífico do sistema e do aumento da temperatura da água no interior da bomba. Já o PCI é igual ao PCS, descontado da energia de condensação da água que estava contida na amostra (SOARES, 2011).

5.4.2 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR)

Espectroscopia, de modo geral, consiste em estudar a radiação eletromagnética transmitida, emitida ou absorvida por um determinado corpo em função do comprimento de onda ou frequência da dita radiação. Esta técnica é largamente empregada nas ciências exatas, pois permite, por exemplo, obter informações sobre a constituição química de materiais e propriedades nucleares, atômicas e moleculares da matéria (SILVEIRA, 2010). A radiação emitida ou absorvida pode ser luz visível, infravermelho, ultravioleta, raios X, micro-ondas ou todas as faixas do espectro eletromagnético. Infravermelho compreende a região entre micro-ondas e de luz visível, em termos energéticos (DONOSO, 2012).

Um espectro é o resultado da dispersão da luz de uma fonte em seus diferentes comprimentos de onda. Pode ser representado pelo espectrograma ou em forma de um gráfico de fluxo em função do comprimento de onda.

A Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) é uma técnica de análise que capta o espectro infravermelho com maior velocidade, pois ao invés de fazer a coleta dos dados variando-se a frequência da luz infravermelha monocromática, a luz IV (com todos os comprimentos de onda da faixa usada) é guiada através de um interferômetro. Ao passar pela amostra o sinal medido é o interferograma. Fazendo-se uma transformada de Fourier no sinal resulta-se em um espectro igual ao da espectroscopia IV convencional (dispersiva) (HAACK, 2010). São encontrados estudos de alguns materiais presentes em RSU com esta técnica, porém o conjunto com todas as frações ainda não tem caracterização por FT-IR.

5.4.3 TERMOGRAVIMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL (TG E DTA)

A termogravimetria (TG) é a técnica das análises térmicas que estuda as variações de massa de um material em função da temperatura ou do tempo sob uma determinada razão de aquecimento (GIOLITO, 2004).

O equipamento dessa técnica – termobalança – é formado, basicamente, por forno e balança, podendo o forno ser de diferentes tipos, definidos pelo posicionamento do porta-amostra e/ou pela faixa de temperatura em que trabalha, e sendo a balança analítica, por exigir precisão nas medições com massas relativamente pequenas (MORAIS, 2012).

A termobalança é ligada a um microcomputador equipado com um aplicativo computacional, específico desta, que define e controla os parâmetros do ensaio e imprime os resultados registrados, de massa, temperatura e tempo, pelo equipamento (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002). As curvas TG registram todas as variações sofridas pela amostra desde a temperatura ambiente, passando pelo seu aquecimento e, por fim, tendo o resfriamento (MORAIS, 2012). A termogravimetria diferencial (DTA) é uma técnica complementar da TG, pois é obtida pela primeira derivada da curva TG, sendo responsável pela medição da taxa de variação de massa (FREITAS, 2002). A curva DTA dá resultados mais bem definidos que a curva TG, tendo área diretamente proporcional à variação de massa, mostrando os picos das variações de massa em função da temperatura e permitindo determinar as temperaturas de pico, inicial de um evento (por exemplo, reação) e final deste (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002; GIOLITO, 2004; MORAIS, 2012).

5.4.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP OES)

A espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES) do inglês *inductively coupled plasma optical emission spectrometry*, é uma técnica instrumental que apresenta numerosas aplicações na caracterização de materiais (MATIAS, 2007).

A técnica de ICP OES surgiu como técnica analítica na metade dos anos 60 (GREENFIELD *et al*, 1964; WENDT; FASSEL, 1965 apud Santos, 2014). Desde então, essa

técnica tem tido grande aceitação entre os químicos analíticos, principalmente devido ao fácil manuseio dos equipamentos, capacidade de realizar análises multielementares e ao relativo baixo efeito de matriz (DUBUISSON *et al.*, 1997),

Essa técnica analítica possibilita a determinação rápida de vários elementos em diferentes faixas de concentração, baseada no espectro de emissão desses elementos (SANTOS, 2014). Como vantagens, apresenta característica multielementar e simultânea, alta precisão e exatidão, alta seletividade e sensibilidade, rapidez, baixos limites de detecção, bem como ampla faixa dinâmica linear de trabalho.

Na técnica de ICP OES são gerados espectros eletromagnéticos nas regiões do ultravioleta e visível, a partir de transições eletrônicas em átomos e íons excitados. O plasma fornece energia suficientemente alta para promover excitação da maioria dos elementos, sendo medida a intensidade da radiação emitida em comprimentos de onda específicos, correspondendo à concentração do analito de interesse (SANTOS, 2014).

A espectroscopia ótica de emissão utiliza esse fenômeno para a determinação quantitativa de elementos em uma ampla variedade de amostras (amostras ambientais, água, sangue, urina, óleos, combustíveis, solventes orgânicos, solos, cerâmicas, refratários, plantas, tecidos animais, metais e ligas, plásticos, óxidos, alimentos, bebidas entre outros) (IDE; NAKAMURA, 2002; TREVIZAN *et al.*, 2003 apud SANTOS, 2014). A amostra pode ser introduzida no plasma na forma gasosa, líquida ou suspensão.

O plasma é um gás parcialmente ionizado, produzido a partir de uma descarga em uma corrente de gás inerte (argônio), mediante aquecimento por indução em uma tocha de quartzo localizada dentro de uma bobina de indução ligada a um gerador de radiofrequência, que opera a frequência e potência apropriada (VANDECASTEELE; BLOCK, 1997 apud SANTOS, 2014).

Para quase todos os métodos de digestão existentes são utilizados reagentes químicos que podem ser ácidos diluídos e concentrados, mistura de ácidos, mistura de ácidos com outros reagentes ou sais, entre outros (SANTOS, 2014).

5.5 PELETIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

Os primeiros processos de peletização de madeira ocorreram nos Estados Unidos a partir da década de 1930. Após a grande depressão de 1929, um engenheiro da companhia madeireira Potlatch Forest Industries (Robert T. Bowling) desenvolveu um combustível barato, feito a partir da prensagem de serragens, aparas e cavacos, capaz de substituir o carvão mineral (PEREIRA, 2017). O biocombustível inventado por Bowling, chamado “pres-to-log”, parecido com o briquete atual, caracterizava-se por um alto teor de energia e uma queima lenta e limpa (PEREIRA, 2017).

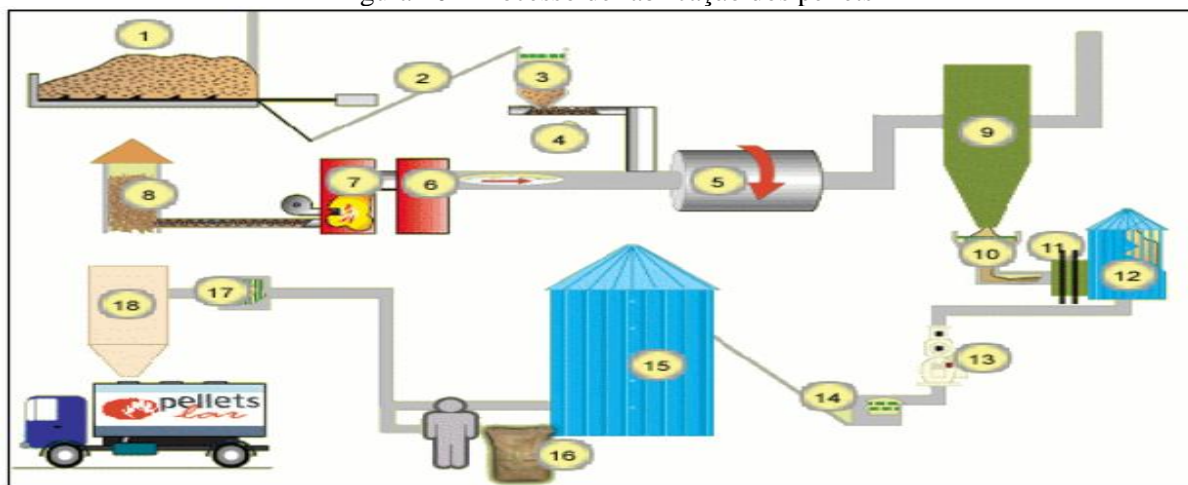
O pellet, na forma que conhecemos hoje, surgiu na década de 1970, no estado norte-americano de Washington, durante a crise do petróleo da época (1973/1974). O objetivo foi o de substituir o óleo de petróleo por um biocombustível melhorado e com alta qualidade energética. Já em 1988, um engenheiro aeronáutico da Companhia Boeing (Dr. Jerry Whitfiel), inventou o sistema de abastecimento automático dos fogões e, a partir disso, iniciou-se a expansão, no mundo inteiro, do uso do pellet na calefação residencial (PEREIRA, 2017).

Atualmente, a produção de pellet emprega várias fontes possíveis de matéria prima que vêm evoluindo em função da demanda crescente do mercado mundial, da industrialização dos processos de produção e da acumulação de capital necessário para atingir uma economia de escala. O processo produtivo se inicia com definição da biomassa, ou seja, escolha da matéria-prima, considerando, dentre outros aspectos, a sua procedência (industrial ou florestal) e a destinação final dos pellets (se para utilização na indústria ou se para uso doméstico).

Para que possam atender com adequação e segurança às necessidades dos consumidores, os pellets devem atender às especificações técnicas impostas pela certificação em vigor, o que também permite que possam ser comercializados. A certificação é um meio eficaz de garantir a confiabilidade dos produtos, contribuindo para atrair e manter novos clientes e para melhorar sua qualidade de produção, em virtude dos controles regulatórios exigidos. Auxilia, também, no balizamento de seu nível de produção e oferta, considerando os preços que o mercado pratica conforme a classificação emanada pelas normas (FARIA *et al.*, 2016).

Na Figura 10 é possível identificar as principais etapas presentes no processo de peletização.

Figura 10 - Processo de fabricação dos pellets



Fonte: FARIA *et al.*, 2016.

Detalhamento de cada etapa (Figura 10): 1 – Recepção da matéria-prima que será utilizada no processo. 2 – Por meio de um transportador de correia, o material é levado a um silo. 3 – Limpeza primária: ao passar pelo silo, realiza-se a primeira limpeza da biomassa para retirada das impurezas ou objetos estranhos que possam estar misturados à matéria-prima. 4 – Regulagem da quantidade de matéria-prima que será transportada para o secador. 5 – Ajuste da umidade da matéria-prima: o secador de tambor retira a umidade da matéria-prima, através de movimentos circulares e ação do ar quente, deixando a umidade entre 10 a 12%. Como a matéria-prima costuma apresentar um conteúdo de umidade superior a 50%, torna-se necessário, antes da sua utilização, reduzir o teor de umidade, sendo esta a etapa que consome mais energia na produção de pellets. 6 - Recuperador de cinzas da queima do combustível: fase em que ocorre a remoção da pequena quantidade de cinzas gerada pela combustão da madeira. 7 – Geração de calor para a secagem da matéria-prima: por meio da combustão de resíduos da madeira, a estufa gera o ar quente a ser utilizado no processo de secagem. 8 - Silo de material usado para combustível: local onde se armazenam os resíduos e partículas com geometrias irregulares (não são apropriados para a fabricação dos pellets) e que serão queimados na estufa de secagem. 9 - Ciclone separador por vapor: local onde ocorre o ajuste da umidade, de modo a deixar todas as partículas de madeira com o mesmo teor de umidade. O ar quente é forçado a passar pelas partículas, removendo a umidade. 10 - Realização da limpeza secundária da matéria-prima com a finalidade de garantir uma melhor qualidade aos pellets. Nessa etapa,

eventuais resíduos são retirados do processo. 11 - Redimensionamento da matéria-prima: fase na qual ocorre a homogeneização e estabilização da matéria-prima a ser compactada e que tem por finalidade garantir um produto com características uniformes (normalmente o mercado requer que o pellet possua uma superfície externa lisa e muito resistente à abrasão, brilhante e com uma boa resistência mecânica). Nessa etapa o material é triturado e reduzido a partículas com tamanho máximo 2mm, por meio do picador e triturador de partículas finas. 12 - Estoque de material homogeneizado: silo contendo material com umidade e tamanho desejados, pronto para densificação. 13 - Peletização: processo de prensagem do material e formação dos pellets. Por meio de prensas granuladoras (peletizadoras), a matéria-prima é compactada em condições de alta temperatura e pressão e cortada, formando pellets com as dimensões pré-definidas. 14 - Resfriamento e acomodação dos pellets. Essa é uma fase muito importante, porque os pellets saem com uma temperatura em torno de 95°C e devem chegar lentamente à temperatura ambiente, para não interferir nas propriedades mecânicas do produto. 15 - Silo de pellets prontos: local onde são armazenados os produtos finalizados e prontos para venda. Etapa 16 - Ensacamento por aspirador e gravidade: o produto é embalado e disponibilizado para ser distribuído nos pontos de vendas. Etapa 17 - Preparação do silo de carga: limpeza do silo e da esteira que irá transportar os pellets para o seu interior. Etapa 18 - Silo de carga: compartimento utilizado para carregar os caminhões que transportarão os pellets aos seus destinatários.

É importante ressaltar que a umidade do material é um índice primordial, quando se avaliam os resíduos como fonte de bioenergia, pois, quanto maior a quantidade de água presente no combustível, menor será o seu valor calórico (FARIA *et al.*, 2016).

Em média, as biomassas in natura apresentaram 11,2% de umidade na base seca e os pellets 10,6%. Dessa forma, constatasse que o processo de peletização da biomassa resulta em uma diminuição na umidade do combustível, uma vez que durante a densificação ocorre o atrito entre a matriz da peletizadora e a biomassa, proporcionando um aumento na temperatura e, conseqüentemente, parte da água contida no material é liberada, na forma de vapor de água (FARIA *et al.*, 2016).

A norma europeia de comercialização para pellets de biomassa DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), estabelece que os pellets do tipo A, oriundos de biomassas herbáceas, biomassas de

frutas ou de misturas de biomassas, apresentem valores menores que 12%, para umidade na base úmida e inferiores a 13,6%, para a umidade na base seca.

Os normativos estabelecem determinadas exigências (valores mínimos e máximos e demais parâmetros determinantes da qualidade de um pellet); protocolos (métodos para a determinação desses valores e parâmetros, bem como da própria organização da produção dos pellets); e especificações técnicas (PEREIRA, 2017). Conforme Verhoest e Ryckmans (2012 citado por Pereira, 2017), as normas asseguram um padrão de qualidade para esse biocombustível em conformidade com critérios técnicos e ambientais, associando um conjunto de diferentes atores envolvidos direta ou indiretamente nessa cadeia energética, sejam produtores, consumidores e fabricantes de equipamentos.

Os valores medidos e definidos pelas normas de fabricação de pellets são, na maioria, vinculados diretamente à qualidade da combustão do produto. De acordo com Alakangas (2010), apud Pereira (2017), normalmente são regulamentados os seguintes pontos: - dimensões, diâmetro e comprimento (mm); - teor de umidade (%); - teor de cinzas (%); - resistência mecânica do pellet à compressão e ao choque (% da massa); - teor de finos (% da massa); - poder calorífico inferior (PCI) expresso em megajoule por quilograma (MJ/kg), ou por kWh por tonelada (kWh/t); - massa volúmica aparente ou densidade a granel expressa (kg/m³); - teores de enxofre (S), cloro (Cl) e nitrogênio (N) (% do produto seco); - temperatura de deformação das cinzas (°C); - teores de metais pesados: arsênico (As), cobre (Cu), cromo (Cr), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) (mg/kg) (PEREIRA, 2017).

O teor de combustíveis é um índice importante para a peletização, pois indica a porcentagem de materiais com potencial de geração de calor e o teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte, que não produz calor (GONÇALVES *et al.*, 2009).

No Quadro 4 é possível analisarmos algumas características relevantes para o enquadramento aos padrões de qualidade da produção de pellets, ainda que sejam voltados para pellets produzidos a partir de resíduos oriundos de poda ou vegetais, tendo-se em vista que não foram encontradas referências que citem a peletização executada com resíduos sólidos urbanos orgânicos (RANGEL *et al.*, 2018).

Quadro 4 – Padrões de Qualidade na Produção de Pellets na Alemanha

(continua)

Critério	Unidade	DINplus
Diâmetro	Mm	$6,6 \pm 1,0$
		$8,8 \pm 1,0$
Comprimento	Mm	$3,15 \leq L \leq 40,00$
Teor de água	% em massa	$\leq 10,0$
Teor de cinzas	% peso na matéria seca	$\leq 0,7$
Força mecânica na condição de entrega	% em massa	$\geq 97,5$
Fração fina no final do processo de produção (no último ponto de carregamento anterior ao cliente)	% em massa	Embalagens até 20 kg: $\leq 0,5$
		Embalagens maiores e a granel: $\leq 1,0$
Poder calórico na condição de entrega	MJ/kg	$\geq 16,5$
	kWh/kg	$\geq 4,6$
Densidade aparente na fábrica (DA)	kg/m ³	$600 \leq DA \leq 750$
Auxiliar de pressão/aditivos	% em massa	$\leq 2,00$

Quadro 4 – Padrões de Qualidade na Produção de Pellets na Alemanha

(conclusão)

Critério	Unidade	DINplus
Nitrogênio	% peso na matéria seca	$\leq 0,30$
Enxofre	% peso na matéria seca	$\leq 0,04$
Cloro	% peso na matéria seca	$\leq 0,02$
Arsênio	mg/kg TR	$\leq 1,00$
Cádmio	mg/kg TR	$\leq 0,50$
Crômio	mg/kg TR	$\leq 10,0$
Cobre	mg/kg TR	$\leq 10,0$
Mercúrio	mg/kg TR	$\leq 0,10$
Níquel	mg/kg TR	$\leq 10,0$
Zinco	mg/kg TR	$\leq 100,0$
Temperatura de fusão da cinza	°C	≥ 1.200

Fonte: DIN CERTCO (2015 apud RANGEL *et al.*, 2018).

5.6 GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA A PARTIR DA QUEIMA DE PELLETS

Quando os resíduos não podem ser reutilizados ou reciclados devido a restrições técnicas, econômicas ou mesmo ambientais, outros métodos de tratamento e recuperação de valor devem ser considerados (UNEP, 2013 apud DAMBROS E IANDA, 2014). Dentre estas alternativas encontra-se a incineração, também chamada de processo *Waste to Energy* (WTE), tecnologia que realiza o aproveitamento energético através da queima completa dos resíduos (SOUSA; GAIA; RANGEL, 2010; EPE, 2008 apud DAMBROS E IANDA, 2014).

No entanto, no presente trabalho, a incineração se dará após o processo de biodigestão e peletização dos resíduos sólidos, ou seja, os resíduos serão manipulados e tratados

adequadamente antes do processo de queima, não sendo, portanto, os resíduos incinerados em sua forma inicial.

Dambros e Ianda (2014) colocam que, embora o tratamento térmico seja capaz de produzir mais energia elétrica do que o processamento biológico, ele também é responsável pela geração de subprodutos altamente tóxicos, como cinzas compostas por diversos poluentes e GEE – dióxido de carbono, furanos - em níveis maiores do que outras fontes, o que demanda altos investimentos em manutenção e sistemas de controle da poluição (EPE, 2008 apud DAMBROS E IANDA, 2014). Na incineração para geração de energia térmica e consequente conversão em energia elétrica dos compostos orgânicos produzidos no processo de biodigestão proposto, é relevante destacar que, devido à ausência de odor, os agentes patogênicos, muito provavelmente, foram eliminados. Porém, a afirmação de geração de subprodutos tóxicos será, ainda, analisada, devendo-se, entretanto, dar maior importância aos gases liberados na queima e possíveis formas de tratamento dos mesmos.

5.7 CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA, A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DO MOTOR STIRLING

A recuperação de calor residual (Waste Heat Recovery - WHR) é um método válido para produzir energia, adequado para atender aos requisitos de sustentabilidade, preservação do meio ambiente e redução do consumo de combustíveis fósseis (CATAPANO *et al*, 2021), no qual se enquadra o motor Stirling, utilizado neste projeto para a cogeração de energia.

O motor Stirling é um dos conversores mais simples e estudados, que representa uma opção de substituição dos motores de combustão interna. Esse tipo de máquina tem a capacidade de utilizar diversos tipos de fontes de energia podendo ser elas politicamente corretas e com custo reduzido, permitido, assim, a sua aplicação em diversos meios. O motor Stirling, foi inventado em 1816, 40 anos antes do motor a diesel (AHMADI *et al*, 2016, apud COSTA *et al*, 2021). Desenvolvido por Robert Stirling, clérigo escocês, com o objetivo de reduzir o número de acidentes e os custos de operação e manutenção em fábricas que utilizavam vapor, o motor Stirling foi, anos depois, usado em uma montanha para bombear água.

Atualmente os pesquisadores são atraídos pela facilidade de operação, construção, alta eficiência teórica, design compacto e ambiente de trabalho que não agride o meio ambiente.

O motor Stirling tem o potencial para substituir alguns motores usados atualmente por possuir ciclos termodinâmicos com tecnologia para sistemas de refrigeração e motores industriais (CHENG e YANG, 2012, apud COSTA *et al*, 2021). Esse tipo de motor opera em velocidades de 33 HZ a 67 HZ, possui eficiência compreendida entre 30% e 40%, e a temperatura do fluido de trabalho pode variar de 686° C a 800°C (SULZBACH, 2010, apud COSTA *et al*, 2021). Uma máquina Stirling é compreendida por quatro fases internamente que são em série e reversíveis: expansão isotérmica, resfriamento com o volume constante, compressão isotérmica, aquecimento com o volume constante. O princípio de funcionamento dos motores Stirling baseia-se em um ciclo termodinâmico periódico que compreende a compressão e expansão de um fluido de trabalho em um volume fechado e, assim, transformando o calor em energia mecânica. Os fluidos de trabalho frequentemente usados para o processo são gases pressurizados como nitrogênio, hélio ou também hidrogênio (SHNEIDER, 2020).

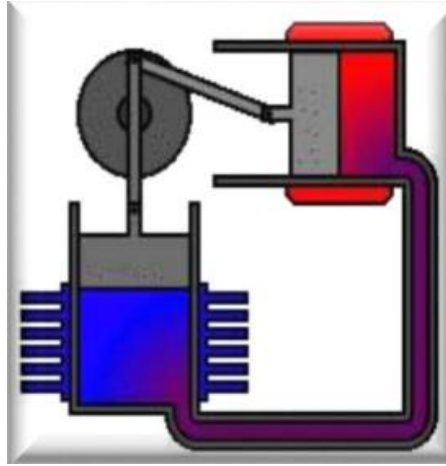
Quando comparado com um motor a diesel ou demais motores, o motor Stirling tem um princípio de funcionamento diferente, uma vez que possui uma combustão externa e gases de trabalho pressurizados no cilindro; sua potência é conseguida pelo aquecimento e resfriamento do gás (BRUNETTI, 2016, apud COSTA *et al*, 2021; BARROS, 2004). O pistão de deslocamento faz a transferência do movimento da câmara quente para a câmara fria, e da câmara fria para a câmara quente. Esse deslocamento de gás provoca uma mudança na pressão e provoca a movimentação do eixo (MOU, 2017, apud COSTA *et al*, 2021). A potência do motor Stirling depende, na maioria das vezes, da pressão e temperatura de trabalho. O desenvolvimento de um motor com ciclo Stirling deve levar sempre em consideração dois fatores para sua construção: a mecânica dos fluidos e os materiais para construção mecânica (ZARE, 2019, apud COSTA *et al*, 2021). O fluido de trabalho escolhido deve ter alta capacidade de calor específico. Gases como hélio, nitrogênio e hidrogênio são usados por possuírem temperatura e eficiência parecidas na operação, mas é necessária a avaliação da aplicação do motor e do seu design (PAUTZ, 2013, apud COSTA *et al*, 2021).

Os motores Stirling estão disponíveis principalmente na energia elétrica e variam entre 500 Wel e 50 kWel, embora teoricamente forneçam eficiências relativamente altas, pois seguem a eficiência de Carnot. Além disso, não requerem mudanças de óleo. Então, prometem baixos custos de manutenção. Devido ao aquecimento externo, são flexíveis em relação à matéria-prima de combustível e a combustão contínua pode ser realizada em comparação com a combustão descontínua. Tal configuração de combustão geralmente oferece baixo ruído e emissões de poluentes atmosféricos. As principais desvantagens são os altos níveis de temperatura para o fornecimento de calor e o fornecimento limitado no mercado de motores Stirling comprovados (SHNEIDER, 2020).

A Universidade Técnica da Dinamarca (DTU) relata as primeiras atividades em o campo dos motores Stirling movidos à biomassa. No decorrer de uma pesquisa projeto visando a aplicação de motores Stirling em pequena escala de cogeração em 1992, a DTU projetou e testou um primeiro motor de teste com um motor Stirling de pistão único de 10 kW em configuração beta. Quatro anos depois, foi introduzido o primeiro protótipo para a combinação com um forno de grelha utilizando aparas de madeira. O motor Stirling de quatro cilindros desenvolvido SM3A, trabalhando com 40 bar de hélio, tinha uma potência nominal de 40 kWel. O motor Stirling citado alcançou em testes autônomos em torno de 36 kWel, enquanto a eficiência interna foi de cerca de 20% (SHNEIDER, 2020).

Os dispositivos que possuem o ciclo Stirling são normalmente divididos em grupos, pois há diferença de modelos e geometrias. Os tipos existentes são: alfa, beta e gama. Os melhores desempenhos são encontrados na configuração alfa, como apresentado na Figura 11, mas possui desvantagens como a necessidade de vedar os dois pistões, sendo um de expansão e outro de compressão (COSTA *et al.*, 2021).

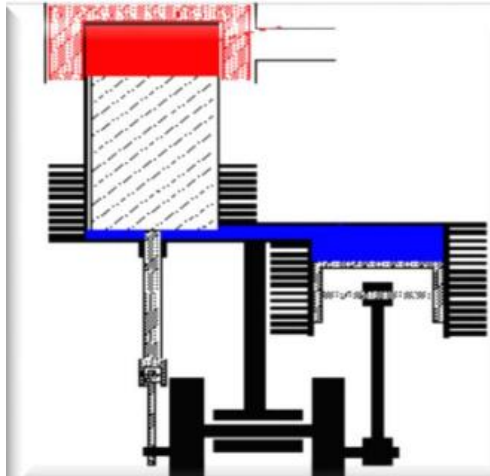
Figura 11 - Motor Stirling configuração Alfa



Fonte: HIRATA, 1995, apud Costa *et al.*, 2021.

No Stirling gama, mostrado na Figura 12, também conhecido como motor de deslocamento, o pistão de deslocamento faz a movimentação do gás de trabalho para as áreas de baixa e alta temperatura enquanto o pistão de trabalho faz a compressão e expansão do gás. Essa configuração separa o espaço de trabalho da parte quente do trocador de calor (SILVA, 2008, apud Costa *et al.*, 2021).

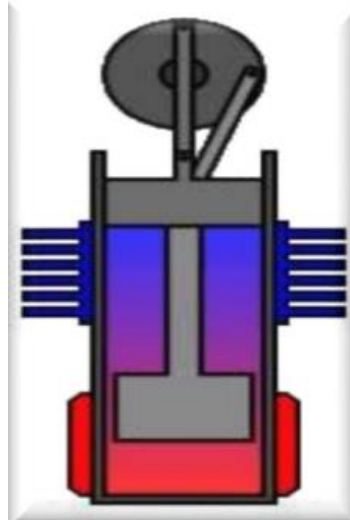
Figura 12 – Desenho em Corte de Motores Stirling de Tipo Gama



Fonte: HIRATA, 1995, apud Costa *et al.*, 2021.

Nos dispositivos do tipo beta, apresentado na Figura 13, os pistões de trabalho e deslocamento ficam alinhados em apenas um cilindro. Nesse sistema, tem-se uma taxa de compressão maior do motor, e geralmente pode-se ter uma potência maior do que o tipo gama (PAUTZ, 2013, apud Costa *et al.*, 2021).

Figura 13 – Desenho em Corte de Motores Stirling de Tipo Beta



Fonte: HIRATA, 1995, apud Costa *et al.*, 2021.

6. METODOLOGIA

6.1 ETAPAS

A metodologia foi dividida em 3 etapas, que serão descritas detalhadamente mais adiante, sendo elas:

1. Processo de realização prática da biodigestão aeróbia dos resíduos de alimentos e monitoramento dos parâmetros temperatura, umidade e pH;
2. Confeção dos pellets da biomassa de resíduos de alimentos e as análises do nível de compactação, durabilidade quanto à formação de fungos, quantidade de agregados, poder calorífico superior e inferior (PCS E PCI), perda de massa por termogravimetria

(TG e DTA), informações dos grupos funcionais por espectrofotometria infravermelho (FT-IR) e elementos químicos por ICP-OES.

3. Conversão de energia química em térmica e elétrica, através do uso de um motor Stirling. Foram realizados ensaios para determinação da potência do motor fabricado, medidas de rotação, temperatura da parede externa do trocador de calor e o consumo de biocombustível durante o experimento.

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Energia e Meio Ambiente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Inhumas, utilizando os equipamentos já existentes no mesmo. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta das atividades básicas necessárias para execução deste projeto de pesquisa:

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica, em que foram utilizadas obras científicas que subsidiaram os primeiros conhecimentos a respeito da biodigestão aeróbia, tornando possível a confrontação dos resultados obtidos com a literatura científica utilizada para obtenção dos compostos, produto da biodigestão aeróbia.

A matéria prima utilizada no projeto foi, no primeiro momento, coletada no próprio Câmpus Inhumas, utilizando as lixeiras de coleta seletiva do pátio dos pisos superior e inferior, com ajuda dos alunos que separavam os resíduos de alimentos na lixeira marrom (Figura 14) dos demais resíduos recicláveis. Devido às adversidades surgidas com a Pandemia do Covid-19, o acesso aos laboratórios do Câmpus foi interditado. Sendo assim, houve a necessidade de se adaptar os processos de coleta, desenvolvimento e análises. Uma estrutura em domicílio próprio, com o biodigestor e equipamentos de medição, foi montada e a seleção dos resíduos de alimentos passou a ser realizada somente com os produzidos na residência.

Figura 14- Lixeira Utilizada na Coleta de Amostras para o Projeto



Fonte: Própria, 2021.

Após a coleta dos resíduos, foi feita a seleção do material mais adequado para ser utilizado no processo de biodigestão aeróbia, essencialmente restos de alimentos cozidos ou assados, talos e cascas de verduras e frutas, cascas de ovo, ervas, serragem, entre outros materiais orgânicos (detalhados na Tabela 4), com exceção de excretas humanas e de outros animais, carnes e ossos. Para serem mais facilmente decompostos, foram utilizados pedaços pequenos e, algumas vezes, aplicado o processo de trituração para o preparo dessas amostras (Figura 16). O acondicionamento deste resíduo triturado foi em um biodigestor em escala laboratorial (Figura 15) acrescido de serragem sem verniz (Figura 17).

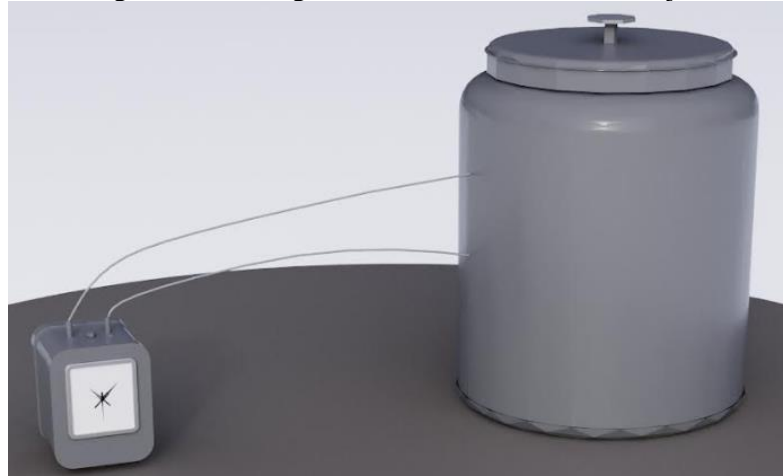
Tabela 4 - Detalhamento dos Resíduos Orgânicos de Alimentos Utilizados

AMOSTRA	RESÍDUO	MASSA (g)	MASSA TOTAL
RSOBA 1	Casca de cebola	14	350
	Casca de banana desidratada	35	
	Arroz	67	
	Batata frita	48	
	Pão integral	70	

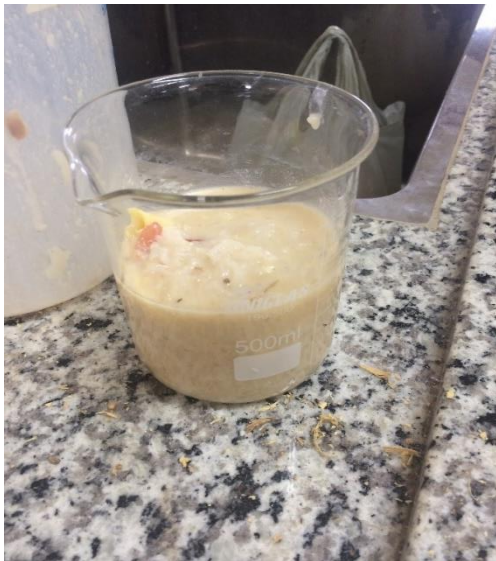
	Resíduos de suco após trituração no Mixer (limão, couve, abacaxi, espinafre, maçã verde)	96	
	Serragem	20	
RSOBA 2	Arroz		
	Casca de batata		
	Maçã	-	383
	Banana		
	Cenoura		
	Alface		
	Serragem	76,6	
RSOBA 3	Arroz	197	
	Batata frita	38	
	Alface, cenoura e repolho	31	
	Alface, tomate, couve e ½ limão	148	655
	Macarrão tipo penne, tomate cereja, milho e pimenta	191	
	Serragem	50	
RSOBA 4	Arroz, feijão, cenoura, macarrão e couve	513	
	Kiwi, cebola, pêssigo e banana	88	
	Arroz, batata, cenoura, quiabo, feijão e tilápia	326	1132
	Casca de ovo	175	
	Serragem	30	
RSOBA 4 + AGLUTINANTES	Arroz, feijão, cenoura, macarrão e couve		
	Kiwi, cebola, pêssigo e banana		
	Arroz, batata, cenoura, quiabo, feijão e tilápia	80	100
	Casca de ovo		
	Serragem		
	Gordura bovina	10	
	Gordura suína	10	
RSOBA 5	Arroz		
	Casca de cenoura	-	340
	Batata		
	Serragem	68	
RSOBA 6	Arroz	40	
	Banana	40	200
	Casca de banana	40	
	Serragem	80	

Fonte: Própria, 2021.

Figura 15 - Biodigestor Aeróbio Utilizado no Projeto



Fonte: Própria, 2021.

Figura 16 - Resíduo Orgânico “*In Natura*” Triturado

Fonte: Própria, 2021.

Figura 17 - Adição de Serragem ao Resíduo Orgânico Alimentício Triturado



Fonte: Própria, 2021.

O processo de biodigestão foi monitorado diariamente pelos parâmetros umidade (Shimatzu, MOC63u), pH (eletrodo de ponta fina para solos – Hanna, HI1292D) e temperatura (Termopar K, haste de latão). Os resultados das triplicatas de cada medida foram interpretados por análises estatísticas, possibilitando sua precisão.

Figura 18 - Resíduo Orgânico Alimentício Biodigerido



Fonte: Própria, 2021.

Após a biodigestão do resíduo orgânico alimentício (Figura 18), na segunda etapa deu-se a confecção dos pellets. À biomassa de resíduos de alimentos seca e triturada foram acrescentadas gordura animal bovina e suína, como aglutinantes auxiliares na compactação da biomassa. A prensagem da biomassa aglutinada foi executada utilizando-se uma montagem entre duas seringas de 10 mL (Figura 19).

Figura 19 - Compactação do Composto, Juntamente com os Aditivos Propostos, para Formação dos Pellets



Fonte: Própria, 2021.

Consecutivamente a essa etapa, foram realizadas as caracterizações dos biocompostos, descritas no tópico 6.2 e, a partir dos bons resultados confirmados de poder calorífico, os pellets foram utilizados para combustão em um motor Stirling, a fim de mensurar os parâmetros relacionados à energia elétrica gerada.

6.2 CARACTERIZAÇÕES

Esta etapa do estudo consistiu na caracterização da biomassa de resíduos de alimentos e foram utilizadas as técnicas para determinar o poder calorífico superior e inferior (PCS e PCI), de espectroscopia infravermelho (FT-IR), de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTA) e de ICP-OES.

A denominação adotada para nomear as amostras foi RSOBA, significando resíduo sólido orgânico biodigerido aerobiamente.

6.2.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR (PCS e PCI)

O procedimento de determinação do PCS e PCI deste experimento foi realizado em uma bomba calorimétrica de oxigênio da marca “*Parr Instruments Company*” modelo 6400. Foi inserido aproximadamente 0,5 g da amostra sólida diretamente no cadinho de níquel cromo em balança analítica com resolução de 0,0001 g; posteriormente, realizada a anotação do peso da amostra, levando o cadinho para o suporte diretamente no equipamento; com o auxílio de uma pinça, o cotton (fio de algodão), foi colocado na amostra de maneira a facilitar a ignição da mesma; logo após, foi realizada a inserção do suporte do cadinho dentro do vaso e fechamento da tampa, rosqueando até travamento total; por fim, o *start* no equipamento, aguardando até a bomba calorimétrica finalizar a combustão e imprimir os resultados. Os valores finais são gerados pelo equipamento.

6.2.2 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR)

Os espectros foram obtidos por meio da Espectroscopia Infravermelha com Transformada de Fourier com Reflectância Total Atenuada (ATR/FTIR Vertex 70; Bruker, Ettlingen, Germany) em uma faixa espectral de 400 – 4000 cm^{-1} . Dois microlitros das amostras foram inseridos diretamente no cristal e, após protocolo de secagem (jato de ar por 3 minutos), foi realizada a aquisição dos espectros em temperatura de 22 ± 2 °C e umidade controlada. A aquisição dos espectros foi realizada por meio de 64 escaneamentos com uma resolução de 4 cm^{-1} . Os espectros de referência (*background*) foram adquiridos de cada amostra para garantir a qualidade do espectro em relação a variação de CO_2 , vapores de água presentes na análise e possíveis variações na linha de base. Os dados foram normalizados pelo método do vetor, tiveram as suas linhas de base corrigidas e posteriormente realizou-se a análise da área das bandas obtidas no espectro por meio do programa Opus 6.5 (Bruker, Ettlingen, Germany). Após a análise, os dados foram salvos em formato .txt e os gráficos foram plotados no programa Origin Pro.

6.2.3 TERMOGRAVIMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA DIFERENCIAL (TG E DTA)

O termograma das amostras com e sem aglutinantes foi obtido pela técnica Termogravimétrica para a obtenção da mudança na massa da amostra (TG) e da diferença de temperatura entre a amostra e uma substância padrão (DTA), usando o equipamento Shimadzu DTG-60H. As medidas foram realizadas no intervalo de temperatura entre 25 °C e 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, fluxo de oxigênio de 100 mL/min em cadinho de platina (70 μL).

Os dados da análise térmica (TG e DTG) das amostras RSOBA 1, RSOBA 2, RSOBA 3, RSOBA 4, RSOBA 4 com aglutinantes, RSOBA 5 e RSOBA 6 foram obtidos através de um sistema de termobalança, marca SHIMADZU - DTG-60H, no intervalo de temperatura entre 25 °C e 900 °C, fluxo de oxigênio de 100 mL/min, utilizando-se um cadinho de platina (70 μL) para acondicionamento das amostras, com razão de aquecimento de 10 °C/min. Foram tomadas amostras com massa média de $5,4 \pm 0,13$ mg, após a passagem das amostras bruta em uma peneira de 200 mesh, para uma melhor reprodutibilidade e uniformidade dos resultados. Os

dados foram registrados e sofreram um tratamento matemático no software Tasy for Windows, fornecido pelo fabricante da termobalança.

6.2.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP OES)

No presente estudo, uma alíquota de 0,4764 g das amostras (RSOBA 1, RSOBA 2 e RSOBA 6) foi digerida em 50 mL solução de ácido nítrico 5% em digestor de micro-ondas, CEM MARS 6, a 200 °C por 90 minutos em vials de teflon. Após essa solução foi diluída 20 vezes em solução de ácido nítrico 5% e, posteriormente, analisada.

A análise química dos elementos Na, Mg, Al, P, K, Ti, Mn, Fe, As, Cd, Pb, Ni, Cu, Cr, Co, Sr, V e Hg foram realizadas em um espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado da marca Perkin Elmer modelo OPTIMA 8300. A calibração foi realizada utilizando-se padrões monoelementares dos analitos de interesse e o elemento ítrio (Y) como padrão interno. Os resultados são apresentados na unidade $\mu\text{g}/\text{kg}$. Devido ao alto custo da medida, apenas uma leitura por cada amostra foi realizada.

6.3 CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ELÉTRICA

A geração de energia térmica foi realizada a partir da combustão dos pellets e sua conversão em energia elétrica foi realizada a partir de testes com uso de um motor Stirling tipo gama (Figura 20). Foram realizados ensaios para determinação das principais características do motor/gerador: medidas de rotação, temperatura da parede externa do trocador de calor, tensão máxima atingida e o consumo de combustível.

Figura 20- Motor Stirling tipo Gama utilizado no Projeto.



Fonte: Própria, 2021.

Os testes foram realizados utilizando pellets confeccionados com 4 g de amostra biodigerida e 2 g de gordura animal, sendo executados em duplicata. A rotação foi medida através de um tacômetro com detecção a laser, marca Bangni e as medidas de diferença de potencial entre os terminais do gerador elétrico foram realizadas com um multímetro da marca Icell, modelo IK-1000. Para as medidas das temperaturas da parede externa do trocador de calor do motor Stirling e dos pellets, foi utilizado um termômetro laser digital infravermelho, marca OEM.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO BIODIGERIDO

O biocomposto advindo dos resíduos de alimentos atingiu o resultado organoléptico esperado, chegando ao final do processo de biodigestão aeróbia com uma média de 14 dias de monitoramento. As características físicas (Figura 22) apresentam aspecto granular, cor marrom, levemente úmido, com odor e textura de terra. Após a compactação com aglutinantes, atingiu o objetivo da peletização, tornando-se denso e uniforme (Figura 21).

Figura 21 - Pellet Compactado



Fonte: Própria, 2021.

Figura 22 - Resíduo Biodigerido



Fonte: Própria, 2021.

7.1.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR (PCS E PCI)

Os resultados mostraram maior PCS e PCI para a amostra RSOBA 1 e menor para a amostra RSOBA 4, sendo que a amostra RSOBA 4 com adição de aglutinantes teve um considerável aumento nestes valores (Tabela 5). Pode se inferir que o baixo valor apresentado na amostra RSOBA 4 foi devido à presença de casca de ovo entre os resíduos orgânicos de

alimentos que foram biodigeridos, rica em carbonatos de cálcio e magnésio que diminuem o poder calorífico da amostra.

Na Tabela 5 são apresentados os valores do poder calorífico superior e inferior da biomassa residual, após a biodigestão e, na Tabela 6, uma comparação entre os valores de diferentes compostos, que mostra o bom resultado de PCI gerado a partir da combustão dos compostos biodigeridos quando comparados a compostos já comumente utilizados no mercado como combustíveis.

Tabela 5 - Resultados de PCS e PCI das Amostras de RSOBA

AMOSTRA	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCI (MJ/Kg)
RSOBA 1	3965	3458	14,48
RSOBA 2	3381	2875	12,03
RSOBA 3	3612	3106	13,00
RSOBA 4	371	<250	<1,00
RSOBA 4 + Aglutinantes	2732	2225	9,32
RSOBA 5	2566	2059	8,62
RSOBA 6	2850	2344	9,81

Fonte: Própria, 2021.

Tabela 6 - Resultados de PCI de Diversos Materiais

(continua)

COMBUSTÍVEIS	PCI (MJ/kg)
BORRACHA	119,2
PLÁSTICOS	110,8
PAPEL/ PAPELÃO	70,9
COURO	63,8
TÊXTEIS	61,2
MADEIRA	44,3
PARAFINA	39,0
ÓLEO COMBUSTÍVEL	35,0
CARVÃO VEGETAL	31,0
CARVÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS	26,0
ORGÂNICOS	23,0
CASCAS DE COCO	17,0
LENHA SECA EM ESTUFA	17,0
CARVÃO MINERAL	15,0
RSOBA 1	14,5
ESTERCO	14,0
RSOBA 3	13,0
CASCAS DE CAFÉ	13,0
PALHA DE CASCA DE ARROZ	13,0
RSOBA 2	12,1
LENHA SECA AO AR	12,0
BAGAÇO	11,0
TURFA	10,0
RSOBA 6	9,84
RSOBA 4 + Aglutinantes	9,35

Tabela 6 – Resultados de PCI de Diversos Materiais

(conclusão)	
COMBUSTÍVEIS	PCI (MJ/kg)
RSOBA 5	8,65
CASCAS DE PALMEIRA	8,0
LENHA VERDE	7,0

Fonte: Adaptado de Teccalor (2021).

A quantidade de energia que efetivamente pode ser obtida de um determinado combustível é proporcional ao valor de seu poder calorífico inferior (PCI) (INNOCENTE, 2011). Assim, os resultados obtidos mostram que a amostra com maior potencial para ser um combustível eficiente para produção de energia é a RSOBA 1, seguida da amostra RSOBA 2.

Analisando a Tabela 7, pode-se concluir que os resultados obtidos são significativamente relevantes, uma vez que seus autores utilizaram da estimativa do potencial energético das principais frações combustíveis que compõem os resíduos sólidos dos domicílios brasileiros, com fração mais significativa de matéria orgânica (51%), seguida de recicláveis (35%) e por fim rejeitos (14%), e a matéria prima utilizada no presente estudo são, puramente, compostas de resíduos orgânicos de alimentos e agrícolas, o que corrobora com os ótimos resultados obtidos, uma vez que não utilizou-se de recicláveis que, fundamentalmente, contribuem para a otimização do PCI. Uma confirmação desta afirmação é o resultado da amostra RSOBA 1, a de maior PCI, próxima ao valor do PCI do carvão mineral, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 7 - Estimativa do Potencial Energético dos Resíduos Domiciliares no Brasil

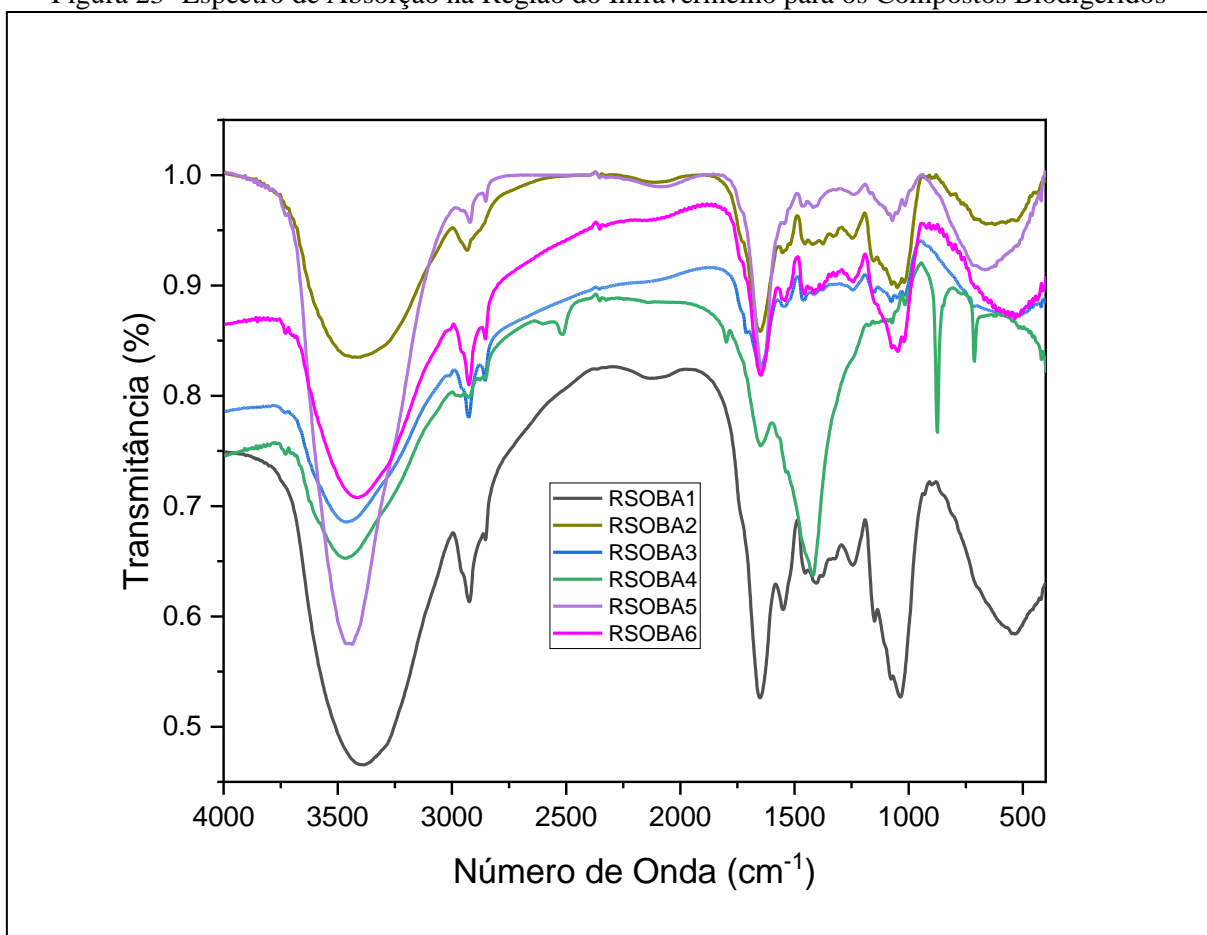
PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
PCI	MJ/Kg	6,25
QUANTIDADE COLETADA DE RSD	t/dia	196.050
EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO	%	27
ENERGIA ELÉTRICA GERADA	GWh/dia	91.9

Fonte: ALMEIDA *et al.*, 2020, p. 627.

7.1.2 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR)

A Figura 23 apresenta o espectro de infravermelho com transformada de Fourier para amostras biodigeridas. Por meio da análise deste gráfico e com base em referências que publicaram estudos de materiais por FT-IR, de acordo com tabelas que indicam os valores de transmitância característicos de cada grupo funcional, foram identificados os principais estiramentos em bandas ou picos e associado ao grupo funcional com o respectivo valor.

Figura 23- Espectro de Absorção na Região do Infravermelho para os Compostos Biodigeridos



Fonte: Própria, 2021.

Analisando o espectrograma, de todas as amostras, pôde-se perceber que os materiais apresentam, de forma geral, o seguinte comportamento de absorção na região do infravermelho: banda larga em 3400 cm^{-1} devido às vibrações de hidrogênio de grupos OH da água, alcoóis,

fenóis ou ácidos carboxílicos, bem como para hidrogênio de amidas; bandas em 2920 e 2860 cm^{-1} que podem estar relacionadas aos estiramentos C-H de grupos metílicos de ácidos graxos e vários componentes alifáticos (GRUBE e LIN, *et al.*, 2006); banda em 1650 cm^{-1} que pode ser referente às vibrações C=C de estruturas aromáticas e de grupos C=O conjugados com anel aromático de origem proteica (RAVINDRAN e SRAVANI *et al.*, 2013); banda na região de 1542 cm^{-1} característica de amidas secundárias; banda em 1420 cm^{-1} causada pela absorção de algumas estruturas alifáticas, grupos OH fenólicos, grupos COO-, vibrações de anéis aromáticos e carbonatos; bandas nas regiões de 1384 cm^{-1} e 1230 cm^{-1} que podem estar relacionadas, respectivamente, à formação de nitrato e amida III (RAVINDRAN, SRAVANI, *et al.*, 2013); e uma banda de absorção em 1035 cm^{-1} que é atribuída aos grupos silicatos, para éteres aromáticos e finalmente para estiramento C-O de polissacarídeos. Essas bandas, também foram encontradas em outros estudos do comportamento de resíduos sólidos orgânicos em processos de compostagem (SMIDT e MEISSL, 2007; BADDI, ALBURQUERQUE, *et al.*, 2004; KHAN e CLARK, *et al.*, 2016 apud SACCO, 2008).

A banda na região de 1384 cm^{-1} é referente ao grupo nitrato que aparece no final do processo, quando o material é bem compostado, indicando que o nitrogênio presente no material foi oxidado (GRUBE e LIN *et al.*, 2006). No nosso caso, específico, a presença dessa banda indica que o composto orgânico atingiu seu estágio de biodigestão aeróbia, condizendo com os aspectos organolépticos observados.

7.1.3 TERMOGRAVIMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA DERIVADA (TG E DTA)

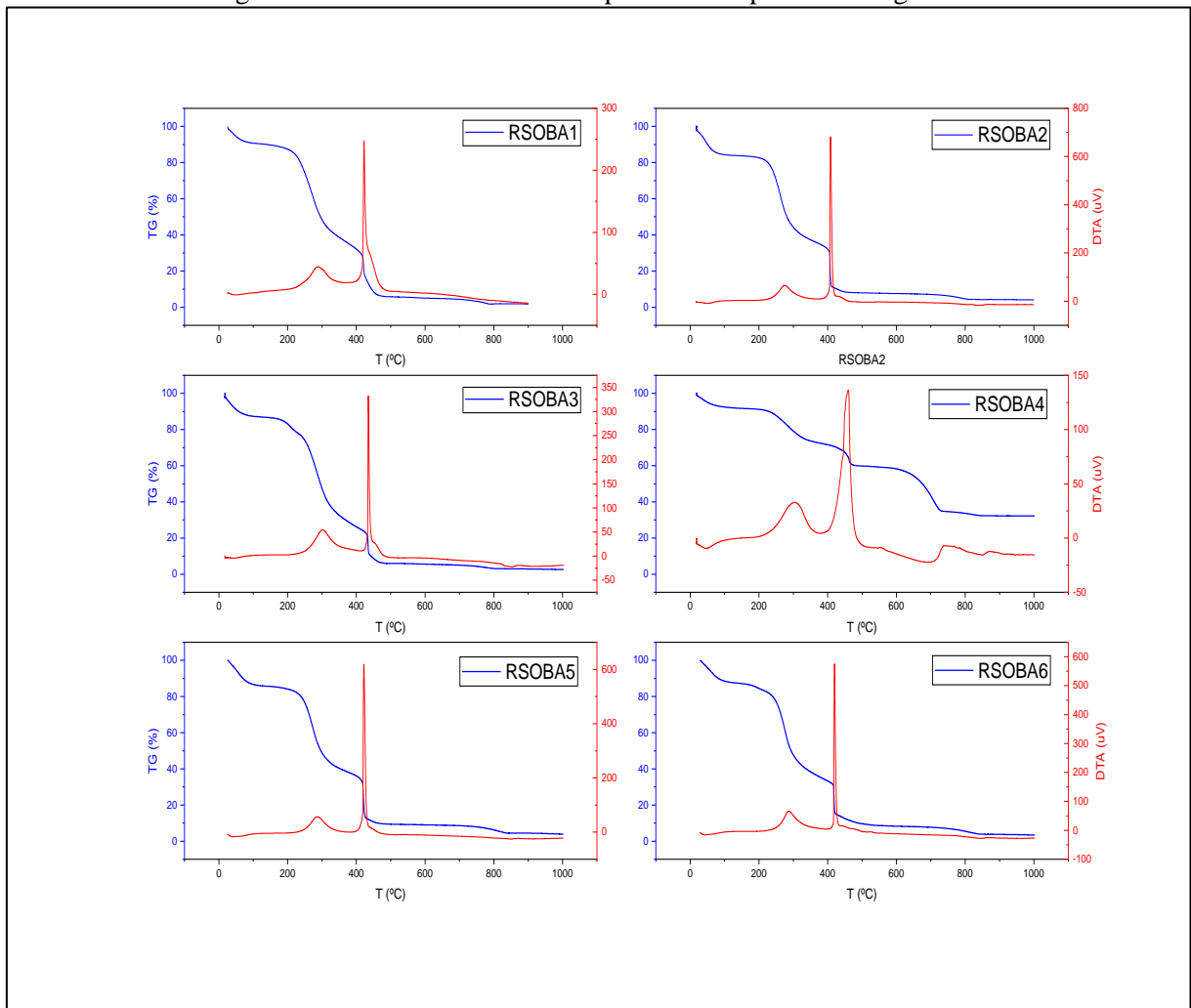
Com objetivo de conhecer o comportamento do composto biodigerido, em relação à variação de temperatura, foram realizadas as análises de TG e DTA para todas as amostras biodigeridas.

Pode se observar pelos gráficos da Figura 24 que o comportamento dinâmico, em relação ao aumento da temperatura, foi semelhante para todas as amostras biodigeridas, com exceção apenas da amostra RSOBA4, a qual merece um estudo mais detalhado posteriormente.

Pela análise termogravimétrica foi possível confirmar, para todas as amostras, uma perda total de massa acima de 95% entre a temperatura ambiente (25 °C) e a temperatura final

de realização do experimento (900 °C). Pôde-se identificar, também, por meio da análise dessas curvas, três faixas distintas de decomposição dos compostos biodigeridos. A primeira faixa, entre a temperatura ambiente (25 °C) e até aproximadamente 100 °C, está relacionada à remoção de água adsorvida na superfície externa do material, resultando em aproximadamente 10% de perda de massa dos compostos.

Figura 24 – Curvas de TG e DTA para os Compostos Biodigeridos



Fonte: Própria, 2021.

Entre 100 °C e aproximadamente 190 °C os compostos se mantêm praticamente estáveis em relação à variação de temperatura, semelhante ao resultado encontrado por Garcia, Caraschi e Ventorim (2016) no estudo de decomposição térmica de pellets de madeira. Esta estabilidade

é um importante indício para garantir a qualidade dos pellets constituídos pelas amostras biodigeridas aerobiamente.

A segunda faixa de decomposição, entre 190 °C e 350 °C, com pico exotérmico na região de 288 °C para a curva de DTA, representando aproximadamente 50% de perda de massa neste intervalo de aquecimento. Este evento pode estar relacionado aos fenômenos atribuídos à decomposição de carboidratos ou mesmo de estruturas alifáticas presentes nos resíduos sólidos, como as cadeias laterais da molécula de lignina, por exemplo (SACCO, 2008).

Para a terceira faixa que se encontra entre 350 °C e 450 °C, apresentando pico exotérmico na faixa de 422 °C, existe uma perda de massa de aproximadamente 30%, referente à decomposição de estruturas aromáticas, bem como esqueleto aromático de macromoléculas de lignina (SACCO, 2008). Acima desta temperatura ocorre a decomposição dos carbonatos, contidos em restos de vegetais (SMIDT e LECHNER, 2005).

Outra observação muito importante, ao analisar os resultados das análises termogravimétricas, é que praticamente todo o material se decompõe até próximo da temperatura de 450 °C, semelhante ao comportamento de pellets de madeira estudados por outros autores (WANG, RONG, *et al.*, 2021)(GARCIA, CARASCHI e VENTORIM, 2016) e diferente do comportamento de materiais extraídos de compostagem de resíduos sólidos diversos (QUEIROZ, 2014). Segundo a literatura, a maior parte desses resíduos é formada por componentes inorgânicos como Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e SiO₂ que, ao entrarem em combustão direta, formam as cinzas (FUKUI, MOMEN, *et al.*, 2020).

As cinzas são componentes indesejáveis nos processos industriais e, principalmente, no uso doméstico da biomassa (aquecimento residencial), porque quanto mais alto o seu teor, menor o poder calorífico do combustível, resultando em maior quantidade de resíduo para ser removido no final da queima (CARVALHO, 2019; GARCIA, 2010). Além disso, o contato desse resíduo com partes metálicas favorece o aparecimento da corrosão, diminuindo a vida útil do equipamento.

Muitos estudos têm apontado as cinzas como componente que pode auxiliar na predição do PCS, relacionando o alto teor das mesmas com baixa capacidade energética do material (HANSTED, CACURO, *et al.*, 2018), (SHEN, ZHU, *et al.*, 2010). A existência de altos teores

de cinzas é um parâmetro que pode determinar a exclusão da matéria-prima para produção de pellets (CARVALHO, 2019).

7.1.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES)

A análise dos elementos por ICP OES na amostra RSOBA 1 (Tabela 8) apresentou altos teores de cobre (Cu) e potássio (K), e teores consideráveis de sódio (Na), fósforo (P), cádmio (Cd) e vanádio (V). A presença de todos os elementos, excetuando o cádmio (Cd), é comum aos resíduos orgânicos de alimentos, uma vez que estes encontram-se presentes em praticamente todos os alimentos rotineiramente consumidos pela população brasileira.

A presença de cádmio (Cd), possivelmente, é característica da utilização da serragem durante o processo de biodigestão, uma vez que este é comumente encontrado em resíduos de madeiras.

Tabela 8 - Análise Química Elementar Obtida por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

ELEMENTO	LQ	RSOBA_1 microg/kg	RSOBA_02 microg/kg	RSOBA_06 microg/kg
Na	0,286	3,91	6602,90	7126,94
Mg	0,143	0,62	0,49	0,44
Al	0,286	0,38	1,31	0,74
P	0,572	1,43	1,01	0,60
K	1,429	8,38	8127,38	3,84
Ti	0,095	<LQ	<LQ	<LQ
Mn	0,095	<LQ	<LQ	<LQ
Fe	0,048	0,143	<LQ	<LQ
As	0,012	0,012	<LQ	838,94
Cd	0,00048	2816,48	0,18	0,18
Pb	0,0038	<LQ	870,86	1739,34
Ni	0,0019	<LQ	0,25	0,047
Cu	0,035	50078,69	2093,78	2043,28
Cr	0,00048	700,31	488,31	0,32
Co	0,00048	<LQ	0,028	0,013
Sr	0,00048	<LQ	8839,13	4934,07
Hg	0,00048	<LQ	<LQ	<LQ
V	0,0038	3883,14	<LQ	<LQ

Fonte: Própria, 2021.

A análise dos elementos por ICP OES nas amostras RSOBA 2 e 6 (Tabela 8) também apresentou altos teores de cobre (Cu) e potássio (K), e teores consideráveis de sódio (Na) e

cádmio (Cd). A presença de todos estes elementos, bem como descrito na amostra RSOBA 1, excetuando o chumbo (Pb) e o estrôncio (Sr), é comum aos resíduos orgânicos de alimentos.

A presença de chumbo (Pb) pode ser justificada pela presença de serragem, ou até mesmo pela presença de chumbo no maquinário e graxa utilizados para o corte da madeira.

O elemento arsênio (As) foi encontrado em teor relativamente alto na amostra RSOBA 6, uma vez que, por ser um elemento tóxico, não deveria estar presente em alimentos. A utilização de serragem em uma proporção de 2 para 3 nesta amostra pode justificar esse fato, por ter sido uma quantidade relativamente alta. O As, de acordo com Junior (2014), é um elemento presente no CCA (arseniato de cobre cromatado) que é um dos preservativos de madeira mais utilizados e regulamentados no Brasil e, conseqüentemente, muito encontrado em análises de amostras de serragem de madeira tratada.

Outra justificativa, de acordo com SOUZA *et al.* (2015), é o fato dessa substância estar se infiltrando na nossa cadeia alimentar devido à poluição difusa, que eleva os níveis do As nos alimentos, o que representa um sério risco à saúde. A exposição ao As vem sendo associada a muitas desordens cardiovasculares, dentre elas hipertensão e arritmias, disfunção vascular endotelial, indução do estresse oxidativo, indução da arterosclerose e regulação de alguns intermediadores químicos celulares como fator de necrose tumoral alfa, interleucina-1 e fator de crescimento endotelial que induz doenças cardiovasculares.

compostos de arsênio são facilmente absorvidos, tanto por via oral quanto pela inalação. Recentemente, estudos detectaram altos níveis de arsênio no arroz, alimento este demasiadamente consumido mundialmente. O As^{3+} , espécie mais tóxica encontrada em alimentos, tem alta solubilidade em água, o que aumenta sua mobilidade no solo, sendo eficientemente absorvido pelas raízes, chegando aos grãos e, portanto, introduzido na alimentação (SOUZA *et al.*, 2015), o que pode justificar a presença de As nesta amostra RSOBA 6.

7.2 CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ELÉTRICA

Os testes realizados a partir da combustão de duas amostras de pellets, confeccionados com 4 g de amostra biodigerida e 2 g de gordura animal, mostraram-se muito satisfatórios levando ao acionamento de uma lâmpada de LED com potência 5 W (Figura 25).

Figura 25- Lâmpada de LED sendo acionada por motor/gerador Stirling tipo gama utilizado no projeto.



Fonte: Própria, 2021.

Através da combustão dos pellets confeccionados o motor Stirling utilizado, conseguiu atingir uma rotação máxima de 836 rpm, sendo suficientes para resultar em uma diferença de potencial elétrico (ddp) de 4,35 V de corrente direta entre os terminais do gerador (Figura 26).

Figura 26- Tensão elétrica atingida entre os terminais do gerador.



Fonte: Própria, 2021.

Foram medidas as temperaturas da parede externa do trocador de calor do motor Stirling e dos pellets, durante a combustão. O trocador de calor atingiu a temperatura de 116 °C, e os pellets a máxima de 440 °C durante o processo, finalizando com uma temperatura de 262 °C. O tempo médio de combustão foi de 8,06 minutos, levando ao consumo médio de combustível de 92,48%, sendo os 7,51% restantes de cinzas.

Com os parâmetros medidos não foi possível calcular o rendimento do motor, tendo em vista que ainda seria necessário a medida de torque para obtenção do trabalho mecânico. Dessa forma, ainda não foi possível realizar uma discussão comparativa desses resultados com outros estudos utilizando motores Stirling acionados por biomassa. Por outro lado, é possível perceber que a conversão de energia térmica em elétrica com o uso de pellets biodigeridos aerobiamente pode ser uma ótima estratégia para solução, pelo menos de forma pontual, de problemas atuais com a geração e distribuição de energia elétrica no nosso país.

7.3 APLICAÇÕES DA PESQUISA

A primeira fase da pesquisa, constante na geração de energia térmica a partir dos resíduos sólidos urbanos, foi apresentada, e inserida nos Anais, no VIII Encontro de Sustentabilidade em Projeto – ENSUS 2020, da Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, com o título: O Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Orgânicos para Geração de Energia Térmica a partir da Biodigestão Aeróbia (KURAMOTO *et al.*, 2020). O trabalho também foi, posteriormente, publicado como o capítulo 20, página 245, do livro “Sustentabilidade: a superação de desafios para a manutenção do sistema” (KURAMOTO *et al.*, 2020).

Recentemente, o artigo intitulado: “O Potencial Energético de Resíduos Sólidos Orgânicos a partir da Biodigestão Aeróbia” foi submetido à Revista Brasileira de Ciências Ambientais (CIAMB) – Brazilian Journal of Environmental Sciences – revista interdisciplinar que se preocupa com aspectos ecológicos, ambientais, territoriais, sociais, culturais, econômicos e políticos da sustentabilidade e das ciências ambientais, e é editada pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), estando em fase de avaliação.

Por fim, está sendo finalizado, juntamente ao Cite IFG, o pedido de registro de patente de invenção (PI) da produção dos pellets de resíduos sólidos urbanos orgânicos para submissão no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), por ser um invento com aplicação industrial nova, com conceitos completamente inovadores.

8. SUGESTÕES DE ATIVIDADES FUTURAS

É válido enfatizar a importância da continuação de testes com pellets produzidos a partir de outros tipos de biomassa, bem como dar prosseguimento às caracterizações laboratoriais dos pellets já produzidos, uma vez que a análise dos gases oriundos da combustão dos mesmos é de suma importância para a garantia da não toxicidade deste processo, e também devido ao fato da importância de se avaliar quais os melhores tipos de resíduos para a confecção e compactação dos pellets e geração de energia. A otimização do processo de confecção é, também, desejada, para que o período de biodigestão seja minimizado ao máximo, garantindo que uma maior quantidade de resíduos seja biodigerida. Sugere-se, também, mais testes de conversão de energia térmica em energia elétrica para validar os bons resultados de rotação do motor e potência da energia gerada.

9. CONCLUSÃO

A regularização da destinação final de resíduos é uma imposição legal, sob pena de aplicações cabíveis dentro da legislação ambiental. Somado a isso existe a necessidade de planejamento da substituição de unidades para destinação adequada ao fim da vida útil dos resíduos sólidos.

A partir disso, pode-se afirmar, através dos resultados, que parte dos objetivos propostos neste trabalho foi alcançada, uma vez que foi possível realizar a decomposição dos resíduos orgânicos de alimentos de forma adequada, segura e com um bom produto final. O biocomposto atingiu o resultado organoléptico esperado, chegando ao final do processo de biodigestão aeróbia com uma média de 14 dias de monitoramento, confirmando uma otimização considerável do processo em relação à compostagem, que leva, em média 120 dias para ser concluída. Foram atingidos, também, bons níveis de poder calorífico inferior (PCI), confirmando a expectativa inicial para a geração de energia térmica.

Por fim, o acionamento da lâmpada, a partir da conversão da energia química em térmica/elétrica, confirmou a eficácia da técnica proposta, indicando a possibilidade de atingir, a partir deste projeto, a geração de energia elétrica com o uso de pellets biodigeridos aerobiamente, minimizando, assim, as várias adversidades e prejuízos que a poluição e o não aproveitamento racional dessas fontes em potencial nos tem causado.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em dezembro de 2020.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em setembro de 2018.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/ 2019**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em junho de 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília, 2002.

ALBUQUERQUE, I. R. ESTEVES, I. M. Relatório SEEG. **Emissões do Setor de Resíduos – Documento de Análise 2018**. ICLEI – Governos locais pela sustentabilidade. Observatório do Clima. São Paulo, 2018.

ALMEIDA, R. SARMENTO, E. B. RODRIGUES, D. S. TONELI, J. T. C. L. ANTONIO, G. C. Estudo do potencial energético dos resíduos sólidos domiciliares brasileiros a partir da sua composição gravimétrica. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. v. 9, n. esp., p. 616-630. Florianópolis, 2020.

BADDI, G. A. ALBUQUERQUE, J. A. GONZAVEZ, J. CEGARRA, J. HAFIDI, M. Chemical and spectroscopic analyses of organic matter transformation during composting of olive Mill wastes. v. 54. **International Biodeterioration & Biodegradation**. 2004.

BARROS, R. W. **Avaliação teórica e experimental do motor Stirling modelo solo 161 operando com diferentes combustíveis**. Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Itajubá, 2005.

BARROS, R. W. ARADAS, M. E. C. COBAS, V. R. M. LORA, E. E. S. **Uso de biomassa como combustível para acionamento de motores Stirling**. Anais 5º Encontro de Energia no Meio Rural. Itajubá, 2004.

BEATO, L. B. **Uso de motores Stirling para recuperação de energia em propulsores navais: avaliação da sustentabilidade**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2018.

BENEVOLO, L. **História da cidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 2015.

BILOTTA, P. ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 21. n. 2. p. 275 - 282. Rio de Janeiro, 2016.

BORGES, H. D. **Avaliação da viabilidade de recuperação e uso de biogás em uma estação de tratamento de esgoto**. Dissertação para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: setembro, 2020.

_____. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

_____. **Resolução 430, de 13 de maio de 2011**. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.labbb.com.br/wp-content/pdf/Resolucao_CONAMA_430_11.pdf>. Acesso em: junho de 2020.

BREDA, C. C. TRABALLI, R. C. MAKIYA, I. K. **Bases ecossustentáveis para o desenvolvimento urbano: potencial energético a partir de lodo de esgoto e resíduos sólidos**. III Encontro de Sustentabilidade em Projeto do Vale do Itajaí. Itajaí, 2009.

BUTTENBENDER, S. E. Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Angelina/ SC. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2004.

CATAPANO, F. PEROZZIELLO.C. VAGLIECO, B. M. Heat transfer of a Stirling engine for waste heat recovery application from internal combustion engines. **Applied Thermal Engineering**. v. 198. 2021, 117492, ISSN 1359-4311.

CEMPRE. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado/** Coordenação geral André Vilhena. Cempre. Edição 4. São Paulo, 2018.

_____. **Review 2019**. Coordenação geral André Vilhena. São Paulo, 2019.

CHENG, H. & HU, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: current and future practices in China. **Bioresource Technology Journal**, v. 101. n. 11. p. 3816-3824. ISSN: 0960-8524.

COPPE - INSTITUTO ALBERTO LUÍS COIMBRA. Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil. Sumário Executivo do Relatório. Rio de Janeiro. Coppe/ UFRJ: Nova Brasileira. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em:< <http://www.climaenergia.ppe.ufrj.br/>>. Acesso em: agosto de 2020.

COSTA, J. P. S. SILVA, J. V. M. PIMENTEL, M.S. MALVEIRA, B. M. SILVA, V. S. P. VIEIRA, A. V. N. CRUZ, A. F. S. LIMA, G. H. G. Desenvolvimento de uma bancada didática de motor Stirling – Development of a Stirling motor stand. **Brazilian Journal of Development**. v. 7. n. 1. Curitiba, 2021.

DRUMOND, C. C. PARISE, J. A. R. **Simulação numérica de um motor Stirling rotativo**. Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2017.

DUBUISSON, C. POUSSEL, E. MERMET, J.M. Comparison of axially and radially viewed inductively coupled plasma atomic emission spectrometry in terms of signal- to-background ratio and matrix effects. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 12, p. 281, 1997.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2017.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil) - EPE. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018**/ Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2019. Brazilian Energy Balance 2019 Year 2018/ Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2019.

FADE – Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Pesquisa Científica BNDES FEP N° 02/2010. Pernambuco, 2013.

FARIA, W. S. PROTÁSIO, T. P. TRUGILHO, P. F. PEREIRA, B. L. C. CARNEIRO, A. C. O. ANDRADE, C. R. JUNIOR, J. B. G. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Revista Coffee Science**. v. 11, n. 1. Lavras, 2016.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais/ Fundação Estadual do Meio Ambiente**. Belo Horizonte, 2012.

FERNANDES, N. A. Os reflexos da modernidade na geração de resíduos: uma análise do fenômeno da globalização à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos. In: **Resíduos sólidos e políticas públicas [Recurso eletrônico on-line]: diálogos entre universidade, poder público e empresa**/ organizadores José Rubens Morato Leite, Germana Parente Neiva Belchior. Editora Insular. Florianópolis, 2014.

FLORES, G. VIEIRA, R. S. Expectativas da governança socioambiental na política brasileira de resíduos sólidos: reflexões sobre a sustentabilidade e as consequências da

globalização na geração de resíduos. **Revista do Instituto do Direito Brasileiro**. n. 2, ano 1. Faculdade de Direito da Universidade de Lisboa. Lisboa, 2012.

FUKUI, K. *et al.* Utilization of woody biomass combustion fly ash as a filler in the glue used for plywood production. **Advanced Powder Technology**, v. 31, p. 4482-4490, 2020.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais Compósitos Lignocelulósicos. Guaratinguetá 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C. A expansão do mercado de Pellets de Madeira. **Revista da Madeira**. v. 23, n. 131, p. 56-59, 2012. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: setembro, 2020.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição Térmica de Pellets de Madeira por TGA. **HOLOS**, v. 1, p. 327-339, 2016.

GODECKE, Marcos Vinicius. **Estudo das alternativas de valorização econômica para a sustentabilidade da gestão de resíduos urbanos no Brasil**. 2010. 186 f. Dissertação (Mestrado em Economia do Desenvolvimento) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GOMES, S. NETO, P. H. W. SILVA, D. A. ANTUNES, S. R. M. ROCHA, C. H. Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa – Paraná. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 22. n. 6. Rio de Janeiro, 2017.

GOMES, Y. F. L. **Avaliação do impacto das técnicas de gestão na redução da disposição irregular de resíduos sólidos no município de São Gonçalo do Amarante/ RN**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Tecnologia Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental. Natal, 2019.

GONÇALVES, J. E. SARTORI, M. M. P. LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.5. Campina Grande, 2009.

GRUBE, M. LIN, J. G. LEE, P. H. KOKOREVICH, S. Avaliação de composto à base de lodo de esgoto por espectroscopia FT-IR. **Geoderma**. v. 130. Edições 3-4, 2006.

HANSTED, A. L. S. *et al.* Use of a lignocellulosic residue as solid fuel: The effect of ash content in the energy potential. **Industrial Crops and Products**, v. 116, p. 209-214, 2018.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Indicadores sociais municipais – Uma análise dos resultados do universo do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro, 2011.

_____ **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2018**. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas de Populacao/Estimativas 2018/estimativa TCU 2018 20181108.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_TCU_2018_20181108.pdf)>. Acesso em setembro de 2020.

_____ **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) : síntese de indicadores 2015 / IBGE**, Coordenação de Trabalho e Rendimento. - Rio de Janeiro : IBGE, 2016. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas de Populacao/Estimativas 2018/estimativa TCU 2018 20181108.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_TCU_2018_20181108.pdf)>. Acesso em: set. de 2020.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade; Programa Cidades Sustentáveis: Guia de Ação Local pelo Clima. São Paulo, 2016.

INNOCENTE, A. F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar – estudo de caso**. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura). São Paulo, 2011.

JATOBÁ, S. U. S. **Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social**. Boletim regional, urbano e ambiental. IPEA. Brasília, 2011.

JUNIOR, S. M. P. **Determinação de cobre, cromo e arsênio em madeira preservada (*Eucalyptus SP.*) pelas espectrometrias de fluorescência de raios X**. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

KHAN, N. *et al.* Physical and chemical properties of biochars co-composted with biowastes and incubated with a chicken litter compost. **Chemosphere**, v. 142, p. 14-23, 2016. ISSN: 0045-6535. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653515005287>>. Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors.

KURAMOTO, L. L. BORGES, E. C. L. SÁ, F. P. SILVA, M. A. L. A. **O Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Orgânicos para Geração de Energia Térmica a partir da Biodigestão Aeróbia**. Anais do VIII Encontro de Sustentabilidade em Projeto – ENSUS 2020. p. 185 a 196. Santa Catarina, 2020.

KURAMOTO, L. L. *et al.* in SILVA, M. E. D. **Sustentabilidade [recurso eletrônico]: a**

superação de desafios para a manutenção do sistema / Organizadora Maria Elanny Damasceno Silva. Editora Atena. Paraná, 2020.

LEITE, J. R. M. BELCHIOR, G. P. N. **Dano ambiental na sociedade de risco: uma visão introdutória.** In: LEITE, José Rubens Morato (org.) Dano Ambiental na Sociedade de Risco. Editora Saraiva. São Paulo, 2012.

MAHLER, C. F. **Lixo urbano - o que você precisa saber sobre o assunto.** 1ª edição. Editora Revan. Rio de Janeiro, 2012.

MARICATO, E. **As idéias fora do lugar e o lugar fora das idéias.** In: ARANTES, O. VAINER, C. MARICATO, E. A cidade do pensamento único: desmanchando consensos. Editora Voze. Petrópolis, 2013.

MATIAS, T.M. **Análise química de materiais cerâmicos: digestão por fusão e medidas por ICP OES com configuração axial.** 2007. 110 f. Tese (Doutorado em Ciências – Química Analítica) – Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

MME - Brasil. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética Balanço Energético Nacional 2006: Ano base 2005 Relatório final/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2006.

ONOFRE, F. L. Estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

ONU BR. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** 2013. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>>. Acesso em: outubro de 2020.

PAULA, P. H. M. **Determinação de metais por ICP-MS e ICP OES em diferentes matrizes ambientais.** Relatórios do Departamento de Química da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

PECORA, VANESSA. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso.** Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Energia (PIPGE), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PEREIRA, S. A. **Uso de pellets de madeira para fins energéticos: pesquisa de mercado.** V Prêmio Serviço Florestal Brasileiro em Estudos de Economia e Mercado Florestal. Graduando. Brasília, 2017.

PEREIRA, S. S. CURI, R. C. CURI, W. F. Uso de indicadores na gestão dos resíduos sólidos urbanos: parte II - uma proposta metodológica de construção e análise para municípios e regiões: aplicação do modelo. **Revista Sanitária e Ambiental**. vol. 3. n. 3. Rio de Janeiro, 2018.

PROTÁSIO, T. P. BUFALINO, L. TONOLI. G. H. D. COUTO, A. M. TRUGILHO, P. F. JUNIOR, M. G. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Brazilian Journal of Forestry Research**. v. 31. n. 66. 2011.

RANGEL, I. C. SILVA, F. F. SOUZA, C. L. M. ERTHAL, M. GRAVINA, G. A. SHIMOYA, A. Normas e padrões para produção de biomassa compactada no mundo: em breve o Brasil terá a sua? **Revista eletrônica Acta Biomedica Brasiliensia**. v. 9. n. 1. 2018. REN 21. **Renewables 2012 Global Status Report – Renewable energy policy network for the 21st Century**. Paris, 2012.

RAVINDRAN, B. SRAVANI, R. MANDAL, A. B. *et al.* Evidência instrumental de biodegradação de resíduos de curtume durante o processo de vermicompostagem com *Eudrilus eugeniae*. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. v. 111. 2013.

ROSA, A. P. LOBATO, L. C. S. BORGES, J. M. MELO, G. C. B. CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 21. n. 2. Rio de Janeiro, 2016.

SACCO, A. P. **Caracterização e estudo do comportamento térmico de ligninas extraídas de bagaço de cana-de-açúcar e dos resíduos sólidos urbanos**. Tese apresentada ao Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos à obtenção do título de Doutor em Química. Araraquara, 2008.

SANTOS, H. C. **Estudo da matéria orgânica e composição elementar de solos arenosos de regiões próximas a São Gabriel da Cachoeira no Amazonas**. Tese (Doutorado em Ciências – Química Analítica) – Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2014.

SCHNEIDER, T. MÜLLER, D. KARL, J. A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 134. 2020, 110288, ISSN 1364-0321.

SHEN, J. *et al.* The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 983-987, 2010.

SILVA, H. J. Produção de Biofertilizantes e Aproveitamento Energético do Biogás Proveniente da Digestão Anaeróbia do Lodo Produzido em ETE: Uma Avaliação do Potencial da Cidade de Cristina (MG). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. v. 4, p. 87-110. Itajubá, 2015.

SILVA, R. L. M. DUARTE, J. V. N. ANSELMO, M. G. V. **Fatores intervenientes no processo de compostagem de resíduos sólidos orgânicos.** Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – Congestas, v. 5. João Pessoa, 2017.

SILVA, R. J. SOEIRO, E. C. **Viabilidade da utilização do biogás como fonte alternativa de energia.** Revista eletrônica de petróleo e gás. Ano 2. n. 1. 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unp.br/index.php/runpetro>>. Acesso em: junho de 2018.

SMIDT, E.; LECHNER, P. Study on the degradation and stabilization of organic matter in waste by means of thermal analyses. **Thermochimica Acta**, v. 438, p. 22-28, 2005.

SMIDT, E. MEISSL, K. The Applicability of Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy in Waste Management. v. 27. **Waste Management**, 2007.

SOARES, E. L. S. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

SOUZA, J. M. O. CARNEIRO, M. F. H. PAULELLIA, A. C. C. GROTTTOB, D. JUNIOR, A. M. M. JUNIOR, F. B. BATISTA, B. L. Arsênio e arroz: toxicidade, metabolismo e segurança alimentar. **Revista Química Nova**. v. 38. n. 1. São Paulo, 2015.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil.** Estudos Avançados. v. 26. n. 74. São Paulo, 2012.

WANG, T. *et al.* TG- MS study on in-situ sulfur retention during the co-combustion of reclaimed asphalt binder and wood sawdust. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 123911, 2021.

WILKE, H. LORA, E. E. S. Desenvolvimento de um módulo combustor biomassa-motor Stirling aplicado a sistemas de geração isolada e baseados em gerador de indução. In: **Encontro de Energia no meio rural.** Anais eletrônicos. Ano 5. Campinas, 2004. Disponível em:<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100046&lng=pt&nrm=abn>. Acesso em: outubro de 2020.

11. APÊNDICE

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE
GOIÁS**

Câmpus Goiânia

**COORDENAÇÃO PROGRAMA DE MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**



LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA

PRODUÇÃO TÉCNICA:

**PROCESSO DE BIODIGESTÃO AERÓBIA
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
ORGÂNICOS
PRODUTO NÃO PATENTEÁVEL**

GOIÂNIA

2021

LUCIANA LOPES KURAMOTO MOREIRA

PRODUÇÃO TÉCNICA:
PROCESSO DE BIODIGESTÃO AERÓBIA
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
ORGÂNICOS
PRODUTO NÃO PATENTEÁVEL

GOIÂNIA

2021

INTRODUÇÃO

A presente produção técnica é um produto não patenteável desenvolvido durante o Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis. A pesquisa foi realizada no período de 2018 a 2021, tendo se estendido devido à paralisação durante o período de Pandemia. O produto desenvolvido se refere a um processo de biodigestão aeróbia de resíduos sólidos urbanos orgânicos.

O processo de urbanização descontrolado degrada estruturalmente os ecossistemas, uma vez que, além de se construir sobre áreas de vegetação, há uma enorme demanda de utilização de recursos naturais e geração exorbitante de resíduos sólidos, diariamente. Estes, quando não coletados, tratados e dispostos da forma correta, tendem a contaminar o solo, os lençóis freáticos, os corpos hídricos e a atmosfera, alterando expressivamente a qualidade de vida das populações locais, o que pode ser notado nos diversos lixões encontrados pelo país (JATOBÁ, 2011).

Essa tendência à urbanização é crescente nos países em desenvolvimento, notadamente no Brasil, atualmente com 213.317.639 pessoas (IBGE, 2021). O PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios) (IBGE, 2015) mostra que a população em todo o território nacional é, predominantemente, urbanizada e mais urbanizada que na década anterior: em 2000, 81% dos brasileiros viviam em áreas urbanas. Em 2010, apenas 15,65% da população (29.852.986 pessoas) viviam em situação rural, contra 84,35% em situação urbana (160.879.708 pessoas). Esta situação coloca os municípios, principalmente as cidades médias, diante do desafio da adequada gestão dos resíduos sólidos municipais, uma vez que é crescente o entendimento sobre a necessidade de propiciar às comunidades um serviço de limpeza urbana de qualidade, que satisfaça os usuários e minimize os riscos à saúde e à degradação ambiental, decorrente da gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos.

Contudo, ao se analisar os modelos de Gestão de Resíduos Sólidos utilizados em países desenvolvidos e, até mesmo, alguns casos presentes no Brasil, é possível atestar que existem meios de lidar com os resíduos de forma mais inteligente, gerando valor socioeconômico e ambiental ao processo.

A relevância deste trabalho situa-se em face do potencial de valorização dos RSU como fonte energética sustentável e ao total enquadramento deste estudo à atual política governamental e tendências mundiais em rever paradigmas nessa área. Ademais, no Brasil, cerca de 32% dos resíduos coletados são recicláveis e 51% é matéria orgânica. Porém, somente 4% da matéria orgânica é destinada a processos de compostagem (CEMPRE, 2018), o único tratamento atual a que este tipo de matéria orgânica é submetido. Isso reforça a pertinência de se pesquisarem formas de melhor aproveitamento desses resíduos.

Para o cadastro da presente produção técnica foi utilizado o Relatório de Produção Técnica da CAPES, o qual apresenta metodologias de avaliação da produção Técnica e Tecnológica, com 23 diferentes produtos, a fim de caracterizar tipos e subtipos de produtos e processos técnicos e tecnológicos desenvolvidos pelos programas de pós-graduação. O presente produto desenvolvido refere-se a um: Processo/Tecnologia e Produto/Material não patenteáveis (CAPES, 2019).

PROCESSO DE BIODIGESTÃO AERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ORGÂNICOS

Definição: Processo de biodigestão aeróbia de resíduos sólidos urbanos orgânicos.

Descrição do produto e de sua finalidade: processo de biodigestão aeróbia de resíduos sólidos urbanos orgânicos para biodegradação de compostos residuais a nível domiciliar, visando a eliminação ou mitigação dos impactos gerados pela destinação incorreta dos resíduos.

Avanços tecnológicos/grau de novidade:

- (x) Produção com alto teor inovativo: Desenvolvimento com base em conhecimento inédito;
- () Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos;
- () Produção com baixo teor inovativo: Adaptação de conhecimento existente;
- () Produção sem inovação aparente: Produção técnica.

Para o desenvolvimento deste produto, se objetivou atender à necessidade mundial do tratamento de resíduos sólidos orgânicos, utilizando conhecimentos teóricos. A metodologia dos processos de compostagem foi utilizada como parâmetro para análise do bom andamento do processo de biodigestão, através das variáveis umidade, pH e temperatura e, utilizando de um modelo de composteira associado à aeração mecânica, foi desenvolvido o biodigestor.

Modalidade:

- (x) Processo/Tecnologia e produto/Material não patenteáveis
- () Material de referência
- () Cepas não patenteadas
- () Produtos naturais
- () Outro: _____

Titular: Luciana Lopes Kuramoto Moreira

Co-titulares: Fernando Pereira de Sá, Elisângela Cardoso de Lima Borges

Há licenciamento: sim

não

Inventores/autores:

Docentes Autores: Luciana Lopes Kuramoto Moreira

Discentes Autores: Fernando Pereira de Sá, Elisângela Cardoso de Lima Borges

Conexão com a Pesquisa

Projeto de Pesquisa vinculado à produção: Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis

Linha de Pesquisa vinculada à produção: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Recursos e vínculos da Produção Tecnológica

Data início: 01/08/2018 Data término: 30/11/2021

Total investido: R\$3.432,00 (material para confecção do biodigestor, análises laboratoriais e testes de poder calorífico).

Fonte do Financiamento: INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS

Demandante: Demanda externa: necessidade mundial de tratamento de resíduos sólidos urbanos orgânicos

Edital

Demanda interna

Embora o excesso de resíduos seja um problema, com manejo e administração adequados, ele pode se tornar uma solução. Diversos países no mundo aproveitam o potencial energético do metano gerado em processos anaeróbios como uma maneira de tornar os sistemas de tratamento sustentáveis ou até mesmo autossuficientes energeticamente, visando não somente a geração de energia, mas também uma eficaz disposição e utilização dos resíduos sólidos gerados.

O aumento na geração de RSU pela população tem sido discutido em diversos aspectos, principalmente naqueles que afetam a sua qualidade de vida. Apesar disso, a gestão dos resíduos sólidos, que é considerada um dos setores básicos do saneamento, ainda não tem recebido a atenção necessária por parte dos gestores públicos, resultando nos atuais grandes problemas de cunho social, ambiental, econômico e de saúde.

O aproveitamento energético de RSU, desde que utilize rotas tecnológicas apropriadas e devidamente analisadas quanto aos riscos de implementação, é uma alternativa ambientalmente correta de tratamento dos resíduos sólidos e uma oportunidade de negócios, além de ser uma ótima opção para a crescente demanda de energia, enfatizando que esse tipo de resíduos deve ser visto como um recurso, e não como algo passível de eliminação (FEAM, 2012).

Situação atual da Produção:

- Piloto/Protótipo
- Em teste
- Finalizado/implantado

Aplicabilidade da Produção Tecnológica:

Descrição da Abrangência realizada: Aplicação da técnica para biodigerir aerobiamente resíduos sólidos urbanos orgânicos, minimizando os impactos que estes resíduos geram se descartados sem tratamento, diretamente no meio ambiente.

Descrição da Abrangência potencial: Replicar a técnica em ambientes domiciliares e em outros ambientes que possuam produção de alimentos e geração de resíduos orgânicos.

Descrição da Replicabilidade: Instrumento fácil de replicar, sem dificuldade operacional para produzir.

A produção necessita estar no repositório? Sim

Classificar e justificar as produções e subtipos em técnico ou tecnológico:

Este produto é tecnológico, pois, como já mencionado, pode ser utilizado para biodigerir aerobiamente resíduos sólidos urbanos orgânicos. Além disso pode ser reproduzido com facilidade.

REFERÊNCIAS

CEMPRE. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado/** Coordenação geral André Vilhena. Cempre. Edição 4. São Paulo, 2018.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais/ Fundação Estadual do Meio Ambiente.** Belo Horizonte, 2012.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2018.** Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_TCU_2018_20181108.pdf>. Acesso em setembro de 2020.

_____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) : síntese de indicadores 2015 /** IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento. - Rio de Janeiro : IBGE, 2016. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_TCU_2018_20181108.pdf>. Acesso em: set. de 2020.

JATOBÁ, S. U. S. **Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social.** Boletim regional, urbano e ambiental. IPEA. Brasília, 2011.