

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**INSTITUTO DE QUÍMICA**

**Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis**

**ALEX BORGES PEREIRA**

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM LODO DE ETA E SERRAGEM DE *PINUS SP***

Uberlândia – MG  
2024

**ALEX BORGES PEREIRA**

**PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM LODO DE ETA E SERRAGEM DE *PINUS SP***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis da Universidade Federal de Uberlândia, na área de Ambiente e Sustentabilidade, como requisito para obtenção do título de Mestre em Biocombustíveis.

Orientador: Antônio José Vinha Zanuncio

Uberlândia – MG  
2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

P436 Pereira, Alex Borges, 1986-  
2024 Produção de briquetes com lodo de ETA e serragem de Pinus sp. [recurso eletrônico] / Alex Borges Pereira. - 2024.

Orientador: Antônio José Vinha Zanuncio.  
Coorientador: Amélia Guimarães Carvalho.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de

Uberlândia, Pós-graduação em Biocombustíveis.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em:

<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.355> Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Biocombustível. I. Zanuncio, Antônio José Vinha, 1987-, (Orient.). II. Carvalho, Amélia Guimarães, 1987-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Biocombustíveis. IV. Título.

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091 Nelson Marcos  
Ferreira - CRB6/3074



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Biocombustíveis				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 051, PPBGBIOCOM				
Data:	01 de março de 2024	Hora de início:	09:30	Hora de encerramento:	11:40
Matrícula do Discente:	12212PGB001				
Nome do Discente:	Alex Borges Pereira				
Título do Trabalho:	Produção de briquetes com lodo de ETA e serragem de Pinus sp.				
Área de concentração:	Biocombustíveis				
Linha de pesquisa:	Ambiente e Sustentabilidade				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Valoração da biomassa para geração de energia, produção de polpa celulósica e outros produtos				

Reuniu-se em ambiente virtual, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, assim composta pelos Professores(as) Doutores(as): Olivia Pereira Lopes, da Universidade Federal de Uberlândia; Vinícius Resende de Castro, da Universidade Federal de Viçosa; e Antônio José Vinha Zanuncio, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Antônio José Vinha Zanuncio, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimeada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

**Aprovada.**

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio José Vinha Zanuncio, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/03/2024, às 08:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Olivia Pereira Lopes, Técnico(a) de Laboratório**, em 05/03/2024, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Resende de Castro, Usuário Externo**, em 23/05/2024, às 09:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5203061** e o código CRC **A92871AA**.

## Sumário

### **CAPÍTULO 1: PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM LODO DE ETA E SERRAGEM DE *PINUS SP***

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	
<b>2.1</b>	Objetivo Geral .....	09
<b>2.2</b>	Objetivos Específicos .....	09
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Fontes de energia.....</b>	<b>10</b>
3.1.2	Energias convencionais.....	10
3.1.3	Energias alternativas .....	11
<b>3.2</b>	<b>Tratamentos dos esgotos sanitários .....</b>	<b>11</b>
3.2.1	Estações de tratamento de esgoto (ETEs).....	11
3.2.2	Lodo de esgoto sanitário.....	12
3.2.3	Classificação do lodo .....	12
3.2.4	Características químicas do lodo de esgoto sanitário .....	13
3.2.5	Características Físicas .....	16
3.2.6	Tratamento do lodo de esgoto .....	16
3.2.7	Metais pesados no lodo .....	17
3.2.8	Organismos microbiológicos no lodo de esgoto.....	17
3.2.9	Toxicidade do lodo.....	18
3.2.10	Descartes do lodo de esgoto sanitário .....	18
<b>3.3</b>	<b>GERAÇÃO DE SERRAGEM DE <i>Pinus sp</i>.....</b>	<b>19</b>
3.3.1	Qualidade de serragem de <i>Pinus sp</i> .....	20
3.3.2	Rendimento gravimétrico .....	21
3.3.3	Cinzas .....	21
3.3.4	Poder calorífico.....	21
<b>3.4</b>	<b>BRIQUETAGEM.....</b>	<b>22</b>
3.4.1	Prensa de pistão mecânico .....	22
3.4.2	Extrusora de pressão (EP) .....	23
3.4.3	Peletização .....	24
<b>3.5</b>	<b>FATORES QUE AFETAM A QUALIDADE MECÂNICA E ENERGÉTICA</b>	

<b>DOS BRIQUETES.....</b>	<b>25</b>
3.5.1 Umidade .....	25
3.5.2 Aglutinantes.....	27
3.5.3 Partículas .....	28
3.5.4 Granulometria .....	29
3.5.5 Efeito da densidade .....	29
3.5.6 Efeito da compactação .....	30
3.5.7 Resistência a compressão .....	30
3.5.8 Composição da matéria prima .....	30
3.5.9 Efeitos da temperatura e pressão.....	31
<b>3.6 ÓLEO VEGETAL RESIDUAL .....</b>	<b>31</b>
<b>3.7 LEGISLAÇÃO PARA O DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.8 LEGISLAÇÃO PARA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.9 USO DE DIFERENTES REJEITOS E BIOMASSA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....</b>	<b>37</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>41</b>

**CAPÍTULO 2: PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM LODO DE ETA E SERRAGEM DE *PINUS SP.***

<b>2.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>2.2 METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
2.2.1 Material biológico .....	47
2.2.2 Caracterização da biomassa .....	47
2.2.3 Produção de briquetes.....	48
2.2.4 Análise estatística .....	49
<b>2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>2.4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## RESUMO

Os aterros sanitários que recebem lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA) desempenham um papel crucial na gestão de resíduos sólidos e na proteção do meio ambiente. O lodo gerado durante o processo de tratamento de água em ETAs geralmente contém uma variedade de substâncias orgânicas e inorgânicas, bem como microorganismos. A disposição adequada do lodo é essencial para evitar impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e da água subterrânea, no entanto os aterros sanitários são uma opção comum para a disposição final do lodo de ETA. Este estudo foca na utilização do lodo de esgoto como matéria-prima na fabricação de briquetes, gerando uma fonte de combustível a partir da combinação com a serragem de *pinus sp.* e consequentemente evitando sua disposição em aterros sanitários. A pesquisa avalia a viabilidade técnica e o potencial dessa biomassa como fonte de combustível. A caracterização do lodo, a análise da composição dos briquetes e a implementação de métodos experimentais foram realizadas. Os resultados indicam que a produção de briquetes a partir do lodo de esgoto é uma alternativa promissora, contribuindo para a redução de resíduos e oferecendo uma fonte sustentável de energia.

**Palavras-chave:** Lodo de esgoto sanitário; Briquetes; Geração de energia.

## ABSTRACT

Landfills that receive sludge from Water Treatment Plants (ETA) play a crucial role in solid waste management and protecting the environment. The sludge generated during the water treatment process in WTPs generally contains a variety of organic and inorganic substances, as well as microorganisms. Proper disposal of sludge is essential to avoid negative environmental impacts, such as soil and groundwater contamination. Landfills are a common option for the final disposal of ETA sludge. This study focuses on the use of sewage sludge as a raw material in the manufacture of briquettes, generating a source of fuel from the mixture with pine sawdust, and consequently, avoiding their disposal in landfills. The research evaluates the technical feasibility and potential of this biomass as a fuel source. Sludge characterization, briquette composition analysis and implementation of experimental methods were carried out. The results indicate that the production of briquettes from sewage sludge is a promising alternative, contributing to waste reduction and offering a sustainable source of energy.

**Keywords:** Sanitary sewage sludge; Briquettes; Energy generation.

## 1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento de resíduos sólidos, líquidos e gasosos pode ser atribuído às atividades humanas, aos avanços sociais e os industriais, bem como ao desenvolvimento científico e tecnológico.

De acordo com as normas estabelecidas pela NBR 13969/2017, esgoto sanitário é definido como a “combinação de resíduos líquidos provenientes de esgotos domésticos e industriais, bem como água que se infiltra nas tubulações a partir de fontes subterrâneas e não é desejável para o sistema separador”.

O descarte inadequado de esgoto “in natura” no meio ambiente aumenta a probabilidade de transmissão de doenças e contaminação de mananciais. Justamente por isso são necessárias empresas especializadas em saneamento básico e diversos processos de tratamento e valorização de resíduos. O lodo de esgoto sanitário é um subproduto gerado pelas estações de tratamento de esgoto (ETEs) utilizadas pelas cidades e indústrias. É um resíduo complexo abundante em matéria orgânica e nutrientes, mas também contém diversos compostos químicos e agentes patogênicos. O lodo de esgoto sanitário pode apresentar-se em diversas formas, como sólido, semissólido ou líquido com base no nível de umidade (PEDROZA ET AL., 2010). Estudos têm demonstrado que o lodo de esgoto sanitário é um resíduo complexo, com elevados teores de matéria orgânica e significativo potencial poluidor (BIANCHINI ET AL., 2015).

Atualmente, mais de 90% do lodo mundial é eliminado por meio de incineração, ou descarte em aterros. A incineração varia de US\$ 50 a US\$ 250 por tonelada, o descarte em aterros varia de US\$ 30 a US\$ 80 por tonelada e o uso agrícola varia de US\$ 20 a US\$ 125 por tonelada. Esses métodos são mais caros do que o despejo oceânico, que custa entre US\$ 12 e US\$ 50 por tonelada dependendo do país (KACPRZAK ET AL., 2017). A disposição em aterros sanitários continua sendo um dos métodos mais utilizados em todo o mundo (LIN ET AL., 2017). O destino final do lodo produzido pelas estações de tratamento continua sendo um problema crítico no processo de “coleta, tratamento e disposição final”. Como tal, esta questão requer uma análise detalhada (JORDÃO, 2011).

A biomassa, especificamente na sua forma sólida, é atualmente a fonte de energia renovável mais utilizada em todo o mundo (TOKLU, 2017). Pesquisadores como RUIZ-GÓMEZ et al., (2017) estudaram a utilização de lodo de estação de tratamento de efluentes como fonte alternativa de combustível para cogeração de energia. Em seu estudo, eles exploraram a pirólise de lodo de esgoto e esterco. Enquanto isso, JAYARAMAN & GÖKALP (2015) estudaram a pirólise, combustão e gaseificação de miscanthus (conhecido como capim elefante) vegetais e lodo de esgoto; PARSHETTI ET AL., (2013) explorou a carbonização hidrotérmica de lodo de esgoto para

produção de energia com carvão; e VIEIRA, ET AL. (2011) examinaram a produção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto. No entanto, atualmente falta uma implementação em larga escala destas conclusões.

A utilização da energia térmica é uma das primeiras formas de energia empregadas pela sociedade humana. Somente com a Revolução Industrial é que o uso extensivo de carvão, gás natural e petróleo se tornou comum (GOLDEMBERG & LUCON, 2007). Aproveitar resíduos de madeira (celulose) para gerar briquetes é um método prático para valorizar esses materiais. O processo de briquetagem transforma os resíduos em um produto com maior densidade energética, resultando na redução dos danos ambientais causados pelo descarte inadequado e, ao mesmo tempo, aumentando o valor econômico dos resíduos (JITTABUT, 2015).

Segundo DIEZ(2012), o processo de briquetagem envolve a consolidação de pequenas partículas na forma sólida em blocos compactos de material que possuem formato distinto e alta densidade.

A produção de materiais compactados ou briquetes para fins energéticos requer cautela, pois qualquer inclusão de agentes contaminantes pode levar à liberação de metais pesados como cádmio e chumbo no meio ambiente através das cinzas geradas no processo de combustão. Isso torna o material ambientalmente impróprio para uso caso não tenha as devidas especificações no rótulo ou em normas específicas PEREIRA (2009).

É crucial entender completamente as diferentes categorias de biocombustíveis, especialmente aqueles sólidos, como briquetes e pellets. Essa compreensão possibilitará o uso mais eficiente, resultando em maior rendimento e na redução de emissões poluentes prejudiciais.

( A.DERMIRBAS 2011).

Quando se trata de geração de energia a partir de fontes sólidas, é imprescindível realizar uma análise da composição química da biomassa vegetal. Esta análise é fundamental porque ajuda a determinar o potencial energético disponível da biomassa, qualificando-a para fins de produção de energia (BRAND, 2010).

Durante os procedimentos de análise química imediata é realizada uma avaliação instantânea para determinar a quantidade de carbono fixo, substâncias voláteis, e cinzas presentes na biomassa energética (SÁNCHEZ ET AL., 2009).

O pó de carvão é outro exemplo de biomassa que pode ser utilizada na fabricação de briquetes. É um subproduto de processos industriais e representa uma ameaça ambiental devido à sua abundância, dispersão generalizada e manejo desafiador. A sociedade atual o produz em escala significativa e geralmente é descartado em aterros municipais quando não é reaproveitado. MELO & MARQUES (2000) indicam que aproximadamente 20% do pó de carvão não é aproveitado devido

ao seu minúsculo tamanho de partícula desde a produção até a aplicação. Essas partículas, conhecidas como finos de carvão, normalmente são ignoradas e descartadas pelas empresas.

Para que o briquete sirva como fonte viável de biocombustível para operação de caldeiras e usinas termelétricas, é imprescindível a realização de uma análise físico-química minuciosa do próprio briquete, bem como a avaliação dos subprodutos que são gerados durante seu processo produtivo minuciosa do próprio briquete, bem como a avaliação dos subprodutos que são gerados durante seu processo produtivo.

A criação do briquete utilizando uma combinação de lodo de esgoto sanitário e finos de carvão é um desenvolvimento relativamente recente e, como tal, não existem regulamentações que regem a sua qualidade. Apesar disso, o comitê europeu de padronização produziu especificações técnicas para biocombustíveis sólidos, incluindo este material (ALAKANGAS ET AL., 2006). À luz disto, é necessário submeter este produto a testes químicos e ambientais abrangentes antes de aprová-lo para uso como uma nova fonte de energia sustentável e renovável. Além disso, o estudo dos gases gerados durante sua combustão apresenta um desafio que deve ser enfrentado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Produção de briquetes para a produção de energia através da queima de lodo de esgoto sanitário e serragem de *pinus sp.*

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o potencial energético dos resíduos lodo de esgoto sanitário e serragem de *pinus sp.*
- Avaliar os parâmetros de processo, como temperatura, pressão, umidade e densidade que influenciam na produção de briquetes com o finos de carvão vegetal.
- Avaliar os diferentes tipos de ligantes a ser utilizado no processo, de forma a garantir que o produto final seja econômico.
- Avaliar os efeitos da compactação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fontes de energia

O Balanço Energético Nacional de 2023 do Ministério de Minas e Energia revela que a Oferta Interna de Energia (OIE) do Brasil estava distribuída entre 52,4% de fontes não renováveis e 47,3% de fontes renováveis. Na categoria renovável, a biomassa da cana-de-açúcar representou 15,4%, a energia hidráulica representou 12,5% e a lenha e o carvão vegetal contribuíram com 9%. Além disso, 4,1% das fontes renováveis vieram de outras fontes, incluindo água sanitária. Por outro lado, as fontes não renováveis eram compostas por 35,7% de petróleo e seus derivados, 10,5% de gás natural, 4,6% de carvão mineral e 1,3% de urânio. Os 0,6% restantes da OIE foram provenientes de outras fontes não renováveis, o que ilustra a diversidade do perfil energético do Brasil nesse ano.

##### 3.1.2 Energias convencionais

O consumo de combustíveis fósseis apresenta uma realidade assustadora que compromete a sustentabilidade do desenvolvimento ambiental. Segundo AGENEAL (2011), as fontes de energia convencionais, também conhecidas como recursos não renováveis, são amplamente desenvolvidas, têm custos baixos e provêm de recursos naturais limitados. No entanto, estas fontes de energia têm um profundo impacto ambiental e são amplamente utilizadas. A qualidade do uso da energia é importante e, portanto, é crucial implementar intervenções que melhorem o uso desses recursos.

Atualmente, as políticas energéticas globais estão majoritariamente centradas na utilização de combustíveis fósseis, especialmente o petróleo. Estas fontes não renováveis, incluindo o carvão e o gás natural, representam cerca de 80% da energia total consumida todos os anos (AEO, 2017).

De acordo com o AEO (2017), o futuro do consumo de energia a nível mundial parece sombrio devido ao aumento das necessidades energéticas dos países em desenvolvimento, como a Índia e a China. Espera-se que este aumento no consumo contribua significativamente para o consumo global de energia, levando a um aumento aproximado de 60% até 2050. Os seres humanos continuam a dar prioridade a fontes de energia de baixo custo para um melhor nível de vida, prestando pouca atenção às preocupações ambientais. As várias formas de energia incluem energia térmica, mecânica, elétrica, radiante, química e nuclear.

### 3.1.3 Energias alternativas

As perspectivas para a energia no próximo século pendem fortemente para fontes de energia alternativas e renováveis. GUERREIRO (2011) define energia renovável como “formas de energia que apresentam taxa de renovação superior à sua taxa de utilização”. GABETTA et al. (2005) descrevem as fontes de energia renováveis como aquelas que podem se autorregenerar em um curto período de tempo. Geralmente, a energia renovável é utilizada no local onde é gerada. Consequentemente, os países podem tornar-se menos dependentes do fornecimento de energia estrangeira e também podem criar oportunidades de emprego em áreas necessitadas (AGENEAL, 2007). As principais fontes de energia alternativa ou renovável consistem em energia solar, eólica, biomassa, geotérmica, hídrica e oceânica.

## 3.2 TRATAMENTOS DOS ESGOTOS SANITÁRIOS

O efluente de qualquer sistema de esgotamento sanitário é transportado direta ou indiretamente para um corpo d'água, que pode ser formado por águas superficiais ou subterrâneas. A capacidade dessas águas receptoras, de acordo com o seu uso designado, determina o nível de tratamento necessário ao efluente sanitário para que os parâmetros de qualidade da região afetada pelo lançamento não sejam comprometidos. É importante ressaltar conforme afirmado por JONSSON et al (2007) o esgoto urbano é a principal fonte de poluição dos mananciais.

### 3.2.1 Estações de tratamento de esgoto (ETEs)

Em princípio o objetivo das ETEs era eliminar substâncias sólidas e orgânicas das águas residuais. No entanto, com o passar do tempo, foi dada atenção adicional à remoção de outras impurezas, tais como agentes patogênicos causadores de doenças e nutrientes.

Existem três métodos principais de tratamento de contaminantes encontrados no esgoto sanitário: físico, químico e biológico. O processo de tratamento envolve várias etapas, incluindo troca gasosa, grade, sedimentação, flotação, coagulação química, precipitação química, filtração, desinfecção e oxidação biológica ( L.Davis e Susan J. Masten, 2020).

O processo de tratamento de águas residuais envolve diversos procedimentos. A etapa inicial é a remoção dos sólidos grosseiros presentes na grade e na caixa de areia. Além disso, o clarificador primário remove sólidos sedimentáveis. O lodo produzido nesse processo passa por remoção de umidade no digestor e no leito de secagem. A categorização da remoção de sólidos é

baseada no perímetro da abertura da grelha; grosso e fino. Os processos de oxidação biológica são empregados para o tratamento secundário, sendo os processos de filtração biológica e lodos ativados os mais tradicionais. Um subproduto do tratamento de esgoto com potencial de causar poluição é o lodo de esgoto. As diretrizes para lançamento de efluentes no país estão definidas na Resolução nº 430/2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, de 05/13/2011, e publicadas no DOU nº 92, de 16/05/2011, p. 89. A aplicação de lodo de esgoto sanitário em terras agrícolas é regida pela Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2006).

### 3.2.2 Lodo de esgoto sanitário

O lodo é um resíduo diversificado, composto por numerosos compostos químicos e patógenos nocivos. Pode existir no estado sólido, semissólido ou líquido e é abundante em substâncias orgânicas e nutrientes essenciais. Devido ao seu alto potencial poluidor, o lodo representa uma ameaça significativa ao meio ambiente (PEDROZA, 2010 & BIANCHINI ET AL., 2015).

As qualidades do lodo de esgoto podem variar dependendo de uma série de fatores, incluindo a origem (industrial ou residencial), a estação do ano e os métodos empregados na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Essas características físicas e químicas podem ser alteradas por essas variáveis.

### 3.2.3 Classificação do lodo

Existem duas categorias de esgoto, nomeadamente sanitário e industrial. O esgoto sanitário é composto predominantemente por lixo doméstico, com pequena quantidade de água pluvial e de infiltração. Além disso, inclui uma quantidade insignificante de resíduos industriais. As fontes desta categoria de esgoto incluem água de banho, urina, fezes, papel, resíduos de alimentos, sabão, detergentes e água de lavagem em geral.

O subproduto do tratamento de esgoto é comumente referido como lodo. De acordo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, esta substância é enquadrada como resíduo sólido, especificamente no capítulo II do artigo 3º, inciso XVI, que a descreve da seguinte forma:

O termo “resíduo” refere-se a qualquer item, material, substância ou produto que não seja mais considerado útil pela sociedade devido às atividades humanas. Esses itens podem estar no estado sólido ou semissólido e devem ser descartados ou são obrigatórios para serem descartados. Inclui também gases confinados em recipientes e líquidos que não podem ser lançados em sistemas públicos de esgoto ou corpos d'água devido às suas características únicas ou à impraticabilidade

de soluções técnica ou economicamente viáveis, de acordo com a mais avançada tecnologia disponível (BRASIL, 2010, pág.1).

Normalmente, as águas residuais domésticas ou industriais consistem em 99,9% de água e 0,1% de material sólido. Desse material sólido, aproximadamente 70% é orgânico e inclui substâncias como proteínas, carboidratos e gorduras, enquanto os 30% restantes são inorgânicos e podem ser compostos por itens como areia, sais e metais (FERNANDES, 2000).

A categorização das lamas pode ser determinada com base nas fases de tratamento em que foram produzidas. Pode ser referido como lodo primário, secundário ou digerido.

O lodo gerado no clarificador primário é denominado lodo primário. É um lodo altamente putrescível, que exala odores desagradáveis e contém alta concentração de patógenos. Já o lodo secundário é produzido a partir da conversão biológica de produtos solúveis do efluente primário, bem como de partículas que escapam do tratamento primário. O lodo primário e secundário pode ser classificado como não digerido ou bruto. O lodo bruto que sofre estabilização biológica, normalmente por meio de digestão anaeróbica, é denominado lodo digerido. Esse processo resulta na diminuição da concentração de sólidos voláteis e na produção de gases como dióxido de carbono e metano (VON SPERLING, 2005).

#### 3.2.4 Características químicas do lodo de esgoto sanitário

O lodo de esgoto doméstico compreende uma gama diversificada de substâncias que podem variar significativamente com base em fatores como tendências populacionais e outras variáveis. As propriedades químicas deste lodo podem ser categorizadas em duas partes distintas: orgânica e inorgânica.

O componente orgânico do lodo de esgoto é composto predominantemente por proteínas, estimadas em 40 a 60% da mistura. Os carboidratos também estão presentes, representando 25 a 50%, enquanto as gorduras e os óleos constituem 10%. Outras substâncias como ureia, fenóis, surfactantes e pesticidas também são encontradas em quantidades variadas no lodo (JORDÃO, 1995).

As proteínas são compostas por vários átomos, incluindo carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre, nitrogênio, ferro e, às vezes, fósforo. Eles são componentes fundamentais da biologia animal e vegetal. As estações de tratamento de esgoto muitas vezes contêm um odor desagradável devido à presença do gás sulfeto de hidrogênio, que se origina do enxofre encontrado nas proteínas. Este enxofre é responsável pelo odor fétido que ocorre durante os processos de tratamento, conforme observado por MELO & MARQUERS (2000).

Carboidratos são compostos orgânicos compostos de carbono, hidrogênio e oxigênio em sua estrutura molecular. Estes compostos são particularmente suscetíveis à degradação bacteriana. Quando a glicose é mineralizada através do processo oxidativo, ela produz aproximadamente 19 vezes mais energia do que através do processo fermentativo, conforme observado por BLACK (2002).

Segundo JORDÃO (1995), a gordura do lodo é composta por materiais oleosos e análogos, o que pode ser atribuído ao consumo de manteiga e óleos vegetais que são descartados na cozinha.

Os detergentes, ou surfactantes, são constituídos por moléculas orgânicas que têm a capacidade de criar espuma no corpo receptor ou na estação de tratamento. Eles têm tendência a aderir à interface entre o ar e a água e, dentro das unidades de aeração, fixam-se às superfícies das bolhas de ar, criando uma espuma estável e durável. Um dos surfactantes mais prevalentes é o ABS, ou Alquil-Benzeno-Sulfonado. É um componente chave em detergentes sintéticos e é amplamente utilizado nas indústrias de limpeza e petróleo. O ABS é conhecido por sua resistência à decomposição biológica (NITSCHKE & PASTORE, 2002).

A composição do lodo de esgoto compreende uma ampla gama de grupos funcionais orgânicos, como ácido, álcool, amina, amida, nitrila, cetona e hidrocarbonetos. Esses grupos possuem considerável potencial energético e podem ser recuperados por meio de processos térmicos. A Tabela 1 fornece uma visão abrangente dos parâmetros de carga orgânica para diversas condições de lodo de esgoto sanitário.

**Tabela 1** - Parâmetros de carga orgânica no lodo de esgoto sanitário (mg/L).

Parâmetros	Condições do Esgoto		
	Forte	Médio	Fraco
DBO5(20 °C)	300	200	100
Nitrogênio total	85	40	20
Nitrogênio orgânico	35	20	10
Amônia livre	50	20	10
Nitrito, NO <sub>2</sub>	0,10	0,05	0
Nitrato, NO <sub>3</sub>	0,40	0,20	0,10
Fósforo Total	20	10	5
Orgânico	7	4	2
Inorgânico	13	6	3

Fonte: JORDÃO (1995) adaptado.

A Tabela 2 mostra a composição química do lodo de esgoto sanitário coletado no município de Cascavel, localizado na região Oeste do estado do Paraná.

**Tabela 2** - Composição química do lodo de esgoto sanitário estabilizado produzido na ETE Oeste da unidade regional do município de Cascavel.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultado Analítico</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos Totais	84,76	g/100g
Cinzas	52,22	g/100g de Sólidos Totais (ST)
Nitrogênio total, N	1,23	g/100g de ST
Carbono total, C	35,00	g/100g de ST
Relação C/N	9,35	Adimensional
Fósforo Total	1,33	g P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / 100g de ST
Potássio Total	0,26	g K <sub>2</sub> O / 100g de ST
Cálcio Total	2,09	g CaO / 100g de ST
Magnésio Total	0,11	g MgO / 100g de ST
Cádmio (mg/kg)	<0,01	mg/Kg de ST
Cobre (mg/kg)	416,00	mg/Kg de ST
Cromo (mg/kg)	181,00	mg/Kg de ST
Mercúrio (mg/kg)	<0,01	mg/Kg de ST
Níquel (mg/kg)	172,00	mg/Kg de ST
Zinco (mg/kg)	670,00	mg/Kg de ST
Escherichia coli	3,7 x 10 <sup>2</sup>	USEPA, 1994
Coliformes Termotolerantes	3,8x 10 <sup>1</sup>	Standard Methods
Ovos de helmintos (NMP/g)	<0,25	EPA/625/R-92/013

Fonte: SANEPAR (2008).

De acordo com os resultados listados na Tabela 2.2, as quantidades medidas de Escherichia coli, Coliformes Termotolerantes e Ovos de Helmintos (NMP/g) estão todas dentro da faixa de valores aceitáveis delineados pelos métodos analíticos empregados. O limite máximo para Escherichia coli não é especificado. Quanto à análise de Coliformes Termotolerantes, o valor máximo permitido estipulado pelos Métodos Padrão é 1,0 x 10<sup>3</sup> MPN/g, e o lodo desta ETE

(3,8 x 10<sup>1</sup>) está bem dentro deste limite. O valor de ovos de helmintos (MPN/g) também está abaixo do limite de 0,25 ovo/g, conforme especificado pela norma EPA/625/R-92/013.

A maioria dos componentes não orgânicos encontrados no esgoto pode ser atribuída à presença de substâncias minerais e areia. A areia, em particular, é proveniente da lavagem de ruas e da infiltração de águas subterrâneas em tubulações e galerias, muitas vezes através de juntas mal vedadas.

Os constituintes inorgânicos raramente são extraídos do esgoto, exceto alguns tipos de resíduos industriais (JORDÃO, 1995).

### 3.2.5 Características Físicas

Para interpretar a natureza física do esgoto, diversas quantidades devem ser examinadas, como matéria sólida, temperatura, odor, cor e turbidez. Em termos de controle e dimensionamento de unidades de tratamento, a concentração de matéria sólida é de extrema importância quando se consideram as características físicas. As operações de tratamento envolvem a eliminação de matéria sólida através de uma série de etapas, incluindo a remoção de sólidos grosseiros, remoção de sólidos sedimentáveis, remoção de sólidos flutuantes, remoção de umidade do lodo, filtração de esgoto, diluição de esgoto e homogeneização. Esta informação é proveniente das descobertas de JORDÃO de 1995.

### 3.2.6 Tratamento do lodo de esgoto

Quando se trata de sistemas de tratamento de esgoto, o lodo que se forma nele contém uma concentração de diversas substâncias, como nutrientes, matéria orgânica, metais pesados e organismos patogênicos. Se não forem devidamente monitorizados e controlados, estes elementos têm o potencial de representar riscos significativos para a saúde humana e para o ambiente.

A base do tratamento de esgoto doméstico é através da estabilização biológica. Esse processo envolve a conversão da matéria orgânica em um subproduto que é estabilizado por bactérias, resultando em gás e resíduo. Essa estabilização pode ocorrer na presença ou ausência de oxigênio, e é classificada em dois tipos: estabilização aeróbia e anaeróbica de lodo (MÉNDEZ et al., 2005).

Quando o lodo é digerido na ausência de oxigênio (estabilização anaeróbica), ele adquire uma tonalidade preta. Alternativamente, quando o lodo é digerido na presença de oxigênio (estabilização aeróbica), ele aparece marrom. Independentemente do método de estabilização, o lodo resultante não emite odores desagradáveis, conforme pesquisa realizada por PEDROZA ET

AL. em 2010.

### 3.2.7 Metais pesados no lodo

A concentração de metais pesados encontrados no lodo pode variar com base em fatores como o nível de industrialização da região, a quantidade de águas residuais industriais produzidas e gerenciadas e a situação socioeconômica e cultural da população (TSUTIYA, 2001).

Metais pesados referem-se a elementos químicos que possuem número atômico superior a 20 e/ou densidade de massa superior a 5 g.cm<sup>-3</sup> que podem causar problemas de poluição. Os limites para metais pesados são determinados por normas regulamentadoras (CETESB, 2004). O uso de lodo de esgoto como fertilizante em solos cultivados pode fazer com que esses metais perigosos sejam absorvidos pelas plantas e se acumulem em tecidos que podem ser consumidos por animais e humanos, causando problemas sociais generalizados (MARQUES et al., 2001).

### 3.2.8 Organismos microbiológicos no lodo de esgoto

Sabe-se que o lodo de esgoto contém uma variedade de microrganismos. Esses microrganismos podem ser classificados como saprófitos, comensais, simbioses ou parasitas. A categoria parasitária é particularmente preocupante, pois inclui patógenos que podem levar ao desenvolvimento de doenças em humanos. Esses patógenos podem ser transmitidos através do contato direto com o lodo ou indiretamente através de outros organismos, como ratos, pássaros ou moscas, que entraram em contato com o lodo (SOCCOL ET AL., 2010).

No lodo, as bactérias mais comumente encontradas incluem *Salmonella spp.*, *Escherichia coli.*, *Shigella sp.*, *Leptosira sp.* e *Vibrio cholerae*. Os agentes virais presentes incluem o vírus da hepatite A, *enterovírus*, *rotavírus* e *reovírus*. Os protozoários que podem ser encontrados incluem *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia*, *Entamoebahistlytica*, *Balantidium coli* e *Toxoplasma gondii*. Os helmintos mais prevalentes são *Ascaris sum*, *Ascaris lumbricoides*, *Toxocara sp.*, *Trichuristrichiura*, *Taeniasolium*, *Hymenolepis diminuta*, *Taeniasaginata*, *Necator americanus* e *Hymenolepis nanam*, segundo SOCCOL ET AL. (2010).

### 3.2.9 Toxicidade do lodo

Os testes de toxicidade são utilizados para medir o impacto de compostos tóxicos (como esgotos ou efluentes) em relação a organismos padrão, dentro do contexto do clima local. Esses testes são eficazes desde que os organismos se aclimatem às condições físicas e químicas da água utilizada para manter seu habitat, o que deve refletir as condições específicas da região em questão (BARBIERI et al., 2002).

A investigação conduzida por JONSSON & MAIA (2007) indica que a utilização de lamas de esgoto provenientes de instalações de tratamento representa uma ameaça prejudicial para a vida selvagem aquática. Acredita-se que esta ocorrência esteja relacionada com a presença de elementos orgânicos ou inorgânicos nocivos.

Os testes de toxicidade empregam tanto o microcrustáceo *Artemia salina* quanto o invertebrado aquático *Daphnia similis* como meio de detectar compostos bioativos presentes em extratos vegetais. Esses organismos também são utilizados para indicar o nível de toxicidade em extratos vegetais que possuem atividade moluscicida. Além disso, a alteração mitótica em culturas celulares é um indicador adicional utilizado para detectar toxicidade (JONSSON & MAIA, 2007).

### 3.2.10 Descartes do lodo de esgoto sanitário

A remoção de agentes patogênicos e inorgânicos das águas residuais descartadas é uma etapa obrigatória no esforço do Brasil para manter a saúde de seus ambientes aquáticos. A Resolução CONAMA nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente dita as normas e condições para o lançamento de efluentes, e serve para complementar e modificar a Resolução nº 357 de 17 de março de 2005 (CONAMA, 2011a).

O lodo de esgoto é comumente descartado por meio de dois métodos: aterros sanitários e incineração, conforme observado por VIEIRA et al. em 2011. No entanto, estes métodos não são apenas caros, mas também carecem de benefícios significativos para a sociedade. Existem meios alternativos de disposição do lodo de esgoto, como a sua utilização em áreas agrícolas destinadas ao plantio florestal e à recuperação de áreas degradadas. Além disso, o lodo de esgoto pode ser reaproveitado para a fabricação de substrato vegetal, conforme sugerido por DORES-SILVA ET AL. em 2011.

### 3.3 GERAÇÃO DE SERRAGEM DE *Pinus sp*

A geração de serragem de *Pinus sp.*, ou seja, a produção de resíduos provenientes do processamento da madeira de pinus, é um tema de relevância tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. O pinus é uma espécie de árvore amplamente cultivada em muitas regiões do mundo, especialmente devido à sua rápida taxa de crescimento e versatilidade em diversas aplicações industriais Fardim, Pedro et al. (2008), como na fabricação de móveis, papel e celulose, construção civil e energética.

A produção de serragem de *Pinus sp.* ocorre durante o processo de beneficiamento da madeira, que envolve operações como o corte, desdobramento, desbaste e acabamento. Essas atividades resultam na geração de uma quantidade significativa de resíduos, segundo Pereira, Helenice et al. (2016), principalmente na forma de serragem. A serragem consiste em pequenos fragmentos de madeira resultantes dessas operações, apresentando-se como um subproduto valioso e de múltiplos usos.

Diversos estudos têm abordado a geração de serragem de pinus e seus potenciais aplicações. Do ponto de vista econômico, a serragem pode ser considerada uma fonte de receita adicional para as indústrias madeireiras Oliveira, Luiz et al. (2019), pois pode ser comercializada para diversos fins. Além disso, a serragem de pinus possui propriedades que a tornam adequada para diversas aplicações industriais, como na produção de aglomerados, compensados, papel e celulose, além de ser uma fonte de biomassa para geração de energia.

No entanto, é importante considerar também os aspectos ambientais relacionados à geração de serragem de pinus. O descarte inadequado desses resíduos pode acarretar impactos negativos no meio ambiente, como a contaminação do solo e da água. Portanto, é fundamental adotar práticas sustentáveis de gestão de resíduos, como a reciclagem, reutilização e valorização energética da serragem de pinus, visando minimizar o seu impacto ambiental Silva, Aline et al. (2020).

### 3.3.1 Qualidade da serragem de *Pinus sp.*

A qualidade da serragem de *Pinus sp.* é um aspecto crucial a ser considerado, especialmente devido à sua ampla gama de aplicações industriais. A qualidade da serragem pode variar dependendo de vários fatores, como a espécie de *Pinus*, o método de processamento da madeira, o tamanho das partículas, a umidade, a presença de impurezas e a densidade. Uma alta qualidade da serragem é fundamental para garantir o desempenho e a durabilidade dos produtos finais nos quais ela é utilizada.

A seguir, são discutidos alguns aspectos relevantes sobre a qualidade da serragem de *Pinus sp.*:

- **Tamanho das partículas:** O tamanho das partículas de serragem pode influenciar diretamente suas propriedades físicas e mecânicas. Estudos têm mostrado que diferentes tamanhos de partículas podem afetar a compactação, a resistência e a absorção de água em produtos como aglomerados e compensados (Yousefi et al., 2017).
- **Umidade:** A umidade da serragem é um parâmetro importante, pois pode afetar sua combustibilidade, capacidade de compactação e resistência à degradação. A secagem adequada da serragem é essencial para evitar problemas como o empenamento em painéis de madeira aglomerada (Esteves et al., 2008).
- **Pureza e presença de impurezas:** A presença de impurezas, como resinas, cascas e outros contaminantes, pode afetar negativamente a qualidade da serragem e comprometer sua adequação para certas aplicações. Portanto, é importante garantir que a serragem seja livre de contaminantes que possam prejudicar a qualidade dos produtos finais (Mendes et al., 2014).
- **Densidade aparente:** A densidade aparente da serragem pode influenciar sua capacidade de armazenamento, transporte e processamento. Estudos têm investigado a influência da densidade aparente na produção de briquetes e outros biocombustíveis derivados de serragem de *Pinus sp.* (Oliveira et al., 2019).
- **Composição química:** A composição química da serragem, incluindo teor de lignina, celulose e hemicelulose, pode influenciar suas propriedades físicas e químicas. Pesquisas têm explorado a relação entre a composição química da serragem e suas propriedades como biomassa para produção de energia (Mašek et al., 2017).

### 3.3.2 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico da serragem de *Pinus sp.* é uma medida importante que indica a eficiência do processo de transformação da madeira em serragem. Esse rendimento refere-se à proporção de serragem obtida em relação à quantidade de madeira inicialmente processada e pode variar dependendo de diversos fatores, como o método de processamento da madeira, a espécie de *Pinus*, o teor de umidade da madeira e as condições de operação da serraria (CORREIRA, Adelmo et al. 2012).

A determinação do rendimento gravimétrico envolve a pesagem da serragem produzida em relação à massa inicial da madeira utilizada, sendo expressa geralmente em porcentagem COSTA Michelle et al. (2016). É uma métrica fundamental para avaliar a eficiência dos processos de beneficiamento da madeira e também pode ser utilizada como indicador de desempenho econômico e ambiental das serrarias.

### 3.3.3 Cinzas

As cinzas resultantes da queima da serragem de *Pinus sp.* são um subproduto importante que possui diversas aplicações e também pode fornecer informações valiosas sobre a composição mineral da madeira e sua influência nos processos de combustão. As cinzas são compostas por minerais que não são volatilizados durante a queima da serragem e geralmente contêm uma variedade de elementos, como cálcio, potássio, magnésio, silício e outros KULINA, F. et al. (2017).

A análise das cinzas da serragem de *Pinus sp.* pode fornecer informações úteis sobre sua qualidade como fonte de biomassa para a geração de energia, bem como sobre a sua aplicabilidade em outras áreas, como agricultura e construção. Além disso, as características das cinzas, como sua composição química e propriedades físicas, podem variar dependendo de fatores como a espécie de *Pinus*, o teor de umidade da serragem e as condições de queima Darmawan, W. et al. (2019).

### 3.3.4 Poder calorífico

O poder calorífico da serragem de *Pinus sp.* é uma medida importante que indica a quantidade de energia que pode ser liberada durante sua queima. Esse parâmetro é fundamental para avaliar a eficiência da serragem como fonte de biomassa para geração de energia térmica ou elétrica.

O poder calorífico da serragem de *Pinus* pode variar dependendo de fatores como a

umidade da serragem, a densidade da madeira, a composição química e o processo de queima (GARCIA, Raquel et al. 2020).

### 3.4 BRIQUETAGEM

Briquetagem refere-se ao processo de compactação de materiais com baixa granulometria em blocos ou aglomerados de tamanho maior e formato definido. Este método é utilizado para transformar subprodutos do processamento agroflorestral e finos de carvão em um novo material com maior valor comercial (ANTUNES, 1982).

Por meio da compressão, a técnica de briquetagem converte os resíduos de madeira provenientes do processamento mecânico em uma fonte compacta de combustível, com alto potencial de utilização (SILVA, 2007).

Quando se trata de produção e desenvolvimento de equipamentos de compactação, também conhecidos como briquetadeiras, os países líderes no cenário mundial incluem França, Alemanha, Bélgica, Brasil, Tailândia, Japão e Taiwan. Esta informação foi relatada por BHATTACHARYA em 2004 e permanece relevante atualmente.

Os mecanismos responsáveis pela compactação da biomassa podem ser categorizados em dois grupos principais: compactação a quente e alta pressão e compactação a frio e baixa pressão. O primeiro é considerado o método mais significativo e comumente utilizado devido à sua capacidade de produzir materiais superiores em termos de propriedades técnicas e energéticas. Além disso, a compactação a quente pode ser obtida usando qualquer um dos três tipos de equipamentos a seguir: prensa mecânica de pistão, extrusora de pressão ou pelletização, conforme estudo de 2017 da LIPPEL.

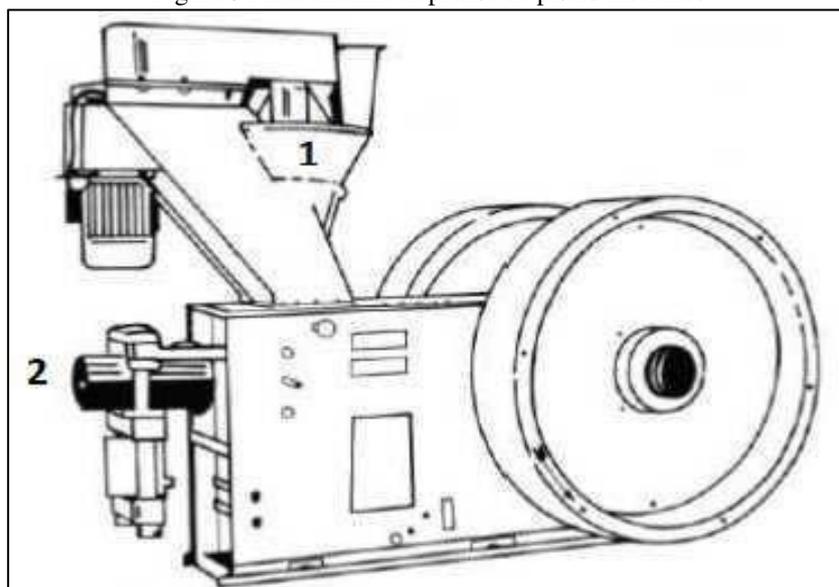
#### 3.4.1 Prensa de pistão mecânico

A prensa mecânica de pistão funciona assim: as matérias-primas são alimentadas através de um funil e em uma matriz cônica que se move continuamente. O pistão, que oscila para frente e para trás, comprime os materiais para formar briquetes. A matriz é tipicamente um canal em forma de funil com seção transversal circular, projetado especificamente para fins de compactação e extrusão (ERIKSSON et al., 1990).

Normalmente, a briquetadeira de pistão mecânico é operada por eletricidade e fixada em uma fundação estacionária. Um dispositivo mais moderno, a prensa hidráulica de pistão

transportador, também foi desenvolvido. Geralmente, a prensa de pistão apresenta um tubo longo que produz briquetes cilíndricos com compressão de alta densidade. No diagrama (Figura 3), “1” denota o ponto de entrada das matérias-primas, enquanto “2” marca a saída dos materiais em forma de briquete.

Figura 3 Parte externa da prensa de pistão mecânico



Fonte: ERIKSSON et al. (1990).

Esses equipamentos possuem uma capacidade de produção que varia de 40 kg/h a 2.500 kg/h, e os briquetes resultantes são frequentemente moldados de forma cilíndrica, com diâmetros que variam de 50 mm a 100 mm.

#### 3.4.2 Extrusora de pressão (EP)

Existem dois tipos de tecnologia utilizados neste tipo de equipamento, nomeadamente a pressão cônica (EPC) e a pressão de molde aquecido (EPMA). Na variação EPC da briquetadeira, um parafuso cônico impulsiona a matéria-prima para uma antecâmara. Depois disso, a biomassa é comprimida e extrusada em uma matriz por uma cabeça de compressão. O produto compactado é então moldado através de uma matriz por uma extrusora que força os resíduos para dentro da câmara. O resultado final é um briquete, que é então cortado no comprimento desejado com uma faca (BHATTACHARYA, 2004).

Para gerenciar o excesso de calor produzido pelo atrito, é necessário instalar um sistema de refrigeração (camisa d'água) ao redor da matriz. A quantidade de material processado pode resultar

em uma capacidade de produção entre 600 e 1.000 kg<sup>h</sup>-1, com variação dependendo do tipo específico de material envolvido. Apesar de obter excelentes resultados na qualidade dos briquetes produzidos, uma desvantagem desta máquina é a tendência de desgastar rapidamente os cabeçotes de reposição (ERIKSSON et al., 1990).

A máquina de briquetagem EPMA opera forçando o material diretamente através de uma seção cônica estreita e suavemente aquecida com um molde de saída. Este dispositivo normalmente é alimentado por eletricidade. O formato do molde do briquete pode ser circular ou quadrado, com abertura central que auxilia na densificação do material devido à rotação da extrusora. Os briquetes produzidos têm geralmente de 5 a 10 centímetros de diâmetro, com temperatura de aquecimento em torno de 300 graus Celsius. O processo em si faz com que o material aqueça até mais de 200 graus Celsius, sendo a maior parte do aquecimento resultante do atrito. Os briquetes possuem superfície parcialmente pirolisada. Durante o processo de briquetagem, a fumaça pode escapar pelo orifício circular central formado no briquete pelo modelo da extrusora. Este modelo de máquina foi estabelecido no Japão em 1945 e tem uma capacidade de briquetagem que varia de 50 a 800 quilogramas por hora, de acordo com o estudo de KISHIMOTO e BOLEY de 1968.

Em certos países, como Bangladesh e Tailândia, o uso de eletricidade durante o processo de briquetagem foi diminuído através da implementação de um sistema de aquecimento dentro da matriz. Este sistema envolve o pré-aquecimento da matriz através de um método refratário que aquece a rosca extrusora, resultando em menor consumo de energia elétrica. Isso ocorre porque o material pré-aquecido a ser briquetado passa pela rosca da extrusora. Esse método foi descrito em estudo realizado por BHATTACHARYA et al. em 2002.

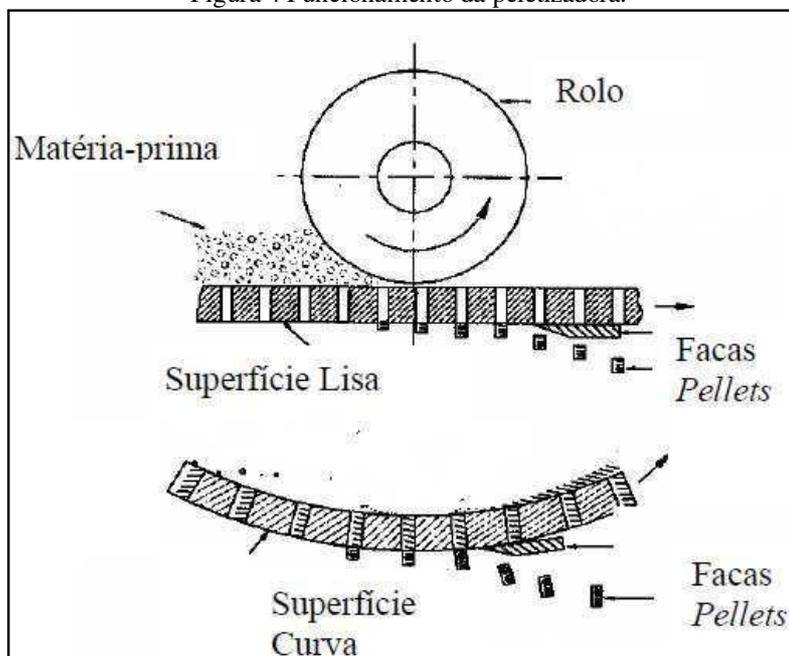
### 3.4.3 Peletização

A prensa de pellets consiste num rolo cilíndrico que gira contra uma matriz equipada com vários furos de pequeno diâmetro, normalmente variando entre 5 e 15 mm. Por meio de pressão e fricção, a matéria-prima é moldada e expulsa da matriz com formato uniforme e contínuo. O material é então cortado com facas no comprimento desejado. O processo envolve colocar a matéria-prima entre o rolo e a matriz e, à medida que o rolo passa, o material é extrudado através dos orifícios da matriz. Isso causa atrito, que por sua vez gera calor. O produto resultante é conhecido como pellet, em oposição a briquete, devido ao seu pequeno diâmetro (BHATTACHARYA et al., 1989).

As máquinas pelotizadoras têm a capacidade de condensar diversos materiais como cereais, forragens, palha e capim, entre outros. Essas máquinas estão disponíveis em configurações fixas

ou móveis e têm capacidade de 3 t/h a 8 t/h. Os pellets produzidos por essas máquinas normalmente têm um diâmetro que varia de 5 a 15 mm e um comprimento de 30 mm. A Figura 4 mostra a variação da superfície de suporte e pressão, que pode ser lisa ou curva.

Figura 4 Funcionamento da peletizadora.



Fonte 1 Fonte: BHATTACHARYA (2004) adaptado.

### 3.5 FATORES QUE AFETAM A QUALIDADE MECÂNICA E ENERGÉTICA DOS BRIQUETES

A qualidade dos briquetes é determinada por diversos fatores, incluindo as características das matérias-primas, como densidade, granulometria e umidade relativa, bem como a composição do material e sua resistência à compressão. Além disso, variáveis de processo como temperatura e pressão também desempenham um papel significativo na determinação da qualidade final dos briquetes.

#### 3.5.1 Umidade

A eficiência de compactação de cada tipo de matéria-prima é influenciada por uma faixa de teor de umidade, que pode diferir dependendo do processo de compactação. O teor de umidade também tem um efeito significativo na combustão de materiais combustíveis. Altos níveis de umidade no material podem produzir explosões devido à criação de vapor.

Por outro lado, uma matéria-prima muito seca pode impedir os mecanismos de aglutinação entre as partículas. KOULLAS & KOUKIOS (1987) descobriram que a água suporta a formação de estrutura na aglutinação. A falta de umidade pode prejudicar o acondicionamento e compactação do material. A água é responsável pelo amolecimento da lignina da madeira (QUIRINO ET AL., 2005). A Tabela 2.3 mostra diversas proporções de umidade em briquetes.

Segundo BHATTACHARYA ET AL. (1989), recomenda-se que os níveis de umidade nos resíduos de madeira fiquem entre 8% e 12% para facilitar o mecanismo de compactação entre as partículas. Por outro lado, material muito seco pode impedir este processo. Enquanto isso, JIANG ET AL. (2014) descobriram que o teor de umidade ideal para pelletização, processo semelhante à briquetagem, utilizando uma mistura de lodo, cânfora e palha de arroz como biomassa, estava entre 10% e 15%. A Tabela 3 fornece valores de umidade para diferentes tipos de briquetes, conforme documentado pelas respectivas pesquisas de cada autor.

Tabela 3 Quantidades de umidade para cada tipo de briquete de acordo com o estudo de cada autor.

<b>Autor - Briquete</b>	<b>Umidade (%)</b>
BHATTACHARYA et al. (1989) - Resíduo de madeira.	8 a 12
GROVER & MISHRA (1996) - Resíduos lignocelulósicos.	8 a 12
DA SILVA & DOS SANTOS MORAIS (2008) - Bagaço de cana.	20
GONÇALVES et al. (2009) - Resíduos lignocelulósicos.	8 a 15
ROUSSET et al. (2011) - Carvão para uso doméstico.	5 a 8
PROTÁSIO et al. (2012) - Casca e pergaminho de café.	7 e 8
PIMENTA et al. (2015) - Casca de coco verde.	4,6
LELA et al. (2016) - Resíduos de madeira (serragem).	5,3 a 7,6
SILVA et al. (2017) - Biomassa de Eucalyptus sp.	10 a 12

Em estudo realizado por OLORUNNISOLA (2007), descobriu-se que briquetes feitos de casca de coco e resíduos de papel apresentavam teor de umidade variando de 5,4% a 13,3%. Outro estudo de REIS et al. (2002) indicaram que a eficiência da combustão dos briquetes poderia ser comprometida se o nível de umidade ultrapassasse 15%, devido à relação entre umidade e poder calorífico. De acordo com pesquisa feita por QUIRINO & BRITO (1991), as briquetadeiras mecânicas de parafuso são projetadas para trabalhar com materiais contendo 10-12% de umidade, enquanto as briquetadeiras de pistão hidráulico podem lidar com níveis de umidade entre 18-20%.

Já as pelotadoras podem acomodar até 20% de umidade e utilizar pressões que variam de 80 a 320 kg cm<sup>-2</sup>.

Segundo SILVA (2017), a quantidade de umidade presente na biomassa tem relação inversa com o seu poder calorífico. Em outras palavras, se um briquete contiver uma quantidade significativa de umidade, seu valor calorífico diminuirá. Por outro lado, se o nível de umidade for baixo, o poder calorífico do briquete será maior.

Ao examinar os dados apresentados na Tabela 2.3, torna-se evidente que os níveis de umidade flutuam dependendo da composição das matérias-primas utilizadas na produção de briquetes ou pellets. Esta variabilidade destaca a importância de considerar a umidade ao industrializar diversos materiais.

### 3.5.2 Aglutinantes

No processo de fabricação de briquetes, os ligantes desempenham um papel integral na segunda etapa, conforme indicado na metodologia delineada por MORO (1987). O autor fornece um relato passo a passo que envolve moagem, incorporação do aglutinante, prensagem, secagem e armazenamento. Os ligantes são responsáveis por ligar as partículas do material que formarão o briquete. A seleção do ligante e a quantidade necessária são fatores cruciais para alcançar uma produção bem-sucedida de briquetes. Os ligantes normalmente são mais caros que o componente primário, sendo necessário avaliar cuidadosamente a quantidade adequada de cada componente para garantir que o produto final seja econômico (MARSOLLA, 1998).

Os ligantes são conhecidos por sua alta capacidade de aglomerar partículas, bem como por sua disponibilidade, resistência mecânica, resistência à umidade e capacidade de funcionar bem em diversas condições operacionais. A ação dos ligantes é provocada por mecanismos como forças de Van der Waals e entrelaçamento de partículas, citados por GROVER e MISHRA em 1996. A deformação e aproximação das partículas durante a compactação levam à ativação de forças de valência e forças de Van der Waals. No processo de briquetagem com finos de carvão, os ligantes são fundamentais, segundo Lucena et al. em 2008. Outros tipos de ligantes, como óleos, talco, ceras e grafite, também podem ser usados para reduzir o atrito entre as partículas e aumentar a compactação. O amido seco, por exemplo, é útil para matérias-primas com alto teor de umidade. No entanto, é relativamente caro em comparação com outros ligantes. Devido à sua ampla disponibilidade e baixo custo, a cal é considerada um aglutinante eficaz. No processo de produção de briquetes com cal, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são transformados em carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), o que aumenta a solidez dos briquetes.

Briquetes de cinza de bagaço de cana misturados com pó de carvão foram criados por TEIXEIRA ET AL. (2010) utilizando 8% de fécula de mandioca ligante no processo produtivo.

Nos EUA e na Europa, o agente ligante predominante utilizado na criação de briquetes de carvão vegetal é o amido de milho industrial não processado. Um típico briquete de carvão doméstico é composto por 85% de carvão, 6-10% de ligante (na forma de amido) e 5-8% de teor de umidade (ROUSSET ET AL., 2011). A Tabela 4 mostra as proporções e composições dos agentes ligantes utilizados na criação de diversas variedades de briquetes.

Tabela 4 Quantidades de aglutinante para cada tipo de briquete de acordo com o estudo de cada autor.

<b>Autor - Briquete</b>	<b>Aglutinantes (%)</b>
GONÇALVES <i>et al.</i> (2009) - Resíduos madeireiros	Rejeitos de Resíduo Sólidos Urbanos, (0 a 25)
PEREIRA (2009) - Carvão vegetal e resíduo de bambu	Carboximetilcelulose (3)
TEIXEIRA <i>et al.</i> (2010) - Cinzas de bagaço de cana	Amido (8)
ROUSSET <i>et al.</i> (2011) - Carvão para uso doméstico	Amido (6 a 10)
WZOREK (2012) Lodo de esgoto	farinha de osso e pasta de carvão (6 a 16)
MARTINS <i>et al.</i> (2016) - Carvão vegetal	Amido industrial de milho (10)

De acordo com a pesquisa realizada por GONÇALVES *et al.* em 2009, a porcentagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RRSU) que servem como material aglutinante teve um impacto considerável na durabilidade e na produção energética dos briquetes produzidos a partir de resíduos de madeira. No estudo, descobriu-se que os briquetes contendo 5% e 10% de RRSU eram quebradiços e propensos a fraturar. Por outro lado, quando a proporção de RRSU foi aumentada para 15% e 25%, a resistência mecânica dos briquetes melhorou, sendo o maior poder calorífico obtido a partir de briquetes contendo 25% de RRSU.

Em sua pesquisa, WZOREK (2012) utilizou uma combinação única de farinha de ossos e pasta de carvão como agente aglutinante na criação de briquetes de lodo de esgoto. Através da sua abordagem inovadora, conseguiram melhorar a coesão entre os materiais utilizados nos briquetes.

### 3.5.3 Partículas

O amido, que representa de 3 a 6% da mistura, é o ligante mais utilizado no Brasil. Além disso, o melão de cana em pó também é utilizado como aglutinante, desintegrado em água e aquecido a 70 °C. Os briquetes formados com esses ligantes conseguiram assumir até 20% do lugar do carvão vegetal na redução elétrica e nos altos-fornos, conforme constatação relatada pela ANTUNES em 1982. Esses resultados foram considerados satisfatórios.

A Tabela 2.4 demonstra que os briquetes podem ser fabricados utilizando uma variedade de matérias-primas e ligantes.

No processo de briquetagem, são utilizados mais de 50 tipos diferentes de ligantes, tanto orgânicos quanto inorgânicos. No Brasil, os ligantes mais utilizados são amido de milho, alcatrão vegetal, melão de cana-de-açúcar, fécula de mandioca e resinas sintéticas, conforme observado por DIAS ET AL. em 2012.

#### 3.5.4 Granulometria

Para criar briquetes, é necessário utilizar uma mistura de partículas de tamanhos variados. O tamanho máximo de partícula permitido depende do tipo de material e do diâmetro da matriz. Geralmente, um tamanho de partícula de 5 a 10 mm é aceitável, mas prensas maiores com matrizes de 125 mm de diâmetro podem lidar com partículas de até 15mm de tamanho (LIPPEL, 2017). O tamanho inicial das partículas também desempenha um papel na porosidade e densidade final dos briquetes (KALIYAN & MOREY, 2009). Tamanhos de partículas menores levam a briquetes mais densos, mas requerem pressões e temperaturas mais altas para ligar as partículas sem o uso de ligantes (ERIKSSON ET AL., 1990).

É fundamental verificar o tamanho das partículas da biomassa antes da compactação, pois o tamanho das partículas é um fator significativo na resistência mecânica dos briquetes, conforme relatado por KALIYAN & MOREY (2009).

#### 3.5.5 Efeito da densidade

Conforme destacado por SILVA (2001), a densidade é um fator crucial na determinação das características da biomassa florestal. Refere-se à concentração de massa dentro de um determinado volume de material e tem impacto direto no valor calorífico de uma substância. O calor produzido pela combustão é proporcional à massa do material, portanto materiais mais densos como carvão e madeira apresentam maior poder calorífico por unidade de volume. A densidade relativa aparente e a densidade real são ambas examinadas em estudos de compactação de

biomassa, pois a compactação ou briquetagem pode aumentar a densidade dos resíduos e produzir um produto com alto potencial energético (QUIRINO et al., 2005).

### 3.5.6 Efeito da compactação

O ato de compactar vários materiais em uma forma mais densa é conhecido como briquetagem e, como muitas práticas, apresenta vantagens e desvantagens.

A compactação da biomassa em pellets, briquetes ou cubos traz vários benefícios. Em primeiro lugar, aumenta o conteúdo calorífico do material por unidade de volume. Em segundo lugar, facilita muito os processos de transporte e armazenamento. Em terceiro lugar, a uniformidade da queima do combustível é superior à dos materiais fragmentados. Em quarto lugar, o processo de compactação ajuda a aliviar a questão da disponibilidade de resíduos. Em quinto lugar, elimina a possibilidade de combustão espontânea durante o armazenamento. Em sexto lugar, reduz a biodegradação dos resíduos. Em sétimo lugar, devido à baixa umidade, o combustível aquece rapidamente, produzindo menos fumaça, cinzas e fuligem em comparação com a lenha (KALIYAN & MOREY, 2009).

A compactação tem suas desvantagens, incluindo investimentos financeiros significativos em equipamentos e consumo de energia durante o processo. Além disso, os briquetes criados por compactação são propensos à desintegração quando expostos à umidade ou a altos níveis de umidade. Os equipamentos utilizados no processo e o produto resultante também estão sujeitos a impostos elevados, conforme observado por BHATTACHARYA em 2004.

### 3.5.7 Resistência a compressão

Ao medir a resistência dos briquetes à compressão, pode-se estimar a resposta mecânica do material a uma determinada carga ou força. Esses exames são normalmente realizados com uma máquina universal LOSENHAUSEN. O software que acompanha a máquina calcula o resultado da resistência à compressão, que é a maior quantidade de carga de resistência expressa em função do tempo antes da falha do briquete. TEIXEIRA ET AL. (2010) sugere que uma resistência à compressão superior a 7 MPa, 71,38 kg f cm<sup>-2</sup> ou 0,7138g cm<sup>-3</sup> é considerada excepcionalmente alta.

### 3.5.8 Composição da matéria prima

Os atributos físicos e energéticos dos briquetes são resultado direto da composição química da biomassa. A resistência dos briquetes depende do quão compacto ou aglutinado é o material, enquanto a energia liberada na queima deles é determinada pelo seu poder calorífico. Cada material possui qualidades distintas quando queimado, que são ditadas pela proporção dos componentes que o compõem, conforme afirmado por BRIDGWATER em 2001.

Os principais componentes empregados na produção de briquetes no Brasil são compostos pelas seguintes matérias-primas:

Segundo pesquisa da Lippel em 2017, foram encontrados diversos materiais utilizados na produção de serragem, maravalha, resíduos florestais, casca de arroz, casca de eucalipto, bagaço de cana, algodão, casca de café e até sementes de açaí.

### 3.5.9 Efeitos da temperatura e pressão

Na produção de briquetes, temperatura e pressão são duas variáveis cruciais que afetam o processo de compactação da matéria-prima. Estes efeitos desempenham um papel significativo na determinação das propriedades finais do produto, bem como do consumo de energia necessário para a sua produção. De acordo com pesquisa realizada por REED ET AL. (1980), o trabalho e a pressão de compactação podem ser reduzidos pela metade se a matéria-prima for aquecida antes da compactação. Enquanto isso, BHATTACHARYA ET AL. (1989) verificaram que a resistência do produto compactado é diretamente proporcional à temperatura de compressão, sendo a resistência ótima alcançada em aproximadamente 220°C.

A densidade final do produto depende da quantidade de pressão aplicada durante o processo de compactação. De acordo com as descobertas de pesquisadores como REED ET AL. (1980), existe uma correlação direta entre a pressão aplicada e a eventual densidade do produto.

## 3.6 ÓLEO VEGETAL RESIDUAL

Quando óleos vegetais são utilizados no processo de fritura, eles são considerados inúteis e podem apresentar riscos ambientais consideráveis se não forem descartados de forma adequada. É comum que a maior parte dos resíduos gordurosos produzidos nos processos de fritura comercial e residencial fiquem sem destino adequado. Muitas vezes, esses resíduos são descartados em lixeiras, pias de cozinha ou mesmo diretamente em corpos d'água e no solo (MURTA & DE FREITAS, 2012).

Conforme constatações de MURTA & DE FREITAS (2012), quando não existe uma estação de tratamento de esgoto, o óleo não processado é lançado diretamente em corpos hídricos como rios, lagoas e baías, levando à poluição de uma parcela significativa da água. Por outro lado, se o óleo residual dos processos de fritura não for descartado no meio ambiente, ele poderá ser coletado e reaproveitado para diversas aplicações de baixo custo, como criação de biodiesel, sabão, tintas a óleo, massas e esmaltes, entre outras. Este reaproveitamento do petróleo evita a contaminação das fontes de água, uma vez que o petróleo não se infiltra e polui as reservas de água. Estas conclusões são apoiadas pela SABESP (2011).

Para reaproveitar o óleo usado como combustível, é imperativo eliminar quaisquer sólidos ou umidade presentes (WILDNER & HILLIG, 2012). Esta fonte de combustível possui uma quantidade considerável de conteúdo energético específico (MJ kg<sup>-1</sup>) em comparação com outros combustíveis derivados de biomassa (CRUZ ET AL., 2001). MEIRELES & ALVES (2011) sugerem que a gestão ideal desses resíduos requer colaboração e distribuição de responsabilidade entre o setor público, organizações privadas e a sociedade como um todo.

### **3.7 LEGISLAÇÃO PARA O DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei 12.305/2010 (também conhecida como Lei Ordinária), regulamenta a destinação de resíduos sólidos no Brasil. Esta lei foi publicada no DOU em 03/08/2010, na página 2, e também altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Adicionalmente, outras medidas são tomadas no âmbito desta lei.

De acordo com o artigo segundo da lei 12.305/2010, a regulamentação relativa aos resíduos sólidos deverá obedecer não apenas às disposições desta lei, mas também às previstas nas Leis nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, 9.974, de 6 de junho de 2000, e 9.966, de 28 de abril de 2000. Adicionalmente, as normas do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS), do Sistema Único de Saúde Agropecuária (SUASA) e do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO) também deve ser seguido.

De acordo com a definição brasileira de 2010, resíduo sólido é qualquer material, objeto ou substância resultante de atividades humanas e destinado a ser descartado no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos que exijam técnica ou soluções economicamente inviáveis para evitar a sua descarga em sistemas públicos de esgotos ou corpos de água. Esses resíduos são considerados resíduos sólidos quando se esgotam todos os processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis para o seu tratamento e valorização, restando

apenas a disposição final ambientalmente adequada.

A norma técnica NBR 10.004 é responsável por categorizar os resíduos sólidos em diversos níveis de periculosidade, levando em consideração potenciais riscos ambientais à saúde pública (ABNT, 2004). Utilizando as normas e testes recomendados, os resíduos sólidos podem ser separados e classificados em duas categorias primárias: Classe I - Resíduos Perigosos e Classe II - Resíduos Não Perigosos, que ainda é dividida em Classe IIA - Não Inertes e Classe IIB - Inertes. No Brasil, a aplicação de lodo de esgoto sanitário em terras agrícolas é regida pela Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2006).

A legislação relativa aos resíduos radioativos não é regida por esta Lei, existindo legislação específica para o efeito.

### **3.8 LEGISLAÇÃO PARA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

A resolução nº 436, publicada no DOU nº 247, de 26 de dezembro de 2011, é o marco legal que fiscaliza o controle de poluentes no Brasil. Esta resolução estabelece os limites de emissão de resíduos com base no tipo de fonte e no poluente envolvido, conforme especificado nos anexos. O processo de construção desta resolução foi semelhante ao da resolução nº. 382/2006, que se concentra na regulamentação de novas fontes de emissão (CONAMA, 2007).

A resolução nº. 436 foi publicada em 26 de dezembro de 2011 no DOU nº 247, e serve como complemento à resolução nº. 382/2006. Esta última resolução rege as fontes de emissão que foram instaladas antes de 2 de janeiro de 2007. Ambas as resoluções contêm apêndices que dizem respeito ao tratamento de determinados tipos de resíduos, conforme descrito nas estatísticas apresentadas na Tabela 5.

Para cumprir as normas previstas nas resoluções, existe um órgão responsável pelo monitoramento e autorização das atividades ambientais. Esta organização tem autoridade para estabelecer limites de emissão mais rigorosos do que os especificados nas resoluções acima mencionadas. Esta decisão basear-se-á numa análise cuidadosamente ponderada da área circundante à fonte de poluição e das suas condições específicas. Além disso, a gestão da qualidade do ar pode exigir tais medidas a seu critério.

Tabela 5 Anexos da RESOLUÇÃO No 436/2011, poluentes e fontes poluidoras

<b>ANEXO I</b>	Processos de geração de calor a partir da combustão externa de óleo combustível
----------------	---

<b>ANEXO II</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de gás natural
<b>ANEXO III</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de biomassa de cana-de-açúcar
<b>ANEXO IV</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira
<b>ANEXO V</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de turbinas a gás para geração de energia elétrica.
<b>ANEXO VI</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de refinarias de petróleo
<b>ANEXO VII</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de fabricação de celulose
<b>ANEXO VIII</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de fusão secundária de chumbo
<b>ANEXO IX</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos da indústria de alumínio primário
<b>ANEXO X</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de fornos de fusão de vidro
<b>ANEXO XI</b>	Limites de emissão de poluentes atmosféricos provenientes da indústria do cimento Portland
<b>ANEXO XII</b>	Limites de emissão de poluentes atmosféricos gerados na produção de fertilizantes, ácido sulfúrico, ácido nítrico e ácido fosfórico
<b>ANEXO XIII</b>	Limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro
<b>ANEXO XIV</b>	Determinações a serem observadas para a realização do monitoramento das emissões atmosféricas e na elaboração de relatórios de monitoramento

---

Fonte: adaptado CONAMA (2011b).

Os anexos que mais se assemelham aos biocombustíveis sólidos são os anexos III e IV das resoluções, pois ambos são compostos por biomassa. Estes anexos são semelhantes aos briquetes desenvolvidos. Porém, atualmente não existe nenhuma resolução para a queima de lodo de esgoto sanitário.

O Anexo III diz respeito às restrições às emissões de poluentes atmosféricos gerados pela

combustão da biomassa da cana-de-açúcar em processos de geração de calor. Aplica-se às fontes que foram instaladas ou tiveram licença de instalação solicitada antes de 2 de janeiro de 2007. Após esta data, entra em vigor a Resolução nº 382/2006, que incide sobre as fontes de combustão mais recentes.

Para utilizar estes anexos, é imperativo que você esteja ciente das seguintes definições:

A biomassa da cana-de-açúcar é um subproduto tanto do processamento industrial quanto da colheita que ultrapassa a capacidade nominal, que é o limite máximo de operação da unidade de geração de calor para a qual o equipamento foi inicialmente projetado. A geração de calor por combustão externa é o processo de queima de madeira ou biomassa de cana-de-açúcar, realizado em qualquer caldeira ou forno, onde os produtos da combustão não estão em contato direto com o produto ou material processado.

Tabela 6 Atividades e poluentes atmosféricos regulamentados pela CONAMA 382/07.

<b>Atividades</b>	<b>Anexo na CONAMA 382/2007</b>	<b>Poluentes regulamentados</b>	<b>Faixas de Potência Nominal (MW)</b>
<b>Geração de calor por combustão de bagaço da cana-de-açúcar</b>	Anexo III	MP e NO <sub>x</sub>	P < 10 10 ≤ P ≤ 75 P > 75
<b>Geração de calor por combustão de derivados da madeira</b>	Anexo IV	MP e NO <sub>x</sub>	P < 10 10 < P < 30 30 < P < 70 P ≥ 70

Fonte: Adaptado de CONAMA (2007). MP: Material particulado. NO<sub>x</sub>: Concentração de óxidos de nitrogênio.

A regulamentação para liberação de poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor que utilizam combustão externa de biomassa de cana-de-açúcar e derivados de madeira foi estabelecida de acordo com a Resolução nº 382/2006, conforme descrito na Tabela 6, e a Resolução nº 436/2011, conforme descrito na Tabela 7. Essas tabelas fornecem limites específicos de emissões que devem ser respeitados para atender às diretrizes estabelecidas.

As concentrações de poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor, especificamente aqueles resultantes da combustão externa de derivados de madeira, estão definidas no Anexo IV das resoluções (382/07 e 436/11) e são expressas em miligramas por metro cúbico normal (mg/Nm<sup>3</sup>). Estes limites de emissão aplicam-se a fontes que foram instaladas ou tiveram

licença de instalação solicitada antes de 2 de janeiro de 2007.

Tabela 7 Atividades e Poluentes atmosféricos regulamentados pela CONAMA 436/11.

<b>Atividades</b>	<b>Anexo na CONAMA 436/2011</b>	<b>Poluentes Regulamentados</b>	<b>Faixas de Potência Nominal (MW)</b>
<b>Geração de calor por combustão de bagaço da cana-de-açúcar</b>	Anexo III	MP e NO <sub>x</sub>	P <50 50 ≤ P ≤100 P >100
<b>Geração de calor por combustão de derivados da madeira</b>	Anexo IV	MP e NO <sub>x</sub>	P <10 10 ≤ P ≤50 P >50

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011b). MP: Material particulado. NO<sub>x</sub>: Concentração de óxidos de nitrogênio.

Para compreender plenamente este anexo, é necessário explorar algumas definições importantes, incluindo capacidade nominal e poder calorífico. No entanto, também é importante compreender outros conceitos, como os derivados de madeira. Derivados de madeira referem-se a materiais como lenha, serragem, cavacos, pó de lixa, casca de árvore, compensado, aglomerado, MDF e outras substâncias semelhantes. Esses materiais não foram tratados com produtos halogenados ou revestidos com produtos polimerizados, tintas ou outros revestimentos. Além disso, sua composição pode ser utilizada para prever os gases que produzem durante a combustão (CONAMA, 2011b).

A geração de calor por combustão externa envolve a queima de derivados de madeira em uma fornalha ou caldeira. Os produtos da combustão são mantidos separados do material ou produto que está sendo processado, conforme definido pelo CONAMA (2011b).

As regulamentações que determinam os níveis máximos permitidos de gases poluentes liberados no ar como resultado da concentração de material particulado (PM) e NO<sub>x</sub> estão descritas nas diretrizes apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 Limites de emissão dos anexos III e IV da Resolução CONAMA 382/07.

PTN (MW)	Concentração limite de emissão MP (mg N m-3)		Concentração limite de emissão NOX (mg N m-3)	
	Bagaço de Cana (8% de O <sub>2</sub> )	Madeira (8% de O <sub>2</sub> )	Bagaço de Cana (8% de O <sub>2</sub> )	Madeira (8% de O <sub>2</sub> )

< 10	300	730	N.A.	N.A.
10 ≤ PTN				
< 30	300	520	350	650
30 ≤ PTN < 70	250	260	350	650
≥ 70	N.A.	130	350	650

N.A (não aplicável)

Fonte: Adaptado de CONAMA (2007).

Ao examinar as Tabelas 8 e 9 para emissões de poluentes, pode-se deduzir que a Resolução CONAMA 382/07 instituiu um limite inferior para emissões de PM (material particulado). Em contraste, a Resolução CONAMA nº 436/2011 implementou um limite mais elevado para emissões de PM, indicando uma abordagem menos rigorosa a este respeito.

Tabela 9 Limites de emissão dos anexos III e IV da Resolução CONAMA nº 436/2011.

PTN (MW)	Concentração limite de emissão		Concentração limite de emissão NOX (mg N m-3)	
	MP (mg N m-3)			
	Bagaço de Cana (a 8% de O <sub>2</sub> )	Madeira (a 8% de O <sub>2</sub> )	Bagaço de Cana (a 8% de O <sub>2</sub> )	Madeira (a 8% de O <sub>2</sub> )
< 10	520	730	N.A.	N.A.
10 ≤ PTN < 30	540	520	350	650
30 ≤ PTN < 70	450	260	350	650
≥ 70	390	130	350	650

N.A (não aplicável)

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011b).

### 3.9 USO DE DIFERENTES REJEITOS E BIOMASSA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Apesar de a produção de briquetes existir desde o século passado, ela ainda não ganhou ampla utilização ou popularidade no Brasil. Como resultado, existem muito poucas obras literárias sobre o assunto. No entanto, nos últimos anos, o interesse tem sido despertado tanto pela comunidade acadêmica como pelos profissionais da indústria, em grande parte devido à utilização econômica de resíduos.

Em 2009, GONÇALVES ET AL. criou briquetes misturando RRSU (rejeitos de resíduos sólidos urbanos) com resíduos de madeira contendo 12% de umidade em diversas concentrações. Os autores realizaram testes para determinar a melhor mistura, avaliando combustibilidade versus cinzas, durabilidade e energia utilizável. Os briquetes que continham menos de 10% de RRSU

apresentaram baixa durabilidade, enquanto aqueles com mais de 15% demonstraram um aumento significativo no teor de cinzas. Conseqüentemente, os testes que apresentaram resultados mais favoráveis em termos de combustibilidade versus cinzas e resistência mecânica foram aqueles contendo 15% de RRSU. Quanto à energia utilizável, o briquete com 25% de RRSU apresentou o maior poder calorífico com 17.175 MJ kg<sup>-1</sup>, levando os autores a proporem o RRSU como aditivo na produção de briquetes. No entanto, são necessárias mais pesquisas sobre as emissões de gases.

SCHNEIDER & VON MÜHLEN (2011) realizaram um estudo sobre o lodo gerado tanto pela reciclagem de papel quanto pelo processamento de celulose pura. O estudo descobriu que o lodo possui uma concentração significativa de celulose, que possui forte capacidade de ligação. Adicionalmente, o estudo envolveu uma análise cromatográfica dos compostos orgânicos encontrados em resíduos sólidos da indústria de reciclagem de papel. Esta análise foi então aplicada à criação de briquetes de carvão vegetal.

Em estudo realizado por DE OLIVEIRA ET AL. (2013), constatou-se que a utilização de resíduos agrícolas e agroindustriais na forma de briquetes é uma alternativa viável para lidar com o problema de gestão de resíduos e produção de energia. Os pesquisadores focaram no aproveitamento de resíduos da bananicultura, especificamente folhas e pseudocaules, na cidade de Joinville-SC. O potencial desses materiais na produção de briquetes foi avaliado por meio de diversas técnicas analíticas, como análise química (teor de umidade, teor de cinzas, material volátil e carbono fixo), poder calorífico e comportamento térmico via análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTG). DE OLIVEIRA ET AL. (2013) também relataram que a produção de banana em Joinville-SC em 2010/11 foi de aproximadamente 24.300 toneladas, o que resultou em 1,5 toneladas de folhas e 2,5 toneladas de pseudocaules por tonelada de banana produzida. As folhas apresentaram PCS de 17,64 MJ kg<sup>-1</sup>, enquanto os pseudocaules apresentaram valor de 15,22 MJ kg<sup>-1</sup>. Esses resultados foram comparáveis aos de outros tipos de biomassa, como o eucalipto, que possui poder calorífico de 16,72 MJ kg<sup>-1</sup>. Além disso, ambos os materiais apresentavam altos níveis de material volátil e carbono, alto poder calorífico e teor de umidade ideal para briquetagem. Existem diversas obras literárias que exploram a produção de bio-óleo. Entre os métodos mais pesquisados estão aqueles que utilizam a pirólise para gerar energia ou combustível, normalmente na forma de calor. Exemplos de tais estudos incluem o trabalho de JIANG ET AL. (2017), que produziu bio-óleo a partir de xisto, CAPUTO & PELAGAGGE(2002), que produziu bio-óleo a partir de polímeros, e BENEROSO ET AL. (2017), que utilizaram micro-ondas para produzir bio-óleo a partir de biomassa. Além disso, vários autores contribuíram para o crescente interesse na pirólise como forma de transformar biomassa

em bioóleo, incluindo CHEN ET AL. (2003) e VIEIRA (2004).

Na literatura, vários estudos examinaram o potencial de produção de energia utilizando uma combinação de carvão e lodo de esgoto sanitário. Um desses estudos, realizado por SHEN & ZHANG (2004), envolveu a mistura de lixo urbano (20%) com lodo de esgoto (80%) e aquecimento da mistura a 500 °C. Os resultados mostraram que 17% da mistura foi convertida em óleo pirolítico com poder calorífico de 33 MJ kg<sup>-1</sup>, de caráter semelhante ao óleo diesel (com poder calorífico de aproximadamente 43 MJ kg<sup>-1</sup>).

Em estudo realizado por JEONG ET AL. (2014), uma mistura de serragem de pinheiro e carvão vegetal foi submetida à pirólise, revelando taxas de reação a 1000°C que excederam aquelas observadas nos componentes individuais. Descobriu-se que a taxa de reação aumenta com a quantidade de biomassa presente na mistura. Este efeito catalítico é atribuído aos componentes das cinzas produzidos pela biomassa, nomeadamente Ca e K. Este fenômeno foi previamente documentado em estudos de vários autores, incluindo ZHU ET AL. (2008), MITSUOKA ET AL. (2011) e YUAN ET AL. (2012).

De acordo com a simulação matemática de injeção de finos de carvão vegetal em altos-fornos de SILVEIRA ET AL. (2002), observou-se que existe uma correlação entre a quantidade de finos de carvão injetados e a redução do volume de escória. A causa deste fenômeno é atribuída às propriedades básicas da cinza de carvão, que contém mais CaO e MgO. Devido a essa característica específica e ao seu menor teor (1,5 a 3% de carvão versus 9 a 12% de coque), é possível minimizar a quantidade de fundente necessária e, assim, gerar menos escória.

Na sua análise de 2009, Norgate e Langberg examinaram as implicações econômicas e ambientais da utilização do carvão como substituto dos combustíveis fósseis no processo de produção de aço. A sua conclusão, com base em considerações de custos, foi que o carvão vegetal não se revelou uma alternativa viável ao carvão mineral em centrais de produção de eletricidade ou em fornos elétricos.

A combustibilidade e a reatividade do carvão foram estudadas por BABICH ET AL. (2010), que utilizaram diversas técnicas e equipamentos para comparar o carvão mineral com o carvão de origem vegetal. A pesquisa revelou que o carvão vegetal oferece diversos benefícios, incluindo maior produtividade, melhor qualidade do metal nos equipamentos de combustão e redução do coque, principalmente devido às suas qualidades como baixo teor de enxofre, estrutura porosa e alta área superficial. Porém, a adição desta biomassa precisa ser monitorada cuidadosamente devido à sua alta umidade e baixa densidade. É crucial garantir que a proporção de carvão adicionado seja adequadamente equilibrada para evitar um aumento no gasto energético durante o processo de produção.

A viabilidade econômica de complementar o alto-forno com biomassa, seja bruta ou carbonizada em temperaturas variadas, foi avaliada por HELLE ET AL. (2009) através de modelos matemáticos. As suas conclusões indicam que a adição de biomassa só é prática se for vendida a uma determinada porcentagem abaixo do valor do carvão e do coque. Além disso, a biomassa requer pré-processamento como combustível auxiliar com baixo poder calorífico e alto teor de oxigênio não renderia alta produtividade. Os pesquisadores também descobriram que uma temperatura de até 250°C resulta em combustível com elevado teor de carbono e valor calorífico, sem uma diminuição perceptível na eficiência.

Em suas pesquisas, GIL et al. (2010) realizaram testes não isotérmicos utilizando uma combinação de serragem de pinus e carvão vegetal de alta volatilidade em uma proporção de 5 a 80% em massa dentro de uma termobalança. Eles determinaram que não houve desvios nas curvas de comportamento. Enquanto isso, LESTER ET AL. (2007) empregaram um método no qual aqueceram uma mistura de biomassa e carvão em gás N<sub>2</sub> até uma temperatura de 900°C. Depois, substituíram o gás por ar e deixaram a amostra isotermicamente até que a perda de massa se estabilizasse. Esta técnica pode ser utilizada para caracterizar a proporção de biomassa nas misturas.

Num esforço para compreender a interação entre misturas de carvão altamente voláteis e serradura de pinheiro, MOGHADDERI e os seus colegas iniciaram um estudo em 2004. O estudo envolveu uma investigação de taxas de aquecimento baixas e altas.

Ao realizar a análise, foi determinado que não há interação química entre os componentes. Isto deve-se ao facto de os dois combustíveis não interagirem quimicamente em condições inertes, conduzindo a uma ausência geral de efeitos mutuamente benéficos. Adicionalmente, verificou-se que a quantidade de produtos primários de pirólise obtidos é diretamente proporcional à porcentagem de biomassa e carvão na mistura.

A análise realizada por SAHU ET AL. (2014) envolveram a combustão não isotérmica de um carvão médio volátil juntamente com serragem tratada termicamente e casca de arroz, ambos aquecidos a 300 e 450 °C. Suas descobertas sugerem que não há correlação discernível entre a biomassa mais reativa e o desempenho de combustão resultante. Em contraste, a relação entre o mesmo carvão e uma biomassa menos reativa parece ser mais significativa. Apesar de algumas pequenas discrepâncias, observou-se geralmente que a taxa máxima de reação aumentou como resultado da incorporação de biomassa no carvão.

A utilização de lodo de esgoto na agricultura apresenta uma perspectiva diferente em todo o mundo, dependendo das regulamentações de cada país. Neste contexto, COSCIONE ET AL. (2010) ilustram que a implantação de lodo de esgoto adequadamente processado proporciona avanços

físico-químicos e biológicos ao solo.

Segundo DOSHI ET AL. (2003), existe uma instalação industrial na Austrália com capacidade para processar 20 toneladas de lodo diariamente e produzir até trezentos litros de óleo pirolítico por tonelada seca de lodo. O foco principal desta planta é processar lodo de esgoto, lodo de curtume e resíduos de lodo oleoso.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A quantidade de lixo que surge durante o processamento do esgoto sanitário é substancial. Em 2005, BARNETO ET AL. informou que a produção de lodo de esgoto na Espanha foi de 1.120.000 toneladas. Mais de 60% desses resíduos foram destinados ao uso do solo. KHAI (2007) afirma que, nos Estados Unidos, 50% do lodo de esgoto criado é aplicado no solo. Na Europa, mais de 30% do lodo de esgoto formado é utilizado como fertilizante na agricultura. Na Austrália, são produzidas aproximadamente 250 mil toneladas de lodo de esgoto a cada ano, sendo um terço empregado na agricultura (MOLLOY ET AL., 2005).

A quantidade estimada de lodo produzido anualmente no Brasil está entre 150 e 220 mil toneladas, mas apenas 55% do esgoto é coletado e apenas 28% do coletado é tratado. É importante ressaltar que 70% da população urbana permanece sem coleta e tratamento adequado de esgoto, conforme dados do IBGE em 2010 e de Pedroza em 2010. Em Cascavel, no Paraná, foram retiradas aproximadamente 3,2 mil toneladas de lodo em 2015, sendo a maior parte encaminhados para aterros sanitários devido ao alto custo do tratamento de aplicação do solo. Este ano, porém, devido ao excesso de chuvas, a quantidade de lodo removido foi inferior aos anos anteriores, conforme informado pela SANEPAR em 2015.

O Brasil é atualmente o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, que é fabricado por diversas indústrias do país. Em 2015, a produção mundial foi de cerca de 50 milhões de toneladas, com o Brasil contribuindo com 7,538 milhões de toneladas, o que equivale a 15% da produção mundial de carvão vegetal naquele ano, segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2015).

Devido à raridade de jazidas de carvão mineral de qualidade suficiente, o Brasil está entre os poucos países que empregam esse material na fabricação de ferro-gusa. Como resultado, a maior parte é reservada para utilização na indústria siderúrgica como forma de reduzir o minério de ferro (ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2011).

Durante a produção e transporte do carvão vegetal, inevitavelmente são geradas pequenas partículas chamadas resíduos, mas devido ao seu tamanho diminuto, carecem de utilidade

industrial. Esses resíduos são normalmente pulverizados e soprados em altos-fornos siderúrgicos como forma de disposição, como exemplificado por SALEME (1992) e PEREIRA ET AL. (2009). Alternativamente, podem ser empregados como substância que condiciona a base e os substratos vegetais, conforme demonstrado por SOUCHIE ET AL. (2011). Por último, FONTES ET AL. (1989) sugerem que esses resíduos podem ser transformados em briquetes para produção de energia e utilizados como agente redutor em altos-fornos.

Sabe-se que os cidadãos brasileiros consomem uma quantidade considerável de óleo vegetal. Na verdade, aproximadamente 3 bilhões de litros de óleo vegetal comestível são produzidos anualmente para diversas finalidades, como uso residencial, comercial e industrial (THODE FILHO ET AL., 2013). No entanto, apenas uma porcentagem minúscula de menos de 3% é reciclada, enquanto a grande maioria é eliminada incorretamente pelo público em geral e pelas indústrias. Isso resulta no lançamento de um grande volume de resíduos de óleos vegetais no solo, nas redes de esgoto e nos corpos hídricos (ABIOVE, 2014), o que por sua vez causa uma série de impactos ambientais negativos. Quando o óleo é lançado de forma descuidada nos efluentes ou no solo, ele se torna um poluente, obstruindo tubulações e gerando uma camada na superfície da água que bloqueia a luz solar, reduzindo a fotossíntese e o oxigênio, e levando à morte da fauna aquática (SABESP, 2011; QI ET AL., 2009).

Em determinadas localidades existem políticas públicas e iniciativas que aceitam o óleo de cozinha já usado para reaproveitá-lo de forma mais adequada, como na criação de biodiesel. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, nos primeiros dez meses de 2014 foram produzidos no Brasil 2.756.124 metros cúbicos de biodiesel, utilizando diversas matérias-primas. Desse total, 20.609 metros cúbicos de biodiesel foram gerados a partir da coleta de óleo de fritura usado. Com o objetivo de reciclar óleo de cozinha usado, DOS SANTOS ET AL. (2013) propuseram o desenvolvimento de sabonetes ecológicos, uma opção sustentável.

A eliminação adequada de três resíduos, nomeadamente lamas de esgotos sanitários, resíduos de óleo alimentar e finos de carvão, é imperativa. No Brasil, a não reutilização de resíduos industriais leva a uma perda anual de aproximadamente R\$ 40 bilhões de reais em receitas (THODE FILHO ET AL., 2013). É crucial explorar alternativas para a gestão e aproveitamento destes resíduos.

Numerosos estudos exploraram métodos alternativos de gestão e eliminação de resíduos. Um desses métodos envolve a utilização de resíduos como biomassa para gerar energia por meio da combustão. No entanto, a utilização desses resíduos diretamente na combustão é muitas vezes impraticável devido aos desafios de manuseio e à má qualidade do material combustível. Como resultado, uma abordagem alternativa é submeter estes resíduos ao processo de briquetagem.

Segundo DIEZ ET AL. (2012), esse processo envolve a compactação de pequenas partículas em estado sólido para criar blocos de material compacto de alta densidade e formato definido.

Vários estudos de pesquisa avaliaram a utilização de briquetes feitos de resíduos como fonte de energia. Esses estudos abrangeram diferentes tipos de resíduos como resíduos sólidos urbanos rejeitados (RRSU) e resíduos de madeira de *Eucalyptus grandis* (GONÇALVES ET AL., 2009), lodo que é subproduto da reciclagem de papel e processamento de celulose (SCHNEIDER & VON MÜHLEN, 2011) bem como os resíduos agrícolas e agroindustriais produzidos durante o cultivo da banana (DE OLIVEIRA ET AL., 2013).

Estudos foram realizados em vários materiais para determinar sua adequação à briquetagem, incluindo lodo de esgoto e pellets de madeira (JIANG et al., 2014), cascas de coco e resíduos de papel (OLORUNNISOLA, 2007), polpa de carvão de lama de mina, resíduos animais (carne e ossos), serragem e lodo de esgoto misturado com outros resíduos (WZOREK, 2012). Adicionalmente, pesquisas têm sido feitas sobre a briquetagem de carvão mineral em diferentes tamanhos e o impacto da umidade no processo (SUN ET AL., 2014).

YANK ET AL. (2016) exploraram o uso de goma (quiabo), pó de arroz e fécula de mandioca como ligantes na produção de briquetes de casca de arroz. Em um estudo separado, LELA ET AL. (2016) investigaram o potencial do uso de papelão e serragem como biomassa para fins de produção de energia. STOLARSKI ET AL. (2013) obtiveram biomassa florestal de vários restos agrícolas no nordeste da Polónia, bem como bagaço de colza (canola) e serradura de plantas perenes. Em ainda outro estudo, KIM ET AL. (2016) conduziram experimentos de oxidação parcial em briquetes feitos de lodo de esgoto de uma estação de tratamento coreana e madeira de pinheiro na forma de serragem, utilizando um método de corrente ascendente de leito fixo.

Após um exame minucioso de múltiplas bases de dados, incluindo o ISI Web o Knowledge, o banco de dados gratuito de patentes do INPI e o banco de teses da Capes, não foram descobertos registros sobre a utilização de lodo de esgoto não adulterado ou uma combinação dele com outras substâncias para criar briquetes para a finalidade de geração de energia por combustão. Além disso, não havia documentação relativa à imersão de óleo de cozinha em briquetes.

+

**CAPÍTULO 2: PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM LODO DE ETA E  
SERRAGEM DE *PINUS SP.***

## RESUMO

A crescente demanda para o tratamento de água no Brasil devido ao aumento da população, urbanização rápida, poluição da água, e mudança climáticas, gera grandes quantidades de resíduos, o que demanda estudos sobre seu aproveitamento. O objetivo deste estudo foi avaliar a produção de briquetes de lodo de ETA combinado com serragem de *Pinus sp.* O lodo de ETA foi coletado em estação de tratamento de tratamento Capim Branco localizado na cidade de Uberlândia no estado de Minas Gerais, e a serragem em madeiras da mesma região. A análise química elementar, imediata, poder calorífico de cada biomassa foi avaliada. Os briquetes foram produzidos em prensa hidráulica com 0, 5, 15, 25, 35, 65, 75, 85 e 95 % de lodo, e a análise termogravimétrica foi realizada com estas proporções de cada material. A serragem de *Pinus sp.* apresentou maior teor de carbono, oxigênio e hidrogênio, enquanto o lodo apresentou maior teor de nitrogênio e enxofre. O lodo apresentou alto teor de cinzas (55,50%), enquanto a serragem de *Pinus sp.* apresentou maior teor de carbono fixo (15,8%), material volátil (83,7%) e poder calorífico (20,25 Mj/kg). Na análise termogravimétrica, as amostras com maior proporção de lodo de ETA apresentaram maior resistência a degradação térmica, sendo que a amostra com 100% de lodo apresentou 63,3% de massa residual após ser submetida a 950 °C. As amostras com maiores proporções de serragem de *Pinus sp.* apresentaram massa residual inferior a 15% e maior taxa de degradação térmica entre 275, e 367,9 °C. Os briquetes produzidos com maiores proporções de lodo apresentaram maior densidade aparente e densidade energética. Devido ao alto teor de cinzas, o lodo deve ser utilizado em baixas proporções na produção de briquetes com serragem de *Pinus sp.* Os resultados mostram uma importante alternativa de utilização do lodo de ETA, e o maior ganho na sua utilização é o fator ambiental.

**Palavras-Chave:** Biomassa; Bioenergia; Energia renovável; Gestão de resíduos; Reciclagem; Sustentabilidade.

## 2.1 INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de esgoto sem tratamento no meio ambiente representa um risco de transmissão de doenças e contaminação da água, no Brasil apenas 45% do esgoto é tratado (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2019). Por isso, é necessário realizar o saneamento básico e implementar processos de tratamento e reaproveitamento de resíduos. O lodo é um subproduto proveniente de estações de tratamento de água (ETA) utilizadas nas cidades e indústrias. Este resíduo é complexo, rico em matéria orgânica e nutrientes, que contém uma variedade de compostos químicos e agentes patogênicos, por essas razões o uso desse subproduto é restrito em áreas mais sensíveis, como na agricultura. O lodo pode apresentar-se na forma sólida, semissólida ou líquida, dependendo do teor de umidade presente (PEDROZA ET AL., 2010; BIANCHINI ET AL., 2015).

A geração de energia é uma forma de utilização do lodo de ETA, neste contexto a produção de briquetes apresenta potencial. Devido a qualidade do lodo, é comum misturar serragem de *Pinus sp.* a produção do briquete. A madeira de *Pinus sp.* também é um subproduto com potencial energético, muitas vezes não aproveitado, possui teor de cinzas, material volátil e carbono fixo de 0,83%, 82% e 17,17% respectivamente, além de poder calorífico superior entre 14,64 e 20,1 MJ/g, por isso é uma oportunidade de uso para dois subprodutos com potencial energético (OLIVEIRA L. H. ET AL., 2017).

Este valor de 0,83% cumpre os requisitos estabelecidos pela Europa e América do Norte, que exigem teores de cinzas entre 0,5% e 1,5% (HUSEK. ET AL., 2022). As cinzas não entram em combustão, portanto não são desejadas para a geração de energia, os materiais voláteis resultam em queima rápida, sendo importantes na ignição do processo, por fim, o carbono fixo garante uma queima mais lenta e prolongada, estando relacionado diretamente com o poder calorífico (dos SANTOS ET AL., 2023).

A briquetagem é um método que envolve a compactação de biomassa lignocelulósica para criar formas compactas e sólidas a partir de partículas irregulares (MARREIRO ET AL., 2021). Essa técnica aplicada ao lodo, juntamente a serragem de *Pinus sp.* pode ser positiva de várias maneiras, pois transforma resíduos em um combustível mais conveniente para armazenar, manusear e queimar. A qualidade dos briquetes pode ser afetada por fatores inerentes ao processo, como pressão e a temperatura aplicadas durante o processo, e fatores relativos à qualidade da biomassa, como a umidade, granulometria, densidade e composição química (MONTIANO ET AL., 2016; CABRALES ET AL., 2020; OBI ET AL., 2022). O processo começa com a trituração e moagem

da biomassa em partículas que variam de 5 a 10 mm de tamanho. Estas partículas são então compactadas a alta pressão e temperaturas entre 100 e 120°C, ( DRAEGER ET AL. (2021) apresentou a produção de briquetes a partir de lodo têxtil, em seus experimentos pode-se observar que os briquetes obtidos mostraram um poder calorífico próximo aos briquetes de origem vegetal, em seus testes o poder calorífico do lodo biológico chegou a 17,07 MJ.kg<sup>-1</sup> valor inferior aos de biomassa vegetal, que foi de 19,42 e 19,48 MJ.kg<sup>-1</sup> para a serragem de eucalipto e pinus respectivamente.

Portanto, objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização do lodo em mistura com serragem de *Pinus sp.* para a produção de briquetes.

## 2.2 METODOLOGIA

### 2.2.1 MATERIAL BIOLÓGICO

O lodo de ETA foi obtido da estação de Tratamento Capim Branco, situada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (8° 30' e 19° 30' S e 47° 50' e 48° 50' W). A serragem foi obtida a partir de resíduos de *Pinus sp.* provenientes de serrarias da mesma cidade, foi escolhido esse resíduo devido a sua facilidade de ser encontrado em relação aos demais tipos, como exemplo a serragem de eucalipto, onde todo seu beneficiamento é realizado na zona rural e seu resíduo não chega a ir pra zona urbana.

### 2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

O material foi armazenado em câmara climática, em seguida, triturado em moinho willey e peneirado, seguindo uma padronização de laboratório, a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh foi utilizada para realizar a compactação, análise de química imediata, poder calorífico, elementar e termogravimétrica.

A química imediata (teor de cinzas, material volátil e carbono fixo) foi realizada conforme a metodologia descrita na norma NBR 8112 da ABNT (1986). O poder calorífico superior foi determinado conforme mesma metodologia adaptada da NBR 8633 da ABNT (1983).

A análise elementar (CHNS-O) foi realizada no equipamento CHNS-O Flash EA 1112 Series, com utilização de 2,5 mg ( $\pm 0,5$ ) de amostra (serragem ou lodo de ETA). O equipamento foi capaz de determinar os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre.

Além disso, foi calculada a razão entre os teores de carbono e hidrogênio (C/H) e carbono e nitrogênio (C/N) no lodo e serragem.

A análise termogravimétrica foi realizada utilizando as diferentes proporções de lodo e serragem. O teste foi realizado em um Analisador Termogravimétrico, Discovery TGA55, da marca TA Instruments, com taxa de aquecimento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ , em atmosfera de  $\text{N}_2$ , no intervalo de temperatura de 25 a  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.3 PRODUÇÃO DE BRIQUETES

Os briquetes produzidos foram divididos em dez tratamentos conforme a sua proporção de lodo de esgoto e serragem de *Pinus sp.* utilizadas (tabela 1), foram produzidos 10 briquetes por tratamento.

Tabela 10: Proporção de lodo de esgoto e serragem para produção de briquetes e quantidade de massa de cada matéria prima para realização do experimento.

Trat.	Proporção lodo/madeira	Trat.	Proporção lodo/madeira
1	0 / 100	6	65 / 35
2	5 / 95	7	75 / 25
3	15 / 85	8	85 / 15
4	25 / 75	9	95 / 5
5	35 / 65	10	100 / 0

O processo de briquetagem foi realizado em uma prensa hidráulica, onde uma carga de cinco toneladas foi aplicada em um cilindro de  $5\text{ cm}^2$ , resultando em uma pressão  $1.020\text{ kgf cm}^{-2}$ , a pressão foi mantida por 30 segundos (TEIXEIRA et al. 2010). Os briquetes foram condicionados em câmara climática a 50% de umidade relativa e  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  por dez dias.

A umidade na base seca dos briquetes foi determinada conforme equação:  $U_{bs} = (M_u - M_s) / M_s$ , em que:  $U_{bs}$  = umidade do briquete;  $M_u$  = massa úmida do briquete;  $M_s$  = massa seca do briquete após secagem em estufa.

A densidade aparente dos briquetes foi mensurada pela razão entre a massa do briquete após climatização e seu volume, a massa foi determinada em balança com 0,01g de sensibilidade, as dimensões foram mensuradas com auxílio de um paquímetro com sensibilidade de 0,01 mm, foi considerado que todas as amostras possuem formato cilíndrico. A densidade energética foi calculada pelo produto do poder calorífico superior (PCS) e a densidade aparente do briquete (DA).

## 2.2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises da serragem e lodo de esgoto foram comparadas a partir de um delineamento inteiramente casualizado (DIC). As médias foram submetidas à análise de homogeneidade de variância pelo teste de Cochran, em seguida, os tratamentos foram submetidos ao teste t-Student com nível de confiança de 95%.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Caracterização do lodo de ETA e serragem de Pinus sp.*

A composição química elementar do lodo de ETA e da serragem de *Pinus sp.* foram diferentes, componentes visados para a geração de energia, como carbono e hidrogênio, estão presentes em maior proporção na madeira, enquanto que componentes indesejados na geração de energia, como enxofre e nitrogênio, foram encontrados em maior proporção no lodo de ETA (Tabela 2).

Tabela 2 Composição elementar do Lodo e Serragem de *Pinus sp.*

Material	Composição Elementar (%)						
	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	C/H	C/N
Lodo	9,92 <sup>2,4</sup> a	3,51 <sup>1,8</sup> a	0,727 <sup>2,2</sup> a	0,378 <sup>2,3</sup> a	21,92 <sup>2,7</sup> a	2,80 <sup>2,5</sup> a	13,66 <sup>3,1</sup> a
Serragem de Pinus	50,4 <sup>2,1</sup> b	5,89 <sup>2,3</sup> b	0,118 <sup>1,3</sup> b	0,038 <sup>2,2</sup> b	43,55 <sup>2,8</sup> b	8,57 <sup>3,4</sup> b	427,12 <sup>2,2</sup> b

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem pelo teste t-Student com nível de confiança de 95%. Os valores em sobrescrito correspondem ao desvio padrão

O teor de carbono e hidrogênio está diretamente relacionado com o poder calorífico da biomassa (ZOLIN, 2011 AND MORAES 2018; BARZEGAR ET AL., 2020), considerando estes parâmetros, a serragem de *Pinus sp.* apresentou melhor qualidade. Embora ambos os elementos químicos contribuam positivamente para a geração de energia, o hidrogênio é mais energético, desse modo, baixos valores na relação C/H promovem elevado ganho no valor calórico dos biocombustíveis (REAÑO E HALOG, 2020). O teor de oxigênio por sua vez, presente em maior proporção na serragem de *Pinus sp.*, é indesejado no material destinado a geração de energia, por reduzir o poder calorífico do material (AROUS ET AL., 2021).

O teor de enxofre foi maior no lodo de ETA. Este elemento ao entrar em combustão reage com o oxigênio presente na atmosfera, formando dióxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>). Além de

serem tóxicos ao meio ambiente, estes óxidos apresentam baixo ponto de condensação ( $\approx 150^{\circ}\text{C}$ ), formando ácidos que provocam a corrosão de peças de equipamento (WANG ET AL., 2021).

A serragem de *Pinus sp.* apresentou teor de Nitrogênio seis vezes menor, e relação C/N trinta vezes maior. O nitrogênio é indesejado para a geração de energia, por não possuir relação com o poder calorífico e por liberar óxidos de nitrogênio com a combustão, estes gases causam desgastes nos equipamentos de queima e são altamente tóxicos ao meio ambiente. Uma baixa relação C/N reduz a quantidade de nitrogênio a ser liberada na atmosfera com a combustão, além disso, valores baixos para esta relação resultam em rápida liberação de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera durante a combustão, potencializando os efeitos negativos do efeito estufa (GRECO ET AL., 2021). Neste sentido, o teor de nitrogênio do lodo de ETA pode ser um limitante para sua utilização para geração de energia, o que sugere seu uso em menores proporções nas misturas com a serragem de *Pinus sp.*

A serragem de *Pinus sp.* apresentou maior teor de carbono fixo, material volátil e poder calorífico superior, enquanto o lodo apresentou maior teor de cinzas (Tabela 3).

Tabela 3: Carbono fixo; Material volátil, cinzas e poder calorífico do lodo e serragem de *Pinus*.

Material	Análise imediata (%)			Poder calorífico Mj/kg
	Carbono Fixo (%)	Material volátil (%)	Cinzas (%)	
Lodo	8,1 <sup>3,5</sup> a	48,4 <sup>4,6</sup> a	55,5 <sup>14,5</sup> a	14,64 <sup>2,5</sup> a
Serragem de <i>Pinus</i>	15,8 <sup>5,5</sup> b	83,7 <sup>5,1</sup> b	0,513 <sup>15,6</sup> b	20,35 <sup>2,6</sup> b

Valores das médias na vertical seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste a 5% de significância. Os valores em sobrescrito correspondem ao desvio padrão.

O teor de carbono fixo da madeira de *Pinus* foi duas vezes maior que o lodo de ETA, este parâmetro representa a quantidade do material que queima na forma sólida, sendo visado para a produção de energia por garantir uma queima prolongada e contínua (RIAZ EL AL., 2023). A serragem de *Pinus sp.* também apresentou maior teor de material volátil, este material queima na forma gasosa, sendo importante para a ignição da combustão (VIEIRA ET AL., 2023). O alto teor de cinzas do lodo de ETA compromete a sua utilização na produção dos briquetes, este material é composto por minerais e não entra em combustão, sendo necessária sua remoção após a queima, o que diminui o tempo de operação das caldeiras, além de desgastar os equipamentos, por isso, para viabilizar a sua utilização, é necessário que sejam utilizadas menos proporções de lodo de ETA nos briquetes (Souza et al. 2023). As normas exigem que o teor de cinzas nos briquetes não ultrapasse 5%, desse modo, o baixo teor de cinzas apresentado na serragem de *Pinus sp.* permite

que os briquetes tenham aproximadamente 8% de lodo em sua composição. O teor de cinzas foi semelhante ao relatado na literatura, (CAMPANA 2022), encontrou 50% de cinzas em peso (quando seco) e 45% de materiais voláteis e 5% de carbono.

O poder calorífico superior foi de 20,35 e 14,64 MJ/kg para a serragem de *Pinus sp.* e o lodo. Este parâmetro é diretamente proporcional ao teor de carbono elementar e carbono fixo e inversamente proporcional ao teor de cinzas, o que explica o maior poder calorífico superior da serragem de *Pinus sp.* O poder calorífico superior do lodo (14 MJ) foi menor que o valor de 16,54 MJ relatado por MENEZES; PRADOS; FIGUEREDO (2019).

### Análise termogravimétrica

A decomposição térmica do lodo de ETA é marcada por baixa perda de massa com o incremento da temperatura e alta quantidade de resíduo no final do teste (Figura 1).

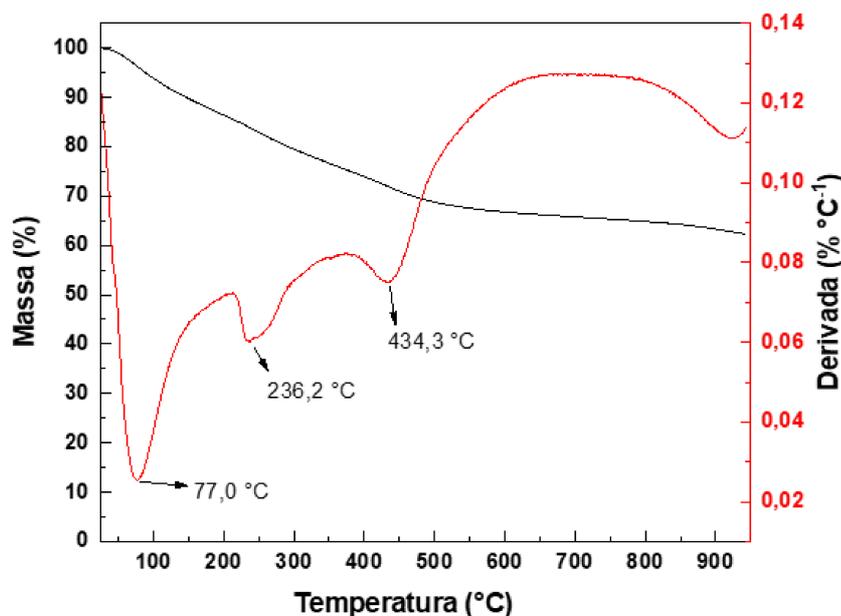


Figura 1. Curvas TGA/DTG para a amostra com 100% de ETA de esgoto.

A curva TGA da amostra com 100% de lodo de ETA não mostrou eventos térmicos de perda de massa pronunciados e uma alta estabilidade térmica, atingindo uma % de perda de massa de apenas 36,7% à temperatura de 950 °C. Porém, a curva DTG denota a presença de processos reacionais complexos evidenciados pela presença de vários picos com diferentes  $T_{máx}$  (temperatura em que ocorre a taxa máxima de decomposição). O primeiro pico, à temperatura de 77 °C e com perda de massa de cerca de 3,7%, pode ser atribuído à dessorção de água e de outros componentes voláteis presentes no lodo (DAHOU ET. AL, 2016). Os picos em 236,2 e 434,3 °C referem-se majoritariamente à decomposição dos componentes orgânicos e à decomposição dos

resíduos orgânicos formados, respectivamente (DAHOU ET AL., 2016; CAPANA ET AL., 2009).

Por fim, a grande quantidade de massa remanescente no final do teste se deve a grande quantidade de cinzas no material, que por serem compostas por minerais, não entram em decomposição nas temperaturas empregadas nos testes (FRAHA ET AL., 2020; XU ET AL., 2021). Capana e colaboradores também atribuem o intervalo de 130 a 430 °C da curva TGA às reações de decomposição da matéria orgânica. Entre 430 e 530 °C, Oliveira e colaboradores destacam a presença conjunta da dessorção da água retida nas estruturas cristalinas da goethita ( $\text{FeO(OH)}$ ) e caulinita ( $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), na porção argilosa do lodo (OLIVEIRA ET AL., 2004; SCHNEIDER ET AL., 1981).

A curva termogravimétrica da amostra com 100% de serragem de *Pinus sp.* apresentou a taxa máxima de degradação a 352,6 °C e resíduo inferior a 20% (Figura 2).

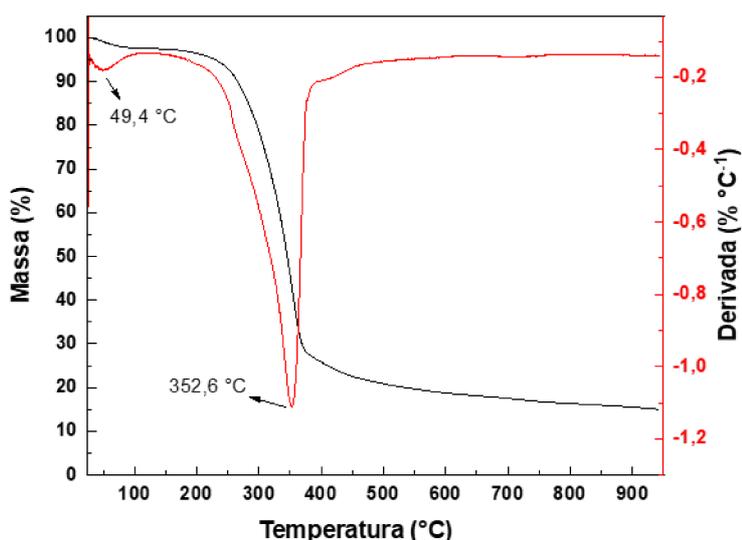


Figura 2. Curvas TGA/DTG para a amostra com 100% serragem de *Pinus sp.*

A curva TGA/DTG da amostra com 100% de serragem *Pinus sp.* apresentou uma perda de massa de cerca de 2,4 % com pico em 49,4 °C (pela DTG), atribuído à saída da água adsorvida pela biomassa. Em seguida, tem-se um evento térmico pronunciado, com perda de massa de cerca de 71,1 % e Tonset (temperatura de início do evento extrapolada) e Tendset (temperatura de final do evento extrapolada) iguais a 275,9 e 367,9 °C, respectivamente, relacionado à decomposição térmica da matéria orgânica que compõe a serragem (decomposição da celulose, hemicelulose e ligninas) (CAI, ET AL. 2016). Esta faixa corresponde a decomposição da hemicelulose e celulose, componentes majoritários da madeira. Restou 15,0 % do resíduo a 950 °C, constituído principalmente de cinzas (Magdziarz, A.; Wilk,

M., 2013).

De posse dos resultados das curvas TGA/DTG para as amostras de lodo e serragem puros, passou-se às análises termogravimétricas dos briquetes produzidos a partir da misturados dois componentes em diferentes composições, sendo estas: 5, 15, 25, 35, 65, 75, 85 e 95% m/m, lodo/serragem.

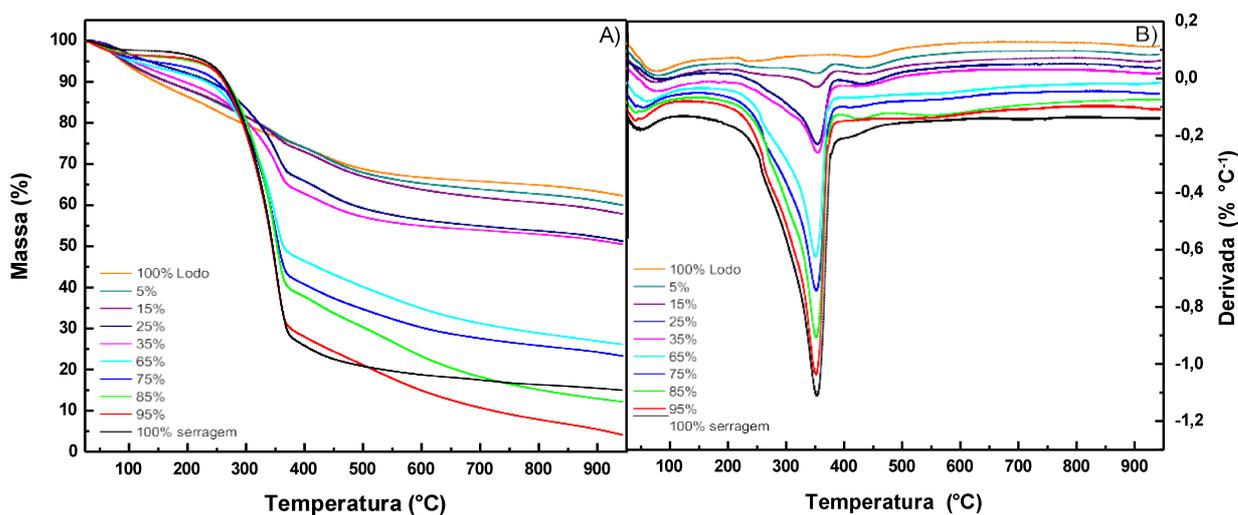


Figura 3. Curvas de A) TGA; e, B) DTG para as amostras de briquetes produzidos nas na proporção de 5,15,25,35,65,75,85,95 % m/m, lodo/serragem.

O perfil térmico do lodo puro (100% m/m) se alterou com a adição da serragem, sendo que a presença desta se torna mais evidente a partir da adição de 25% da serragem. A adição de 5 e 15% de serragem não resultou em diferenças expressivas na estabilidade térmica dos materiais, resultando em perfil semelhante ao do lodo. Os briquetes com 25 e 35% de serragem, apresentam características intermediárias entre os perfis com 100% de lodo e 100% de serragem. A partir de 65 % de serragem, as amostras apresentam comportamento térmico mais semelhante à serragem pura, com destaque para as amostras com 85 e 95% de serragem, apresentando uma % de resíduo ao final dos ensaios, menores do que a da serragem pura, indicando uma decomposição mais eficiente da serragem na presença de quantidades menores de lodo (15 e 5%, respectivamente).

As principais informações térmicas que podem ser retiradas da Figura 3, estão resumidas na Tabela 4.

<i>Amostra</i>	<i>% H<sub>2</sub>O*</i>	<i>T<sub>máx</sub>H<sub>2</sub>O **</i>	<i>T<sub>onset</sub></i>	<i>%Perda de massa</i>	<i>T<sub>máx</sub></i>	<i>T<sub>máx2</sub></i>	<i>T<sub>endset</sub></i>	<i>%Resíduo (a 950 °C)</i>
<i>100% serragem</i>	2,4	49,4	275,9	71,1	352,6	--	367,9	15,0
95	3,4	45,4	263,8	66,6	351,9	--	364,8	4,1
85	3,4	51,3	278,2	56,1	351,4	423,2	363,9	12,2
75	4,3	53,6	270,9	50,3	352,2	408,6	365,4	23,3
65	5,4	60,6	272,5	44,2	351,1	--	363,7	26,2
35	6,9	75,8	275,3	27,3	354,3	420,9	367,7	50,5
25	4,2	84,5	267,9	24,5	353,5	425,7	365,8	51,3
15	6,8	76,2	--	--	351,9	433,5	367,4	57,9
5	5,7	79,6	274,9	--	352,2	433,1	--	60,0
<i>100% lodo</i>	3,7	77,0	--	--		434,3	--	62,3

Tabela 4. Dados termogravimétricos obtidos a partir das curvas TGA/DTG para as amostras de lodo/serragem nas diferentes composições testadas.

Os dados descritos na Tabela 4, permitem acrescentar à discussão que a % H<sub>2</sub>O (e outros componentes mais voláteis), aumentam à medida que se adiciona o lodo. Isto é esperado, uma vez que o próprio lodo também contém essas substâncias. Ademais, nota-se que as T<sub>máx</sub>H<sub>2</sub>O, correspondentes à temperatura em que ocorre a saída desses componentes, se desloca para valores mais próximos ao do lodo puro, conforme ocorre a adição deste último.

Quanto à Tonset do evento principal de decomposição térmica da serragem, apesar desta variar um pouco, seus valores são próximos dos obtidos para a serragem pura. Fato que é corroborado pelos valores próximos de T<sub>máx</sub> deste evento. Porém, a % de perda de massa deste evento, reduz progressivamente, acompanhando a redução na adição do componente orgânico da serragem.

Destaca-se ainda, o surgimento da T<sub>máx2</sub> (correspondente à decomposição do componente orgânico do lodo e saída de água de seus componentes argilosos) para quase todos os briquetes com menos de 95% de serragem, confirmando a mistura do lodo.

#### Avaliação dos briquetes

A adição do lodo de ETA influenciou a densidade aparente e densidade energética dos briquetes, sendo que não foi constatado nenhum efeito sinérgico quando os dois foram misturados (Figura 4).

<b>Amostra</b>	<b>Densidade aparente(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade energética MJ/m<sup>3</sup></b>
100%L	1,44	21,08
95%L 5%S	1,18	17,96
85%L / 15%S	1,07	16,78
75%L / 25%S	0,97	15,42
35%L / 65%S	0,85	15,62
65%L 35%S	0,79	13,26
15%L 85%S	0,75	14,74
25%L / 75%S	0,73	13,88
5%L / 95%S	0,71	14,22
100%S	0,53	10,86

Tabela 4: Densidade aparente e densidade energética dos briquetes produzidos com lodo de ETA e serragem de *Pinus sp.*

A adição do lodo de ETA aumentou a densidade energética dos briquetes, sendo que o tratamento com 100% de lodo de ETA apresentou densidade energética superior a 20 MJ/m<sup>3</sup>, enquanto a utilização de 100% de serragem gerou uma densidade energética próxima a 10 MJ/m<sup>3</sup> (Figura 4). A densidade energética é dada pelo produto da densidade do material pelo seu poder calorífico superior (OLIVEIRA 2021). Embora o poder calorífico superior da madeira seja de 20,3 MJ/m<sup>3</sup> e o do lodo de ETA de 14,6 MJ/m<sup>3</sup>, o lodo de ETA possui maior densidade, permitindo uma maior quantidade de massa na formação do briquetes e por consequência, maior densidade energética do material. O aumento da densidade dos briquetes é desejado no seu processo de produção, devido ao aumento da densidade energética (GRANADO ET AL., 2021).

## 2.4 CONCLUSÃO

O lodo de ETA apresentou maior teor de nitrogênio e enxofre, enquanto a serragem de *Pinus sp.* apresentou maior teor de carbono, hidrogênio oxigênio e relação C/H e C/N, comparando a análise elementar. Nos resultados da análise imediata, o lodo apresentou menor teor de material volátil (35,51%), alta proporção de cinzas (60,74%) e menor teor de carbono fixo (3,75%), resultando em poder calorífico de 14,8 MJ/g, a serragem de *Pinus sp.* possui maior teor de material volátil (83,611%), baixa proporção de cinzas (0,513%) e maior teor de carbono fixo (15,876%), levando a um poder calorífico superior de 20,3 MJ/g. O lodo de ETA apresentou alta resistência a

degradação térmica, sem eventos com perda de massa pronunciados. Enquanto a serragem de *Pinus sp.* apresentou maior perda de massa entre 275,9 e 367,9 °C. A adição de serragem entre 5 e 15% alteraram a estabilidade térmica do material, a adição entre 25 e 35% de serragem resultou em um comportamento intermediário entre as amostras com 100% de lodo e 100% de serragem. A partir de 65% de serragem, as amostras mostraram comportamento térmico mais próximo da amostra com 100% de serragem. Por fim a adição entre 85 e 95% de serragem, apresentando uma % de resíduo ao final dos ensaios, menores do que a da serragem pura, indicando uma decomposição mais eficiente da serragem na presença de quantidades menores de lodo. Quanto a densidade energética dos briquetes, foi observado que com a adição gradual de serragem é possível notar uma diminuição proporcional na densidade energética dos briquetes. A utilização do lodo de esgoto para a produção de briquetes é viável, entretanto, devido ao seu alto teor de nitrogênio, enxofre e cinzas, sua utilização deve ser em baixas proporções na composição do briquete.

## REFERÊNCIAS

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2011. Brasília, 2011. 150 p.

AEO. **Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050**. U.S. Energy Information Administration. January 5, 2017. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf)> acesso em abril 2017.

AGENEAL - Agência Municipal de Energia de Almada. **Educar para a energia**: um desafio para as escolas, 2007. Disponível em: <<http://www.ageneal.pt/content01.asp?BTreeID=00/03&treeID=00/03/00&newsID=119>> Acesso em: 20 Dez. 2016.

AGENEAL - Agência Municipal de Energia de Almada. **Espaço Energia**: Energias Não Renováveis, 2011. Disponível em: <<http://www.ageneal.pt/content01.asp?BTreeID=00/01&treeID=00/01&newsID=7>. > Acesso em: 27 Nov. 2015.

ALAKANGAS, E.; VALTANEN, J.; LEVLIN, J. E.. **CEN technical specification for solid biofuels - Fuel specification and classes**. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 11, p. 908914, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.001>

ANDRADE, B. G. **Discriminação entre carvões produzidos com madeira de *Eucalyptus* e de espécies nativas**. Curso produção de carvão vegetal. Viçosa - MG, 2011.

ANTUNES, R. C. Briquetagem de carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. v. 1, p. 197-206.

ANTWI-BOASIAKO, C.; ACHEAMPONG, B. B. **Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities**. *Biomass and Bioenergy*, v. 85, p. 144-152, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.006>

ARANTES, M. D. C.; MENDES, L. M.; RABELO, G. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; BARBOSA, A. M. **Gaseificação de Materiais Lignocelulósicos para Geração de Energia Elétrica**. *Ciência Florestal*. Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 525-533, out.-dez., 2008. Doi: <https://doi.org/10.5902/19805098435>

ARAÚJO, S.; BOAS, M. A. V.; NEIVA, D. M.; DE CASSIA CARNEIRO, A.; VITAL, B.; BREGUEZ, M.; PEREIRA, H. **Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures**. *Biomass and Bioenergy*, v. 90, p. 181-186, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Determinação de densidade a granel. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8299**: Carvão mineral - Determinação do carbono fixo. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: Determinação do poder calorífico superior. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648**: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14984**: Determinação de densidade aparente de cavacos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASTM **D2015-66**. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1973.

ASTM **D240-02**. Standard test method for heat for combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 2007.

ASTM **D3173-85**. Standard Test of Humidity. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985.

BABICH, A.; SENK, D.; FERNANDEZ, M. **Charcoal behaviour by its injection into the modern blast furnace**. *ISIJ international*, v. 50, n. 1, p. 81-88, 2010.

Doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.81>

BARBIERI, E.; OLIVEIRA, I. R.; SERRALHEIRO, P. A. C. **The use of metabolism to evaluate the toxicity of dodecil benzen sodium sulfonate (LAS-C12) on the Mugil platanus according to the temperature and salinity**. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 277, p.109-127, 2002. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(02\)00236-8](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00236-8)

BARBOZA, L. G. A.; THOMÉ, H. V. **Reaproveitamento do óleo residual de fritura para obtenção do Biodiesel**. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 3, n. 3, 2010.

BARCELLOS, Daniel C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 2007. 162 p. Tese (Doutorado) Disponível em: <<http://www.ipef.br/servicos/teses/arquivos/barcellos,dc-d.pdf>> Acesso em nov. 2015.

BARNETO, A. G.; CARMONA, J. A.; ALFONSO, J. E. M.; BLANCO, J. D. **Kinetic models based in biomass components for the combustion and pyrolysis of sewage sludge and its compost**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. v. 86, p. 108-114, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.04.011>

BARRERA-DÍAZ, C.; MARTÍNEZ-BARRERA, G.; GENCEL, O. BERNAL-MARTÍNEZ, L. A.; BROSTOW, W. **Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes**. *Journal of hazardous materials*, v. 192, n. 1, p. 108-115, 2011.

BEN - **Balanco Energético Nacional** - Ano base 2014. Brasília: MME (Ministério das Minas e Energia - on-line), 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em nov. 2015.

BENEROSO, D.; MONTI, T.; KOSTAS, E. T.; ROBINSON, J.. **Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts**. *Chemical Engineering Journal*, 2017.

BHATTACHARYA, S. C.; LEON, M. A.; RAHMAN, M. M. **A Study on Improved Biomass Briquetting**, *Energy for sustainable Development*. v. VI, n.2, p. 110, 2002.

BHATTACHARYA, S. C. **Fuel for Thought**. *Renewable Energy World*, v.7, n.6, p 122- 130, 2004.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. **State of the art for biomass densification**. *Energy Sources*, New York, v. 11, n.3, p.161-182, 1989. Doi: <https://doi.org/10.1080/00908318908908952>

BIANCHINI, A.; BONFIGLIOLI, L.; PELLEGRINI, M.; E SACCANI, C. **Sewage sludgedrying process integration with a waste-to-energy power plant**. *Waste Management*, v.42, p.159-165, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.020>

BLACK, J. G. **Microbiologia – Fundamentos e perspectivas**. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan, 4ed., 2002. 829p.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em:<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 08 fev. 2014.

BRIDGWATER, A. V. **Fast pyrolysis of biomass: a handbook**. Birmingham: Aston University, Bioenergy Research Group, 2001. v. 2.

CAPUTO, A. C.; PELAGAGGE, P. M. **RDF production plants: I Design and costs**. *Applied Thermal Engineering*, v.22, p.423 - 437, 2002.

CHAPRA, S. C. **Métodos Numéricos Aplicados com MATLAB® para Engenheiros e Cientistas-3**. AMGH Editora, 2013.

CHEN, G.; ANDRIES, J.; SPLIETHOFF, H. **Catalytic pyrolysis of biomass for hydrogen rich fuel gas production**. *Energy Conversion and Management*, v.44, p.2289 - 2296, 2003.

EN 14961. **Solid biofuels** – fuel specification and classes, Part 3 – Wood briquettetes for non-industrial use (draft document N194). May 2009.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Resíduos Sólidos**, 2004. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 375**, de 29 de agosto de 2006. “Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências”. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília,

DF, 30 ago. 2006. Seção I, p. 141-146. Disponível <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=506>>. Acesso em: janeiro de 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 382** de 26 de dezembro de 2006. “Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas”. Publicação DOU nº 1, de 02 fev. 2007, pág. 131. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43611.pdf>> Acesso em dezembro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 430** de 13 de maio de 2011. “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências”. Publicação DOU nº 92, de 16 mai 2011, pág. 89. 2011a.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 436** de 22 de dezembro de 2011: “Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anterior a 02 de janeiro de 2007.” Publicação de 26 dez. 2011, pág. 304-311. 2011b. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43611.pdf>> Acesso em dezembro de 2015.

CORTEZ, L.; LORA, E.; AYARZA, J. **Biomassa no Brasil e no Mundo**. In: CORTEZ, B.; LORA, S.; GÓMEZ, O. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008. p.15 – 29.

COSCIONE A. R.; NOGUEIRA T. A. R.; PIRES A. M. M. (eds): **Uso agrícola de lodo de**

**esgoto: avaliação após a Resolução nº375 do CONAMA.** 1ed. Botucatu: *FEPAF*, p.83-112, 2010.

**COUTO, A. M. Influência das características anatômicas, químicas e físicas da madeira de Eucalyptus e Corymbia na qualidade do carvão para uso siderúrgico.** Tese (Doutorado) Minas Gerais: Universidade Federal de Lavras, 2014. Disponível em: [http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/4584/1/TESE\\_Influ%C3%Aancia%20das%20caracter%C3%ADsticas%20anat%C3%B4micas,%20qu%C3%ADmicas%20e%20f%C3%ADsicas%20da%20madeira%20de%20Eucalyptus%20e%20Corymbia%20na%20qualidade%20do%20carv%C3%A3o%20para%20uso%20sider.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/4584/1/TESE_Influ%C3%Aancia%20das%20caracter%C3%ADsticas%20anat%C3%B4micas,%20qu%C3%ADmicas%20e%20f%C3%ADsicas%20da%20madeira%20de%20Eucalyptus%20e%20Corymbia%20na%20qualidade%20do%20carv%C3%A3o%20para%20uso%20sider.pdf). acesso em novembro de 2015.

**CRUZ, R. S.; ALMEIDA NETO, J. A.; SAMPAIO, L. A. G. Aproveitamento de óleos e gorduras vegetais “in natura” e residuais em combustíveis tipo diesel.** Ilhéus: UESC, 2001.

**DA SILVA, M. B.; DOS SANTOS MORAIS, A. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação.** In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro. 2008. Disponível em <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008\\_TN\\_STP\\_077\\_543\\_11289.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_077_543_11289.pdf)> acesso em maio de 2017.

**DE AGUIAR L., F.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química.** *Scientia cum Industria*, v. 4, n. 2, p. 74-79, 2016.  
Doi:<https://doi.org/10.18226/23185279.v4iss2p74>

**DE ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. R. Dioxins and furans: origins and risks.** *Revista de Saúde Pública*, v. 33, n. 5, p. 523-530, 1999. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0034-89101999000500014>

**DE LA VILLA, R. V.; FRÍAS, M.; GARCÍA-GIMÉNEZ, R.; MARTÍNEZ-RAMIREZ, S.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L. Chemical and mineral transformations that occur in mine waste and washery rejects during pre-utilization calcination.** *International Journal of Coal Geology*, v. 132, p. 123-130, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.07.014>

**DE OLIVEIRA, G. B.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; OLIVEIRA, T. M. N.; SELLIN, N.** Preparação e caracterização de resíduos da bananicultura para uso em processo de briquetagem. In: III Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais 12 a 14 de março de 2013. São Pedro - SP. **Anais...**

**DE OLIVEIRA, R. S.; PALÁCIO, S. M.; DA SILVA, E. A.; MARIANI, F. Q.; REINEHR, T. O. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge.** *Environmental Science and Pollution Research*, v.24, n.11, p.10778-10785, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8695-0>

DIAS, J. D. S.; DOS SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C.H.; BARBOSA, P. F.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia-Documentos (INFOTECA- E)**, 2012.

DIEZ, M. A.; ALVAREZ, R.; CIMADEVILLA, J. L. G. **Briquetting of carbon containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production.** *Fuel*, Oviedo, p. 73, May, 2012.

DOMINGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J. A.; INGUANZO, M.; PIS, J. J. **Sewage sludge drying using microwave energy and characterization by IRTF.** *Afinidad*, v. 61, n. 512, p. 280- 285, 2004.

DORES-SILVA, P.R., LANDGRAF, M.D., REZENDE, M.O.O. **Acompanhamento químico da vermicompostagem de lodo de esgoto doméstico.** *Química Nova*, v.34, n.6, p.956-961, 2011.

DOS SANTOS, A. M.; LIMA, N. M. O.; FIGUEIREDO, M. L. M.; FERNANDES, R. B. Fabricação de Sabão ecológico: uma alternativa para o desenvolvimento sustentável. In: III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos Sólidos, São Paulo. 2013. **Anais...**

DOSHI, V. A.; VUTHALURU, H. B.; BASTOW, T. **Investigations into the control of odour and viscosity of biomass oil derived from pyrolysis of sewage sludge.** *Fuel Processing Technology*, 86, p.885 - 897, 2003.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.10.001>

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel.** Rome: FAO, 1990. 11 p.

FAN, C.; YAN, J.; HUANG, Y.; HAN, X.; JIANG, X. **XRD and TG-FTIR study of the effect of mineral matrix on the pyrolysis and combustion of organic matter in shale char.** *Fuel*, v. 139, p. 502-510, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.021>

FANG, S.; YU, Z.; MA, X.; LIN, Y.; LIN, Y.; CHEN, L.; FAN, Y.; LIAO, Y. **Copolyrolysis characters between combustible solid waste and paper mill sludge by TG-FTIR and Py- GC/MS.** *Energy Conversion and Management*, v. 144, p. 114-122, 2017.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.046>

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forestry Production and Trade – Wood charcoal.** Brazil: FAO, 2015.  
Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>> acesso em março de 2017.

FERNANDES, F. **Estabilização e higienização de biossólidos.** In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). *Impacto do uso agrícola do lodo de esgoto.* Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap.3, p.45-67.

FONTES, P. J.; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. **Aspectos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil.** Brasília, DF. Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, *Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal.* p.1-14. 1989.

FONTES, P.J.P. de; QUIRINO, W.F.; PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S.M.S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal.** Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

FONTES, I.; AZUARA, M.; GEA, G.; MURILLO, M. B. **Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.85, n.1, p.184-191, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.003>

FRANCIOSO, O.; RODRIGUEZ-ESTRADA, M. T.; MONTECCHIO, D.; SALOMONI, C., CAPUTO, A.; PALENZONA, D. FRANCIOSO. **Chemical characterization of municipal wastewater sludges produced by two-phase anaerobic digestion for biogas production.** *Journal of hazardous materials*, v. 175, n. 1, p. 740-746, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.071>

FUENTES, A.; LLORENS, M.; SAEZ, J.; AGUILAR, M. R.; ORTUNO, J. F.; MESEGUER, V. F. **Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludge.** *Journal of Hazardous Materials*, 108, p.161-169, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.014>

GABETTA, J. H.; PAMPLONA, E. O.; TIAGO, G. L. **Utilização de Certificados de Emissões Reduzidas na Análise de Risco de Investimento em PCH's.** In: XI Encontro Latinoamericano y del Caribe sobre Pequeños Aprovechamiento Hidroenergéticos

GHORBEL-BELLAJ, O.; HAJJI, S.; YOUNES, I.; CHAABOUNI, M.; NASRI, M.; JELLOULI, K. **Optimization of chitin extraction from shrimp waste with *Bacillus pumilus* A1 using response surface methodology.** *International journal of biological macromolecules*, v. 61, p. 243-250, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.07.001>

GIL, M. D.; CASAL, D.; PEVIDA, C.; PIS, J. J.; RUBIERA, F. **Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion.** *Bioresource Technology*, v.101, p.5601-5608, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.008>

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e o meio ambiente no Brasil.** *Estudos Avançados*, v.21, p.7-20, 2007.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M.; MP; 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, p.657-661, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500021>

GUERREIRO, C. **Formas de Energia Renovável**. Jun., 2011. Disponível em: <<http://energiasrenovaveis.blogspot.com/2011/06/formas-de-energiarenovavel.html>>. Acesso novembro de 2015.

HELLE, H.; HELLE, M.; SAXÉN, H.; PETTERSSON, F. **Mathematical optimization of ironmaking with biomass as auxiliary reductant in the blast furnace**. *ISIJ International*, v.49, n.9, p.1316-1324, 2009. Doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1316>

HILLING, É.; SCHNEIDER, V. E.; PAVONI, E. T. **Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção**. *Production Journal*, v. 19, n. 2, p. 292-303, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132009000200006>

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**: 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf)> acesso em nov. 2015.

JAYARAMAN, K., GÖKALP, I. **Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge**. *Energy Conversion and Management*, v.89, p.8391, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.058>

JEONG, H. J.; PARK, S. S.; HWANG, J. **Co-gasification of coal-biomass blended char with CO<sub>2</sub> at temperatures of 900-1100°C**. *Fuel*, v.116, p.465-470, 2014. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.015>

JIANG, H.; ZHANG, M.; CHEN, J.; LI, S.; SHAO, Y.; YANG, J.; LI, J. **Characteristics of bio-oil produced by the pyrolysis of mixed oil shale semi-coke and spent mushroom substrate**. *Fuel*, v.200, p.218-224, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.075>

JIANG, J; DU, X; YANG, S. **Analysis of the combustion of sewage sludge-derived fuel by a thermogravimetric method in China**. *Waste management*, v.30, n.7, p.14071413, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.009>

JIANG, L.; LIANG, J.; YUAN, X.; LI, H.; LI, C.; XIAO, Z.; HUANG, H.; WANG, H.; ZENG, G. **Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet**. *Bioresour. Technol.*, v.166, p.435-443, 2014. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.077>

JIN, J.; LI, Y.; ZHANG, J.; WU, S.; CAO, Y.; LIANG, P.; ZHANG, J.; WONG, M.H.; SHAN, S.; CHRISTIE, P. **Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge**. *Journal of Hazardous Materials*, v.320, p.417-426, 2016. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>

JITTABUT, P. **Physical and Thermal Properties of Briquette Fuels from Rice Straw and Sugarcane Leaves by Mixing Molasses**. *Energy Procedia*, v.79, p.2-9, 2015.

**estações de tratamento para o invertebrado aquático *Daphnia similis*. Pesticidas: ecotoxicol e meio ambiente**, Curitiba, v.17, p.1-8, jan/dez, 2007.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.452>

JORDÃO, E. P. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3ed.- Rio de Janeiro- ABES,1995.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6ed. (no prelo). Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KACPRZAK, M.; NECZAJ, E.; FIJAŁKOWSKI, K.; GROBELAK, A.; GROSSER, A.; WORWAG, M.; SINGH, B. R. **Sewage sludge disposal strategies for sustainable development**. *Environmental research*, v.156, p.39-46, 2017.

Doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products**. *Biomass and Bioenergy*. Oxford, GB. v.33, n.3, p.337 - 359, 2009.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

KHAI, N. M. **Effects of using wastewater and biosolids as nutrient sources on accumulation and behaviour of trace metals in Vietnamese soils**. 2007. 71p.

Universidade Sueca de Ciências Agrícolas.2007. Uppsala: 2007. Tese (Doutorado)

KIJO-KLECZKOWSKA, A.; ŚRODA, K.; KOSOWSKA-GOLACHOWSKA, M.;

MUSIAŁ, T.; WOLSKI, K. **Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass**. *Fuel*, v.170, p.141-160, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.026>

KIM, M.; LEE, Y.; PARK, J.; RYU, C.; OHM, T. I. **Partial oxidation of sewage sludge briquettes in a updraft fixed bed**. *Waste Management*, v.49, p.204-211, 2016. Doi:

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.026>

KISHIMOTO, S.; BOLEY, C.C. **The Sawdust Briquetting and Agglomerating Industry in Japan, in Proceedings of the 11th**. Biennial Conference of the IBA (Institute for Briquetting and Agglomeration). p.43 - 50, 1968.

KOULLAS, D. P.; KOUKIOS, E. G. **Briquetting of Wheat Straw. Paper Presented at FAO/CNRI**. First Workshop on Handling and Processing of Biomass for Energy, Hamburg, FRG, p.14-15, September, 1987.

KOSTURKIEWICZ, B.; JANEWICZ, A.; MAGDZIARZ, A. **Results of briquetting and combustion process on binder-free coking coal**. *Polish Journal of Environmental Studies*, v.23, n.4, 2014

LELA, B; BARIŠIĆ, M; NIŽETIĆ, S. **Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics**. *Waste Management*, v.47, p.236245, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035>

LESTER, E.; GONG, M.; THOMPSON, A. **A method for source apportionment in biomass/coal blends using thermogravimetric analysis**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.80, p.111-117, 2007. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.01.010>

LI, R.; TENG, W.; LI, Y.; WANG, W.; CUI, R.; YANG, T. **Potential recovery of phosphorus during the fluidized bed incineration of sewage sludge.** *Journal of Cleaner Production*, v.140, p.964-970, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.004>

**sewage sludge and oil shale thermal decomposition using TGA–FTIR analysis.** *Energy Conversion and Management*, v. 118, p. 345-352, 2016.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.004>

LI, M., LI, W.; LIU, S. **Hydrothermal synthesis, characterization, and KOH activation of carbon spheres from glucose.** *Carbohydrate research*, v. 346, n. 8, p. 999-1004, 2011.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carres.2011.03.020>

LIN, Y.; LIAO, Y.; YU, Z.; FANG, S.; MA, X. **The investigation of co-combustion of sewage sludge and oil shale using thermogravimetric analysis.** *Thermochimica Acta*, v.653, p.71-78, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.04.003>

LIPPEL. **Equipamentos de alta performance.** 2012. Disponível em: <[www.lippel.com.br](http://www.lippel.com.br)>. Acesso abril de 2017.

LUBWAMA, M.; YIGA, V. A. **Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda.** *Renewable Energy*, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041>

LUCENA, D. A.; MEDEIROS, R. D.; FONSECA, U. T.; ASSIS, P. S. **Aglomerado demoinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia.** *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. v.4, n.4, p.1-6. 2008.

MAGDZIARZ, A; WERLE, S. **Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS.** *Waste management*, v.34, n.1, p.174-179, 2014.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.033>

MARCOS MARTÍN, F. **Otros aprovechamientos forestales.** Ed. Fernando Martín Asín. Madrid, 1997. 62 p.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J.; MARQUES, T. A. **Metais Pesados e o uso de Biossólidos na Agricultura.** In: TSUTIYA M.T.; Camparini, J.B.; Alem Sobrinho, P.; Hespanhol, I. Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. p.365-403.

MARSOLLA, A. **Planta de briquetagem de carvão vegetal.** São Paulo: Rosa Madeireira, 1998. 76 p.

MARTINS, M. P.; BENÍCIO, E. L.; JÚNIOR, A. F. D.; DE ALMEIDA, R. B.; DECARVALHO, A. M.; YAMAJI, F. M. **Produção e avaliação de briquetes de finos de carvão vegetal compactados com resíduo celulósico proveniente da indústria de papel e celulose.** *Revista Árvore*, v.40, n.1, p.173-180, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000100019>

MEIRA, A. M. **Diagnóstico sócio-ambiental e tecnológico da produção de carvão vegetal no município de Pedra Bela.** Estado de São Paulo. 2002. 99p. – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, Piracicaba - SP, 2002. Tese (Doutorado)

MEIRELES, M. E. F.; ALVES, J. C. M. Gestão de resíduos: as possibilidades de construção de uma rede solidária entre associações de catadores de materiais recicláveis. In. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2011. **Anais**.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas**. In: Betitio, W. e Camargo, O. A. (eds). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP. EMPRAPA *Meio Ambiente*, p.11-24, 2000.

MENENDEZ, J.A.; DOMÍNGUEZ, A.; INGUANZO, M.; PIS J.J. Microwaveinduced drying, pyrolysis and gasification (NWDPG) of sewage sludge: Vitrification of the solid residue. *J. Appl. Pyrolysis* 74, 2005-406 412p. **Anais...**  
Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.013>

MITSUOKA, K.; HAYASHI, S.; AMANO, H.; KAYAHARA, K.; SASAOAKA, E.; UDDIN, M. A. **Gasification of woody biomass char with CO<sub>2</sub>: The catalytic effects of K and Ca species on char gasification reactivity**. *Fuel Processing Technology*, v.92, p.26– 31, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.08.015>

MOGHTADERI, B.; MEESRI C.; WALL, T. F. **Pyrolytic characteristics of blended coal and woody biomass**. *Fuel*, v.83, p.745-750, 2004.  
Doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.05.003>

MOLLOY, R.; MCLAUGHLIN, M.; WARNE, M.; HAMON, R.; KOOKANA, R.; SAISON, C. **Background and scope for establishing a list of prohibited substances and guideline limits for levels of contaminants in fertilizers**. Adelaide: CSIRO Land and Water Client Report April, 2005. 62p. Disponível em:  
<<https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=procite:744ac5b2-691d-4d98-a2bc2003b520038f&dsid=DS1>> Acesso em maio de 2017.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO D. C. **Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis**. *Revista Árvore*. v.29, n.3, p.461-470, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000300014>

MORO, J. P. Briquetagem de finos de carvão vegetal. In: 2ª Jornada de Engenharia dos Países de Língua Portuguesa. Rio de Janeiro, 1987. v.1. p.1-14. **Anais...**

MUAZU, R. I.; STEGEMANN, J. A. **Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs**. *Fuel Processing Technology*, v. 133, p. 137-145, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.022>

MURTA, A. L. S.; DE FREITAS, M. A. V. **Análise da viabilidade de produção de biodiesel de óleo residual de fritura na marinha**. *SBI Journal*, n.15, 2012. Doi: <https://doi.org/10.22409/sbijournal2012.i15.a10195>

NDINDENG, S. A.; MBASSI, J. E. G.; MBACHAM, W. F.; MANFUL, J.; GRAHAMACQUAAH, S.; MOREIRA, J.; DOSSOU, J.; FUTAKUCHI, K. **Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products**. *Energy for Sustainable Development*, v.29, p.24-31, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.003>

NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. **Biossurfactantes: Propriedades e aplicações**. *Química Nova*. v.25, p.772-776, 2002. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000500013>

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 200p.

NOGUEIRA, M.; RENDEIRO, G. **Caracterização energética da biomassa vegetal**. In: RENDEIRO, G. *et al.* (eds). *Combustão e gaseificação de biomassa sólida*. Brasília: MME, 2008. p.52-63.

NORGATE, T.; LANGBERG, D. **Environmental and Economic Aspects of Charcoal Use in Steelmaking**. *ISIJ International*, v.49, n.4, p.587-595, 2009.

Doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.587>

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. 2ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565p

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets**. London: Earthscan, 2010. 593 p.

OLADEJI, J. T. **Fuel characterization of briquettes produced from corncob and rice husk residues**. *The Pacific Journal of Science and Technology*, v. 11, n. 1, p. 101-106, 2010.

OLADEJI, J. T.; ENWEREMADU, C. C. **The effects of some processing parameters on physical and densification characteristics of corncob briquettes**. *International Journal of Energy Engineering*, v. 2, n. 1, p. 22-27, 2012.

Doi: <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20120201.04>

OLIVEIRA, J. D.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. **Produção decarvão vegetal: aspectos técnicos**. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, p.60-73, 1982.

OLORUNNISOLA, A. **Production of fuel briquettes from waste paper and coconut husk admixtures**. *Agricultural Engineering International: CIGR EJournal.*, 2007.

OUDEGHIRI, F.; ALLALI, N.; QUIROGA, J. M.; RODRÍGUEZ-BARROSO, M. R. **TG-FTIR analysis on pyrolysis and combustion of marine sediment**. *Infrared Physics & Technology*, v. 78, p. 268-274, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.08.015>

PARSHETTI, G. K.; LIU, Z.; JAIN, A.; SRINIVASAN, M. P.; BALASUBRAMANIAN, R. Hydrothermal carbonization of sewage sludge for energy production with coal. *Fuel*, v.111, p.201-210, 2013. Doi: <https://doi.org/10.3917/cj.210.0201>

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; DE SOUSA, J. F.; DE CASTILHO PICKLER, A.; LEAL, E. R. M.; DA CRUZ MILHOMEN, C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão**. *Revista Liberato*, v.11, n.16, p.147-157, 2010.

Doi: <https://doi.org/10.31514/rliberato.2010v11n16.p149>

PEDROZA, Marcelo M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Rio Grande do Norte – Natal: Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Química Programa de Pós-graduação em Engenharia

Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. 73p. Tese (Doutorado).

PEREGRINA, C.; ARLABOSSE, P.; LECOMTE, D.; RUDOLPH, V. **Heat and mass transfer during fry-drying of sewage sludge.** *Drying technology*, v.24, n.7, p.797-818, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1080/07373930600733085>

PEREIRA, F. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; DELLA LÚCIA, R. M.; PATRÍCIOJÚNIOR, W.; BIANCHE, J. J. **Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio.** *Floresta e Ambiente*. v.16, n.1, p.23-29, 2009.

PEREIRA, M. J. **Energia: Eficiência e Alternativas.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 126p.

PIMENTA, A. S.; SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. C. D. O.; CASTRO, R. V. O. **Charcoal briquettes produced with recycled coconut pith.** *Ciência Florestal*, v.25, n.1, p.137-144, 2015.

PINHEIRO, Cyntia H. R. **Zn, Ni, Cr, Cu, Fe e S em lodo de esgoto: comportamento químico, adsorção e proposta de tratamento.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007. 52 p. Tese (Doutorado). Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-15052008-153050/en.php>> Acesso em fevereiro de 2017.

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. E. A. D.; VIANA, E. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática.** 1ed. Belo Horizonte, 2006. 120p.

POKORNA, E.; POSTELMANS, N.; JENICEK, P.; SCHREURS, S.; CARLEER R.; YPERMAN, J. **Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges.** *Fuel*, v.88, p.1344-1350, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.020>

PRASITYOUSIL, J.; MUENJINA, A. **Properties of solid fuel briquettes produced from rejected material of municipal waste composting.** *Procedia Environmental Sciences*, v.17, p.603-610, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.076>

PROMDEE, K.; CHANVIDHWATANAKIT, J.; SATITKUNE, S.; BOONMEE, C.; KAWICHAI, T.; JARERNPRASERT, S.; VITIDSANT, T. **Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, p. 1175-1186, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.099>

PROTÁSIO, T. D. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P.F.; LEITE, E. R. D. S. **Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, v.16, n.11, p.1252-1258, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100015>

QI, D.; WANG, Q.; WANG, QI.; HUANG, Q.; YIN, P. **Study on Saponification Technology of Waste Edible Oil.** In: Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2009. ICBBE 2009. 3rd International Conference on, IEEE, 2009. p.1-4

QUARTERONI, A.; SALERI, F. **Approximation of functions and data.** In: Scientific

Computing with MATLAB and Octave. Springer Berlin Heidelberg, 2006. p.71-99.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. Brasília, DF: LPF/IBAMA, 1991. Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/briquetagem.pdf>> Acesso em janeiro de 2016.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, L. S. A.; AZEVEDO, A. C.S. **Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos**. *Revista da Madeira*. v.89, p.100-106, abr. 2005.

TEAM, R. C. R. **A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria**. 2015. ISBN 3 900051-07-0, Disponível em: <<http://www.R-project.org>>

RAHAMAN, S. A.; SALAM, P. A. **Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder**. *Fuel Processing Technology*, v. 158, p. 9-19, 2017.

REED, T. B.; TREZEK, G.; DIAZ, L. **Biomass densification energy requirements. In: Thermal conversion of solid waste and biomass**. Washington D. C.: American Chemical Society, 1980. p.177-189

REIS, B. de O.; SILVA, I. T.; SILVA, M. O.; ROCHA, B. R. P. **Produção de briquetes energéticos a partir de caroços de açaí**. In: 4th ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, Campinas. *Proceedings online...* Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000200044&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200044&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em maio de 2017.

ROMÁN, S.; NABAIS, J. M. V.; LAGINHAS, C.; LEDESMA, B.; GONZÁLEZ, J. **F.Hydrothermal carbonization as an effective way of densifying the energy content of biomass**. *Fuel Processing Technology*, v. 103, p. 78-83, 2012.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.008>

ROUSSET, P.; CALDEIRA-PIRES, A.; SABLÓWSKI, A.; RODRIGUES, T. **LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes**. *Journal of Cleaner Production*, v.19, n.14, p.1647-1653, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.015>

RUIZ-GÓMEZ, N.; QUISPE, V.; ÁBREGO, J.; ATIENZA-MARTÍNEZ, M.; MURILLO, M. B.; GEA, G. **Co-pyrolysis of sewage sludge and manure**. *Waste management*, v. v.59, p.211-221, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.013>

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Reciclagem de óleo de cozinha**, 2011. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br>>. Acesso em dezembro de 2015

SAHU, S. G.; MUKHERJEE, A.; KUMA, M.; ADAK, A. K.; SARKAR, P.; BISWAS, S.; TIWARI, H. P.; DAS, A.; BANERJEE, P. K. **Evaluation of combustion behaviour of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI)**. *Applied Thermal Engineering*, v.73, p.1014-1021, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.071> SALEME, J. E. F. **Estudo básico para briquetagem de carvão vegetal**. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia, 1992. 19 p.

SÁNCHEZ, M. E.; MENÉNDEZ, J. A.; DOMÍNGUEZ, A.; PIS, J. J.; MARTÍNEZ, O.; CALVO, L. F.; BERNAD, P. L.. **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge.** *Biomass and Bioenergy*, v.33, p.933-940, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.002>

SANEPAR. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Relatórios de Indicadores Estratégicos do Sistema de Informações Sanepar: SIS.** Cascavel, 2015.

SANEPAR. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Laudo Técnico: 021-0708.** Unidade Regional de Cascavel. Sistema de Informações Sanepar: SIS. Cascavel, 2008.

SANTIAGO, A. R.; DE ANDRADE, A. M. **Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto.** *Ciência Florestal*, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005. Doi: <https://doi.org/10.5902/198050981819>

SANTORO, A.; HELD, A.; LINSINGER, T. P.; PEREZ, A.; RICCI, M. **Comparison of total and aqua regia extractability of heavy metals in sewage sludge: The case study of a certified reference material.** *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2017.

SANTOS, C. **Estatística descritiva - Manual de auto-aprendizagem.** 1ed. Lisboa: Edições Silabo, 2007. 264p

SANTOS, R. C. dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto.** Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais: Lavras, 2010. 159p. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia da Madeira)

SCHIELD, M. SCHIELD, Milo. Correlation, determination and causality in introductory statistics. **American Statistical Association, Section on Statistical Education**, Augsburg College, 1995.

SCHNEIDER A; VON MÜHLEN C. **Caracterização cromatográfica de compostos orgânicos presentes nos resíduos sólidos provenientes de indústria de reciclagem de papel e sua aplicação na produção de briquetes de carvão vegetal.** *Quím. Nova*, v.34, n.9, p.1556-1561, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n9/v34n9a14.pdf>> acesso em dezembro de 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000900014>

SEVILLA, M.; MACIÁ-AGULLÓ, J. A.; FUERTES, A. B. **Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO<sub>2</sub>: Chemical and structural properties of the carbonized products.** *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 3152–3159, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.032>

SHEN, L.; ZHANG, D. **Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production.** *Energy & Fuel*, v.84, p.809-815, 2004.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.024>

SILVA, D. A. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados.** 182p.– Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2001. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)

SILVA, D. A.; RÓZ, A. L.; PIRES, A. A. F.; CARVALHO, A. M.; NAKASHIMA, G.T.; PÁDUA, F. A.; YAMAJI, F. M. **A Influência da Umidade em Propriedades Mecânicas de Briquetes Produzidos com Resíduos de Madeira (*Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*)**. *Revista Virtual de Química*, v.9, n.3, Data de publicação na Web: 4 de maio de 2017.

SILVEIRA, M. L.; BRZUSZEK, R. K.; ANDRIONI, R. R.; SAMPAIO, R. S. Benefícios metalúrgicos e ambientais do uso de biomassa na fabricação de ferro primário em altos-fornos. In: Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 12., Vila Velha. São Paulo: ABM, 2002, p.79-86. **Anais...**

SOCCOL, V. T.; PAULINO, E. C.; PEREIRA, J. T.; CASTRO, E. A.; COSTA, A. O.; HENNING L.; ANDREOLI, C. **Organismos patogênicos presentes em lodo de esgoto a ser aplicado no solo e a Resolução nº375 do CONAMA**. 1ª ed. Botucatu: FEPAF, p. 83- 112, 2010

SOUCHIE, F. F.; MARIMON JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; MARIMON, B. S.; LENZA, E. **Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigalivulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima**. *Ciência Florestal*. v.21, n.4, p.811-821, 2011. Doi: <https://doi.org/10.5902/198050984526>

SRIVASTAVA, N. S. L.; NARNAWARE, S. L.; MAKWANA, J. P.; SINGH, S. N.; VAHORA, S. Investigating the energy use of vegetable market waste by briquetting. *Renewable Energy*, v.68, p.270-275, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.047>

STOLARSKI, M. J.; SZCZUKOWSKI, S.; TWORKOWSKI, J.; KRZYŻANIAK, M.; GULCZYŃSKI, P.; MLECZEK, M. **Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass**. *Renewable energy*, v.57, p.20-26, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>

SUN, B.; YU, J.; TAHMASEBI, A.; HAN, Y. **An experimental study on binderless briquetting of Chinese lignite: Effects of briquetting conditions**. *Fuel Processing Technology*, v.124, p.243-248, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.013>

TEISANO, T. **Briquetes comprimidos de aparas de serragem**. *Revista da Madeira*, São Paulo, v.32, n.383, p.11-12, nov. 1983.

TEIXEIRA, C. M.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F. M. **Caracterização Química de Resíduos de *Eucalyptus sp.* de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia**. *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 5, 2016

TEIXEIRA, S. R.; PENA, A. F. V.; MIGUEL, A. G. **Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel**. *Waste management*, v.30, n.5, p.804-807, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.018>

THODE FILHO, S.; DA SILVA SANTOS, A. S.; DE ALMEIDA, T. M.; DA SILVA, E. R. **Tecnologia ambiental aplicada ao gerenciamento e processamento do óleo vegetal residual no estado do Rio de Janeiro**. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v.15, n.15, p.3026-3035, 2013. Doi: <https://doi.org/10.5902/2236117010815>

TILLMAN, D. **Wood as an energy resource**. New York: Academic Press, 1978.

TOKLU, E. **Biomass energy potential and utilization in Turkey**. *Renewable Energy*, v.107, p.235-244, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>

TOMELERI, J. O. P.; VALENTIM, L. B.; DA SILVA, J. P.; YAMAJI, F. M.; DE PÁDUA, F. A. **Caracterização química e energética de epicarpo residual do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e briquete produzido**. *Revista Virtual de Química*, 2017.

TSUTIYA, M. T. **Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos**. In: TSUTIYA *et al.* Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. p.89-132.

TOLMASQUIM, M. T. **Novo modelo do setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro: Synergia, 2011. 238p.

VALE, A. T. D.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. D. S. **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta do pinhão-manso (*Jatropha curcas*)**. *Cerne*, Lavras, v.17, n.2, p.267-273, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200015>

VIEIRA, G. E. G. **Fontes alternativas de energia** – Processo aperfeiçoado de conversão térmica. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2004. 181p. Tese (Doutorado).

VIEIRA, G. E. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F.; PEDROZA, C. M. **O Processo de Pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto** – uma revisão. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v.12, n.17, p.01-106, jan./jun. 2011. Doi: <https://doi.org/10.31514/rliiberato.2011v12n17.p81>

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**.- 3ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. v.1. 2005. 452p.

WILDNER, L. B. A.; HILLIG, C. **Reciclagem de óleo comestível e fabricação de sabão como instrumentos de educação ambiental**. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v.5, n.5, p.813-824, 2012. Doi: <https://doi.org/10.5902/223611704243>

WZOREK, M. **Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge**. *Fuel processing technology*, v.104, p.80-89, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.04.023>

XIA, X.; SUN, Y.; WU, K.; JIANG, Q. **Optimization of a straw ring-die briquetting process combined analytic hierarchy process and grey correlation analysis method**. *Fuel Processing Technology*, v.152, p.303-309, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.018>

YANK, A.; NGADI, M.; KOK, R. **Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications**. *Biomass and Bioenergy*, v.84,

p.22-30, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.015>

YUAN, S.; DAI, Z.; ZHOU, Z.; CHEN, X.; YU, G.; WANG, F. **Rapid co-pyrolysis of rice straw and a bituminous coal in a high-frequency furnace and gasification of the residual char.** *Bioresource Technology*, v.109, p.188–197, 2012.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.019>

YUAN, X.; HUANG, H.; ZENG, G.; LI, H.; WANG, J.; ZHOU, C.; ZHU, H; PEI, X; LIU, Z. **Total concentrations and chemical speciation of heavy metals in liquefaction residues of sewage sludge.** *Bioresource Technology*, v.102, n.5, p.4104-4110, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.055>

ZHU, W.; SONG, W.; LIN, W. **Catalytic gasification of char from co-pyrolysis of coal and biomass.** *Fuel Processing Technology*, v.89, p.890-896, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.03.001>

ALMEIDA, Alberto Antônio Resende de. Avaliação técnica, econômica e ambiental do aproveitamento de lodos como combustível em fábrica de celulose. 2019.

BIANCHINI, A.; BONFIGLIOLI, L.; PELLEGRINI, M.; E SACCANI, C. Sewage sludgedrying process integration with a waste-to-energy power plant. **Waste Management**, v.42, p.159-165, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.020>

CASTRO, P. G. S., CASTRO, V. R., ZANUNCIO, A. J. V., ZANUNCIO, J. C., CARNEIRO, A. C. O., GOMINHO, J., ARAÚJO, O. S. Energetic characterization and radiographic analysis of torrefied coated MDF residues. **Scientific Reports**, v. 11, 0-0. 4899. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-84296-5

CHAI SUWAN, N., KANSAI, N., SUPAKATA, N., PAPONG, S. The Comparison of Environmental Impacts of Carbonized Briquettes from Rain Tree Residues and Coffee Grounds/Tea Waste and Traditional Waste Management. **International Journal of Environmental Science and Development**, v.11. n. 1, 0-0. 2020. DOI: 10.18178/ijesd.2020.11.1.1224

DE OLIVEIRA, R. S.; PALÁCIO, S. M.; DA SILVA, E. A.; MARIANI, F. Q.; REINEHR, T. O. Briquettes production for use as power source for combustion using charcoal thin waste and sanitary sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, n.11, p.10778-10785, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84296-5>

DRAEGER, Adenirson et al. APROVEITAMENTO DO LODO TÊXTIL NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 23, n. 1, p. 46-56, 2021.

GOUVÊA, A. F. G., CARVALHO, A. M. M. L., SILVA, C. M., CARNEIRO, A. C. O., TRUGILHO, P. F., FREITAS, F. P., VALADARES, L. B., GOMES, C. M., COSTA, E. B. Study of the addition of lignin extracted from kraft black liquor in the mechanical proprieties of briquettes. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, 1029-1036. 2017.

HARYADI, R., VITA, M., UTAMI, I. S., IHSANUDIN, I., SETIANI, Y. & SUHERMAN, A. Briquettes production as teaching aids physics for improving science process skills. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1157. n. 3, 0-0. 2019.

KUNH, Sheila Simone et al. Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem. 2022.

MARTINEZ, C.L.M.; SERMYAGINA, E.; CARNEIRO, A.D.C.O.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, v. 123, p. 70-77, 2019. MORAES, Beatriz Stoll. Utilização de lodos de estações de tratamento de água como fonte alternativa de energia. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>

OLIVEIRA, Lucas Henrique et al. Aproveitamento de resíduos madeiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017. Doi: <https://doi.org/10.19084/RCA17010>

OLIVEIRA, Ricardo Sonsim de et al. Produção de briquetes a partir do lodo de esgoto sanitário e fins de carvão vegetal para geração de energia por combustão. 2017.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; DE SOUSA, J. F.; DE CASTILHO PICKLER, A.; LEAL, E. R. M.; DA CRUZ MILHOMEN, C. Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. **Revista Liberato**, v.11, n.16, p.147-157, 2010. Doi: <https://doi.org/10.31514/rliberato.2010v11n16.p149>

PORTILHO, Gabriel Reis. Recuperação energética de resíduos de painéis MDF (medium density fiberboard) por meio da torrefação e briquetagem. 2021.

SANTOS, R. E. dos, SANTOS, I. F. S. dos, BARROS, R. M., BERNAL, A. P., TIAGOFILHO, G. L. & SILVA, F. das G. B. da. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, 198–206. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>

SILVA, V. V., SIQUEIRA, W. C., ABRAHÃO, S. A., MORALES, M. M., GUEDES, D. M. Production and physical-mechanical characterization of briquettes, made by woodwork waste, for energy purposes. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n.7, 8880-8903. 2019. DOI:10.34117/bjdv5n7-093. Doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n7-093>  
SUARTE JUNIOR, Fernando Moreno. Aproveitamento e Caracterização do Lodo de ETE para Fins Energéticos e como Adição Pozolânica para o Concreto. 2019.

VAN DER STELT, M.J.C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.A.; PTASINSKI, K.J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and bioenergy**, v. 35, 3748-3762. 2011. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.06.023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>

WINTGENS, T.; MELIN, T.; SCHÄFER, A. I.; MUSTON, M.; BIXIO, D.; THOEYE, C. The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse. **Desalination**, v. 178, p. 1-11, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.014>.

ZOLIN, Ivan. *Materiais de Construção Mecânica*. 3ª ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2011. 76 p.

ALEX S. CAPANA; QUÉZIA V. MARTINS; MARISA S. CRESPI; CLÓVIS A. RIBEIRO; HERNANE S. BARUD. Thermal behavior of residues (sludge) originated from Araraquara water and sewage treatment station. *J Therm Anal Calorim* (2009) 97:601–604 DOI 10.1007/s10973-009-0361-4. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0361-4>

OLIVEIRA EMS, MACHADO SQ, HOLANDA JNF. Caracterização de resíduo de (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. 2004; 50:324–30. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132004000400007>

M. DAHHOU M. EI MOUSSAOUIY; A. BENLALLA; A. EI HAMIDI; M. TAIBI; M. A. ARSHAD. Structural Aspects and Thermal Degradation Kinetics of Water Treatment Plant Sludge of Moroccan Capital. *Waste Biomass Valor* (2016) 7:1177–1187. DOI 10.1007/s12649-016-9513-5. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9513-5>

SCHNEIDER, U., DIEDERICH, U., E, C.: Effect of temperature on steel and concrete for perv's. *Nucl. Eng. Des.* 67, 245–258 (1981).  
Doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(82\)90144-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(82)90144-3)

ANETA MAGDZIARZ, MATGORZATA WILK. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion. *Energy Conversion and Management* 75 (2013) 425–430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.016>

ZILIN CAI, XIAOQIAN Ma; SHIWEN FANG, ZHAOSHENG YU, YAN L. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of eucalyptus residues and paper mill sludge. *Applied Thermal Engineering* 106 (2016) 938–943.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.088>.  
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.088>

DOS SANTOS, ELVIS VIEIRA ; LIMA, MICHAEL DOUGLAS ROQUE ; DANTAS, KELLY DAS GRAÇAS FERNANDES ; CARVALHO, FÁBIO ISRAEL MARTINS ; GONÇALVES, DELMAN DE ALMEIDA ; SILVA, ARYSTIDES RESENDE ; SUN, HONGGANG ; FERREIRA, MARCIEL JOSÉ ; HEIN, PAULO RICARDO GHERARDI ; **Protásio, Thiago de Paula** . The Inorganic Composition of *Tachigali vulgaris* Wood: Implications for Bioenergy and Nutrient Balances of Planted Forests in the Amaz