

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



CARLOS ANDRÉ SILVESTRE MEDEIROS DE ALMEIDA

Prospecção do lodo de ETE com capim elefante e óleo de cozinha residual como alternativa energética a produção de pellets

Maceió
2020

CARLOS ANDRÉ SILVESTRE MEDEIROS DE ALMEIDA

Prospecção do lodo de ETE com capim elefante e óleo de cozinha residual como alternativa energética a produção de pellets

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Karina Ribeiro Salomon

Coorientador: Msc. Ivo da Silva

Maceió
2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 - 661

A447p Almeida, Carlos André Silvestre Medeiros de.
Prospecção do lodo de ETE com capim elefante e óleo de cozinha residual como alternativa energética a produção de pellets / Carlos André Silvestre Medeiros de Almeida. – 2020.

69 f. : il. color.

Orientadora: Karina Ribeiro Salomon

Coorientador: Ivo da Silva.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 56-69.

1. Resíduos como combustível. 2. Combustível sólido. 3. Energia renovável.
4. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

CDU: 620.91



Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Centro de Tecnologia - CTEC

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento - PPGRHS



Folha de Aprovação

CARLOS ANDRÉ SILVESTRE MEDEIROS DE ALMEIDA

PROSPECÇÃO DO LODO DE ETE COM CAPIM ELEFANTE E ÓLEO DE
COZINHA RESIDUAL COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA A
PRODUÇÃO DE PELLETS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Em: 18 / 02 / 2020

Prof.^a Dr.^a Karina Ribeiro Salomon
(Orientadora- PPGRHS)

Me. Ivo da Silva
(Coorientador- UFAL)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante Amorim
(Examinador interno – PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Johnnatan Duarte de Freitas
(Examinador externo – UFAL)

UFAL - Campus A.C. Simões- Av. Lourival Melo Mota s/n – Cidade Universitária
57.072-970 Maceió – AL – Brasil

Tel.: (82) 3214 1863 / e-mail: ppgrhs@gmail.com / Homepage: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs>

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aqueles que tiveram contribuição direta ou indiretamente em minha vida, para realização deste sonho, em plano espiritual e físico como meus pais, todos os familiares e namorada, amigos que contribuíram de alguma forma.

Agradeço especialmente a minha orientadora Karina Ribeiro Salomon, por acreditar em mim e me incentivar a entregar o melhor, sempre com paciência e otimismo, acompanhando meu crescimento e me apoiando em minhas decisões. Assim como o coorientador Ivo da Silva que se fez presente em diversas etapas da pesquisa.

Agradeço a CAPES pelo financiamento da bolsa de mestrado.

Um agradecimento ao Denis Silvestre, amigo e diretor do Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município de Cajueiro, pelo apoio para realização da pesquisa.

Agradeço também a todos os professores que se fizeram presentes ao decorrer da jornada no mestrado, em especial: Eduardo Lucena, Valmir Pedrosa e Fábio Pereira, pelas conversas, sugestões e conselhos prestados todo este tempo.

Agradeço a EMBRAPA, por fornecer material e análises necessárias ao experimento.

E por fim gostaria de agradecer a UFAL, CTEC, PPGRHS, por toda a estrutura cedida, e a oportunidade de crescer e desenvolver todo o trabalho. Em especial ao Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), Laboratório de Biocombustíveis e Energia (LABEN), Laboratório de Tecnologia de Nanosistemas Carreadores de Substâncias Ativas (TecNano), Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA). Assim como o Centro de Laboratórios de Química Multiusuários da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

RESUMO

A correta destinação de resíduos é de extrema importância para a sociedade e o para o meio ambiente. Para alcançar esse propósito novas pesquisas de reuso destes são convenientes. A utilização de pellets tem difundido com este propósito, fornecendo alternativas energéticas com satisfatórios resultados. O objetivo desse trabalho foi determinar as características elementares, químicas e energéticas de pellets produzidos com lodo de ETE combinado com capim elefante e óleo de cozinha residual para a concepção energética, para isso também aplicou-se a técnica de torrefação nos pellets e analisados com intuito de aumento de poder calorífico. Adotou-se diferentes proporções, 25% e 50% para o lodo e de 75% e 50% para o capim. Foram analisados os parâmetros de umidade, densidade a granel, composição elementar, análise química imediata (cinzas, teor de voláteis e carbono fixo), poder calorífico, teor de finos, resistência e durabilidade mecânica. Os pellets com proporção de 50% de lodo apresentaram menor poder calorífico com valores de 13,56 e 13,87 MJ/kg e maior teor de cinzas chegando até valores de 16,51%, porém maior densidade a granel (705 e 682 kg/m³), maior resistência (28,70 e 29,75 kgf/cm²) e durabilidade mecânica (99,59 e 99,89%) e menor teor de finos (ambas de 1%). O óleo conferiu nos pellets aumento de poder calorífico de até 2,66%, assim como a técnica de torrefação com aumento chegando até 6,63%. Os pellets apresentaram valores de acordo com parâmetros determinados pela norma de pellets EN 14961-6, com exceção dos pellets com 50% de lodo que nas cinzas possuíram valores maiores do que o mínimo previsto na norma.

Palavras-chave: Resíduos, Combustível sólido, Energia Renovável, Sustentabilidade.

ABSTRACT

Correct destination of wastes is extremely important to society and the environment. To reach this goal new researches for reuse of these wastes are convenient. The use of pellets has spread for this purpose, providing energy alternatives with satisfactory results. The propose of this work was to determinate the elemental, chemical and energetic features of pellets productize from sewage plant sludge gather with elephant grass and kitchen oil waste to energy conception, also apply torrefaction technique for the purpose of gain calorific power. Different proportions were adopted, 25% and 50% for sludge and 75% and 50% for grass. The parameters of moisture, bulk density, elemental composition, immediate chemical analysis (ash, volatile and fixed carbon content), calorific value, fines content, strength, and mechanical durability were analyzed. Pellets with a proportion of 50% of sludge showed lower calorific value with values of 13.56 and 13.87 MJ / kg and higher ash content reaching values of 16.51%, but greater bulk density (705 e 682 kg/m³), greater resistance (28.70 e 29.75 kgf/cm²) and durability mechanics (99.59 e 99.89%) and less fine content (both 1%). The oil provided an increase in calorific value of up to 2.66% in the pellets, as well as the torrefaction technique with an increase reaching up to 6.63%. The pellets presented values according to parameters determined by the standard of pellets EN 14961-6, with the exception of pellets with 50% of sludge that in the ashes had values greater than the minimum foreseen in the standard.

Keywords: Wastes, Solid Fuel, Renewable Energy, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais fontes de energia brasileira no ano de 2016.....	15
Figura 2: Disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2017.....	19
Figura 3: Representação esquemática de um reator UASB.	22
Figura 4: Etapas de tratamento do lodo em uma Estação de Tratamento.	23
Figura 5: Quantidade de empresas brasileiras produtoras de pellets e briquetes.	27
Figura 6: Matérias-primas utilizadas na produção de briquetes.....	28
Figura 7: Fluxograma de metodologia de coleta e caracterização do lodo e dos pellets.	29
Figura 8: Localização geográfica do SAAE Cajueiro.....	30
Figura 9: Reator UASB da ETE Isaura Toledo.....	31
Figura 10: Equipamento produtor de pellets.....	32
Figura 11: Lodo proveniente do reator UASB após descarte.....	37
Figura 12: Capim elefante utilizado para produção dos pellets.	38
Figura 13: Pellets produzidos amostras 1 à 4.....	40
Figura 14: Umidade dos pellets (%), comparados a norma EN 14961-6 (DIN, 2012).....	40
Figura 15: Resistência mecânica (kgf/cm ²) amostras de pellets.	43
Figura 16: Densidade à granel (kg/m ³) comparados a norma EN 14961-6 (DIN, 2012).....	44
Figura 17: Poder calorífico útil (MJ/kg) comparados a norma EN 14961-6 (DIN, 2012).....	46
Figura 18: Tendência crescente poder calorífico superior (kcal/kg) amostras 1 à 4.....	47
Figura 19: Curva TGA amostras 1 à 4.	48
Figura 20: Pellets torrefados.	49

Figura 21: Tendência crescente poder calorífico superior (kcal/kg) amostras 5 à 8.....	49
Figura 22: Aumento do PCS após a técnica da torrefação.....	50
Figura 23: Cinzas do lodo.	50
Figura 24: Análise elementar cinzas do lodo.	51
Figura 25: Cinzas dos pellets.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Situação do saneamento brasileiro em 2017.	20
Tabela 2: Análises e referência para caracterização das amostras de lodo e capim elefante. ...	33
Tabela 3: Análises e referência para caracterização das amostras dos pellets produzidos.	33
Tabela 4: Amostras e proporções de comparação dos pellets.	35
Tabela 5: Amostras e proporções de comparação dos pellets torrefados.	36
Tabela 6: Propriedades de pellets de não madeira para uso não industrial de acordo com a norma EN 14961-6.	36
Tabela 7: Valores de umidade, análise imediata, poder calorífico superior e análise elementar.	38
Tabela 8: Análise imediata das quatro amostras de pellets.	41
Tabela 9: Resultados de durabilidade mecânica e teor de finos comparados aos parâmetros de pellets tipo A e B da norma EN 14961-6 (DIN, 2012).	42
Tabela 10: Análise elementar amostras 1 à 4.	44
Tabela 11: Análise elementar CHN amostras 1 à 4 comparados a literatura.	45
Tabela 12: Densidade energética amostras 1 à 4 comparados a outras biomassas da literatura.	47
Tabela 13: Análise elementar cinzas amostras 1 à 4.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional das Águas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CECA – Centro de Ciências Agrárias

CTEC – Centro de Tecnologia

DIN - Deutsches Institut für Normung

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

ETE – Estação de Tratamento de esgoto

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEE – Gases do Efeito Estufa

ISO - International Organization for Standardization

LASSOP – Laboratório de sistema de separação e otimização de processos

LSA – Laboratório de Saneamento Ambiental

LTBA – Laboratório de Tecnologia de Bebidas e Alimentos

NBR – Norma Brasileira

RSU – Resíduo Sólido Urbano

RU – Restaurante Universitário

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digestion

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Cenário energético brasileiro: matriz energética e fontes renováveis.....	15
3.2 Produção e utilização de resíduos como fonte de energia.....	18
3.3 Unidades de estação de tratamento no Brasil e sua importância no tratamento dos rejeitos	20
3.4 Reator de manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (UASB)	21
3.5 Lodos de ETE	22
3.6 Capim Elefante	24
3.7 Óleo de cozinha residual	25
3.8 Pellets e Briquetes.....	25
3.8.1 Pellets e Briquetes a nível mundial, nacional e local	27
4 METODOLOGIA	29
4.1 Sequência do experimento	29
4.2 Locais de coleta e dos experimentos	30
4.3 Caracterização do lodo, capim elefante e dos pellets	32
4.4 Determinação das proporções de mistura.....	35
4.5 Análise estatística	36
4.6 Análise e avaliação dos resultados obtidos.....	36

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Classificação físico-química e energética do lodo e do capim elefante	37
5.2 Propriedade dos pellets	39
5.3 Propriedade dos pellets torrefados	48
5.3 Propriedade das cinzas do lodo e dos pellets	50
5.4 Considerações finais	52
6 CONCLUSÕES	54
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A quantidade de resíduos gerados nos centros urbanos vem crescendo cada vez mais. No Brasil, estimou-se uma geração de 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos no ano de 2018 (ABRELPE, 2019). Um desses resíduos é o lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), segundo Świerczek, Cieślik e Konieczka (2018) seu aumento é relacionado principalmente a crescente produção dos municípios, expansão dos sistemas de esgotamento sanitário e ao desenvolvimento de novas plantas industriais, necessitando de alternativas de reciclagem, visto o descarte contribuir com a superlotação de aterros sanitários.

Visando a reutilização do lodo, diversas pesquisas o investigaram para diversos fins, através de técnicas como de biodigestão, pirólise e produção de biocarvão para geração de energia, sua utilização como fertilizante, alcançando resultados satisfatórios do ponto de vista energético e agrícola (KOMINKO et al., 2019; YIN et al., 2019; AGARWAL et al., 2015; MANÃS et al. 2014). Partindo deste princípio o lodo aparece como possível material de combinação para produção de energia renovável, visto que sua utilização sozinho para produção de biocombustíveis sólidos, por exemplo, apresentou alto o teor de cinzas, o que confere uma má qualidade ao material em termos de aproveitamento energético (JIANG et al., 2016). Sua combinação com outros materiais tipo biomassas lignocelulósicas, favorecem o processo de geração de energia, obtendo melhores propriedades do combustível final (SILVA et al., 2020).

Outro resíduo gerado em grande quantidade é o óleo de cozinha. No Brasil uma família descarta cerca de 1 litro de óleo por mês, essa quantidade é capaz de poluir cerca de 25 mil litros de água (EMBRAPA, 2009 apud SABESP, 2009). Se tratando em reuso para consumo humano, o óleo apresenta uma séria ameaça à saúde, por liberar diversos produtos químicos em deterioração no qual implicam em doenças (CAO et al., 2019). Entretanto, estudos apontam o óleo de cozinha alimentar como benéfico na produção de energia, por ser compatível tanto energeticamente quanto economicamente a fontes convencionais (HUSSAIN et al., 2016). Porém ainda existem entraves em sua utilização neste sentido, como a presença de ácidos graxos livres que pode prejudicar o processo de transesterificação durante a produção de biodiesel (SAHAR et al., 2018). Com isso necessita-se de soluções de reuso sustentável, para produção de energia renovável, neste ponto biomassas podem aparecer como ponto chave para combinação.

O Brasil é um grande produtor de biomassa que pode ser utilizada para produzir energia, contribuindo para a preservação do meio ambiente, a diversificação da matriz energética, o desenvolvimento econômico, além da ampliação do acesso a energias de regiões mais isoladas (FERREIRA et al., 2018). Biomassas como o Capim Elefante que possui uma safra de três vezes ao ano, se adapta bem em qualquer região, pelo fato de se desenvolver sobre condições climáticas desfavoráveis como a seca e a neve (QUEIROZ FILHO; SILVA; NASCIMENTO, 2000). O capim possui elevada quantidade de lignina, algumas espécies podem chegar até cerca de 22% (XIE et al., 2011), fator extremamente importante quando se trata da produção de energia, pois sua presença auxilia diretamente em maiores valores de poder calorífico (SILVEIRA et al., 2015). A caracterização do Capim Elefante colocou-a como compatível com biomassas atuais para produção de energia (KUMAR; GOSH, 2018), sendo utilizado com êxito em pesquisas para geração de bioetanol (MENEGOL et al., 2016; SCHOLL et al., 2015).

Existem práticas de produção de biocombustíveis sólidos a partir de resíduos e biomassas, como a pelletização e briquetagem, promovidas com o intuito de reduzir custos de transporte e armazenamento, além de melhorar sua eficácia na produção de energia (DESHANNAVAR et al., 2018). Diversos estudos atuais utilizaram de diferentes biomassas para produção de pellets e briquetes como resíduos de banana, casca de arroz e café, espiga de milho, etc. (AHMAD; SAZALI; KAMAROLZAMAN, 2018; LUBWAMA, YIGA, 2018; PETKOVIC, 2018). Pesquisas tiveram o lodo de ETE como componente para produção de pellets e briquetes (SILVA et al., 2020; YILMAZ; WZOREK; AKÇAY, 2018; AVELAR et al., 2016). Normas como a EN 14961-6 (DIN, 2012) estabelecem parâmetros de qualidade de pellets, servindo como base de comparação dos resultados obtidos, abrangendo uma grande variedade de pellets, com o principal objetivo de classificar sua qualidade torná-los aptos para comercialização.

Apesar de diversas pesquisas colaborarem com uso de resíduos e biomassas para produção de energia, ainda não existem trabalhos que combinem os componentes propostos na presente pesquisa. O principal propósito deste trabalho, é fornecer alternativas viáveis de reutilização de resíduos para produção combustível do ponto de vista energético, utilizando de resíduos e biomassas renováveis. Ao explorar esta lacuna buscará ter uma relevante contribuição científica, ambiental, social e econômica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi a análise da utilização de resíduos (óleo de cozinha residual e lodo de ETE) misturados a biomassa (capim elefante) para concepção energética de pellets.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o resíduo e a biomassa do processo produtivo dos pellets;
- Avaliar a qualidade dos pellets de acordo com a norma EN 14961-6 (DIN, 2012);
- Analisar os efeitos da empregabilidade do óleo de cozinha residual na mistura do lodo com capim elefante para produção de pellets, através da caracterização e comparação desses;
- Verificar os efeitos da técnica da torrefação;
- Avaliar energeticamente os materiais e produtos obtidos;
- Analisar as cinzas proveniente do lodo e dos pellets.

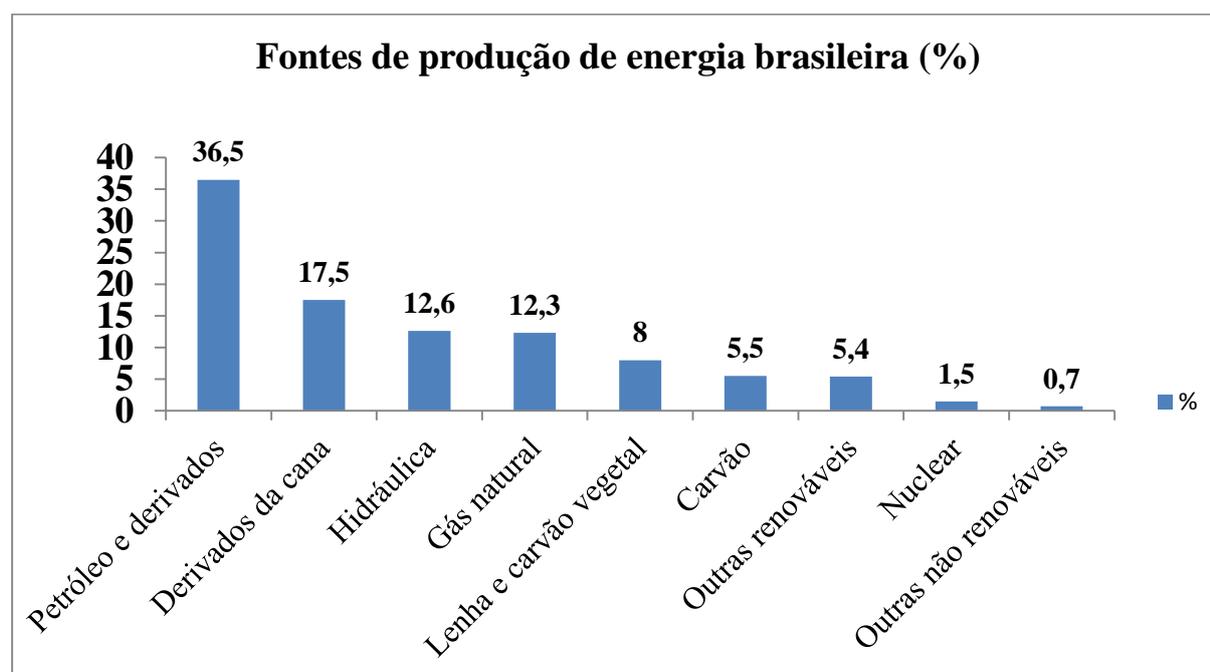
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cenário energético brasileiro: matriz energética e fontes renováveis

É inquestionável a importância da energia para o desenvolvimento de um país. No Brasil o crescimento populacional no decorrer do tempo ocasionou uma maior utilização da energia para desempenho de suas atividades. A segunda guerra mundial foi fator agravante deste aumento populacional e por consequência consumo de energia, aliados à implantação de novas indústrias, e o desenvolvimento de redes rodoviárias no país (GUERRA et al., 2015).

O Brasil é um país rico em fontes energéticas conforme ilustrado na Figura 1, apresentando assim elevado poder de produção de energia.

Figura 1: Principais fontes de energia brasileira no ano de 2016.



Fonte: Adaptado de EPE, 2016.

Para haver crescimento econômico a partir destes bens é necessária uma gestão eficiente, porém apesar dessa abundância de recursos ainda há deficiências em relação à sua utilização, segundo Hunt, Stilpen e Freitas (2018) decorrentes de crises no cenário nacional.

O petróleo é um dos bens mais utilizados para geração de combustível no país. No setor de exploração de petróleo, apesar de haver uma gama de recursos disponíveis, a má gestão por parte da companhia petrolífera nacional (Petróleo Brasileiro SA - Petrobrás), elencado aos constantes casos de corrupção agravam tal déficit (LIN; ANKRAH; MANU, 2017). O

planejamento energético depende de diversos fatores, entre eles questões culturais, econômicos e políticos, sendo tais fatores determinantes na formulação de políticas gerenciais (DRANKA; FERREIRA, 2018).

Porém, a matriz energética brasileira é bastante diversificada, tal fato possibilita uma infinidade de alternativas de fontes, nas quais podem subsidiar soluções as deficiências existentes. A evolução da matriz energética brasileira, deve-se a busca por novas alternativas de produção de energia (LAMAS; GIACAGLIA, 2013).

O etanol produzido no Brasil é um combustível produzido a partir da cana de açúcar, combustível utilizado para veículos automotores. Sendo este uma alternativa à utilização da gasolina oriunda do petróleo. Além disso a gasolina oferece impactos significativos na saúde humana pelas partículas emitidas na atmosfera em sua combustão (ZHENG et al., 2018).

Outro combustível com origem do petróleo ainda muito utilizado para motores é o óleo diesel. O uso do biodiesel é uma potencial alternativa de substituição desta fonte, como solução de crises energéticas e ambientais (MAHMUDUL et al., 2017).

O carvão mineral, representado em 5,5% do total da matriz energética brasileira, ainda é o combustível sólido mais utilizado na concepção energética devido à disponibilidade e baixo custo. Apesar de bastante abundante este não é uma fonte renovável, além de causar sérios impactos na natureza, com liberação de gases de efeito estufa desde sua mineralização (GUIMARÃES et al., 2018). Uma alternativa a esta fonte é o carvão vegetal, que é oriundo da queima da madeira, geralmente utilizado em fornos de pizzarias, em caldeiras que são utilizadas em diversos setores como hospitais e indústrias, cujo seu uso pode reduzir consideravelmente as emissões de CO₂ (PURWANTO et al., 2018).

A energia nuclear ainda não é uma fonte muito difundida no Brasil. Apesar de ser vantajosa para geração de energia, sendo uma fonte limpa e segura do ponto de vista energético (DOS SANTOS et al., 2013). Tal energia surge como uma alternativa à geração de energia elétrica, podendo suprir déficits energéticos oriundos das hidrelétricas.

Vale destacar a energia eólica e solar como alternativas ao fornecimento energético pelas hidrelétricas. Porém um desafio em aumentar o fornecimento dessas fontes é quanto a sua variabilidade e intermitência (ZHOU, 2018).

É imprescindível analisar todas as alternativas, visto o leque de opções energéticas disponíveis na matriz brasileira, de forma a aumentar sua eficiência. A maior parte de consumo energético no Brasil advém de fontes não renováveis. Estas fontes são mais eficazes no

crescimento econômico do que as renováveis (ADAMS; KLOBODU; APIO, 2018). Mas, apesar de serem vantajosas do ponto de vista econômico, estas fontes por não serem renováveis, passam a ter possibilidade de esgotar, uma vez que o consumo só aumenta com o passar do tempo.

As fontes renováveis disponíveis na matriz brasileira somam 45,2% do total (EPE, 2019). O Brasil tem uma das maiores fontes de energia renovável do mundo (SANTOS et al., 2017). Tal fato traz uma visão otimista a respeito da utilização destas. As fontes renováveis são fundamentais para alcançar objetivos sustentáveis (DRANKA; FERREIRA, 2018).

Apesar de muitas serem fontes limpas, as diversas renováveis presentes no Brasil possuem suas desvantagens. As eólicas, por exemplo, dependem da ocorrência dos ventos não sendo possível estoca-las além da disponibilidade de grandes terras para instalação. No caso das energias solares, o alto custo de implantação é um entrave, além da disponibilidade de luz no local, as condições climáticas da região também interferem, dentre outros fatores.

O consumo de energia renovável pode ser atribuído à renda do país, sendo os de menor renda priorizando o desenvolvimento econômico em relação às questões ambientais aumentando o consumo de energias não renováveis intensificando a degradação ambiental, e nos de renda mais elevada exatamente o oposto (NGUYEN; KAKINAKA, 2018). Ou seja, para a sua utilização ser sustentável é preciso investimentos principalmente em infraestrutura, por parte dos órgãos gestores a fim de viabilizar sua utilização e conseqüentemente mitigar os danos ao meio ambiente.

Sustentabilidade é um ponto de extrema importância quando o assunto é energia, visto que, em todas as atividades do homem é preciso planejar de maneira a possibilitar boas condições para as futuras gerações. Com isso é fundamental avaliar as diversas alternativas a fim de aliar sustentabilidade com capacidade renovável. Para atingir este objetivo com êxito é preciso que os órgãos gestores saibam quais fontes de energias são substituíveis (LIN; ANKRAH; MANU, 2017). É essencial abordar questões sustentáveis agora, com propósito de garantir igualdade da geração atual com as futuras gerações (GONZÁLES; GONÇALVES; VASCONCELOS, 2016).

Dentre as diversas dificuldades encontradas, Dranka e Ferreira (2018) comentam a respeito do grande desafio em prever o comportamento das tecnologias energéticas para o futuro, onde podem não ser viáveis em larga escala ou não estarem disponíveis, sabendo disto

determina que uma correta definição das hipóteses e uma delimitação adequada dos problemas são imprescindíveis para conseguir prever cenários reais e relevantes.

Para saber quais recursos energéticos um país deve escolher para produção, deve-se alinhar o seu crescimento econômico com a degradação ambiental que vai ocasionar, estando ligado ao seu estágio de desenvolvimento (NGUYEN; KAKINAKA, 2018).

No Brasil se gasta pouco tempo planejando e muito operando, em contraste com países mais desenvolvidos economicamente. À medida que se planeja uma ação seja ela qual for de maneira negligente, seus resultados poderão não ser tão satisfatórios, pois um bom planejamento prevê diversas alternativas para execução de planos futuros. Na questão energética parte do mesmo pressuposto, avaliar ao máximo as possibilidades, para conseguir garantir sucesso em futuras ações.

3.2 Produção e utilização de resíduos como fonte de energia

Os resíduos são materiais oriundos das atividades humanas, é o que sobra após ser utilizado o produto original para algum fim, podendo ser sólido no caso dos lixos domésticos, líquido como esgotos, e gasoso aquele liberado por chaminés, ou qualquer atividade de combustão. Sua composição varia significativamente de acordo com a região, no qual engloba o seu poder econômico, estilo de vida, regulamentação de gestão de resíduos, além da estrutura industrial (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018).

No Brasil existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos, regida pela lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010). Tal regulamentação busca subsidiar todas as etapas desde a geração até o destino final deste material. Conforme os objetivos explícitos no Art. 7º:

“Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

I - proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;

II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;

III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;

IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;

V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;

VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;

VII - gestão integrada de resíduos sólidos; [...]”.

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), o Brasil gerou 214.868 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos (RSU), no ano de 2017. Sua destinação está ilustrada conforme a Figura 2.

Figura 2: Disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2017.



Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2017.

A partir da Figura 2, percebe-se majoritariamente uma correta destinação dos resíduos pelo fato dos aterros sanitários receberem maior quantia, porém os lixões ainda recebem grande volume deste material (cerca de 13 milhões de toneladas por ano), onde dificilmente é reaproveitado. A reciclagem dos resíduos faz parte da sustentabilidade urbana, sendo seus benefícios diversos, do ponto de vista ambiental, sanitário, social e econômico (CONKE, 2018).

A ideia de utilizar os resíduos para produção de energia já era abordada na década de 90. Knoef e Stassem (1995) já tinham esta preocupação, onde pesquisaram na Holanda a utilização de biomassa para este fim. Schultheis e Steinbach (1996) utilizaram o bio-resíduo como fonte renovável de energia, fermentando tal composto. Sharma et al. (1998) utilizou de resíduos de pneus para recuperação de energia.

Atualmente a utilização dos resíduos, é bastante difundida para produção de energia, de forma que diversos estudos atuais se engajaram nesta temática. Makarichi, Jutidamrongphan e Techato (2018) pesquisaram a respeito da incineração de lixo para geração de energia, obtendo êxito em relação aos resultados encontrados. Nunes et al. (2017) constataram o benefício no uso de resíduos de uma empresa têxtil para geração de energia térmica. Beegle e Borole (2018) compararam a eficiência energética da conversão de resíduos diretamente em eletricidade

usando digestores anaeróbicos e bioeletroquímicos, obtendo resultados de alta eficiência energética.

Apesar dos esforços de políticas em diminuir a quantidade de resíduos gerados, eles sempre existirão como produto final das atividades humanas. Geri-los de forma a dar um fim sustentável, é de grande valia. Ao aplicá-los para fins energéticos é uma alternativa renovável, de extrema relevância no âmbito social, ambiental e econômico.

3.3 Unidades de estação de tratamento no Brasil e sua importância no tratamento dos rejeitos

As águas residuais, deveriam todas elas serem encaminhadas para as estações de tratamento de esgoto (ETE's), para ter um devido tratamento para reposição na natureza ou reuso. Porém nem sempre se tem esse fim.

Dados recentes de estudo por parte da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), revelam uma situação alarmante quanto a disposição do esgoto no Brasil, demonstrados na tabela 1.

Tabela 1: Situação do saneamento brasileiro em 2017.

Situação do esgoto da População	%
Coletado e tratado	43
Utilizam de fossa séptica	12
Coletado e não tratado	18
Não coletado e não tratado	27

Fonte: (ANA, 2017).

Em um cenário em que 9,1 mil toneladas de esgoto são gerados por dia no Brasil, 45% não recebem qualquer tratamento (ANA, 2017). Com isso estas águas residuárias são devolvidas a natureza, uma vez que não possui qualquer tratamento apresenta graves riscos à saúde da população e ao meio ambiente alterando suas características naturais. De acordo com Rajasulochana e Preethy (2016) as principais populações microbianas encontradas nos sistemas de tratamento de esgoto são bactérias, protozoários, vírus, fungos, algas e helmintos, sendo a presença desses fatores interveniente na propagação de doença, além de muitos casos a presença

de poluentes químicos. São fatos preocupantes como estes, que reforçam ainda mais a importância da existência das ETE's.

No Brasil atualmente existem 2.768 ETE's (ANA, 2017). Para Von Sperling (1995) os níveis de tratamento convencional dos resíduos nas ETE's são:

1. Tratamento preliminar: remove sólidos grosseiros;
2. Tratamento primário: remoção de sólidos sedimentáveis;
3. Tratamento secundário: remoção de matéria orgânica por mecanismos biológicos;
4. Tratamento terciário: remoção de nutrientes, patogênicos, compostos não biodegradáveis, etc.;

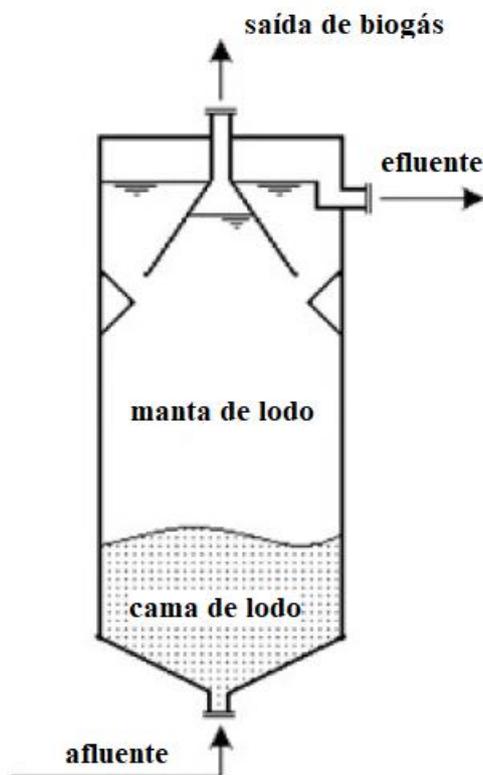
Percebe-se a partir do tratamento primário, existem resíduos oriundos do tratamento, denominados de lodo.

3.4 Reator de manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB)

Existem diversas alternativas eficientes de tratamento de efluentes, utilizando do próprio lodo no sistema, tal mecanismo pode ser realizado por reatores, por exemplo. Dentre eles se destaca como tratamento anaeróbico o Reator de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente – UASB (a sigla vem do inglês “Upflow Anaerobic Sludge Blanket”). Devido a sua elevada eficiência, diversas pesquisas atuais se propõem a utilizar este reator como forma de tratamento (LI et al., 2018; NERY et al. 2018; CHEN et al., 2017).

Este tipo de processo de tratamento anaeróbico segundo Chernicharo (2007) consiste num fluxo ascendente da água residual por uma manta de lodo com elevada atividade microbiana. Conforme esquematizado na Figura 3.

Figura 3: Representação esquemática de um reator UASB.



Fonte: Chernicharo (2007) – Adaptado pelo autor.

Na configuração convencional de um reator UASB, ilustrada na Figura 3, percebe-se a entrada da água residual pela base, reagindo no interior com populações microbianas, e uma separação do efluente do biogás.

De acordo com Chernicharo (2007) um princípio fundamental deste sistema é a capacidade de desenvolver num tempo médio de retenção alto uma biomassa de alta atividade (forma de flocos de 1 a 5 mm). No reator UASB, se é mantido o lodo de boa qualidade, e removido para descarte os de baixa qualidade (CHERNICHARO, 2007).

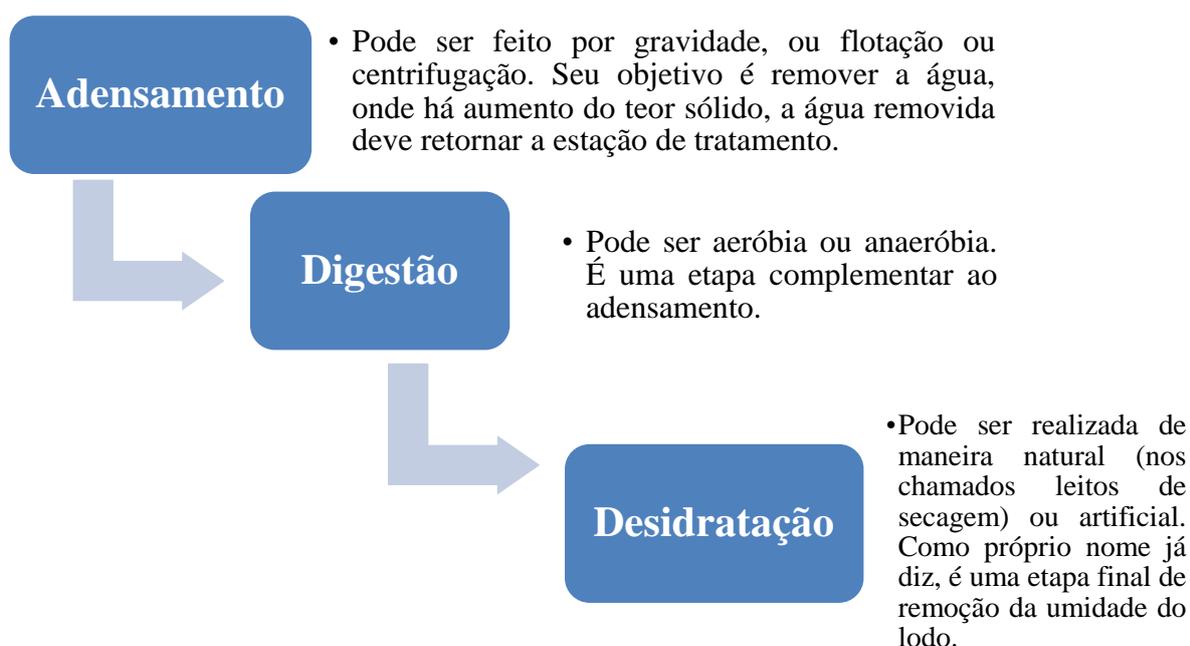
3.5 Lodos de ETE

Os lodos gerados nas estações de tratamento são considerados resíduos sólidos, apesar de 95% de seu volume poder ser composto por água (MARGUTI; SECKLER; PIVELI, 2018). O lodo é efetivamente produzido por microrganismos fornecido nas fases de tratamento de uma ETE (como é o caso do reator UASB).

O fato de sua origem ser de compostos nocivos à natureza, que possuem todo tipo de poluentes, liga o alerta quanto à sua destinação. Segundo Chen e Kuo (2016) sua incineração emite altas taxas de CO₂. Seu descarte ainda é comumente ligado à alocação para aterros sanitários. O descarte em aterros sanitários ocasiona emissão direta de metais pesados, nos quais contribuem para a toxicidade humana, já processos de incineração contribuem para toxicidade marinha (XU; CHEN; HONG, 2014). De acordo com Marguti, Seckler e Piveli (2018) por questões técnicas e ambientais, os lodos devem ser tratados antes de serem descartados na natureza.

Conforme a NBR 12209 (ABNT, 1992), existem alguns procedimentos para o tratamento do lodo, de acordo com o resumo explicito na Figura 4.

Figura 4: Etapas de tratamento do lodo em uma Estação de Tratamento.



Fonte: ABNT (1992) – Adaptado pelo autor.

O tratamento dos lodos deve ser de forma eficiente, seguindo à risca as etapas descritas na Figura 3, visto a sua composição ser altamente poluente. Segundo Chernicharo (2007) o lodo proveniente de um reator UASB, já sai digerido e adensado. Também é importante tratar o lodo para qualificá-lo para ser reaproveitado.

Um estudo comprovou após alcançar resultados satisfatórios que a aplicação de lodo de esgoto com baixo teor de metais pesados num solo estéril, pode ser benéfica para

desenvolvimento de espécies vegetais, fornecendo nutrientes para seu crescimento, além de aumentar a sua retenção hídrica (GROBELAK et al., 2017).

O lodo de esgoto pode ser utilizado na composição para produção de materiais de construção civil, sua junção com outros materiais para produção de cerâmicas apresenta boa estabilidade e durabilidade (ŚWIERCZEK; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2018).

O lodo pode ser considerado como biomassa, logo pode ser destinado para geração de energia, sua utilização mostrou-se como uma eficiente fonte para geração de energia térmica após testes de aquecimento de resíduos de uma ETE (MANÃS; CASTRO; HERAS, 2014). O lodo desidratado oriundo de um reator UASB chegou a apresentar valor médio de poder calorífico superior de 8,7 MJ/kg (ROSA et al., 2016).

Em razão de sua constante presença nas estações de tratamento aliada a uma busca por sua correta destinação, o lodo aparece como alternativa potencial de fonte energética, sendo uma biomassa eficiente.

O produto de sua pirólise pode proporcionar energia elétrica e para transportes, sendo estimado que uma tonelada de lodo seria capaz de suprir necessidades energéticas de cerca de 239 casas indígenas por dia e produziria uma quantidade de gás metano exigido pra rodar 128 ônibus de transporte público diariamente (AGARWAL; TARDIO; MOHAN, 2015).

3.6 Capim Elefante

As matérias agrícolas representam grande volume no Brasil, por conta disso possui elevado potencial de uso para produção de energia (CARNEIRO et al., 2013).

O Capim Elefante (*Pennisetum purpureum schum*) é uma dessas matérias, no qual apresenta elevado volume seco, e é capaz de se desenvolver sobre condições climáticas desfavoráveis como a seca (QUEIROZ FILHO; SILVA; NASCIMENTO, 2000). De acordo com Collazzo et al. (2017) o capim elefante é uma fonte promissora de energia renovável.

Em relação a viabilidade energética, o capim elefante é utilizado com êxito em algumas pesquisas para geração de bioetanol (MENEGOL et al., 2016; SCHOLL et al., 2015). Magalhães et al. (2016), produziu pellets com capim elefante, encontrando bons resultados em relação a produção de energia com poder calorífico médio de 14,6 MJ/kg, mas com baixa densidade a granel.

3.7 Óleo de cozinha residual

O óleo de cozinha é um importante material culinário, usado em demasia por todo o mundo, com isso há elevada quantia de resíduos gerados. Uma pesquisa na China estimou que somente no ano de 2016 foram gerados 90,14 mil toneladas de resíduos de óleo de cozinha por restaurantes apenas nos distritos urbanos de Pequim (LIU et al., 2018).

Visto elevada produção deste resíduo, alternativas para seu reuso são bem recebidas. Os óleos de cozinha usados, podem ser convertidos em biodiesel, diversas pesquisas atuais entraram neste mérito, utilizando as mais diversas técnicas tais como transesterificação enzimática e a co-pirólise de micro-ondas (MOAZENI; CHENG; ZHANG, 2019; MAHARI et al., 2018; LAM et al., 2017; ARAÚJO et al., 2013). Tal processo demonstrou que o biodiesel produzido tem propriedades de combustíveis satisfatórias e semelhantes ao diesel comum, alcançando valores de PCS de até 42 MJ/kg (MAHARI et al., 2018). No Brasil uma pesquisa da Associação de Produtores de Biocombustíveis do Brasil estimou que cerca de 30 milhões de litros de óleo de cozinha são reciclados para produção de biodiesel, valor ainda pequeno comparado aos 4,9 bilhões de óleo residual descartados anualmente (APROBIO, 2017). Porém há dificuldades no processo de transesterificação devido a presença de ácidos graxos livres tornando o processo mais complexo (SAHAR et al., 2018).

O óleo por ser um material volátil pode favorecer na composição de outras alternativas combustíveis para geração de energia, aumentando assim o seu poder calorífico, por exemplo, no caso de pellets e briquetes, com isso fornecendo uma nova opção de reuso às técnicas já existentes.

3.8 Pellets e Briquetes

Como alternativa para o uso dos resíduos e biomassas sólidas pode-se destacar os pellets e briquetes, a diferença entre eles é quanto suas dimensões, onde segundo a EMBRAPA (2012) os pellets tem diâmetro de cerca de 6 a 16 mm, e os briquetes diâmetros de 50 a 100 mm. Porém ambos tem origem idêntica partindo da compactação da biomassa utilizando de algum ligante para ajudar na fixação. De acordo com Muazu e Stegemann (2017) esse ligante melhora a adesão de partículas, resistência à compressão, resistência à abrasão e teor de energia da biomassa densificada.

Dentre as vantagens dos pellets e briquetes, Deshannavar et al. (2018) citam a economia nos custos de transporte e armazenamento. Visto que, por ser uma mistura homogênea

(denominada de blenda), tem seu tamanho controlado. Algumas normas servem como base para determinação da qualidade dos pellets, como é o caso da EN 14961-6 (DIN, 2012), que cita parâmetros para comercialização de pellets feitos de não madeira, para uso não industrial.

Os pellets e briquetes são combustíveis sólidos usados em pizzarias, fornos industriais, caldeiras em geral, dentre outras diversas finalidades. Sua fácil queima é um ponto positivo na sua comercialização, além de existirem uma gama de fontes viáveis para sua produção, o que lhe faz como alternativa sustentável em relação às fontes não renováveis de energia. Com isso a biomassa tem um papel importante, visto que segundo Sawadogo et al. (2018) utilizá-la na produção de energia é uma forma de contribuir com a segurança energética e abordar questões ambientais.

A produção de pellets e briquetes é uma prática difundida no mundo todo. O primeiro registro destas práticas data dos anos 30, onde o engenheiro Robert Bowling, inventou uma maneira de reutilizar resíduos de madeira para geração de energia (COYNER, 2004). No século XX já existiam pesquisas para utilização destes combustíveis como alternativa combustível. Saxena e Dewan (1996) produziram pellets a base de celulose, obtendo resultados em ótimas condições de emissão de CO com relação aos limites de proteção ambiental local. Tripathi, Iyer e Kandpal (1998) produziram um dos primeiros estudos para avaliação técnico-econômica do uso de biomassa para briquetagem na Índia, tendo como um dos resultados que matérias primas secas, possuem custos mínimos de produção. Wamukonya e Jenkins (1995) pesquisaram a respeito da durabilidade dos briquetes feitos com serragem e palha de trigo no Quênia, obtendo resultados com baixo teor de umidade, e sem a presença de ligantes, porém com baixa durabilidade.

Pradhan, Mahajani e Arora (2018) comentam que a produção e utilização de pellets a partir de matérias-primas variadas ampliaram as oportunidades e desafios para as tecnologias existentes. Com isso pesquisas atuais contribuíram acerca da utilização de pellets e briquetes como fonte de energia no Brasil e no mundo.

Miranda et al. (2018) utilizou de espigas de milho para produção de pellets, com resultados satisfatórios atendendo a maioria das especificações normativas. Sette Jr. et al. (2018) pesquisou a respeito da aplicação direta da casca bruta de eucalipto para produção de briquetes, concluindo que sua utilização é desvantajosa em relação a madeira, devido ao alto teor de cinzas produzidas e baixo valor de aquecimento. Brand et al. (2017) utilizou de resíduos do arroz na produção dos briquetes, obtendo resultados satisfatórios em diferentes proporções

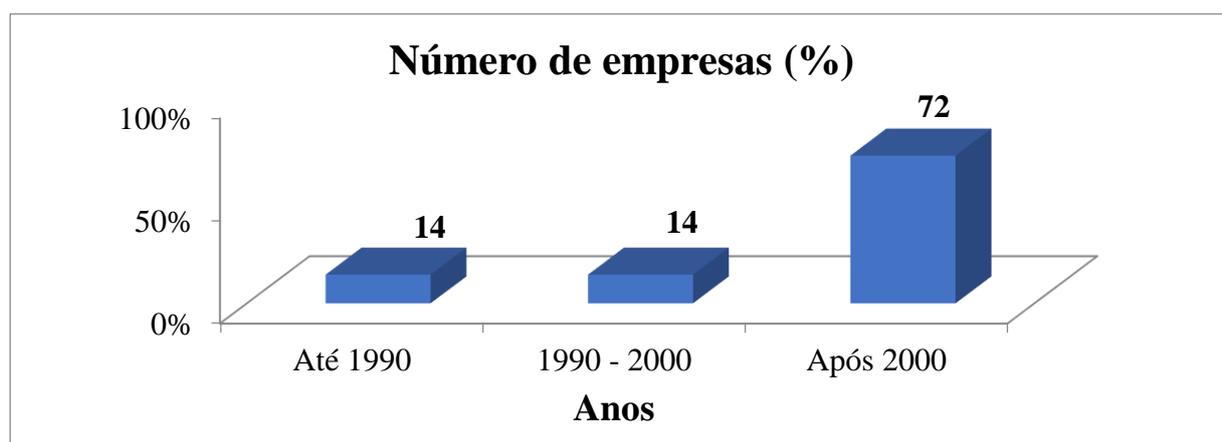
dos materiais, com relação as propriedades energéticas. A utilização do biolodo com resíduos de uma indústria têxtil, em uma proporção de 25% de lodo, mostrou-se eficiente na produção de briquetes, de acordo com as características físico-químicas e mecânicas encontradas (AVELAR et al., 2016). Visando aumentar ainda mais o poder energético destes combustíveis, diversas pesquisas utilizam da técnica de torrefação, denomina por Manouchehrinejad e Mani (2018) como um método que busca tratar de forma térmica o combustível visando aumentar sua densidade de energia e diminuir a energia de moagem da biomassa.

3.8.1 Pellets e Briquetes a nível mundial, nacional e local

Uma pesquisa estatística da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2017), realizada ao longo do ano de 2016 mostrou que foram produzidos 29 milhões de toneladas de pellets de madeira em todo o mundo, resultando em um aumento de 6% em relação ao ano anterior.

No cenário nacional a existência de empresas produtora dos pellets e briquetes vem crescendo a partir dos anos 2000, porém há a escassez de dados atuais referentes ao quantitativo dessas empresas. A Figura 5 ilustra o cenário da quantidade de empresas produtoras de briquetes e pellets segundo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2012) em um levantamento feito no ano de 2012.

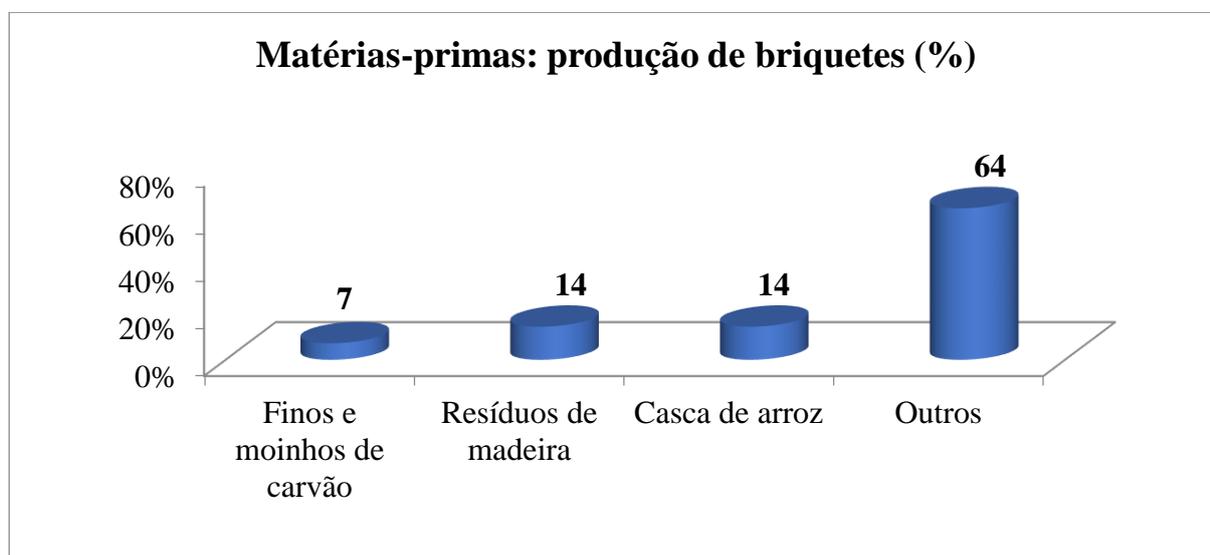
Figura 5: Quantidade de empresas brasileiras produtoras de pellets e briquetes.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2012.

Esta mesma pesquisa também fez um levantamento a respeito das fontes de produção dos briquetes, descritos na Figura 6. Percebe-se uma tendência ao uso de fontes renováveis.

Figura 6: Matérias-primas utilizadas na produção de briquetes.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2012.

Apesar de existirem poucas empresas de acordo com a última pesquisa realizada pela EMBRAPA, dados recentes da FAO (2018) mostram que no ano de 2017 o Brasil produziu mais de 135 mil toneladas de pellets de madeira.

Em Alagoas, não existem registros de empresas que realizem a produção de pellets, quanto de briquetes existem poucas, não sendo uma prática tão consolidada. Neste setor se destaca a Usina Sumaúma localizada na cidade de Marechal Deodoro, na qual produz briquetes a partir do bagaço da cana, comercializando com padarias dentre outros setores (EMBRAPA, 2016). Uma outra empresa na região, é a “E-Paletes Bioenergia”, criada em 2010, a qual faz uso de resíduos agroindustriais do Eucalipto e do Bambu, para produção de briquetes.

Num atual cenário de busca por alternativas para as atuais fontes não renováveis, os pellets e briquetes são alternativas extremamente viáveis para serem usados como combustíveis sólidos. Inserindo-se também no meio sustentável, com a utilização de biomassas e resíduos, obtendo assim de acordo com Gendek et al. (2018) excelentes resultados quanto as características físicas e mecânicas.

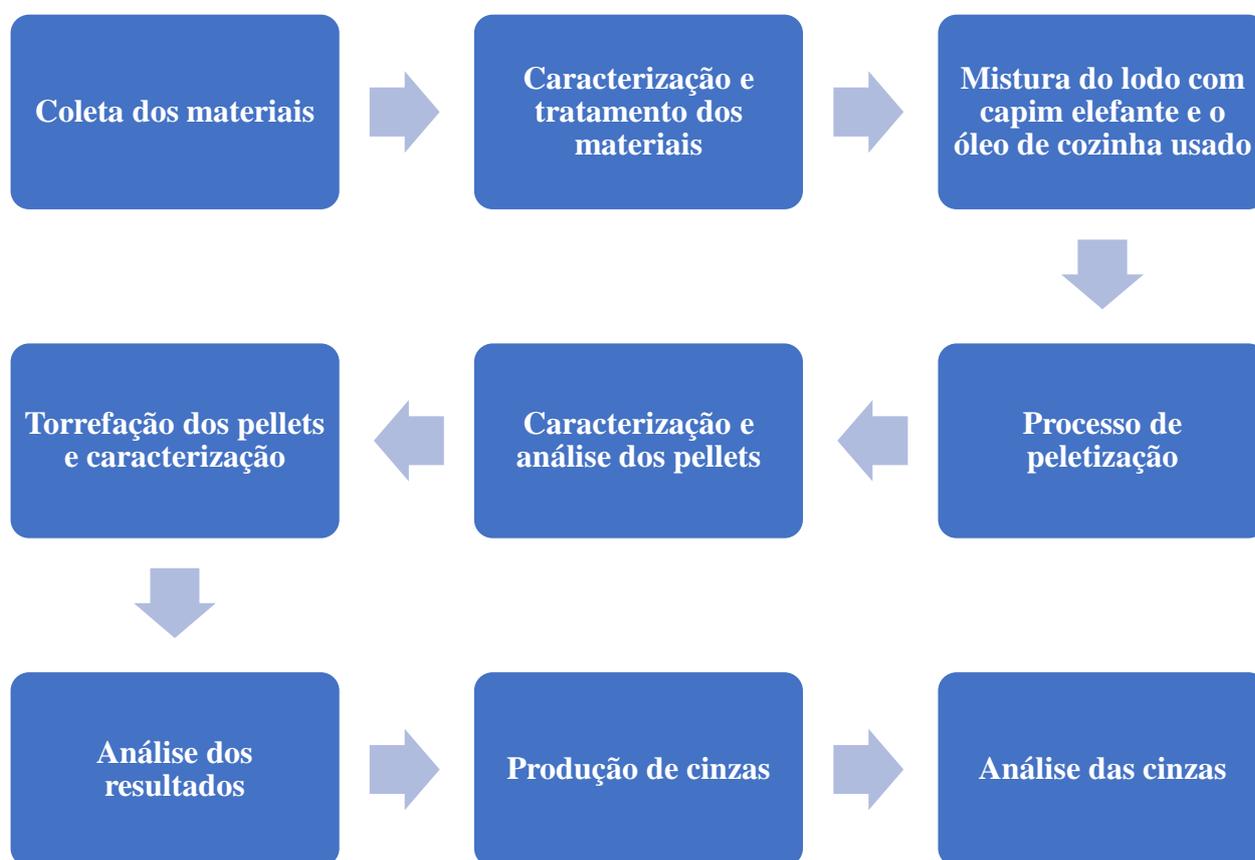
4 METODOLOGIA

Nesta seção, descreve-se as etapas empregadas para alcançar os objetivos propostos, desde os locais de coleta dos materiais até os locais de análises.

4.1 Sequência do experimento

O fluxograma apresentado na Figura 7 ilustra a sequência utilizada para realização do trabalho.

Figura 7: Fluxograma de metodologia de coleta e caracterização do lodo e dos pellets.

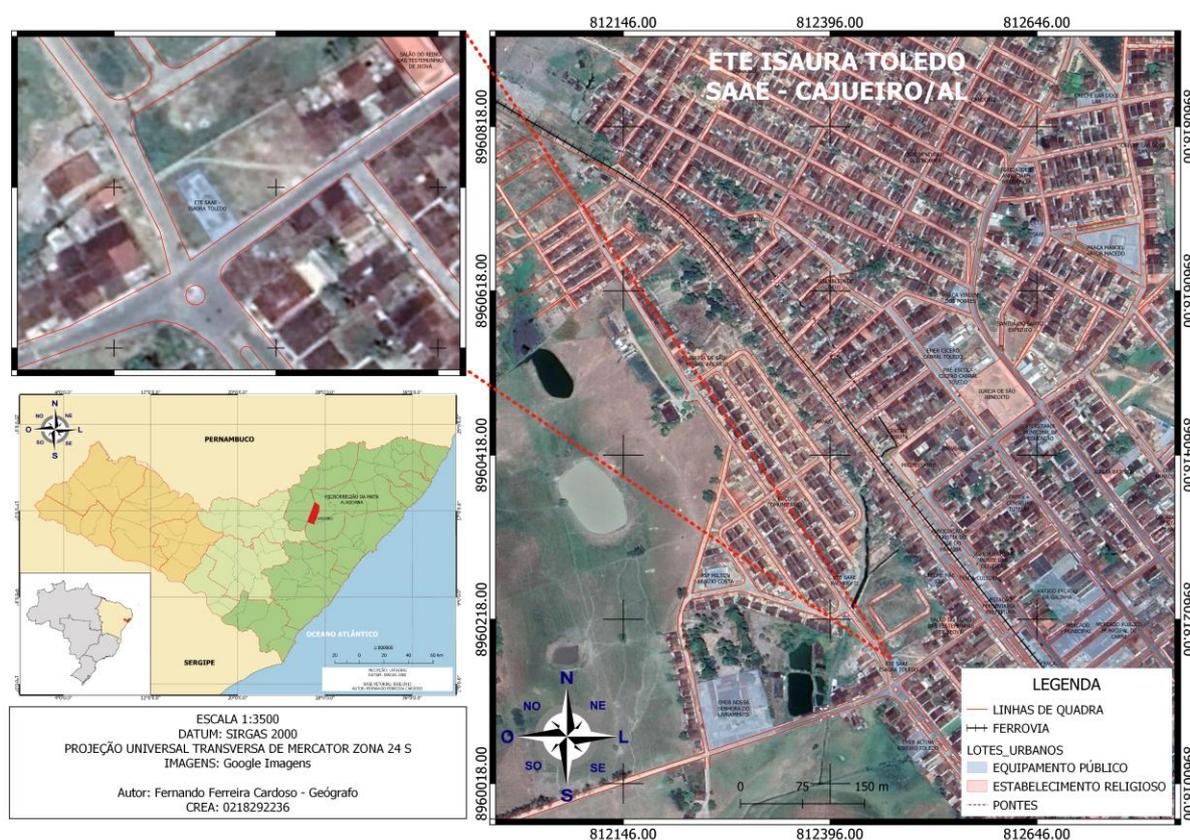


Fonte: Autor, 2018

4.2 Locais de coleta e dos experimentos

O lodo utilizado no presente trabalho foi coletado na ETE Isaura Toledo, sob domínio do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de Cajueiro-AL ($9^{\circ} 23' 48'' S$ $36^{\circ} 09' 13'' O$) de acordo com a Figura 8. Este sistema de tratamento conta com um reator UASB (Figura 9), sendo todo o esgoto tratado nesta ETE de origem residencial, o efluente líquido final é descartado num córrego próximo, e o lodo levado a um aterro sanitário na cidade de Pilar, localizada no estado de Alagoas (cerca de 36 km do município de Cajueiro).

Figura 8: Localização geográfica do SAAE Cajueiro.



Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Figura 9: Reator UASB da ETE Isaura Toledo.



Fonte: Autor, 2018.

O capim elefante, da espécie Pasto Panamá, foi coletado no Centro de Ciências Agrárias (CECA), localizado na UFAL, na cidade de Rio Largo.

O óleo residual foi coletado na cozinha do Restaurante Universitário (RU), da UFAL, no Campus A. C. Simões.

Foram feitas análises para caracterização do lodo e do capim. A produção dos pellets foi feita utilizando uma pelletizadora Yulongjixie, modelo SKJ2, presente na Miniusina de Adensamento de Biomassa da UFAL, localizada no Campus A.C. Simões, conforme Figura 10. Esta Miniusina conta com diversas outras máquinas e equipamentos, como fornos, trituradores, moinho, etc.

Figura 10: Equipamento produtor de pellets.



Fonte: Autor, 2018.

4.3 Caracterização do lodo, capim elefante e dos pellets

As análises de caracterização foram realizadas no Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), Laboratório de Biocombustíveis e Energia (LABEN), Laboratório de Tecnologia de Nanosistemas Carreadores de Substâncias Ativas (TecNano), Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA), todos localizados no Campus A. C. Simões na UFAL. A análise elementar CHN-O foi realizada no Centro de Laboratórios de Química Multiusuários da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Para a classificação do lodo coletado na ETE, adotou-se a Norma de Classificação de Resíduos Sólidos NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Em um momento posterior, foram feitas análises tanto para o lodo e o capim de umidade, imediata, elementar e poder calorífico superior. E para os pellets ainda foram feitas de forma complementar aos já citados, testes de durabilidade mecânica, teor de finos, densidade básica e

a granel, análise elementar CHN, poder calorífico inferior e útil. Ainda foram analisadas as cinzas dos pellets e do lodo em uma análise elementar.

Utilizou-se como base para realização das análises anteriormente citadas para as matérias primas os parâmetros normativos e da literatura descritos na tabela 2.

Tabela 2: Análises e referência para caracterização das amostras de lodo e capim elefante.

Análise	Referência
Teor de umidade	NBR 14.929 (ABNT, 2003)
Imediata	ASTM D 1762 - 84 (2013)
Elementar	ASTM F1375 – 92 (2012)
Poder Calorífico Superior	ASTM D407-44 (1969)

Fonte: Autor, 2018.

Para caracterização dos pellets seguiu as recomendações normativas da tabela 3.

Tabela 3: Análises e referência para caracterização das amostras dos pellets produzidos.

Análise	Referência
Teor de umidade	ISO 18134-1 (2015)
Imediata	ASTM D 1762 - 84 (2013)
Elementar	ASTM F1375 – 92 (2012); ASTM D 5373 (2008)
Durabilidade Mecânica	NBR 7222 (ABNT, 1994)
Teor de Finos	NBR 8740 (ABNT, 1985)
Resistência Mecânica	NBR 5739 (ABNT, 2018) - Adaptado pelo autor
Densidade a granel	EN 15103 (DIN, 2010)
Poder Calorífico Útil	EN 14918 (DIN, 2010)
Densidade Energética	Garcia et al. (2018)
Termogravimétrica	ASTM E2550 (2011)
Torrefação	Isemin et al. (2019)

Fonte: Autor, 2018.

A umidade é determinada para saber a quantia em porcentagem de água presente no material, foi feita após pesar as amostras e coloca-las por 24 horas em estufa à uma temperatura de 105 °C, após decorrido o tempo pesou-se novamente e determinou a porcentagem de perda, pela diferença de massa.

A análise imediata leva em conta o teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, sua determinação é necessária quando se trata de combustíveis, a fim de saber quanto de resíduo pode restar após a combustão (cinzas) e o potencial de materiais combustíveis. Para

determinação destes parâmetros utilizou-se somente balança de alta precisão, cadinhos tarados e forno mufla, seguindo recomendações normativas descritas das tabelas 2 e 3.

A análise elementar geral foi realizada para determinar o teor de elementos (como Fe, Si, S, Ca, etc.) presentes nas amostras tanto das matérias primas quanto dos pellets, utilizando um aparelho EDX 7000, Shimadzu, com base na norma ASTM F1375 – 92 (2012). Foi realizada também a análise elementar CHN, que determina os teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio, em um equipamento CHN628 da LECO e os resultados foram tratados no *Software* CHN628 versão 1.30, conforme a norma ASTM D 5373 (2008) já citada na Tabela 3.

Para a determinação da densidade a granel completou-se até a superfície superior um recipiente conhecido de acordo com a norma supracitada, fazendo assim a relação entre a massa e o volume.

Poder calorífico superior (PCS) foi determinado de forma direta numa bomba calorífica, já o útil (PCU) calculado segundo equação normativa EN 14918 (DIN, 2010).

O teor de finos das amostras, e a durabilidade mecânica são ensaios que se complementam, nos quais determinam o quão estável o material pode ser, e foi feito de forma adicional o ensaio de resistência mecânica, a respeito à resistência física às forças externas do material.

A análise da densidade energética embora não seja um parâmetro normativo, é importante no que diz respeito a ganhos no transporte energético, é simplesmente obtida pelo produto da densidade a granel pelo poder calorífico do pellet (GARCIA et al., 2018).

Ainda foram realizadas torrefações dos pellets produzidos, seguindo os preceitos de Isemin et al. (2019) à uma temperatura de 220 °C por 20 min, objetivando aumentar o valor de aquecimento (poder calorífico), previamente com intuito de comprovar tais condições de procedimentos foi realizada uma análise termogravimétrica (TG), em um analisador térmico DTG-60H, Shimadzu, à uma razão de aquecimento 10°C/min, na faixa da temperatura ambiente até 800°C, em atmosfera dinâmica de N₂ com vazão de 50 mL.min⁻¹.

Todas essas análises são imprescindíveis para caracterizar de forma completa os materiais envolvidos no experimento, para com isso ao fim determinar sua qualidade.

4.4 Determinação das proporções de mistura

As proporções de amostras aqui determinadas, seguiram duas proporções de mistura de materiais conforme Avelar et al. (2016). Foram determinadas a partir de experimentos prévios com os materiais propostos.

Para as misturas duas amostras tiveram a mesma quantidade de lodo e capim (50% de cada), uma delas adicionado o óleo, não conseguiu-se produzir pellets com mais do que 50% de lodo em sua composição, nas condições da presente pesquisa. Para outra proporção de comparação, seguiu de acordo com a pesquisa de Avelar et al. (2016), onde a melhor proporção de lodo misturado com outro material para produção de biocombustível sólido foi de 25%, obtendo assim alto teor de matéria volátil, carbono fixo, maior valor de aquecimento, densidade e resistência à compressão, além de menor teor de cinzas. Uma dessas amostras ainda foi adicionado o óleo residual, a uma porcentagem de 5% em massa da mistura do lodo com o capim, chegou-se a esse valor após experimentos prévios, no qual foi o maior valor possível para produção de pellets sob as condições da presente pesquisa, porcentagens superiores a 5% tornaram as amostras escorregadias e não permitia a produção do material, fez-se esta análise prévia pelo fato de não encontrar na literatura pesquisas que abordem tal procedimento. As amostras estão descritas conforme a Tabela 04.

Tabela 4: Amostras e proporções de comparação dos pellets.

Proporção de mistura em massa (%)			
Amostra	Lodo	Capim	Óleo residual*
1	50%	50%	0%
2	50%	50%	5%
3	25%	75%	0%
4	25%	75%	5%
<i>*porcentagem em massa da mistura lodo + capim</i>			

Fonte: Autor, 2019.

Ressalta-se que mais outras quatro amostras fizeram parte do experimento, que são aquelas provenientes da torrefação dos pellets, como o objetivo principal foi a otimização do valor de aquecimento nessas amostras, foi analisado o poder calorífico encontrado das amostras dos pellets de acordo com a Tabela 05.

Tabela 5: Amostras e proporções de comparação dos pellets torrefados.

Proporção de mistura em massa (%)			
Amostra	Lodo	Capim	Óleo residual*
5	50%	50%	0%
6	50%	50%	5%
7	25%	75%	0%
8	25%	75%	5%
<i>*porcentagem em massa da mistura lodo + capim</i>			

Fonte: Autor, 2019.

4.5 Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi feita por meio da estatística descritiva, utilizando de artifícios de medida central a partir da média das amostras e dispersão pelo desvio padrão. Foi realizado também um Teste-T, no qual analisa amostras em par em relação a média, com intuito de analisar se há diferença significativa entre os tratamentos aplicados aos pellets, ou seja, a presença do óleo e da técnica da torrefação, em relação ao poder calorífico.

4.6 Análise e avaliação dos resultados obtidos

Para a análise dos resultados obtidos dos Pellets, se comparou à norma alemã EN 14961-6 (DIN, 2012), de qualidade de pellets não lenhosos para uso não industrial, na qual apresenta valores de referência para as características dos pellets, os classificando em pellets Tipo A sendo de melhor qualidade, e Tipo B para menor qualidade, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades de pellets de não madeira para uso não industrial de acordo com a norma EN 14961-6.

Parâmetro	Tipo A	Tipo B
Diâmetro (D)	$6 \leq D \leq 10$ (mm)	
Comprimento (C)	$3,15 \leq C \leq 40$ (mm)	
Umidade (%)	$\leq 13,6$	$\leq 17,6$
Cinzas (%)	≤ 5	≤ 10
Durabilidade (%)	$\geq 97,5$	≥ 96
Finos (%)	≥ 2	≥ 3
Densidade Granel (kg/m³)	≥ 600	≥ 600
Poder Calorífico (MJ/kg)	$\geq 14,1$	$\geq 13,2$

Fonte: EN 14961-6 (DIN, 2012) – Adaptado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui serão apresentados os resultados encontrados no trabalho com sua devida discussão a respeito. Onde primeiramente se apresentará os resultados de caracterização físico-química e energética do lodo e do capim elefante, e posteriormente dos pellets e cinzas.

5.1 Classificação físico-química e energética do lodo e do capim elefante

Nas Figuras 11 e 12 estão representadas as matérias primas coletadas para produção dos pellets (lodo e capim respectivamente). O lodo foi classificado segundo a norma de classificação de resíduos sólidos NBR 10.004 (ABNT, 2004), como “Resíduos classe I – Perigosos”, por razão de apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, além de ter característica tóxica.

Figura 11: Lodo proveniente do reator UASB após descarte.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 12: Capim elefante utilizado para produção dos pellets.



Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 7 apresenta os valores encontrados para a análise imediata, elementar e poder calorífico superior (PCS) do lodo e do capim elefante.

Tabela 7: Valores de umidade, análise imediata, poder calorífico superior e análise elementar.

Parâmetro	Lodo	Capim
Umidade (%)	70,10	63,00
Cinzas (%)	8,02	5,55
Matéria Volátil (%)	51,16	24,13
Carbono Fixo (%)	40,82	70,32
PCS (kcal/kg)	2476	4037
Fe (%)	31,12	0,94
Si (%)	21,29	9,28
S (%)	15,57	1,22
Ca (%)	12,17	15,48
Al (%)	9,64	2,09
K (%)	3,60	43,22
P (%)	1,90	0,98
Ti (%)	1,57	0,12
Zn (%)	1,17	0,05
Mg (%)	0,90	1,90
Cl (%)	0,00	15,70

Fonte: Autor, 2019.

O lodo por ter sido coletado de um leito de secagem apresentou uma umidade (70,1%), visto que seu volume pode ser composto de água em até 95% (MARGUTI; SECKLER; PIVELI, 2018). O capim coletado obteve uma porcentagem de 63%, para reduzir este teor foi levado à uma estufa, chegando até cerca de 12%, umidade ótima obtida por Magalhães et al. (2016) para produção de pellets com capim elefante.

O teor de cinza do lodo (8,02%) em comparação aos resultados encontrados por Avelar et al. (2016) em base seca que chegaram à 11,8%. Já o teor de cinzas do capim é de 5,55 %, valor elevado se comparado a algumas variedades de Capim Elefante, cuja EMBRAPA (2016) cita teores de até 2,21%.

O Poder Calorífico Superior (PCS) do lodo foi de 2476 kcal/kg, o valor é justificado pela alta presença de Fe e Si conforme explicito na análise elementar. O capim elefante foi empregado a mistura com intuito de aumentar o poder calorífico, este de 4037 kcal/kg.

Observa-se na análise elementar que há uma compensação entre os materiais, onde o lodo apresenta elevados valores de Fe e Si, esses que podem aumentar o teor de cinza dos pellets, e o capim resultados menores. Isso também se vale ao teor de Cl que é extremamente nocivo ao meio ambiente pelo fato de liberar compostos clorados e dioxinas (CAO et al., 2019), encontramos no Capim um teor de 15,70% enquanto no lodo não se obteve nenhum registro de presença.

5.2 Propriedade dos pellets

Todos os Pellets tiveram diâmetros iguais de 6mm, e com pouca variação de tamanho entre as quatro amostras, com valores entre 19 e 23mm, atendendo assim as recomendações da norma EN 14961-6 (DIN, 2012), conforme ilustrado na Figura 13, cuja numerações seguiram a tabela 4.

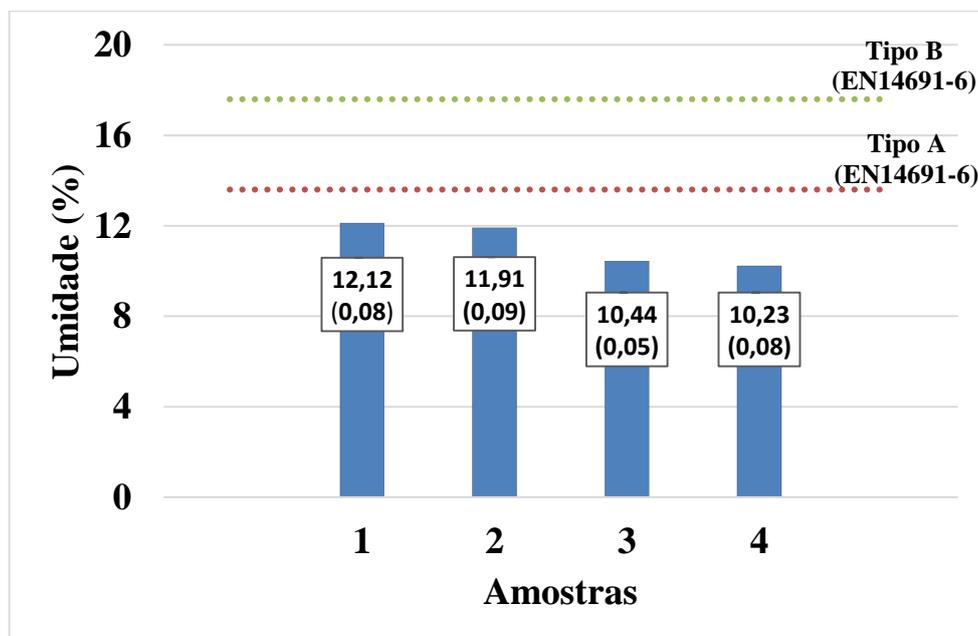
Figura 13: Pellets produzidos amostras 1 à 4.



Fonte: Autor, 2020.

A Figura 14 exibe o resultado da umidade encontrada nos pellets, com o desvio padrão, comparados à norma EN 14961-6 (DIN, 2012), onde se tem dois tipos de qualidades de pellets (tipo A e B), sendo o A fixado em uma umidade máxima de 13,6% e o tipo B em 17,6%.

Figura 14: Umidade dos pellets (%), comparados a norma EN 14961-6 (DIN, 2012).



Fonte: Autor, 2019.

Percebe-se que todos os pellets atendem a recomendação normativa (EN 14961-6) quanto a umidade, se enquadrando como Pellets Tipo A, confirmando assim a boa qualidade dos resultados encontrados. Percebe-se uma pequena diferença entre amostras 1 e 2, 3 e 4, sendo as que contêm o óleo com menor umidade. Menores valores de umidade favorecem o poder calorífico do combustível (MATUS et al., 2018). Os resultados obtidos se aproximam a pellets produzidos com casca de café, no qual apresentaram valores médios de 10,68% (FARIA et al., 2016). Avelar et al. (2016) encontrou valores médios próximos a 10% em briquetes produzidos com lodo misturado a resíduos de uma indústria têxtil. Pellets produzidos com bagaço da cana apresentaram valores aproximados também a estes anteriores, chegando a 9,85% (SILVA et al., 2020).

A análise imediata dos pellets, está ilustrada na tabela 8, cujo desvio padrão está apresentado entre parêntesis.

Tabela 8: Análise imediata das quatro amostras de pellets.

Amostra	Cinzas (%)	Teor de Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)
1	16,51 (0,33)	77,63 (0,267)	5,86
2	16,22 (0,38)	80,45 (0,173)	3,33
3	9,61 (0,22)	70,70 (0,324)	19,69
4	8,40 (0,16)	78,30 (0,273)	14,30

Fonte: Autor, 2019.

A norma EN 14961-6 (DIN, 2012) em relação à análise imediata só leva em consideração o teor de cinzas em sua classificação, com isso prevê valores de cinzas menores que 5% para estarem de acordo com os pellets tipo A, e valores menores que 10% para serem classificados como pellets tipo B. Os resultados obtidos demonstram que apenas os pellets das amostras 3 e 4 se enquadram neste preceito normativo, sendo assim classificados em tipo B. Altos teores de cinzas significam inconvenientes na qualidade dos pellets em relação a geração de energia por diminuir o poder calorífico, em caldeiras, por exemplo, pode causar problemas de incrustações e corrosão, e quanto ao meio ambiente a contaminação do solo (MATUS et al., 2018). Em sua pesquisa Avelar et al. (2016), utilizando de lodo de indústria têxtil encontrou valores médios de cinzas de 12,76% e para material volátil e carbono fixo, respectivamente 77,5% e 9,77%. Para pellets produzidos com capim elefante Silva et al. (2020) encontrou valores próximos a 6,5% de cinzas, 81% de matéria volátil e 12% de carbono fixo. Para pellets

produzidos com blendas de capim elefante e bagaço da cana a uma proporção de 75/25% respectivamente, os valores de cinzas foram cerca de 5,30% quanto que para teor de volátil e carbono fixo respectivamente 83% e 11,70%. Em pellets produzidos somente com lodo os valores alcançaram 33,11% de cinzas, quanto que para aqueles produzidos com casca de arroz valores de 16,38% esse mais próximo das amostras 1 e 2 desta pesquisa (JIANG et al., 2016).

Para os resultados de durabilidade mecânica e teor de finos, foi comparado na tabela 9 os valores encontrados com os parâmetros da norma EN 14961-6 (DIN, 2012).

Tabela 9: Resultados de durabilidade mecânica e teor de finos comparados aos parâmetros de pellets tipo A e B da norma EN 14961-6 (DIN, 2012).

Amostra	Durabilidade Mecânica	Teor de finos (%)
1	99,59	1
2	99,89	1
3	98,23	2
4	98,76	2
Tipo A	≥ 97,5	≥ 2
Tipo B	≥ 96	≥ 3

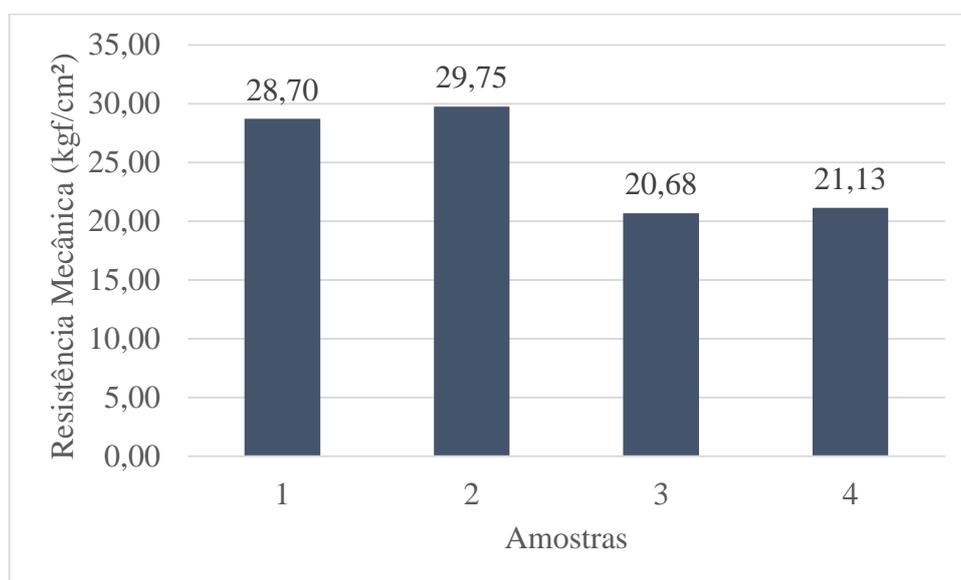
Fonte: Autor, 2019.

Ao analisar a tabela 9, percebemos excelentes resultados em relação a durabilidade mecânica das quatro amostras, estando todas elas classificadas em tipo A ao se comparar com a EN 14961-6. Para teor de finos, todas as amostras também se enquadram em tipo A. Essas propriedades tem fundamental importância em termos de coesão dos pellets e formação de partículas de poeira durante o transporte e manuseio (MATUS et al., 2018). Vale salientar também ao analisar a tabela 9 que maiores proporções de lodo na mistura aumenta a durabilidade dos pellets e reduz o teor de finos, confirmando resultados encontrados por Matus et al. (2018). Silva et al. (2020) encontrou melhores valores de durabilidade mecânica de pellets produzidos com capim elefante à uma proporção de 50% de capim e 50% de eucalipto, chegando a alcançar 98,66% valor próximo aos encontrados nas amostras 3 e 4 desta pesquisa, perdendo em qualidade para amostras na qual possuem maior proporção de lodo em sua composição. Para o teor de finos Silva et al. (2020) encontrou excelentes resultados nas mesmas proporções de materiais citadas anteriormente, chegando a aproximadamente 1%, estes semelhantes aos encontrados nas amostras 1 e 2 desta pesquisa. Para pellets produzidos somente com capim Silva et al. (2020) encontrou valores de durabilidade mecânica e finos de respectivamente 96,58% e 2,36% resultados inferiores aos evidenciados nesta pesquisa,

caracterizando uma melhora nas propriedades do material devido a presença do lodo, no que se refere a parâmetros físicos de análise.

Os trabalhos que contemplam a qualidade dos pellets usualmente só realizam ensaios de teor de finos e durabilidade mecânica a fim de avaliar a resistência física do material. De forma complementar esta pesquisa buscou realizar um ensaio de resistência mecânica a compressão dos pellets adaptando a norma de compressão de materiais feitos de concreto, na qual já foi anteriormente citada. Os resultados de ensaio como esse pode ser útil em relação a estocagem de material, por exemplo, onde avalia-se o quanto de carga o material pode resistir, em caso de empilhamento de material. Resultados expressos na Figura 15.

Figura 15: Resistência mecânica (kgf/cm²) amostras de pellets.

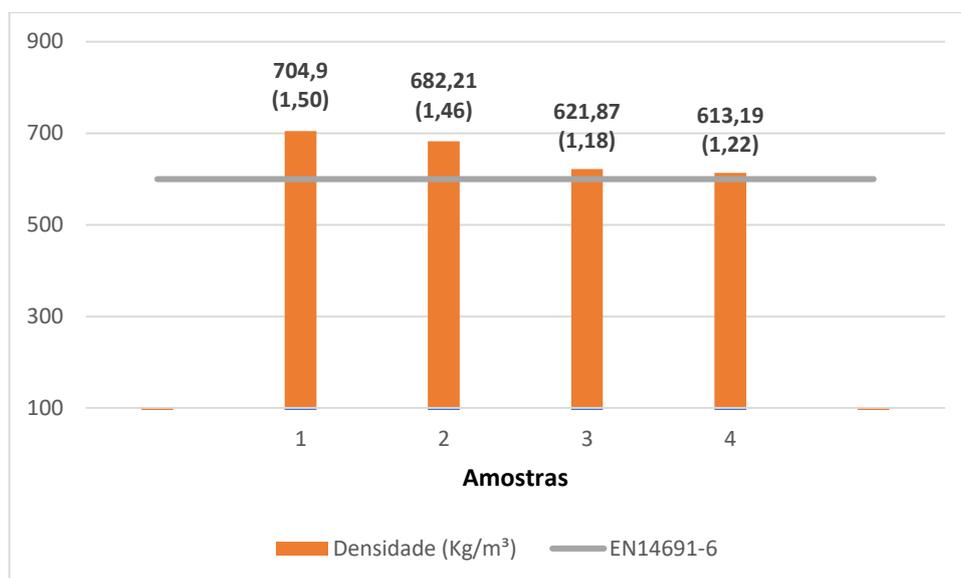


Fonte: Autor, 2019.

A Figura 15 permite visualizar que uma maior proporção de lodo na composição dos pellets aumentam sua resistência mecânica, também percebe-se não só com a resistência mecânica mas com os resultados de durabilidade mecânica que amostras com a presença do óleo apresentam uma maior coesão das partículas aumentando assim maiores valores quanto a resistência e durabilidade do material.

Para análise da densidade à granel a norma EN 14961-6 cita tanto para pellets tipo A quanto B o valor mínimo de referência de 600 kg/m³. Na Figura 16 vemos a comparação dos resultados obtidos com o parâmetro normativo, com os respectivos desvios padrões entre parêntesis.

Figura 16: Densidade à granel (kg/m³) comparados a norma EN 14961-6 (DIN, 2012).



Fonte: Autor, 2019.

A partir da Figura 16, percebe-se que as quatro amostras atendem os pressupostos normativos. Os resultados também apresentam um avanço na pesquisa de Magalhães et al. (2016) na qual necessitava de mais estudos para aumento da densidade a granel de pellets produzidos com capim elefante, valores estes compreendidos entre 545,1 à 590,6 kg/m³. Maiores valores da densidade a granel otimizam o transporte, armazenamento e a geração de energia dos pellets (MAGALHÃES et al., 2016 apud MANI et al., 2006).

A análise elementar geral encontrou teores de Si, Fe, K, Ca, Al, S e P, além de outros componentes em teor muito baixo, descritos na tabela 10.

Tabela 10: Análise elementar amostras 1 à 4.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Si (%)	18,14	17,71	14,53	15,02
Fe (%)	28,53	24,05	17,52	16,51
K (%)	22,42	22,73	36,93	37,29
Ca (%)	13,2	14,49	16,95	15,54
Al (%)	13,79	11,68	8,35	7,98
S (%)	1,53	6,72	2,24	5,17
P (%)	1,25	1,58	1,12	1,35
Mg (%)	0,36	0,42	1,74	1,12

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados encontrados demonstram que a pelletização diminuiu a quantidade de sílica e ferro, além do teor de cloro que não foi encontrado nas análises realizadas, uma das possíveis explicações para este fato é do teor de cloro ter sido expelido no processo de fabricação dos pellets, necessitando de pesquisas mais aprofundadas para comprovar tal fato. Observamos também que as amostras 2 e 4 apresentam maiores teores de enxofre, tais amostras são as que contêm o óleo de cozinha residual, assim também necessita de pesquisas mais aprofundadas para comprovar sua interferência neste teor. Pesquisas com pellets produzidos somente com lodo chegaram a ter em sua composição até 49,65% de Si, justificando assim o alto teor de cinzas já mencionado (JIANG et al., 2016).

A análise elementar para teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (CHN), são pré-requisitos para se determinar outros parâmetros, como o poder calorífico útil, os resultados desta análise estão expressos na tabela 11, comparados com resultados encontrados em pellets produzidos com lodo misturado com resíduo de oliva.

Tabela 11: Análise elementar CHN amostras 1 à 4 comparados a literatura.

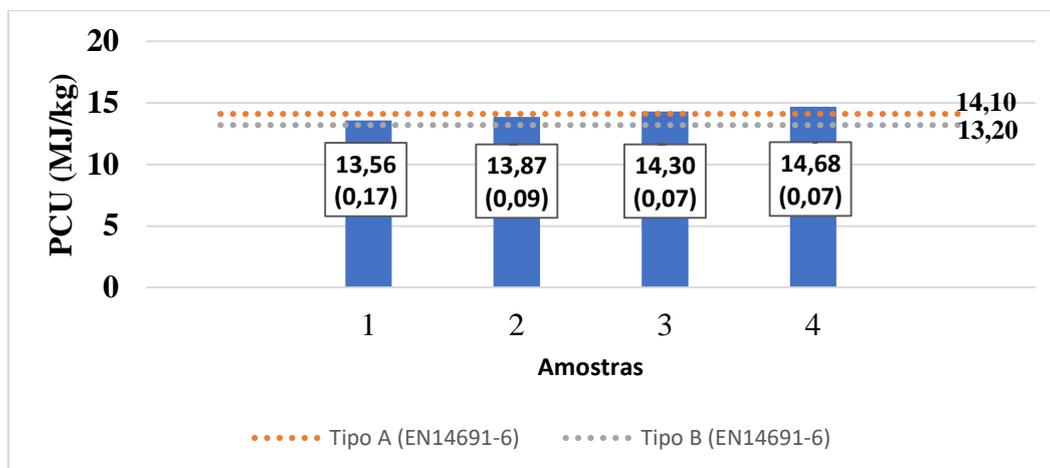
Composição Elementar	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Lodo 30% + resíduo de oliva ¹	Lodo 20% + resíduo de oliva ¹
C (%)	48,76	38,64	41,65	40,86	30,79	35,81
H (%)	6,579	5,732	6,223	6,121	4,49	5,16
N (%)	0,403	0,9588	0,1831	0,7513	1,54	1,38

¹ (Yilmaz et al., 2018)

Fonte: Autor, 2019.

A Figura 17 ilustra os resultados encontrados de PCU ao serem comparados com parâmetros normativos da EN 14961-6.

Figura 17: Poder calorífico útil (MJ/kg) comparados a norma EN 14961-6 (DIN, 2012).



Fonte: Autor, 2019.

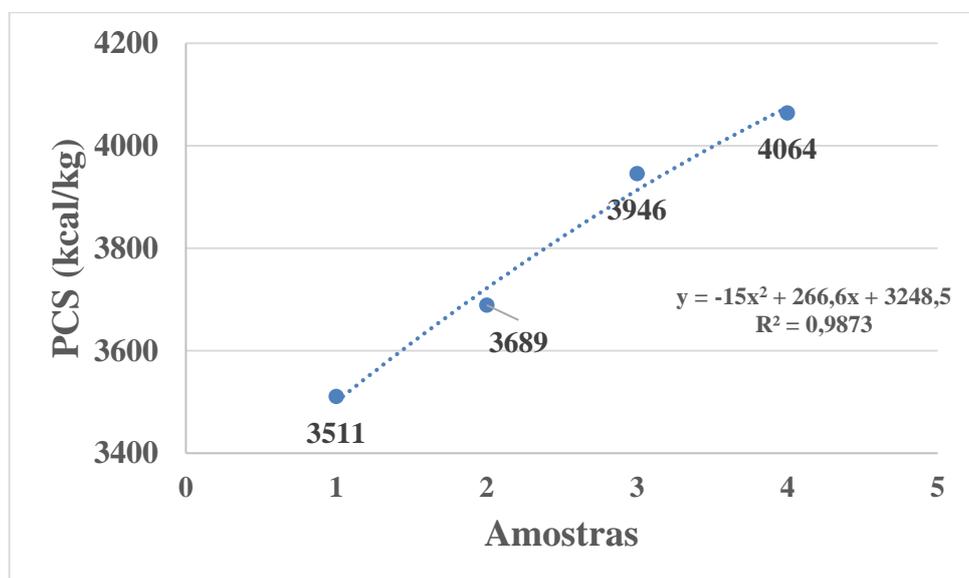
Os valores apresentados na Figura 17 demonstram que as quatro amostras estão dentro os parâmetros da norma supracitada, assim as amostras 1 e 2 se inserem nos pellets tipo B, e os pellets das amostras 3 e 4 como pellets tipo A, evidenciando os bons resultados para produção de energia aqui encontrados.

Um outro fator que esta pesquisa se atentou foi a perceber se o óleo residual conferiria um aumento no poder calorífico dos pellets. Observamos que entre as amostras 1 e 2, houve um acréscimo de aproximadamente 2,29%, quanto entre as amostras 3 e 4 este aumento foi de cerca de 2,66%. Ao se fazer uma análise estatística do que esse aumento representou, o teste-t determinou como não significativa ($\alpha > 0,05$) a diferença entre as amostras que possuem óleo em sua composição e as que não possuem.

Pellets e briquettes produzidos com lodo de efluentes industriais apresentaram valores de poder calorífico maiores em relação aos encontrados na presente pesquisa que se trata de lodo de efluentes domésticos, aqueles podem chegar até 18,5 MJ/kg, porém com elevados teores de metais pesados como Ca, Zn, Mg podendo chegar até concentrações de 32.000 mg/kg, além de outros metais pesados não identificados nesta pesquisa como Cu e o Mn (AVELAR et al., 2016; JIANG et al., 2016)

A Figura 18 ilustra a curva de tendência crescente do PCS devido à diferentes proporções de lodo e capim e a presença do óleo, juntamente com sua equação correspondente, valores estes em kcal/kg.

Figura 18: Tendência crescente poder calorífico superior (kcal/kg) amostras 1 à 4.



Fonte: Autor, 2019.

Após uma breve análise em relação ao PCS, é trivial a percepção do aumento do PCS dos pellets em relação ao PCS do lodo de 2476 kcal/kg, sendo o processo de pelletização eficiente em ganhos energéticos. Em seu trabalho Yilmaz et al. (2018) encontrou valores entre 3203 e 3774 kcal/kg para pellets produzidos com lodo em proporções respectivas de 20% e 30% misturando-o a resíduos de oliva, uma vez que pellets produzidos somente com lodo apresentaram valor de 2635 kcal/kg.

A densidade energética das quatro amostras está descrita na tabela 12 abaixo, comparado a alguns resultados obtidos na literatura.

Tabela 12: Densidade energética amostras 1 à 4 comparados a outras biomassas da literatura.

Pellets	Densidade Energética (GJ/m ³)
Amostra 1	10,36
Amostra 2	10,54
Amostra 3	10,27
Amostra 4	10,43
Bagaço da Cana ¹	10,03
Madeira Nativa ¹	9,93
Capim elefante ²	8,69

¹ (GARCIA et al., 2018); ² (MAGALHÃES et al., 2016)

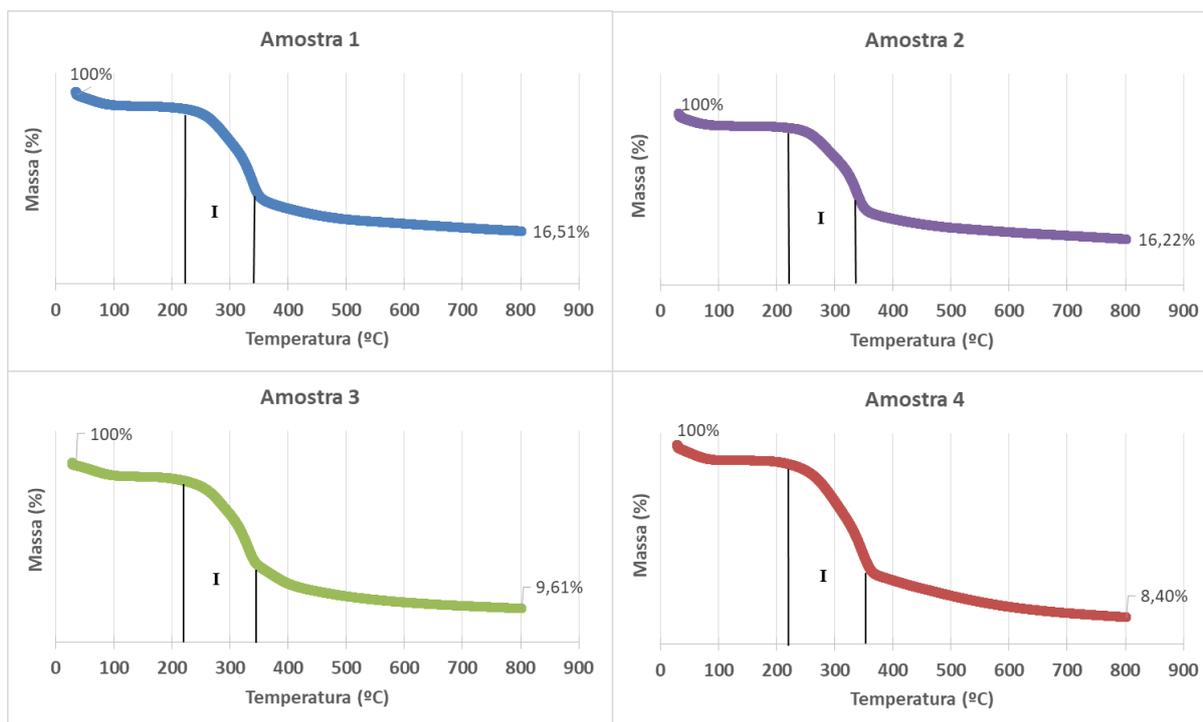
Fonte: Autor, 2019.

Percebe-se a partir da tabela 12, que em relação a densidade energética a presença do lodo representa um avanço em pellets produzidos somente com capim elefante, e as quatro amostras possuem densidades superiores à pellets feitos com madeira nativa, tornando-os competitivos com biomassas existentes.

5.3 Propriedade dos pellets torrefados

Para produção dos pellets as condições propostas por Isemin et al. (2019), foram confirmadas com uma análise termogravimétrica (TGA) das amostras, nas quais possuem formato semelhante, conforme ilustrado na Figura 19. Percebe-se que a degradação da lignina ocorre aproximadamente entre as temperaturas 230°C e 350°C (representado em “I” na Figura 19), a remoção de tal componente é de fundamental importância para aumento da qualidade dos pellets (LI et al., 2012).

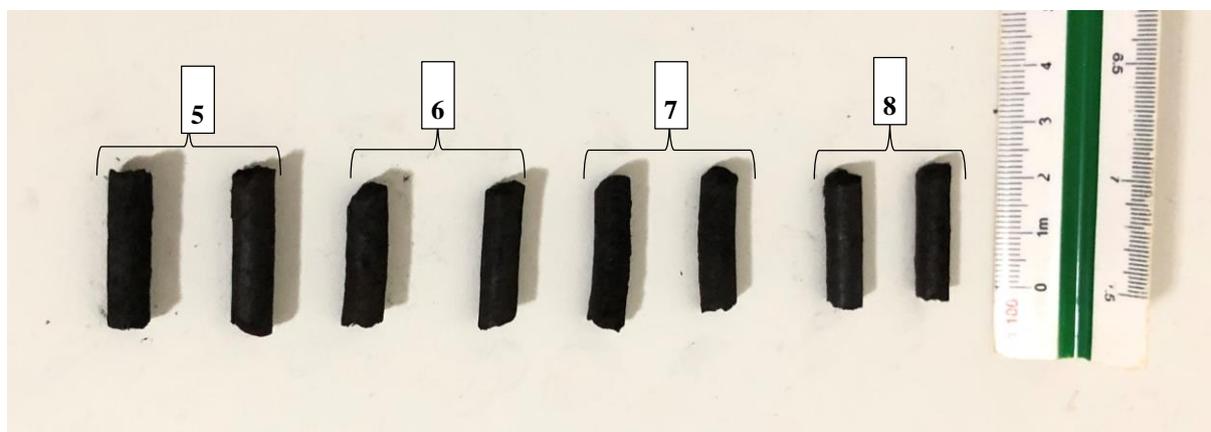
Figura 19: Curva TGA amostras 1 à 4.



Fonte: Autor, 2020.

As amostras de pellets torrefados são visualmente idênticas, conforme ilustrado na Figura 20.

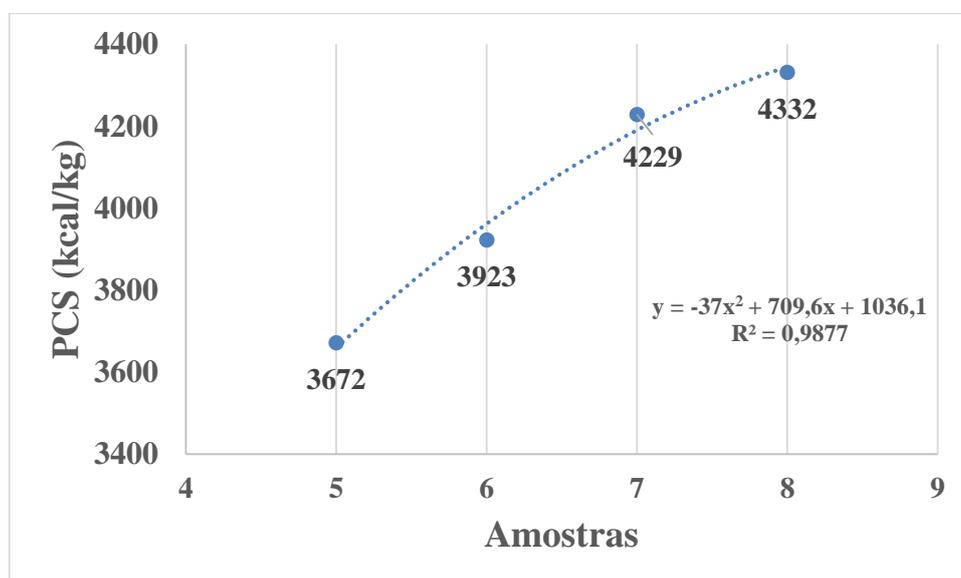
Figura 20: Pellets torrefados.



Fonte: Autor, 2020.

Na Figura 21 está representada a tendência crescente em relação ao PCS, juntamente com a equação da curva correspondente.

Figura 21: Tendência crescente poder calorífico superior (kcal/kg) amostras 5 à 8.

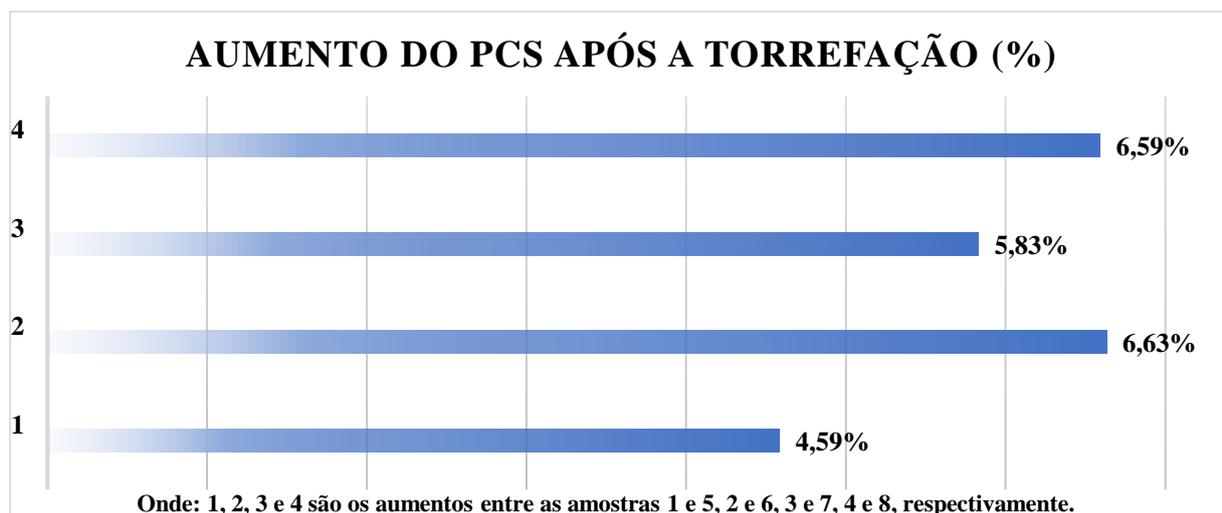


Fonte: Autor, 2019.

Ao se comparar os pellets não torrefados com os torrefados foi evidenciado um aumento claro no PCS das amostras, estes representados na Figura 22. O teste t apontou que o aumento do PCS decorrente da aplicação da técnica da torrefação foi significativo ($\alpha < 0,05$) entre as amostras com e sem a técnica da torrefação. Este acréscimo devido a técnica da torrefação pode

representar consideráveis aumentos de rendimentos dos pellets em caldeiras (ISEMIN et al., 2017).

Figura 22: Aumento do PCS após a técnica da torrefação.



Fonte: Autor, 2019.

5.3 Propriedade das cinzas do lodo e dos pellets

As cinzas do lodo tiveram a aparência conforme apresentada na Figura 23.

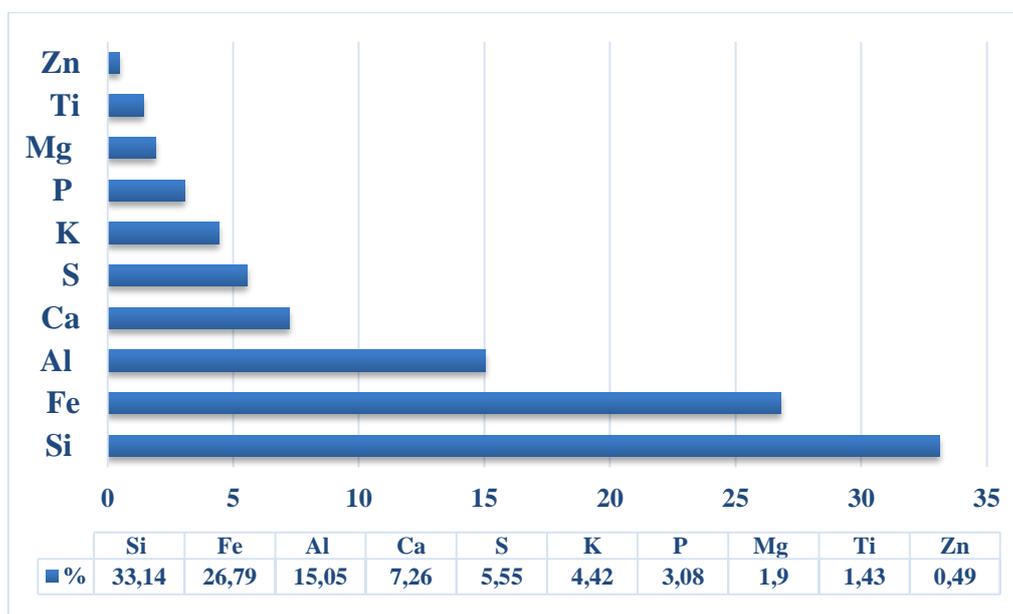
Figura 23: Cinzas do lodo.



Fonte: Autor, 2019.

A propriedade elementar das cinzas do lodo está ilustrada na Figura 24. Os resultados demonstram que a maior parte (cerca de 60%) dos componentes são formados de Si e Fe.

Figura 24: Análise elementar cinzas do lodo.



Fonte: Autor, 2019.

A reutilização de sólidos provenientes de combustão pode trazer benefícios ao meio ambiente (ZHOU et al., 2019). Percebe-se pela Figura 24 a presença de Ca, Al, Si e P, estes elementos imprescindíveis como componentes para produção de cerâmica de vidro a partir de cinzas de lodo de esgoto (ZHANG et al., 2015). O elemento Si como majoritário no produto, pode ser reutilizado a partir de técnicas para se obter sílica gel através de digestão ácida de resíduos, podendo ser aplicada para técnicas cromatográficas, suporte de catalisadores dentre outros (REBELO et al., 2015). Uma alternativa promissora a utilização do fósforo é a aplicação dele na produção de fertilizantes agrícolas (KOMINKO et al., 2019). Este componente pode ser adsorvido por agentes espumantes como o dodecil sulfato de sódio e ser reciclado (ZHOU et al., 2019).

A cinza dos pellets está ilustrada na Figura 25. A análise elementar da cinza das amostras 1 à 4 dos pellets estão expressas na tabela 13.

Figura 25: Cinzas dos pellets.

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 13: Análise elementar cinzas amostras 1 à 4.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Si (%)	27,37	27,22	23,46	22,44
K (%)	20,17	20,02	28,79	27,88
Fe (%)	16,55	19,22	17,36	16,28
Al (%)	13,93	12,31	10,77	9,95
Ca (%)	9,45	8,24	8,97	10,41
S (%)	4,42	5,85	3,55	5,03
P (%)	3,28	2,68	2,18	2,74
Mg (%)	2,86	2,38	2,96	3,75
Ti (%)	1,1	1,05	0,97	0,84

Fonte: Autor, 2019.

Os altos valores de Si, Fe, Al, Ca e outros teores de Mg, K, P, S e Ti são elementos presentes em cinzas utilizadas em compostos para uso como aditivo de cimento com aumentos de resistência do componente podendo chegar em cerca de 75% em relação aos que não utilizam das cinzas (JOHNSON et al., 2010).

5.4 Considerações finais

Ao fim do trabalho foi verificada a viabilidade energética da utilização de resíduos como lodo e óleo de cozinha residual combinado com o capim elefante para produção de energia.

A caracterização do lodo e do capim elefante permitiram demonstrar os benefícios energéticos do processo de pelletização. Os pellets apresentaram boa qualidade em relação a parâmetros da norma EN 14961-6 (DIN, 2012).

O óleo residual conferiu um aumento no poder calorífico dos pellets, porém a análise estatística através do Teste-t demonstrou como não significativo este aumento, além de apresentarem um aumento no teor de enxofre de acordo com a análise elementar.

Em contra partida ao óleo o aumento decorrido da técnica da torrefação em relação ao poder calorífico, foi julgado como significativo a partir da análise estatística, foi possível se obedecer condições para torrefação encontradas literatura a partir da análise termogravimétrica dos pellets.

Foi possível verificar a partir da análise elementar das cinzas do lodo e dos pellets, a presença de diversos elementos com potencial para reutilização em indústrias para produção de materiais de construção como agregado para cimento, composição em materiais cerâmicos e até mesmo para utilização em indústrias para produção da sílica em gel.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve o principal propósito fornecer uma nova alternativa de reutilização sustentável do lodo de ETE para produção energética.

Pesquisas com este viés são imprescindíveis para o desenvolvimento em uma sociedade que consome mais energia e se produz cada vez mais resíduos os destinando de forma inadequada, onde sua queima direta contribui para a degradação atmosférica, deposição em cursos d'água sua contaminação assim como em solos não preparados para sua recepção. Também fortalece preceitos de planos como a lei 12.305/2010 na qual rege a Política Nacional de Resíduos Sólidos, com alternativa a práticas limpas do ponto de vista socioambiental.

O lodo ao ser misturado com biomassas apresenta um maior desempenho em relação a suas características físicoquímicas e energéticas, um dos principais fatores de ter se escolhido o capim elefante, este com elevada lignina e disposição espacial.

Os resultados obtidos nesse trabalho, apresentaram a viabilidade da reutilização do lodo de ETE combinado com o capim elefante e óleo de cozinha residual, para produção de pellets.

Ao fim do trabalho, foi averiguado que uma maior proporção de lodo na mistura aumenta o teor de cinzas, diminui o poder calorífico dos pellets, porém é vantajoso quando se trata de densidade à granel, durabilidade mecânica e teor de finos pois aumenta seu valor.

O óleo de cozinha residual conferiu nos pellets aumento do poder calorífico, em relação aos que não o possuem em sua composição. Sendo assim eficiente na composição do combustível para produção energética. Porém, a análise elementar apontou um aumento no teor de enxofre nas amostras que o contém, necessitando assim de pesquisas mais aprofundadas a fim de analisar alternativas de remoção deste elemento assim como sua viabilidade.

A técnica da torrefação conferiu aumentos de até 6,63% no poder calorífico dos pellets, comprovados pelo teste t como significativos em quase todas as amostras, excluindo apenas aquelas com 25% de lodo sem a presença de óleo em sua composição (amostras 1 e 5). Com isso pode ser caracterizada como eficiente nas condições aqui impostas.

Todas as amostras tiveram parâmetros aceitos de acordo com aqueles estabelecidos da norma EN 14961-6, porém somente pellets produzidos com 25% de lodo e 75% de capim (amostras 3 e 4), se enquadram em todos os parâmetros aqui analisados sendo classificados como tipo B, e poderiam ser comercializados para fins não industriais, como uso doméstico, em pequenos fornos e caldeiras.

As cinzas possuem teores de elementos amplamente utilizados para produção de novos materiais, como cerâmica de vidro e aditivo para pasta de cimento, sendo útil sua reutilização.

No geral os resultados foram satisfatórios, conseguindo obter novos materiais para produção de energia renovável utilizando de resíduo e biomassa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do presente trabalho, como sugestões para futuras pesquisas são deixadas lacunas propostas, tais como:

- Análise de emissões atmosféricas de poluentes (GEE) na combustão dos pellets;
- Avaliação de emissões atmosféricas durante processo produtivo dos pellets;
- Avaliação da viabilidade econômica de produção e comercialização dos pellets;
- Estudo de outras biomassas e resíduos combinados com o lodo de ETE para produção alternativa de energia renovável, nos quais potencializem o poder calorífico e busquem diminuir o teor de cinzas;
- Estudo aprofundado da reutilização das cinzas dos pellets;
- Realizar uma análise mais detalhada de características físicas dos pellets torrefados;
- Estudo aprofundado do óleo na composição de biocombustíveis sólidos assim como práticas de remoção de elementos poluentes presentes em sua composição;
- Análise da viabilidade econômica da produção dos pellets.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, Cairo, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>>. Acesso em: 09 de out. 2018.
- ADAMS, S.; KLOBODU, E. K. M.; APIO, A. Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. **Renewable Energy**, v.125, p.755-767, 2018.
- AGARWAL, M.; TARDIO J.; MOHAN, S. V. Pyrolysis of activated sludge: Energy analysis and its technical feasibility. **Bioresource Technology**, v.178, p.70-75, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf>. Acesso em: 03 de out. 2018.
- AHMAD, K. K.; SAZALI, K.; KAMAROLZAMAN, A. A. Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. **Materials Today: Proceedings**, v.5, p.21744-21752, 2018.
- ARAÚJO, C. D. M.; ANDRADE, C. C.; SILVA, E. S.; DUPAS, F. A. Biodiesel production from used cooking oil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.27, p.445-452, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12209**: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE BIOCOMBUSTÍVEIS DO BRASIL - APROBIO. **Brasil recicla 30 milhões de litros de óleo de cozinha na produção de biodiesel**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/2017/01/10/brasil-recicla-30-milhoes-de-litros-de-oleo-de-cozinha-na-producao-de-biodiesel/>>. Acesso em: 04 out. 2018.

AVELAR, N. V.; REZENDE, A. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. Evaluation of briquettes made from textile industry solid waste. **Renewable Energy**, v.91, p.417-424, 2016.

BEEGLE, J. R.; BOROLE, A. P. Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.96, p.343-351, 2018.

BRAND, M. A.; JACINTO R. C.; ANTUNES R.; DA CUNHA A. B. Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing. **Renewable Energy**, v.111, p.116-123, 2017.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 ago. 2010.

BULUT, U.; MURATOGLU, G. Renewable energy in Turkey: Great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth nexus. **Energy Policy**, v.123, p.240-250, 2018.

CAMPUZANO, F; BROWN, R. C.; MARTÍNEZ, J. D. Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.102, p.372-409, 2019.

CAO, B.; SOL, Y.; GUO, J.; WANG, S.; YUAN, J.; ESAKKIMUTHU, S.; UZOEJINWA, B. B.; YUAN, C.; ABOMOHR, A. E.; QIAN, L.; LIU, L.; LI, B.; ELE, Z.; WANG, Q. Synergistic effects of co-pyrolysis of macroalgae and polyvinyl chloride on bio-oil/bio-char properties and transferring regularity of chlorine. **Fuel**, v.246, p.319-329, 2019.

CAO, G.; DING, C.; RUAN, D.; ZHAOBIN, C.; WU, H.; HONG, Y.; CAI, Z. Gas chromatography-mass spectrometry based profiling reveals six monoglycerides as markers of used cooking oil. **Food Control**, v.96, p.494-498, 2019.

CARNEIRO, M. L. N. M.; GOMES, M. S. P. Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants. **Energy Conversion and Management**, v.179, p.397-417, 2018.

CARNEIRO, T. F.; BERNI, M.D.; DORILEO, I.L.; ROSTAGNO, M.A. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v.77, p.178-88, 2013.

CHEN, C.; LIANG, J.; BRANDON, A. Y.; LI, Q. X.; ZHAN, Y.; WANG, Q. Evaluation of an up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor containing diatomite and maifanite for the improved treatment of petroleum wastewater. **Bioresource Technology**, v.243, p.620-627, 2017.

CHEN, S.; XU, L. **A rustic opinion for govern and control of waste cooking oil**. China Food Drug Adm. Mag., v.4, p.50-53, 2018.

CHEN, W.H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.44, p.847-866, 2015.

CHEN, Y. C.; KUO, J. Potential of greenhouse gas emissions from sewage sludge management: a case study of Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, v.129, p. 196-201, 2016.

CHEN, Z.; WANG, M.; JIANG, E.; WANG, D.; ZHANG, K.; REN, Y.; JIANG, Y. Pyrolysis of Torrefied Biomass. **Trends in Biotechnology**, China, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.005>>. Acesso em: 06 de nov. 2018.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic reactors**, Belo Horizonte, Federal University of Minas Gerais, Department of Sanitary and Environmental Engineering, v.4, 2007.

COLLAZZO, G.C; BROETTO, C.C.; PERONDI, D.; JUNGES, J.; DETTMER, A.; DORNELLES FILHO, A. A.; FOLETTO, E.L.; GODINHO, M.. A detailed non-isothermal kinetic study of elephant grass pyrolysis from different models. **Applied Thermal Engineering**, v.110, p.1200-1211, 2017.

CONKE, L. S. Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v.134, p.129-135, 2018.

COYNER, Barbara. **Pres-to-Logs: A History Lesson in Industry Efficiency**. Timber West, 2004. Disponível em: <http://forestnet.com/timberwest/archives/March_April_04/prestologs.htm>. Acesso em: 12 de dez. 2018.

DESHANNAVAR, U. B; HEGDE, G. P.; DHALAYAT, Z.; PATIL, V.; GAVAS, S. Production and characterization of agro-based briquettes and estimation of calorific value by regression analysis: An energy application. **Materials Science for Energy Technologies**, v.1, p.175-181, 2018.

DOS SANTOS, R. L. P.; ROSA, L.P; AROUCA M. C.; RIBEIRO A. E. D. The importance of nuclear energy for the expansion of Brazil's electricity grid. **Energy Policy**, v.60, p. 284-289, 2013.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Planning for a renewable future in the Brazilian power system. **Energy**, v.164, p.496-511, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**, Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Reciclagem do Óleo de Cozinha e a Cadeira produtiva do Biodiesel**, Brasília:

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. Disponível em: <https://www.agnia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/oleoresidual1_000g6virmfu02wx5ok0wtedt3gl89gw3.pdf>. Acesso em: 04 out. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Visita**

Técnica à Fabrica de Briquetes de Bagaço de Cana, Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-eventos/-/evento/210549/visita-tecnica-a-fabrica-de-briquetes-de-bagaco-de-cana>>. Acesso em: 05 out. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Poder**

Calorífico do Capim-Elefante para a Geração de Energia Térmica, Aracaju-SE:

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Matriz Energética e Elétrica**, Brasília:

Ministério de Minas e Energias, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 21 set. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2019: ano base 2018**, Brasília: Ministério de Minas e Energias, 2019.

FARIA, W. S.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; ANDRADE, C. R.; JUNIOR, J. B. G. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffe Science**, v.11, p.137-147, 2016.

FERREIRA, L.R.A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; DE SOUZA, S. S.; JUNIOR, O. H. A. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.94, p. 440-455, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Global production and trade of forest products**. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

GARCIA, D.P, CARASCHI, J.C., VENTORIM, G., PRATES, G.A., PROTÁSIO, T.P. Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v.9, p. 45-53, 2018.

GENDEK, A.; ANISZEWSKA, M.; MALAŤÁK, J.; VELEBIL, J. Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. **Biomass and Bioenergy**, v.117, p.173-179, 2018.

GROBELAK, A.; PLACEK, A.; GROSSER, A.; SINGH, B. R.; ALMÅS, Å. R.; NAPORA, A.; KACPRZAK, M. Effects of single sewage sludge application on soil phytoremediation. **Journal of Cleaner Production**, v.155, p.189-197, 2017.

GUERRA, J. B. S. O. de A.; DUTRA, L.; SCHWINDEN, N. B. C.; ANDRADE S. F. Future scenarios and trends in energy generation in brazil: supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, v.103, p.197-210, 2015.

GUIMARÃES, DA SILVA M.; COSTA, MUNIZ A.R; HOFFMANN R.; LUZ LISBÔA, A.C. Impact of greenhouse gases on surface coal mining in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.193, p.206-216, 2018.

HUNT, J. D.; STILPEN, D.; FREITAS, M. A. V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.88, p.208-222, 2018.

HUSSAIN, M.N.; SAMAD, T.A.; JANAJREH, I. Economic feasibility of biodiesel production from waste cooking oil in the UAE. **Sustainable Cities and Society**, v.26, p.217-226, 2016.

ISEMIN, R.; KLIMOV, D.; LARINA, O.; SYTCHEV, G.; ZAICHENKO, V.; MILANOV, O. Application of torrefaction for recycling bio-waste formed during anaerobic digestion. **Fuel**, v.243, p.230-239, 2019.

ISEMIN, R.; MIKHALEV, A.; KLIMOV, D.; GRAMMELIS, P.; MARGARITIS, N.; KOURKOUMPAS, D.; ZAICHENKO, V. Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw. **Fuel**, v.210, p.859-865, 2017.

JIANG, L.; YUAN, X.; LI, H.; CHEN, X.; XIAO, Z.; LIANG, J.; LENG, L.; GUO, Z.; ZENG, G. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: Thermogravimetric analysis and ash deposits. **Fuel Processing Technology**, v.145, p.109-115, 2016.

JOHNSON, A.; CATALAN, L. J. J.; KINRADE, S. D. Characterization and evaluation of fly-ash from co-combustion of lignite and wood pellets for use as cement admixture. **Fuel**, v.89, p.3042-3050, 2010.

KNOEF, H.A.M.; STASSEN, H.E.M. Energy generation from biomass and waste in the Netherlands: A brief overview and perspective. **Renewable Energy**, v.6, p.329-334, 1995.

KOMINKO, H.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. **Journal of Environmental Management**, v.248, 2019.

KUMAR, S.; GHOSH, P. Sustainable bio-energy potential of perennial energy grass from reclaimed coalmine spoil (marginal sites) of India. **Renewable Energy**, v.123, p.475-485, 2018.

LAM, S. S.; MAHARI, W. A. W.; JUSOH, A.; CHONG, C. T.; LEE, C. L.; CHASE, W. A. Pyrolysis using microwave absorbents as reaction bed: An improved approach to transform used frying oil into biofuel product with desirable properties. **Journal of Cleaner Production**, v.147, p.263-272, 2017.

LAMAS, W.de Q.; GIACAGLIA, G.E.O. The Brazilian energy matrix: Evolution analysis and its impact on farming. **Energy Policy**, v.63, p.321-327, 2013.

LI, H.; HAN, K.; LI, Z.; ZHANG, J.; LI, H.; HUANG, Y.; SHEN, L.; LI, Q.; WANG, Y. Performance, granule conductivity and microbial community analysis of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors from mesophilic to thermophilic operation. **Biochemical Engineering Journal**, v.133, p.59-65, 2018.

LIN, B.; ANKRAH, I.; MANU, S. A. Brazilian energy efficiency and energy substitution: a road to cleaner national energy system. **Journal of Cleaner Production**, v.162, p. 275-1284, 2017.

LIU, T.; LIU, Y.; WU, S.; XUE, J.; WU, Y.; LI, Y.; KANG, X. Restaurants' behaviour, awareness, and willingness to submit waste cooking oil for biofuel production in Beijing. **Journal of Cleaner Production**, v.204, p.636-642, 2018.

LUBWAMA, M.; YIGA, V. A. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. **Renewable Energy**, v.118, p.43-55, 2018.

MAGALHÃES, M. A; DONATO, D. B.; CANAL, W. D.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R. Caracterização de pellets produzidos a partir de capim-elefante para uso energético. **Brazilian Journal of Wood Science**, v.7, p.155-162, 2016.

MAHARI, W. A. W.; CHONG, C. T.; CHENG, C. K.; LEE, C. L.; HENDRATA, K.; YEK, P. N. Y.; MA, N. L.; LAM, S. S. Production of value-added liquid fuel via microwave co-pyrolysis of used frying oil and plastic waste. **Energy**, v.162, p.309-317, 2018.

MAHMUDUL, H. M; HAGOS, F. Y; MAMAT, R.; ADAM, A. A; ISHAK, W. F. W; ALENEZI, R. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.72, p.497-509, 2017.

MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHAN, W.; TECHATO, K. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.91, p.812-821, 2018.

MAÑAS, P.; CASTRO, E.; HERAS, J. de las. Application of treated wastewater and digested sewage sludge to obtain biomass from *Cynara cardunculus* L. **Journal of Cleaner Production**, v.67, p.72-78, 2014.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 7, p. 648-654, 2006.

MANOUCHEHRINEJAD, M.; MANI, S. Torrefaction after pelletization (TAP): Analysis of torrefied pellet quality and co-products. **Biomass and Bioenergy**, v.118, p. 93-104, 2018.

MARGUTI, A.L.; SECKLER, F.F. S.; PIVELI, R.P. Full-scale effects of addition of sludge from water treatment stations into processes of sewage treatment by conventional activated sludge. **Journal of Environmental Management**, v.215, p. 283-293, 2018.

MATUS, M.; KRIZAN, P.; SOOS, L.; BENIAK, J. The effect of papermaking sludge as an additive to biomass pellets on the final quality of the fuel. **Fuel**, v.219, p.196-204, 2018.

MENEGOL, D.; FONTANA, R. C.; DILLON, A. J. P.; CAMASSOLA, M. Second-generation ethanol production from elephant grass at high total solids. **Bioresource Technology**, v.211, p.280-290, 2016.

MIRANDA, M. T.; SEPÚLVEDA, F.J.; ARRANZ, J.I.; MONTERO, I.; ROJAS, C.V. Analysis of pelletizing from corn cob waste. **Journal of Environmental Management**, v.228, p. 303-311, 2018.

MOAZENI, F.; CHEN, Y. C.; ZHANG, G. Enzymatic transesterification for biodiesel production from used cooking oil, a review. **Journal of Cleaner Production**, v.216, p.117-128, 2019.

MUAZU, R. I.; STEGEMANN, J. A. Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. **Fuel**, v.194, p. 339-347, 2017.

NERY, V. Del; ALVES, I.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z.; PIRES, E. C. Hydraulic and organic rates applied to pilot scale UASB reactor for sugar cane vinasse degradation and biogas generation. **Biomass and Bioenergy**, v.119, p.411-417, 2018.

NGUYEN, K. H.; KAKINAKA, M. Renewable energy consumption, carbon emissions, and development stages: Some evidence from panel cointegration analysis. **Renewable Energy**, v.132, p.1049-1057, 2018.

NIKKU, M.; DEB, A.; SERMYAGINA, E.; PURO, L. Reactivity characterization of municipal solid waste and biomass. **Fuel**, v.254, 2019.

NUNES, L. J. R.; GODINA, R.; MATIAS, J. C.O.; CATALÃO, J. P. S. Economic and environmental benefits of using textile waste for the production of thermal energy. **Journal of Cleaner Production**, v.171, p.1353-1360, 2017.

PETKOVIC, D. Technology for Producing Briquetts From Wet Biomass. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, University of Niš, Serbia, 2018.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11122-1>>. Acesso em: 24 de nov. 2018.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. **Fuel Processing Technology**, v.181, p.215-239, 2018.

PURWANTO, H.; ZAKIYUDDIN, A. M.; ROZHAN, A. N.; MOHAMAD, A. S.; SALLEH, H. M. Effect of charcoal derived from oil palm empty fruit bunch on the sinter characteristics of low grade iron ore. **Journal of Cleaner Production**, v.200, p.954-959, 2018.

QUEIROZ FILHO, J. L.; SILVA, D. S.; NASCIMENTO, I. S. Produção de matéria seca e qualidade do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivar Roxo em diferentes idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, p.69-7, 2000.

RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, v.2, p.175-184, 2016.

REBELO, M. M.; NASCIMENTO, L. D.; CORRÊA, J. A. M. Sílica gel obtida de escória de alto forno: Marabá, Pará. **Cerâmica**, v.6, p.359-366, 2015.

ROCHA, J. R. A. S. C.; MACHADO, J. C.; CARNEIRO, P. C. S.; CARNEIRO, J. C.; RESENDE, M. D. V.; PEREIRA, A. V.; CARNEIRO, J. E. S. Elephant grass ecotypes for bioenergy production via direct combustion of biomass. **Industrial Crops and Products**, v.95, p.27-32, 2017.

ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G. C. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Eng. Sanit. Ambient.**, v.21, p.315-328, 2016.

SAHAR; SADAF, S.; IQBAL, J.; ULLAH, I.; BHATTI, H. N.; NOUREN, S.; REHMAN, H.; NISAR, J.; IQBAL, M. Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. **Sustainable Cities and Society**, v.41, p.220-226, 2018.

SAWADOGO, M.; TCHINI, S. TANO; SIDIBÉ, S.; KPAI, N.; TANKOANO, I. Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. **Journal of Cleaner Production**, v.195, p.1047-1056, 2018.

SAXENA, S.C; DEWAN, S. S. Co-combustion and fluidized-bed incineration of cellulose pellets. **Energy**, v.21, p.889-897, 1996.

SCHOLL, A. L.; MENEGOL, D.; PITARELO, A. P.; FONTANA, R. C.; FILHO, A. Z.; RAMOS, L. P.; DILLON, A. J. P.; CAMASSOLA, M. Ethanol production from sugars obtained during enzymatic hydrolysis of elephant grass (*Pennisetum purpureum*, Schum.) pretreated by steam explosion. **Bioresource Technology**, v.192, p.228-237, 2015.

SCHULTHEIS, A.; STEINBACH, D. Fermentation of bio-waste as a source of renewable energy. **Biomass for Energy and the Environment**, p.1823-1827, 1996.

SETTE JR., C. R.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SANTOS, D. R. de SOUZA; YAMAJI, F. M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops and Products**, v.122, p.209-213, 2018.

SHARMA, V.K.; MINCARINI, M.; FORTUNA, F.; COGNINI, F.; CORNACCHIA, G. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment-Review. **Energy Conversion and Management**, v.39, p. 511-528, 1998.

SI, S.; LYU, M.; LAWELL, C. Y. C. L.; CHEN, S. The effects of energy-related policies on energy consumption in China. **Energy Economics**, v.76, p. 202-227, 2018.

SILVA, S. B.; ARANTES, M. D. C.; ANDRADE, J. K. B.; ANDRADE, C. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PROTÁSIO, T. P. Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. **Renewable Energy**, v.147, p.1870-1879, 2020.

SILVEIRA, L. C. I., BRASILEIRO, B. P., KIST, V., WEBER, H., DAROS, E., PETERNELLI, L. A., & BARBOSA, M. H. P. Selection strategy in families of energy cane based on biomass production and quality traits. **Euphytica**, v.204 (2), p.443–455, 2015.

ŚWIERCZEK, L.; CIEŚLIK, B. M.; KONIECZKA, P. The potential of raw sewage sludge in construction industry – a review. **Journal of Cleaner Production**, v.200, p. 342-356, 2018.

TRIPATHI, A. K.; IYER, P. V. R.; KANDPAL, T. C. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. **Biomass and Bioenergy**, v.14, p. 479-488, 1998.

VIEIRA, N. D. B.; NOGUEIRA, L. A. H.; HADDAD, J. An assessment of CO₂ emissions avoided by energy-efficiency programs: A general methodology and a case study in Brazil. **Energy**, v.142, p. 702-715, 2018.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 2^a edição, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (1996).

WAMUKONYA, L.; JENKINS, B. Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya. **Biomass and Bioenergy**, v.8, p.175-179, 1995.

XIE, X. M.; ZHANG, X. Q.; DONG, Z. X.; GUO, H. R. Dynamic changes of lignin contents of MT-1 elephant grass and its closely related cultivars. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p. 1732-1738, 2011.

XU, C.; CHEN, W.; HONG, J. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China. **Journal of Cleaner Production**, v.67, p.79-87, 2014.

YILMAZ, E.; WZOREK, M.; AKÇAY, S. Co-pelletization of sewage sludge and agricultural wastes. **Journal of Environmental Management**, v.216, p.169-175, 2018.

YIN, Q.; LIU, M.; REN, H. Biochar produced from the co-pyrolysis of sewage sludge and walnut shell for ammonium and phosphate adsorption from water. **Journal of Environmental Management**, v.249, 2019.

ZHANG, Z.; ZHANG, L.; YIN, Y.; LIANG, X.; LI, A. The recycling of incinerated sewage sludge ash as a raw material for CaO–Al₂O₃–SiO₂–P₂O₅ glass-ceramic production.

Environmental Technology, v.36, p.1098—1103, 2015.

ZHENG, X.; ZHANG, S.; WU, Y.; XU, G.; HU, J., HE, L.; WU, X.; HAO, J. Measurement of particulate polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from gasoline light-duty passenger vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v.185, p.797-804, 2018.

ZHOU, H.; BHATTARAI, R.; LI, Y.; LI, S.; FAN, Y. Utilization of coal fly and bottom ash pellet for phosphorus adsorption: Sustainable management and evaluation. **Resources, Conservation and Recycling**, v.149, p. 372-380, 2019.

ZHOU, S.; WANG, Yu; ZHOU, Y.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. Roles of wind and solar energy in China's power sector: Implications of intermittency constraints. **Applied Energy**, v.273, p.22-30, 2018.

ZOLNIKOV, T. R.; SILVA, R. C.; TUESTA, A. A.; MARQUES, C. P.; CRUVINEL, V. R. N. Ineffective waste site closures in Brazil: A systematic review on continuing health conditions and occupational hazards of waste collectors. **Waste Management**, v.80, p.26-39, 2018.