

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

BRUNA VIRGÍNIA CUNHA RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE PELLETS UTILIZANDO LODO PRIMÁRIO GERADO NA
INDÚSTRIA DE CELULOSE KRAFT**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

BRUNA VIRGÍNIA CUNHA RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE PELLETS UTILIZANDO LODO PRIMÁRIO GERADO NA
INDÚSTRIA DE CELULOSE KRAFT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Master Scientiae*.

Orientador: Cláudio Mudadu Silva

Coorientadora: Angélica de Cassia O. Carneiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

Rodrigues, Bruna Virgínia Cunha, 1996-
R696p Produção de pellets utilizando lodo primário gerado na
2021 indústria de celulose kraft / Bruna Virgínia Cunha Rodrigues. –
Viçosa, MG, 2021.
58 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Cláudio Mudadu Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 47-58.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Meio ambiente -
Aspectos econômicos. 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos,
etc.). 4. Pellets. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.986

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fatima Alves CRB6 2578

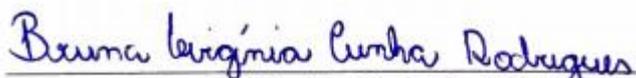
BRUNA VIRGÍNIA CUNHA RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE PELLETS UTILIZANDO LODO PRIMÁRIO GERADO NA
INDÚSTRIA DE CELULOSE KRAFT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Master Scientiae*.

APROVADA: 11 de junho de 2021.

Assentimento:



Bruna Virgínia Cunha Rodrigues
Autora



Cláudio Mudadu Silva
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar meu caminho e me dar forças mesmo quando estou distante.
A minha mãe, Lêda e meus irmãos Braz Júnior e Ellem por sempre estar ao meu lado e me incentivar nos estudos.

Aos Professores Claudio Mudadu Silva e Angélica de Cássia Oliveira Carneiro pelas orientações, confiança, paciência e suporte durante todo desenvolvimento do trabalho, contribuindo profundamente para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu amigo e parceiro de trabalho Caio Elete, por todo apoio e resiliência que foi essencial para a execução dessa pesquisa.

A Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao CNPq, CAPES e Fapemig pelo apoio no suporte das pesquisas.

Aos funcionários, estagiários e alunos do Laboratório de Celulose e Papel (LCP-DEF/UFV) pela amizade e auxílio na elaboração desse projeto.

A todos do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM-DEF/UFV) pelo suporte e auxílio durante toda pesquisa, em especial o pesquisador Mateus Alves Magalhães pela ajuda na produção dos pellets.

Ao Alexandre e demais amigos pelo carinho, paciência e incentivo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

RODRIGUES, B. V. C., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2021. **Produção de pellets utilizando lodo primário gerado na indústria de celulose kraft** Orientador: Cláudio Mudadu Silva. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

A grande expansão da indústria de polpa celulósica no Brasil traz consigo um aumento expressivo na geração de resíduos, induzindo a uma maior pressão ambiental, social e econômica sobre o setor. O tratamento dos efluentes gera quantidades significativas de lodo primário que comumente é disposto nos aterros industriais. O objetivo foi utilizar lodo primário de estação de tratamento de efluentes de fábrica de celulose kraft branqueada de eucalipto para produção de pellets via processo úmido para fins energéticos. Os pellets foram produzidos em prensa peletizadora laboratorial com matriz circular horizontal, com capacidade para produção de 10 kg.h^{-1} . Os pellets foram caracterizados pela determinação do teor de umidade, base seca, poder calorífico superior, teor de cinzas, diâmetro e comprimento, durabilidade mecânica e finos, e ainda foram estimados os valores de poder calorífico útil e densidade energética. Os resultados obtidos foram comparados com a norma europeia EN 14961-6 para pellets produzidos com materiais não-madeireiros. A peletização proporcionou redução no teor de umidade em 37,8%, e aumentou o poder calorífico útil em 41% e da densidade a granel em 158%, o que acarretou aumento de 263% da densidade energética. O processo de peletização a úmido foi apropriado para o lodo primário de fábricas de polpa celulósica, resultando na formação de pellets de alta durabilidade mecânica (99.3%) e baixo teor de finos (0.062%), potencializando o uso do combustível para combustão na caldeira de biomassa para produção de vapor de alta qualidade.

Palavras-chave: Bioeconomia. Economia circular. Energia renovável. Reciclagem. Peletização à úmido.

ABSTRACT

RODRIGUES, B. V. C., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2021. **Pellets production using primary sludge from kraft pulp mills.** Advisor: Cláudio Mudadu Silva. Co-Advisor: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The large expansion of pulp and paper mills in the last years in Brazil resulted in a significant increase in the generation of waste, inducing environmental, social and economic pressure on this sector. The treatment of the effluents produces large amounts of primary sludge, which is usually disposed of in landfills. This paper aimed to study the pellets production using primary sludge from an effluent treatment plant of an eucalyptus bleached kraft pulp mill using a wet process for energy purposes. The pellet samples were produced in a laboratory pelletizing press, which has a horizontal circular matrix with a production capacity of 40 kg.h⁻¹. The samples were characterized by moisture content, higher heating value, ash content, diameter and length, mechanical durability, fines content the results for net heating value and energetic density were also measured. The sludge pellet was compared according to the European Standard EN 14961-6 for non-woody pellets. Pelletization provided a reduction of the moisture content by 37.8%, and led to an increase of the net heating value by 41% and the bulk density by approximately 158%, which resulted in a 263% increase in the energetic density. The pellets production using a wet process was appropriate for the primary sludge from the pulp mill, which obtained samples with a high mechanical durability (99.3%) and low fines content (0.062), indicating the potential of thermal valorization for incineration on the biomass boiler to produce high quality steam.

Keywords: Bioeconomy. Circular economy. Energy. Recycling. Wet palletization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO	9
3. REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1. Lodos gerados em estações de tratamento de efluentes.....	10
3.1.1. Lodo primário	13
3.1.2. Lodo secundário	14
3.2. Geração de energia nas fábricas de celulose e papel	15
3.3. Inovações no gerenciamento do Lodo gerado pelas indústrias de celulose e papel ..	16
3.3.1. Produção de carvão ativado	17
3.3.2. Aplicação no solo	18
3.3.3. Uso na construção civil.....	19
3.3.4. Geração de energia a partir do lodo.....	20
3.3.5. Produtos químicos	24
3.4. Pellets.....	25
3.4.1. Processo de peletização	27
3.4.2. Produção de pellets com diferentes biomassas.....	28
3.4.3. Utilização dos pellets	29
3.5. Análise SWOT	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1. Material.....	32
4.2. Métodos	33
4.2.1. Caracterização do lodo primário.....	33
4.2.2. Produção de Pellets.....	33
4.2.3. Propriedades dos pellets	34
4.2.4. Especificação dos pellets	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Propriedades químicas e energéticas do lodo in natura e peletizado	37
5.2. Especificação de pellets de acordo com o padrão de qualidade europeu	43

5.3. Aspectos ambientais e econômicos.....	45
6. CONCLUSÕES	46
7. RECOMENDAÇÕES	46
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

A expressiva expansão da indústria brasileira de celulose nos últimos anos resultou em um aumento significativo na geração de resíduos sólidos, induzindo pressões ambientais, sociais e econômicas sobre o setor (FAUBERT *et al.*, 2016; NOSEK *et al.*, 2017; ZAMBARE & CRISTOPHER, 2020). Como consequência desse aumento na geração de resíduos, principalmente de lodo proveniente da estação de tratamento de efluentes, a disposição usual em aterros sanitários tornou-se uma opção onerosa e ambientalmente questionável (JARIA *et al.*, 2017; KUOSA; KOPRA, 2019). O estabelecimento de soluções de gestão e valorização do lodo é imprescindível, principalmente do ponto de vista ambiental e econômico, seguindo a tendência mundial da economia circular (LEE *et al.*, 2017).

As fábricas de celulose demandam alto consumo de água e geram grandes volumes de efluentes. De acordo com a literatura a estação de tratamento de efluente de fábricas de celulose kraft gera em média 40-60 kg de lodo primário e 10-15 kg de lodo biológico para cada tonelada seca ao ar (tsa) de celulose produzida, o que representa importante parcela dos resíduos sólidos gerados na indústria (COIMBRA *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2018).

Para evitar a disposição final dos lodos em aterros, outras opções devem ser avaliadas, incluindo a sua combustão para geração energia térmica e elétrica. A conversão térmica do lodo é uma alternativa interessante, uma vez que o lodo possui um alto percentual de orgânicos e a maioria das fábricas de celulose kraft já possui caldeiras de biomassa para geração de energia. As cinzas da combustão do lodo têm volume extremamente menor que o próprio lodo, facilitando o seu transporte e a sua disposição final (ELLIOTT; MAHMOOD, 2005; MONTE *et al.*, 2009; NOSEK *et al.*, 2017). Ademais, as cinzas podem ser utilizadas como condicionadores de solo, pois contêm elementos essenciais para a agricultura (BAJPAI, 2015a; ORANG & TRAN, 2015).

A queima direta de lodo para geração de energia, ainda, é uma opção pouco atraente devido ao seu alto teor de umidade. A alta umidade reduz o poder calorífico e também exige um alto consumo de energia para remoção da água presente no material. Esses fatores podem promover o balanço energético negativo do processo, onde a energia utilizada durante a secagem pode ser superior à energia gerada nos processos de combustão do lodo na caldeira (PÖYKIÖ; WATKINS; DAHL, 2018).

O lodo é um material heterogêneo, o que aumenta os custos nas operações de transporte e armazenamento. Além de dificultar o processo de combustão na caldeira, os combustíveis heterogêneos são responsáveis por uma maior variação de temperatura na câmara de combustão (PÖYKIÖ; WATKINS; DAHL, 2018; ZAMBARE; CHRISTOPHER, 2020). Isso resulta em um menor equilíbrio da pressão do vapor da caldeira e, portanto, reduzindo a sua eficiência. Essas propriedades dificultam o uso de lodo, “*in natura*”, para a geração de energia.

Para manter a eficiência energética de uma caldeira que utiliza lodo como combustível, o mesmo é misturado a biomassa, geralmente, cavaco, na proporção média de 10% em relação a biomassa total. Para aumentar esse percentual ou até mesmo queimar 100% de lodo nas caldeiras, faz-se necessário a realização de tratamentos que visam obter características adequadas ao processo de combustão (TAN *et al.*, 2017). Neste contexto, a produção de pellets a partir do lodo torna-se uma opção atrativa do ponto de vista técnico, uma vez que o processo de peletização permite a produção de um combustível homogêneo e com maior poder calorífico líquido, além de facilitar o seu armazenamento e transporte. No entanto, existem alguns desafios para a produção de pellets utilizando lodo primário, sobretudo, pelo seu alto teor de umidade, geralmente entre 70 e 80% em base úmida após um processo de desaguamento por prensas e pela sua baixa densidade, haja visto que a pelletização da maioria das biomassas é realizada com teores de umidades variando de 8 a 12%. (HUANG *et al.*, 2017; NOSEK *et al.*, 2017; OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006).

Alguns estudos têm mostrado que a qualidade de pellets produzidos a partir de lodo é aumentada quando se peletiza com teor de umidade, base úmida, variando de 15 a 25% (NOSEK *et al.*, 2017). No entanto, vale salientar que quanto maior for o teor de umidade da biomassa de lodo para pelletização, menor será o custo com secagem.

Neste contexto, o objetivo principal desta pesquisa foi produzir pellets a partir de lodo primário coletado na estação de tratamento de efluentes de uma fábrica de celulose kraft branqueada de eucalipto, buscando desenvolver metodologia de peletização com alto teores de umidade.

2. OBJETIVO

Utilizar lodo primário da estação de tratamento de efluentes de fábrica de celulose kraft branqueada de eucalipto para a produção de pellets para fins energéticos via um

processo úmido.

Objetivos específicos

- i. Caracterização física e química do lodo primário;
- ii. Determinar a degradação térmica do lodo através da curva termogravimétrica (TG/DTG) do material;
- iii. Avaliar a viabilidade técnica da produção de pellets utilizando lodo com alto teor de umidade;
- iv. Determinar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos pellets;
- v. Classificação e comparação dos os pellets de acordo com as normas europeias, EN 14.961-6;
- vi. Avaliar as implicações de um novo processo integrado às fábricas de celulose e papel;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Lodos gerados em estações de tratamento de efluentes

Dentre os resíduos sólidos gerados pelas indústrias de celulose e papel, os lodos originados do tratamento de águas residuárias constituem a maior porção desses resíduos. (MONTE *et al.*, 2009).

O tratamento de efluentes realizado pelas fabricas de celulose e papel é uma etapa importante dentro do processo produtivo de polpa celulósica, visto que o seu lançamento em corpos d'água sem tratamento pode acarretar significantes impactos ambientais negativos afetando o ecossistema aquático (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004).

Dois tipos distintos de lodos são gerados a partir do tratamento de efluente das indústrias de celulose e papel que variam de acordo com o tratamento realizado e com a matéria prima utilizada, o lodo primário e o secundário (GRIMM *et al.*, 2019). O lodo primário é gerado nos clarificadores primários. O lodo secundário também denominado lodo biológico é gerado nos processos de tratamento secundário, sobretudo no processo de lodos ativados. Devido às características físicas proporcionadas pelo alto conteúdo de matéria microbiana, o lodo secundário possui difícil manuseio e desaguamento e assim, frequentemente são misturados ao lodo primário para facilitar a remoção de água. Estes materiais possuem em sua composição frações orgânicas e inorgânicas, geralmente os compostos presentes na fração orgânicas são componentes da madeira, como por exemplo cascas e fibras, e na porção inorgânica compostos na forma de areia são predominantes

(FANG *et al.*, 2017).

As quantidades de lodo gerado nas fábricas variam com o tipo de produto e dos processos adotados. Fábricas de polpa kraft branqueada geram em média 58 kg/tsa, enquanto fábricas que utilizam o processo sulfito e destintagem vão produzir respectivamente 102 e 234 kg/tsa, sendo que 70% referem-se ao lodo primário e 30% ao lodo secundário. Esses valores podem ainda sofrer variações em virtude da finalidade do produto final, como por exemplo fábricas de papel tissue que geram maior quantidade de lodo quando comparada às fábricas de papel jornal (BAJPAI, 2015b; FAHIM *et al.*, 2018).

A matéria prima utilizada para a produção de celulose e papel também vai influenciar significativamente na fração e na composição do lodo produzido (Tabela 1), enquanto que as fábricas que utilizam fibras virgens possuem uma menor geração de lodo do que aquelas que utilizam fibras recicladas. O lodo proveniente das fábricas de fibras recicladas possui maior teor de cinzas devido ao maior teor de materiais não recicláveis presentes nessa matéria prima (BAJPAI, 2015c; JARIA *et al.*, 2017).

Na Tabela 1 são apresentadas algumas propriedades do lodo gerado na estação de tratamento de efluentes de diferentes fábricas.

Tabela 1. Caracterização das misturas de lodo primário e secundário gerado em diferentes fábricas de polpa celulósica

Produção	Propriedades(%)						
	Sólidos Totais	Cinzas	C	H	S	O	N
Reciclagem	45,0	3,0	48,4	6,6	0,2	41,3	0,5
Kraft	38,8	7,6	51,6	6,1	0,9	31,2	2,8
Polpa branqueada	33,4	1,9	48,7	6,6	0,2	42,4	0,2

Adaptado por US EPA (2012), Bajpai (2015)

Os lodos gerados nas fábricas que realizam polpação química tendem a possuir altos teores de compostos sulfurosos, assim como fábricas que realizam os estágios de branqueamento da polpa marrom vão possuir alto conteúdo de compostos orgânicos clorados em virtude dos reagentes (ClO_2) utilizados no branqueamento da polpa celulósica (MONTE *et al.*, 2009).

O tratamento primário objetiva a remoção dos sólidos em suspensão e consiste em processos de sedimentação ou flotação, o qual é responsável pela remoção de cerca de 80% de

sólidos em suspensão presente no efluente. O tratamento secundário promove a remoção da matéria orgânica dissolvida e coloidal e se dá através do tratamento biológico, sendo os mais usuais o processo de lodos ativados, lagoas aeradas, processos anaeróbios ou ainda a combinação de ambos (anaeróbio-aeróbio). Em algumas fabricas há ainda a necessidade de um sistema de tratamento terciário, o qual tem como principal objetivo remoção de cor e DQO, embora não seja muito comum nas fábricas de celulose e papel, apenas em locais onde há legislações ambientais mais rígidas (KAMALI; KHODAPARAST, 2015; POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004; PÖYKIÖ; WATKINS; DAHL, 2018b).

Tanto o lodo primário como o lodo secundário são classificados como Classe II pela ABNT NBR 10004/2004, ou seja, não perigosos (MALAIŠKIENĖ *et al.*, 2018). Os principais destinos dos resíduos provenientes do tratamento de efluentes de fabricas de celulose e papel são o aterro, prática está que tem se tornado uma opção onerosa e inviável, visto que além de ocupar grandes extensões de terra, podem promover a poluição de águas subterrânea devido a lixiviação e geração de gases de efeito estufa (LIKON; TREBSE, 2012; PERVAIZ; SAIN, 2015). A queima direta do lodo ou o seu uso como condicionador de solos se mostram como alternativas mais interessantes comparadas ao aterro industrial. Vale salientar que a queima do lodo na caldeira de biomassa para produção de energia tem sido altamente estudada e até mesmo aplicada nos últimos anos (BAJPAI, 2015d; BEKHTA *et al.*, 2019; JARIA *et al.*, 2017). No entanto, os altos teores de umidade podem fazer com que o saldo energético seja nulo ou até mesmo negativo (GRIMM *et al.*, 2019).

O poder calorífico do lodo primário e secundário se assemelha ao das cascas da madeira, apesar de conter presença de alguns metais (Tabela 2).

Tabela 2. Conteúdo de metais pesado em diferentes tipos de lodo

Fonte	Elementos (mg/kg)						
	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
Lodo primário	41	<0,7	24	238	6	0,1	141
Lodo secundário	22	<0,7	17	71	8	0,01	135
Resíduo sólido urbano	50-350	1-35	8-240	35-750	1-150	0,1-2	85-500

Adaptado de Valkenburg *et al.* (2008), Monte *et al.* (2009), Bajpai (2015)

Tem-se buscado o emprego do lodo para usos alternativos a queima direta, como material de isolamento térmico, na construção civil, papel e adesivo de madeira, produção de

pesticidas ou fertilizantes, produção de pellets para geração de energia e até mesmo para a produção de carvão ativado para aplicação em tratamento de água (FERREIRA *et al.*, 2016; JARIA *et al.*, 2017; NOSEK *et al.*, 2020)

3.1.1. Lodo primário

O lodo primário, também conhecido como lodo físico-químico é constituído principalmente por materiais orgânicos e uma menor fração inorgânica como argila e cinzas (MONTE *et al.*, 2009). Dentre os elementos que compõem esse material pode-se destacar as fibras de celulose e hemicelulose, lignina, muscovita, carbonato de cálcio, talco, caulinita, e quartzo de SiO₂. Esse material tem também um alto teor de água, característica muitas vezes negativa que resulta em uma maior dificuldade no seu gerenciamento (MALAIŠKIENĖ *et al.*, 2018).

Sua origem se dá a partir do sistema primário de tratamento de efluentes o qual objetiva a remoção de sólidos suspensos, sendo normalmente adensados e desaguados a consistência de 20 a 40% após sua passagem por decantadores ou flotores, devido seu alto conteúdo orgânico esse material possui alta relação C:N (111:1 - 943:1), seu pH pode variar de 5-11 (FAHIM *et al.*, 2018; FAUBERT *et al.*, 2016b).

A maior porção de sólidos presentes no efluente vão compor o lodo primário, estima-se que a geração de lodo primário em uma fábrica de celulose kraft branqueada é cerca de 40-60 kg por tonelada de celulose seca ao ar, geralmente esse lodo é disposto em aterros industriais ou são incinerados (GRIMM *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2018). O lodo primário ainda úmido pode conter até 94,3% de material orgânico e 5,7% de cinzas, apresentando um poder calorífico de 20,1 MJ/kg quando seco (BAJPAI, 2015c).

O processo de obtenção do lodo primário se dá a partir do tratamento físico ou físico-químico dos efluentes, conhecido também como tratamento primário. Esse tratamento pode ser realizado através de técnicas de sedimentação, flotação, triagem, adsorção, coagulação, oxidação, ozonização, eletrólise, osmose reversa, ultrafiltração e nanofiltração, onde tem como objetivo a remoção de sólidos em suspensão, partículas coloidais, materiais flutuantes e compostos tóxicos (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004).

Devido ao seu alto conteúdo de materiais lignocelulósicos, o lodo primário pode ainda ser beneficiado e transformado em diversos produtos como papeis reciclados e bioetanol (GURRAM *et al.*, 2015b; NIJU; VIJAYAN, 2020). Bekhta et al. (2019) avaliaram o uso de

lodo primário das indústrias de celulose como componente do adesivo ureia-formaldeído para a produção de compensados, onde obteve uma redução de formaldeído sem interferir nas propriedades de resistência ao cisalhamento dos compensados (BEKHTA *et al.*, 2019). Jaria *et al.* utilizaram o lodo primário das indústrias de celulose para produzir carvão ativado granular obtendo-se propriedades físico-químicas próximas ao carvão ativado granular comercial (JARIA *et al.*, 2019).

3.1.2. Lodo secundário

Após o tratamento primário, compostos orgânicos dissolvidos e partículas coloidais ainda estão presentes no efluente. A aplicação de um tratamento secundário objetiva reduzir esses compostos através da oxidação biológica desses materiais. Há a transformação da matéria orgânica biodegradável em gases e células (lodo). O lodo secundário ou biológico é, portanto, obtido a partir de tratamentos com microrganismos, os quais convertem a matéria orgânica solúvel em gases, água e biomassa. Estes processos podem ser aeróbios, anaeróbios ou a combinação de ambos (BAJPAI, 2015b; KAMALI; KHODAPARAST, 2015). Dentre os processos aeróbios podem-se destacar o processo de lodos ativados, lagoas aeradas e reatores biológicos aeróbios.

Quando comparado aos processos físico-químicos, os processos aeróbios são considerados mais vantajosos do ponto de vista econômico e ambiental além de apresentar elevada eficiência. Todavia, esse processo ainda não é eficaz na remoção de compostos recalcitrantes e cor presentes no efluente (KAMALI; KHODAPARAST, 2015).

Devido às características do processo de tratamento, o lodo biológico é constituído basicamente de água, microrganismos, proteínas, fibras e carbonato de cálcio, possuindo um teor de sólidos entre 0,5-2%. Tais características fazem com que esse lodo seja de difícil desidratação, principalmente quando comparado ao lodo primário (BAJPAI, 2015c). Estima-se que é gerado cerca de 20 kg de lodo secundário por tonelada de celulose produzida, apesar de corresponder apenas 30% do total de lodo gerado na fábrica, o lodo biológico apresenta grandes desafios para sua utilização e manejo devido seu alto teor de umidade, por isso muitas vezes este é misturado com lodo primário (LOPES *et al.*, 2018).

Geralmente, o destino do lodo secundário tem sido a disposição em aterros industriais ou a incineração, podendo ainda pode ser utilizado na indústria de cartão, aplicação como adubos e corretivos do solo ou utilizado em agregados leves e incorporação de tijolos (NIJU;

VIJAYAN, 2020).

Para se determinar um destino final adequado ao lodo, é importante realizar uma caracterização completa do material como o teor umidade, as cinzas, o poder calorífico, o pH dentre outros. Normalmente, o lodo secundário proveniente do processo de lodos ativados possui um pH que varia de 6,0-7,4. O poder calorífico desse material varia entre 22-25 MJ/ kg de sólidos totais, no entanto a queima na caldeira para produção de energia muitas vezes é inviável devido ao seu alto teor de umidade, resultando em um balanço energético desfavorável a geração de energia (BAJPAI, 2015d).

3.2.Geração de energia nas fábricas de celulose e papel

A demanda energética de uma fábrica de celulose e papel convencional está em torno de 23-35 GJ de vapor para cada tonelada seca ao ar de celulose produzida, devido a integração de vários processos na produção, essas indústrias já podem ser consideradas autossuficientes em energia (ORANG; TRAN, 2015).

Estima-se que a queima do licor negro oriundo do processo de polpação consegue suprir 60-70% da energia requerida dentro da fábrica, e como energia complementar destaca-se a queima de biomassa na caldeira auxiliar que contribui com cerca de 30-40% da energia necessária para os processos fabris. Apesar de existir uma pequena porcentagem (4%) de combustíveis fósseis utilizado pelo setor, grande parte da energia gerada na fábrica é proveniente de combustíveis renováveis como o próprio licor negro, cascas, finos e resíduos de madeira (ALMEIDA, 2019; SAARI *et al.*, 2021)

A caldeira de recuperação responsável pela queima da biomassa líquida possui capacidade muito superior quando comparada com a caldeira de biomassa. A unidade industrial Suzano em Três Lagoas (MS) dispõe de duas caldeiras de recuperação que podem queimar respectivamente 5.800 e 8.250 toneladas de biomassa líquida por dia totalizando na geração de 2.062 toneladas de vapor, enquanto a caldeira de auxiliar tem capacidade de apenas 250 toneladas de biomassa sólida por dia o que vai gerar até 150 toneladas de vapor. Essa diferença se estabelece justamente pelo combustível predominantemente utilizado na fábrica ser o licor negro, integrando o ciclo de recuperação do processo kraft (ALMEIDA, 2019).

As caldeiras de biomassa das fábricas de celulose e papel geralmente são de leito fluidizado e é capaz de converter cerca de 75% dos processos de combustão da matéria prima

em calor e energia, no entanto sua eficiência está diretamente ligada as propriedades da biomassa como o teor de umidade, poder calorífico e teor de cinzas (ORANG; TRAN, 2015).

A geração de lodo primário e secundário de uma fábrica de celulose pode girar em torno de 200-275 toneladas por dia apresentando consistência de 20-30%. O principal desafio no aproveitamento energético dessa biomassa é em decorrência do alto teor de umidade, no entanto dentre as técnicas de gerenciamento que visam substituir o aterro industrial, a queima do lodo para geração de energia é a melhor alternativa (HEILAND, 2012). Almeida (2019) afirma em seu estudo que a incorporação de 42% de lodo primário e secundário à biomassa para queima não afetou o rendimento de vapor na caldeira de biomassa, evidenciando o potencial energético desse material. (ALMEIDA, 2019).

3.3. Inovações no gerenciamento do Lodo gerado pelas indústrias de celulose e papel

Novas formas de reciclagem e reaproveitamento de resíduos sólidos têm sido investigadas nos últimos anos, desvinculando-se da economia linear clássica e consolidando cada vez mais uma economia circular (MOLINA-MORENO *et al.*, 2017). As indústrias de celulose e papel são conhecidas pelo seu alto consumo de água e como consequência alta geração de lodo proveniente da estação de tratamento de águas residuais, e em virtude de uma legislação cada vez mais restrita tem-se a necessidade do estabelecimento de novas formas de gerenciamento desses materiais (JARIA *et al.*, 2017; MOLINA-SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

Pesquisas têm sido realizadas por cientistas ao redor do mundo, de forma a tentar encontrar um meio alternativo de utilização desses resíduos, com o objetivo de se estabelecer uma nova forma de manejo alinhada à sua valorização (Figura 1) (BURUBERRI; SEABRA; LABRINCHA, 2015; KAMALI; KHODAPARAST, 2015).

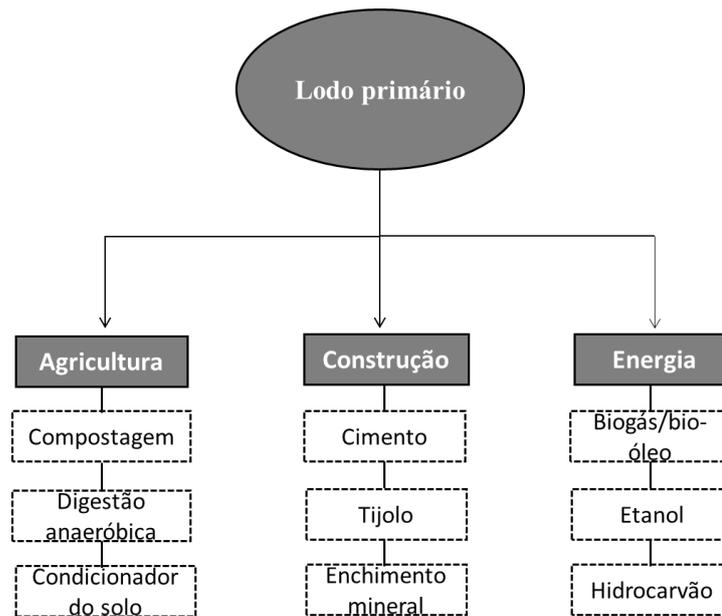


Figura 1. Possíveis usos do lodo gerado nas indústrias de celulose e papel

3.3.1. Produção de carvão ativado

Alguns estudos propõem a utilização do lodo proveniente das indústrias de celulose e papel como matéria prima potencial para produção de carvão ativado. Calisto et al., 2014 foi pioneira na investigação do potencial do lodo das fábricas de celulose e papel como precursor para produção de carbonos com alta capacidade de adsorção para remoção de citalopram da água. Os adsorventes foram produzidos a partir de lodo primário e biológico sem ativação física ou química e apresentaram rápida cinética de adsorção, evidenciando o potencial desses materiais de serem reestabelecidos no mercado como matéria prima (CALISTO *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2019).

O carvão ativado granular produzido a partir o lodo primário e lignosulfonato de amônio (subproduto do processo de polpação sulfito) como agente aglutinante, apesar de apresentar menor capacidade de adsorção, apresentou propriedades físico-químicas muito semelhantes quando comparado ao carvão ativado disponível comercialmente (JARIA *et al.*, 2017; JARIA *et al.*, 2019).

O uso do lodo primário como matéria prima para essa finalidade tem como vantagem a baixa variabilidade das suas características ao longo do tempo. A fim de se obter carvão ativado proveniente do lodo comercialmente competitivo pode-se também selecionar condições ótimas de produção: temperatura de pirólise, tempo de residência, agente ativador e

razão precursor / agente ativador, com esse planejamento é possível atingir percentuais de adsorção para remoção de contaminantes da água superiores ao carvão ativado comercial. (JARIA *et al.*, 2017; JARIA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019).

Apesar dos maiores desafios, a utilização do lodo das indústrias de celulose e papel como precursor na produção de carvão ativado apresenta vantagens ambiental e econômica. Ao eliminar custos com gerenciamento desses e resíduos e limitar o uso de aterro, além do processo de produção restringir a necessidade de ativadores químicos, tornando o processo ainda mais ambientalmente atrativo (FERREIRA *et al.*, 2016).

3.3.2. Aplicação no solo

Uma das formas de gerenciamento do lodo gerado nas indústrias de celulose e papel é sua aplicação no solo para fins agrícolas, silviculturais ou recuperação do mesmo. O lodo tende a melhorar a qualidade e fertilidade do solo. A mistura de lodo primário e secundário normalmente contém N (nitrogênio) disponível também sendo uma alternativa aos fertilizantes minerais (FAUBERT *et al.*, 2016; RODRIGUEZ *et al.*, 2018).

Muitos estudos têm sido feito quanto à viabilidade prática dessa forma de gerenciamento, visto que o lodo pode apresentar em sua composição metais pesados, e mau cheiro resultando em problemas ambientais e sociais. Deve ser levando em consideração ainda a distância da fábrica em relação às terras onde será feita a aplicação, visto que esse fator pode elevar o custo com transporte e o aumento de emissões de gases poluentes (FAUBERT *et al.*, 2016; PERVAIZ; SAIN, 2015).

A alta razão C:N é outra limitação para a aplicação do lodo no solo, visto que pode ocorrer a mineralização e imobilização do N. A compostagem e o pré-condicionamento são práticas que promovem a redução da relação C:N, viabilizando sua utilização para melhorar as propriedades físico-química do solo (RODRIGUEZ *et al.*, 2018).

A aplicação de 84 t.ha^{-1} de lodo compostado proveniente de uma fábrica de celulose e papel promoveu um aumento de produtividade de madeira de *Pinus taeda* de $11,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. O efeito desse fertilizante de baixo custo nas árvores promove o aumento de volume de madeira por árvore e reduz a idade de rotação do plantio (RODRIGUEZ *et al.*, 2018). Faubert *et al.* quantificou e comparou as emissões diretas de gases do efeito estufa do mix de lodo primário e secundário e apenas lodo primário de um fábrica de polpa mecânica em aterro e após a aplicação no solo como substituto do nitrogênio mineral. A deposição de lodo em aterro pode

promover o aumento de até três vezes na emissão dos gases de efeito estufa quando comparado com a utilização no solo (FAUBERT *et al.*, 2019).

A aplicação de lodo para remediação de solos degradados por mineração também é uma alternativa do uso desses resíduos no solo. As cinzas da caldeira de biomassa juntamente com o lodo biológico em proporções pré-determinadas podem melhorar a qualidade do solo contaminado com cobre (Cu), chumbo (Pb) e zinco (Zn) além de aumenta o fósforo (P) e potássio (K) extraíveis (ALVARENGA *et al.*, 2019).

3.3.3. Uso na construção civil

A construção civil ainda é considerada um setor que gera grandes impactos ambientais, o cimento que é um material imprescindível dentro do setor, é responsável por utilização e esgotamento de vários recursos, principalmente no processo de transformação da cal. O lodo gerado nas indústrias de celulose surge como matéria prima alternativa ao uso da cal na argamassa. A adição de até 10% de lodo primário proveniente de uma fábrica de papel permite a produção de uma argamassa com propriedades de resistência adequada para a construção civil (AZEVEDO *et al.*, 2018; AZEVEDO *et al.*, 2020).

O lodo biológico juntamente com a lama de cal e cinzas volantes da combustão da biomassa possui potencial como matéria prima secundária para produção de clínquer. O lodo biológico, por ser constituído principalmente por matéria orgânica pode ser considerado combustível secundário durante a produção, além de conter pequenas quantidades de SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 e Fe_2O_3 (BURUBERRI; SEABRA; LABRINCHA, 2015).

A utilização de tijolos para construção civil é uma técnica antiga que se estendeu até os anos atuais, no entanto com a modernização das construções surgiram exigências de inovações visando a produção de um material de maior qualidade e mais sustentável (GOEL; KALAMDHAD, 2017). Existem diversos estudos quanto à utilização do lodo gerado na fábrica de celulose e papel como uma das matérias primas na produção de tijolo. O lodo pode ser um agente formador de poros na fabricação do tijolo, o que resulta em melhoria nas propriedades de isolamento térmico e redução da densidade aparente, a qual infere diretamente nos custos de transporte e de produção (GOEL; KALAMDHAD, 2017; YARAS, 2020).

O poder calorífico do lodo reduz a carga de combustão durante a ignição no processo de produção de tijolos de argila cozido, resultando na economia de 3% de combustível

(GOEL; KALAMDHAD, 2017; VIEIRA *et al.*, 2016). A incorporação de 10% de lodo, em peso úmido, na produção de tijolos de argila à 750°C apresentou resistência à compressão de acordo com as normas técnicas brasileira, sendo considerado adequado para construção civil (VIEIRA *et al.*, 2016).

As placas de cimento madeira também são utilizadas na construção civil como revestimento de parede, pisos especializados e como elemento de decoração. Possui propriedades que promove o isolamento térmico e acústico. Cavdar et al., (2017) avaliaram adição de lodo biológico na produção das placas de cimento/madeira e concluíram que proporções de até 5% atendem aos requisitos padrão do material, viabilizando sua produção comercial (CAVDAR *et al.*, 2017).

3.3.4. Geração de energia a partir do lodo

A conversão energética do lodo surge como uma alternativa interessante, em um contexto global onde há a necessidade de substituição de combustíveis fósseis, alinhado a expressiva geração de resíduos. A união europeia possui metas para 2030, onde prevê a redução de 40% dos gases do efeito estufa e o aumento em 30% da energia proveniente de fontes renováveis, incluindo a utilização de bioresíduos para tal fim, com o objetivo reduzir o descarte desses materiais em aterros (FERREIRA *et al.*, 2016; MOLINA-MORENO *et al.*, 2017).

Muitas pesquisas foram feitas ao longo dos anos investigando o potencial energético do lodo primário e secundário gerado nas fábricas de celulose e papel. A prática mais comum para recuperação energética é a incineração direta do lodo na caldeira de biomassa, no entanto, devido seu alto teor de umidade e heterogeneidade essa prática acaba não sendo eficiente, estima-se que o aproveitamento energético do lodo é de 35% do seu conteúdo total de energia (LOPES *et al.*, 2018; MOHAMMADI *et al.*, 2019). A co-combustão do lodo primário e secundário com carvão mostrou-se também uma prática alternativa para o gerenciamento desses resíduos, visto que a mistura de 10% de lodo primário e principalmente lodo secundário com carvão não alterou as propriedades de combustão do carvão, além de prover redução nas emissões de CO₂ e NO_x (COIMBRA *et al.*, 2015).

3.3.4.1. Produção de Biogás

O lodo possui elevado teor de umidade, heterogeneidade e baixa densidade. Essas

propriedades fazem com que o aproveitamento energético do lodo ainda seja um desafio enfrentando pelo setor papelero. Uma das alternativas encontradas foi a produção de biogás a partir desse material através da digestão anaeróbica, esse processo possui a vantagem por promover a estabilização do lodo, remover odores e patógenos. Apesar do baixo teor de nitrogênio e da estrutura lignocelulósica complexa ser um obstáculo, muitos estudos vêm empregando melhorias de processo e comprovando a viabilidade técnica da produção de biogás utilizando esses resíduos (LOPES *et al.*, 2018; SETHUPATHY; SIVASHANMUGAM, 2021; VELUCHAMY; KALAMDHAD, 2020)

Vaez e Zilouei observaram bons resultados ao investigar a produção de hidrogênio e metano a partir do processo de fermentação na ausência de luz e digestão anaeróbica do efluente das fábricas de papel. O sequenciamento do sistema resultou no tratamento do efluente, remoção de DQO e geração de energia (VAEZ; ZILOUEI, 2020).

A combinação de métodos alternativos para gerenciamento do lodo pode também ser considerada, como forma de mitigar os impactos ambientais provocados por determinado método isolado (CAO & PAWŁOWSKI, 2012; MOHAMMADI *et al.*, 2019). A combinação da digestão anaeróbica e pirólise com o intuito de produzir biogás e biochar respectivamente, apresenta grande potencial de melhorias no desempenho ambiental desses resíduos. O sistema permite a produção de dois produtos de maior valor agregado, o biogás que pode ser usado como fonte energética, e o biochar, o qual pode ser empregado para gerenciar estoques de carbono e nutrientes nos solos florestais. A grande vantagem do processo é a estabilização dos metais pesados presentes no lodo pela produção de biochar a partir da pirólise (MOHAMMADI *et al.*, 2019).

3.3.4.2. Produção de carvão e bio-óleo

O processo de pirólise consiste na decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio. Esse processo pode ser dividido de acordo com as condições operacionais empregadas: lenta, intermediária e rápida. A pirólise lenta favorece a produção de carvão, por apresentar menor taxa de aquecimento ($1-50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) e maior tempo de residência do material, enquanto que a pirólise rápida consiste em maiores taxas de aquecimento ($300-12000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) e menor tempo de residência, o que máxima a produção de gás favorecendo a formação de bio-óleo. A pirólise intermediária por apresentar taxas de aquecimento moderada possui potencial tanto para produção de carvão como também bio-óleo (GOTTUMUKKALA

et al., 2016; GUEDES; LUNA; TORRES, 2018; OUADI *et al.*, 2013; RIDOUT *et al.*, 2016).

Muitos trabalhos vêm investigando o potencial do lodo produzido em fábricas de papel e celulose para produção de bio-óleo. Ridout *et al.*, 2016 avaliaram técnicas de pirólise lenta e rápida em dois tipos de lodo, um proveniente de uma fábrica de celulose kraft com baixo teor de cinzas, e outro proveniente de uma fábrica de papel de reciclado com alto teor de cinzas. Foi constatada uma maior conversão de energia bruta na pirólise rápida devido principalmente à maior produção de compostos orgânicos condensáveis (RIDOUT *et al.*, 2016).

A combinação de técnicas de pré-tratamento do lodo também pode ser empregada com o objetivo de produzir bio-óleo de qualidade superior. A combinação de hidrólise ácida e torrefação levaram ao aumento de um produto importante derivado da celulose a levoglucosana, e também reduziu a formação de componentes que interferem negativamente nas propriedades físico-químicas do bio-óleo: ácido, aldeídos e cetonas (RECKAMP; GARRIDO; SATRIO, 2014).

Lodo proveniente de uma fábrica de papel reciclado à 500 °C, submetido a pirólise lenta, produziu em peso de lodo seco 40% de bio-óleo, 36% de carvão e 24% de biogás. Esses resultados evidenciam o potencial do lodo proveniente de fábrica de papel para geração de vários coprodutos, via pirólise lenta, e, sendo mais uma alternativa para o gerenciamento desses resíduos (STREZOV; EVANS, 2009).

3.3.4.3. Carbonização hidrotérmica

A produção de hidrocarvão é feita mediante a carbonização hidrotérmica subcrítica. O uso desse processo no lodo é interessante visto que não é necessária a secagem prévia do mesmo, devido às condições de alta temperatura (180-220 °C) e alta pressão (2,5-5 Mpa) esse processo ainda é capaz de eliminar patógenos que podem estar presente no material (BHATT *et al.*, 2018; MÄKELÄ *et al.*, 2016; PETERSON *et al.*, 2008).

A carbonização hidrotérmica pode ser utilizada como forma de aumentar a capacidade de desidratação do lodo. O comportamento da água em condições críticas faz com que ela mude seu comportamento provocando alterações na sua constante dielétrica, fazendo com que a água se comporte como um solvente orgânico. Durante esse processo os componentes como celulose e hemicelulose são hidrolisados em fragmentos de monômeros. Apesar de a água ser crucial, o material não pode ter um teor de umidade muito elevado, visto que ocorre maior dissolução dos orgânicos, resultando em menor rendimento de hidrocarvão e um

hidrocarbonante com menor poder calorífico. No entanto, quando há alta concentração de sólidos o transporte dos fragmentos produzidos pela hidrólise é afetado, sendo necessária uma taxa de umidade ideal, para o lodo de esgoto essa taxa é de 75-99% de umidade (KHAN *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019).

O processo de síntese de carbono a partir da carbonização hidrotérmico é descrito como mais prático e eficiente, principalmente em biomassas como o lodo, visto que o material deve estar úmido, e as temperaturas são menores quando comparado aos métodos de pirólise, gaseificação e incineração ou combustão (Tabela 3) (KHAN *et al.*, 2019). O produto final que se forma é um hidrocarboneto sólido hidrofóbico, friável e que possui alta densidade energética, sendo um combustível renovável ideal para realizar a co-combustão com outros combustíveis não renováveis, aumentando a sustentabilidade da matriz energética mundial (SAHA *et al.*, 2019).

Tabela 3. Características dos processos de conversão da biomassa

Parâmetro	Carbonização Hidrotérmica	Pirólise Lenta	Gaseificação	Incineração
Entrada	Úmido	Seco	Seco	Seco
Reação primária	Desidratação	Combustão	Combustão	Combustão
Temperatura °C	180-350	400-900	>700	800-900
Reagente	Água	Nenhum	Oxigênio (Parcial)	Oxigênio (Excesso)
Subproduto	Líquido Volátil + CO ₂	Carvão	Cinzas	Cinzas
Produto Principal	Hidrocarboneto	Óleo	Gás	Gás

Adaptado de Khan et al., (2019)

3.3.4.4. Produção de Etanol

Os Combustíveis renováveis como etanol, butanol, biodiesel e bio-gasolina é comumente produzido a partir de componentes à base de açúcar, amido ou materiais lignocelulósicos. As principais matérias primas utilizadas são cana de açúcar e amido de milho, no entanto essas culturas são utilizadas também para produção de alimentos. A polivalência dessas biomassas acaba criando uma disputa entre o setor alimentício e o setor energético. E os materiais lignocelulósicos, apesar de mais acessível ainda encontra desafios

devido sua estrutura complexa, necessitando de pré-tratamentos que elevam o custo de produção (GURRAM *et al.*, 2015; NIJU; VIJAYAN, 2020).

Matérias primas alternativas vêm sendo avaliadas para produção desses combustíveis. Os resíduos sólidos gerado no tratamento de efluente das indústrias de celulose e papel são considerados atraentes, visto que são ricos em monossacáridos e polissacarídeos, requerendo menos pré-tratamentos. A grande vantagem no uso do lodo para produção de bioetanol é o custo da matéria prima, que pode ser zero ou até mesmo negativo. O principal destino do lodo da fábrica de celulose e papel é o aterro, estima-se um custo de \$30 por tonelada úmida de lodo depositado em aterro. A conversão bioquímica do lodo se torna atrativa não só economicamente, mas também ambientalmente, por promover a mitigação do uso de aterros (BRANCO; SERAFIM; XAVIER, A., 2018; CHEN *et al.*, 2014; GURRAM *et al.*, 2015; NIJU; VIJAYAN, 2020).

3.3.5. Produtos químicos

O lodo gerado nas estações de tratamento das indústrias de celulose e papel, principalmente o lodo primário é rico em componentes celulósicos e outros carboidratos. No entanto a aplicação desse material para produção de produtos químicos de valor agregado ainda é pouco estudada (GOTTUMUKKALA *et al.*, 2016; SHI; KANG; LEE, 2015).

O acetato de celulose é um importante derivado da celulose e possui aplicação em diversas áreas. Esse produto é obtido a partir da modificação da estrutura química da celulose por meio de um processo de esterificação. O que provoca o aumento das propriedades hidrofóbicas do polissacarídeo ou melhora sua afinidade com polímeros apolares. A celulose presente no lodo possui grande potencial para produção de acetato de celulose, apesar de alguns desafios como o alto teor de componentes inorgânicos. Novos processos podem ser empregados ou otimizados visando o melhor aproveitamento desses resíduos e viabilizando a produção de acetato de celulose a partir do lodo (ROSA *et al.*, 2020).

O ácido láctico é outro produto de alta versatilidade que também pode ser produzido através do lodo das indústrias de celulose e papel. A matéria prima convencional para sua produção é o açúcar ou o amido, e apresentam elevado custo (GOTTUMUKKALA *et al.*, 2016; SHI; KANG; LEE, 2015). Como alternativa surge o lodo que é rico em carboidratos e possui um custo zero ou negativo. O uso do lodo proveniente de uma fábrica de papel reciclado juntamente com a adição de um pré-hidrolisado de hemicelulose obteve um

rendimento de 83% de ácido lático com concentração de 60g/ L (SHI; KANG; LEE, 2015).

Existe uma infinidade de produtos de valor industrial, como ácidos graxos, celulose bacterianas, nanofibras de celulose e até mesmo enzimas que podem ser produzidas utilizando o lodo produzido pelas indústrias de celulose (DU *et al.*, 2020; GOTTUMUKKALA *et al.*, 2016). As possibilidades de conversão são diversas e possibilita a ampla exploração desses resíduos, motivando o desenvolvimento de novas formas de uso e o estabelecimento de uma economia circular.

3.4. Pellets

Os pellets são considerados combustíveis sólidos renováveis, granulares e densificados. As principais matérias primas para sua produção são as biomassas agroflorestais, como por exemplo, os resíduos de pinus e eucalipto, cana de açúcar, sorgo, palha de arroz (Figura 2), palha de milho, capim elefante (BRAND *et al.*, 2021; SANTANA *et al.*, 2020; SCATOLINO *et al.*, 2018). A utilização de pellets para a geração de energia é altamente difundida em países como China, Japão, Alemanha, Reino Unido e Holanda. Os pellets têm algumas vantagens em relação às biomassas que os deu origem como a alta densidade a granel, menor teor de umidade, geometria regular, e tamanho padronizado (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018; XIAO *et al.*, 2015).



Figura 2. Pellets produzidos com diferentes misturas contendo resíduos de arroz e *Pinus* spp. aparas de madeira (Fonte: BRAND *et al.*, 2021)

O processo de produção de pellets consiste na densificação da biomassa, tornando a

matéria prima competitiva para produção de combustíveis. A peletização permite a padronização da forma e tamanho do material, aumento da densidade energética e redução no teor de umidade. Essas características permitem maior economia e praticidade nas operações de manuseio, transporte e armazenamento (MOSTAFA *et al.*, 2019; NUNES; MATIAS; CATALÃO, 2014; RENTIZELAS; TOLIS; TATSIPOULOS, 2009).

Houve uma grande expansão na produção de pellets nos últimos anos em decorrência da sua utilização na Europa para a produção de energia. Os pellets se mostraram como alternativa aos combustíveis fósseis, por se tratar de uma opção ecologicamente atrativa. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU reiterou a necessidade da diversificação da matriz energética, como forma de consolidação da produção de energia limpa através de matérias primas renováveis, principalmente resíduos agroindustriais. O reaproveitamento de resíduos de formas diretas e indiretas cria uma tendência de redução de áreas destinadas a aterros, além da possibilidade de criação de uma biomassa moderna capaz de gerar energia eficiente e renovável (UN SDGs, 2015; CARRILLO-PARRA *et al.*, 2020; GARCÍA *et al.*, 2019; NIELSEN; MANDØ; ROSENØRN, 2020; SANTANA *et al.*, 2020a).

O lodo primário e secundário *in natura* tem um alto teor de umidade (50-70%), e partículas heterogêneas. Devido a essas propriedades, o processo de combustão acaba sendo ineficiente, tornando o lodo uma fonte energética, na maioria das vezes, inviável (AZEVEDO *et al.*, 2020; ZAMBARE; CHRISTOPHER, 2020).

A densificação do lodo primário e secundário gerado nas fábricas de celulose para a produção de pellets é uma alternativa que permite superar os principais desafios apresentados por essa biomassa no que tange a sua valorização energética. Dospoy *et al.*, 1998 foi pioneiro na aplicação industrial de pellets contendo lodo proveniente de uma fábrica de papel. Os pellets foram produzidos com 60-80% de finos de carvão mineral, 10-30% de lodo e 0,5-15% de um material polimérico (DOSPOY *et al.*, 1998; JIANG *et al.*, 2016).

Pesquisas têm sido realizadas nos últimos anos visando encontrar a melhor forma de produzir combustíveis densificado a partir de resíduos (JIANG *et al.*, 2016). A mistura de lodo proveniente de uma fábrica de papel reciclado com serragem de madeira e palha de trigo para produção de pellets se mostrou uma opção tecnicamente viável e pode ser considerada uma rota alternativa de gestão para esses resíduos. A adição de lodo nos pellets promoveu aumento do ponto de fusão das cinzas. Fator considerado positivo, uma vez que a baixa

temperatura de fusão das cinzas acaba causando incrustações, escórias e até mesmo corrosões nos equipamentos. O auto conteúdo de fibras do lodo também contribui para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos pellets (MATÚŠ *et al.*, 2018; NOSEK *et al.*, 2017b, 2020).

3.4.1. Processo de peletização

A tecnologia de peletização consiste na densificação da biomassa e pode ser realizado a partir de prensas peletizadoras. Esses equipamentos permitem a formação de pellets por meio da compactação da matéria prima e elevação da temperatura (70-100°C) que ocorre como resultado do atrito gerado durante o processo (SANTANA *et al.*, 2021). Para obtenção de pellets de qualidade alguns critérios devem ser seguidos durante o processo de peletização como a temperatura da matriz, pressão exercida sobre a biomassa e geometria, já no que tange a fatores intrínsecos da matéria prima pode-se destacar o teor de umidade, composição química e dimensões das partículas (SHAW, 2008).

Elevadas pressões e temperaturas são essenciais durante a compactação da biomassa, uma vez que permite o desenvolvimento de uma ponte sólida devido às reações químicas como cristalização de substâncias dissolvidas, endurecimento do ligante e solidificação das substâncias fundidas, desenvolvimento de forças interfaciais e pressões capilares devido à presença de água ou outros líquidos. (TUMULURU, 2018).

A umidade ideal dos materiais para o processo de peletização se encontra entre 8-12% (base úmida). A presença de água na biomassa pode promover a redução da temperatura de transição vítrea de alguns constituintes permitindo a formação de pontes sólidas e aumentando a interação entre partículas por meio de forças de van der Waals. No entanto, altos teores de umidade no material podem resultar em pellets com menor densidade e maior geração de finos (CASTRO *et al.*, 2021; TUMULURU, 2018).

A lignina é um componente da biomassa que tem grande importância no processo de peletização, além de possuir o maior poder calorífico, ela também tem o papel de promover a maior adesão das partículas durante o processo devido sua plasticização em temperaturas superiores a 70 °C (KALIYAN e MOREY, 2009)

As partículas da biomassa devem ser uniformizadas antes do processo de compactação, reduzindo as suas dimensões através de um moinho industrial e classificação em peneiras, de forma que as partículas obtidas apresentem aproximadamente 3 milímetros. A

redução de tamanho do material promove o aumento da área superficial e da densidade aparente resultando na maior fluidez e ligações durante o processo de peletização (OBERNBERGER et al. 2006; WARAJANONT e SOPONPONGPIPA; 2013; PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

3.4.2. Produção de pellets com diferentes biomassas

O mercado global de pellets vem passando por uma grande expansão. Em 2017 houve um aumento de 13% na sua produção e em 2018 o aumento foi ainda maior, de 26%, o que resultou na produção de 23,8 milhões de toneladas de pellets (XIE *et al.*, 2020). Esse crescimento faz com que haja o aumento nas buscas por matérias primas complementares (BRAND *et al.*, 2021).

Nos últimos anos diversos estudos foram realizados visando o aproveitamento dos resíduos agroindustriais. A produção de pellets foi uma alternativa avaliada por muitos pesquisadores, uma vez que o processo permite a obtenção de um combustível densificado, homogêneo e com baixo teor de humidade (BRAND *et al.*, 2021; GARCIA *et al.*, 2019; SANTANA *et al.*, 2020). As propriedades de pellets provenientes de diferentes matérias primas estão evidenciadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características de pellets produzidos com diferentes matérias primas

Matéria prima	PCS (MJ.kg⁻¹)	CF (%)	MV (%)	Cinzas (%)	DM (%)	DB (kg m³)	Fonte
Lodo primário	17.00	12.32	86.43	1.25	99.30	551.0	Autor
Pinus	20.65	17.97	81.71	0.32	97.90	690.0	GARCIA et al., 2019
<i>Eucalyptus</i>	19.76	17.77	81.77	0.46	81.94	709.0	GARCIA et al., 2019
Bagaço de cana	17.46	13.9	80.56	5.58	96.64	698.0	SCATOLINO et al., 2018
Resíduos de soja	16.77	10.81	62.47	26.72	47.49	686.0	SCATOLINO et al., 2018
Bambo	19.64	16.44	80.61	2.95	90.29	726.2	GARCIA et al., 2019
Sorgo	19.34	18.10	78.47	3.42	93.59	607.7	GARCIA et al., 2019
Capim elefante	18.51	14.11	79.09	6.80	89.82	509.8	GARCIA et al., 2019
Casca de café	18.89	17.16	73.15	9.69	97.09	687.5	SOUZA et al., 2020

PCS= Poder calorífico superior; CF= Carbono fixo; MV= Materiais voláteis; DM= Durabilidade mecânica; DB= Densidade básica.

Há uma grande versatilidade de biomassa que pode ser utilizada para produção de pellets, no entanto a matéria prima vai inferir diretamente nas propriedades dos pellets. Tumuluru (2018) estudando pellets produzidos a partir de lodo primário gerado na estação de tratamento de efluentes da indústria de celulose verificou baixa densidade aparente dos pellets, fato que pode ser explicado pela alta umidade do lodo durante o processo de peletização (TUMULURU, 2018). De acordo com a literatura a umidade ideal da biomassa para maximizar a densidade durante a peletização é de 10% (base úmida) (NGUYEN *et al.*, 2015; SANTANA *et al.*, 2020). O baixo teor de carbono fixo (CF) do lodo está relacionado com seu alto conteúdo de materiais voláteis de baixo poder calorífico, resultando na redução do poder calorífico superior da biomassa (SANTANA *et al.*, 2020).

A vantagem dos pellets do lodo primário gerado na indústria de celulose em relação às outras matérias primas está nas propriedades de resistência, uma vez que apresentou durabilidade mecânica de 99,3%, sendo superior até mesmo ao pinus (97,9%), matéria prima mais utilizada para produção de pellets no Brasil (BRAND *et al.*, 2021). A durabilidade mecânica é uma propriedade importante nos pellets, uma vez que determina a sua resistência à desintegração durante etapas de transporte e armazenamento (SILVA *et al.*, 2020).

Quando comparado com diferentes resíduos agroindústrias o lodo possui menor teor de cinzas, outro fato considerado vantajoso, uma vez que as cinzas reduzem o poder calorífico e provoca incrustações nos equipamentos (SILVA *et al.*, 2020; SCATOLINO *et al.*, 2018).

3.4.3. Utilização dos pellets

Os pellets são combustíveis cilíndricos densificados que podem ser empregados em vários setores, desde o uso residencial até a geração de energia em grande escala. Nos países europeus a prática mais comum é a utilização de pellets em fogões residenciais e aquecedores, apesar de que essa forma de utilização se limitar apenas a pellets produzidos a partir de madeira (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

Outra forma de uso que também vem sendo implementada é na gaseificação da biomassa através de pellets combustíveis, gerando gases que podem ser usados como combustíveis ou outros materiais de valor agregado. A aplicação no setor industrial para geração de energia também tem sido investigada. O objetivo é reduzir a demanda de

combustíveis fósseis na matriz energética industrial, utilizando os combustíveis renováveis de alta qualidade, uma opção foi a utilização de pellets de biomassa torrificada (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018; PROSKURINA *et al.*, 2017). A conversão de pellets em biocombustíveis gasosos e líquidos tem sido amplamente investigada, inclusive alguns estudos indicam a maior conversibilidade dos pellets em combustíveis líquidos quando comparado com a biomassa bruta (TUMULURU, 2018).

A avaliação da qualidade dos pellets é de extrema importância na sua aplicação e pode ser feita a partir de suas propriedades químicas, físicas, dimensionais e mecânicas. Todas essas características tem influência direta no desempenho do combustível, e podem ser avaliadas mediante normas específicas.

3.5. Análise SWOT

A conversão energética do lodo apresenta várias variáveis quanto sua viabilidade. A fim de se estabelecer um planejamento estratégico apresentando as vantagens e desvantagens alinhadas a fatores externos e internos foi realizada uma matriz SWOT (Tabela 5). Essa matriz permite a análise de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças ao estabelecer um novo sistema de gerenciamento do lodo, com foco na produção de energia.

As principais forças relatadas é a alta disponibilidade dessa matéria prima visto que as indústrias de celulose e papel geram cerca de 300-350 milhões de lodo por ano. O reaproveitamento de resíduos cria uma tendência de redução de áreas destinadas a aterros, promovendo economia com manutenção e transporte, fazendo com que o custo dessa biomassa seja negativo. O lodo é considerado uma fonte de energia renovável e sustentável que quando utilizado como combustível vai mitigar possíveis poluições do solo, água e ar que podem ser causadas por aterros mal supervisionados, além de apresentar-se como alternativa aos combustíveis fósseis. A composição do lodo é muito semelhante a da biomassa lignocelulósica que o deu origem, sendo rico em carboidratos e possuindo elevado poder calorífico superior (BRANCO; SERAFIM; XAVIER, 2018; COIMBRA *et al.*, 2015; GOTTUMUKKALA *et al.*, 2016; GURRAM *et al.*, 2015; NIJU; VIJAYAN, 2020; SETHUPATHY; SIVASHANMUGAM, 2021; ZAMBARE; CHRISTOPHER, 2020).

Tabela 5. Matriz SWOT apresentando as forças, fraquezas, oportunidades e ameaça da conversão energética do lodo

Forças	Fraquezas
<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade • Custo negativo • Sustentável • Fonte renovável • Substituição de combustíveis fósseis • Elevado poder calorífico superior • Alto teor de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Umidade • Baixa densidade • Composição variável • Estrutura lignocelulósica complexa • Alto teor de cinzas • Metais pesados • Emissões atmosféricas
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> • Objetivos do Desenvolvimento Sustentável • PL 513/2020 projeto de Lei que dispõe sobre o incentivo a empresas de recuperação energética a partir de fontes alternativas • Restrição do uso de aterros • Instabilidade política de combustíveis não renováveis • Biomassa moderna competitiva no mercado • Comercialização de um novo produto • Alta demanda energética • Consolidação da economia circular • Processo produtivo inovador 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo com obtenção e manutenção de equipamentos • Tecnologias de conversão • Operações logísticas complexas • Necessidade de pré-tratamento • Balanço energético negativo • Leis que restringem a queima de resíduos • Normas de comercialização

As principais fraquezas e ameaças no reaproveitamento energético do lodo estão relacionadas ao seu elevado teor de umidade, que muitas vezes requer secagem prévia, podendo promover um balanço energético negativo (ZAMBARE; CHRISTOPHER, 2020). Dependendo da finalidade, a baixa densidade do lodo também pode ser considerada um ponto fraco. Para produção de pellets, por exemplo, a densidade aparente da matéria prima interfere diretamente na densidade energética dos pellets produzidos (TUMULURU, 2018). A composição química do lodo, apesar de ser composta principalmente por carboidratos, existe outros componentes que podem interferir negativamente na valoração energética do lodo, como a presença de nitrogênio, enxofre e cloro que podem intensificar as emissões de gases prejudiciais durante a incineração (GOTTUMUKKALA *et al.*, 2016; SHI; KANG; LEE, 2015; ZAMBARE; CHRISTOPHER, 2020). O conteúdo de cinzas e metais pesados varia muito de acordo com a matéria prima utilizada e do processo de produção, mas pode promover contaminação do ar, perda energética e provocar corrosões nos equipamentos (MOHAMMADI *et al.*, 2019).

No que tange as oportunidades, muitas políticas de incentivo à valoração dos resíduos têm sido criadas, como as metas da união europeia em reduzir a utilização de combustíveis fósseis, aumentando o uso de fontes renováveis, incluindo resíduos agroindustriais. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, proposto pela ONU em 2015 também surge como incentivo à produção de energia limpa e a preservação (FERREIRA *et al.*, 2016; MOLINA-MORENO *et al.*, 2017; NIJU; VIJAYAN, 2020). Muito país da Europa já vem proibindo o uso de aterros, fazendo com que novas formas de manejo desses materiais sejam criadas. Com a crescente demanda energética do mundo, a utilização do lodo como combustível é cada vez mais atrativa, visto que é uma biomassa moderna com potencial energético promovendo à consolidação da economia circular (COIMBRA *et al.*, 2015; ZAMBARE; CHRISTOPHER, 2020).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Utilizou-se 97 kg de lodo primário proveniente do decantador primário do tratamento de efluentes com vazão em torno de $3800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de uma fábrica de polpa celulósica kraft branqueada de eucalipto, com uma sequência de branqueamento D(EP)DP localizada no

Brasil, que gera aproximadamente 40 kg de lodo primário por tonelada de polpa celulósica seca ao ar. O lodo primário foi amostrado após uma prensa parafuso e possuía umidade inicial de $\pm 60\%$ (base úmida). Após a obtenção do material, o mesmo foi submetido à secagem em estufa, com circulação forçada, a temperatura de 40°C , até atingirem teor de umidade, base úmida, de $\pm 30\%$, seguindo para a produção dos pellets. A temperatura utilizada durante a secagem teve como objetivo a remoção da água, de forma que não houvesse alterações físicas e químicas no lodo primário.

4.2. Métodos

4.2.1. Caracterização do lodo primário

O lodo primário foi caracterizado obtendo-se o teor de umidade, por meio de balança determinadora de umidade, Marca OHAUS modelo MB45, composição química elementar do lodo (C, H, N, S, O), de acordo com as normas EN 14774-1 e TAPPI Test T 266 om-18 utilizando o equipamento Analisador Elementar, modelo TruSpec CHN Micro, TruSpec S e TruSpec O (DIN, 2009; TAPPI, 2006).

O teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo foram determinados de acordo com a norma a norma EN 14774-1 (DIN, 2009).

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido por meio do método da bomba calorimétrica adiabática Parr 6300 calorimeter baseado na ASTM D2015 (ASTM, 1982). O teor de cloro total foi obtido a partir do analisador de cloro ECS 3000, segundo a norma SCAN-W 9:89 (SCAN, 1989).

4.2.2. Produção de Pellets

Os pellets foram produzidos com lodo primário com teor de umidade, base úmida, de $\pm 31\%$.

Os pellets foram produzidos em prensa peletizadora laboratorial com matriz circular horizontal da marca Amandus Kahl, modelo 14-175 (Figura 3), com capacidade para produção de $10 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, e para a alimentação da peletizadora, utilizou-se um sistema composto por moto redutor, controlador de velocidade e rosca sem fim. A matriz de peletização possui orifícios com comprimento de 30 mm e diâmetro de 7,5 mm na entrada e 6,3 mm na saída. A faca que define o tamanho dos pellets está a 20 mm da matriz. Foram produzidos três lotes de

pellets, sendo cada um com massa próxima de 1 quilo, totalizando aproximadamente 3 quilos.

Os pellets foram submetidos à secagem em estufa de circulação forçada a 40 ± 2 °C, por 14 horas até atingir a umidade, base úmida, de $\pm 6,7\%$.

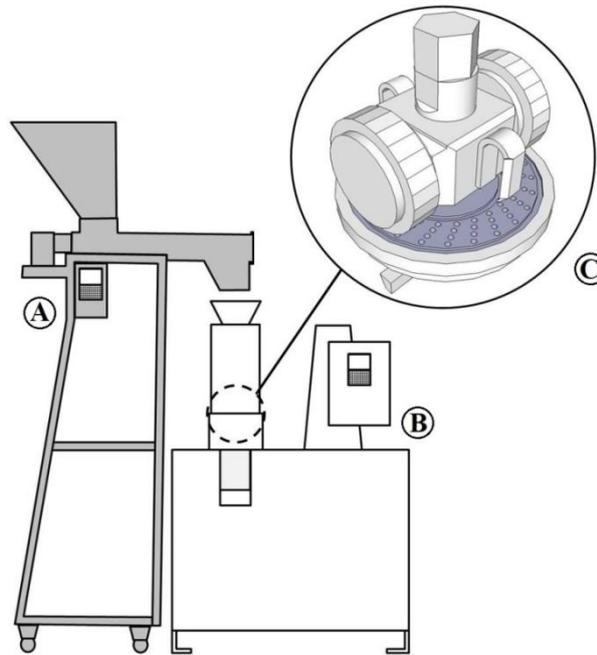


Figura 3. Peletizadora (B) com sistema de alimentação (A) e matriz de peletização com rolos de compactação (C). Fonte da Figura: MAGALHÃES (2016)

4.2.3. Propriedades dos pellets

A determinação do teor de umidade dos pellets, foi realizada de acordo com a Norma EN 14774-2 (DIN, 2010a), a densidade a granel (kg/m^3) foi feita de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010b). As dimensões dos pellets avaliados quanto ao diâmetro e ao comprimento foram obtidas utilizando um paquímetro digital e seguiu a norma EN 16127 (DIN, 2012).

Os ensaios de durabilidade mecânica e porcentagem de finos, partículas menores de 3,15 mm, foram realizados utilizando o equipamento Ligno-Tester, Holmen® (Figura 4) seguindo os procedimentos da norma EN 15210-1 (DIN, 2010c). Para a geração de finos, o fluxo de ar tinha pressão de 30 mbar e tempo de residência de 30 segundos. Em seguida, as amostras, sem finos, foram submetidas à um fluxo de ar controlado de 70 mbar, durante 60 segundos para determinação da durabilidade mecânica. O equipamento consiste na simulação do comportamento dos pellets durante operações de transporte e manuseios.

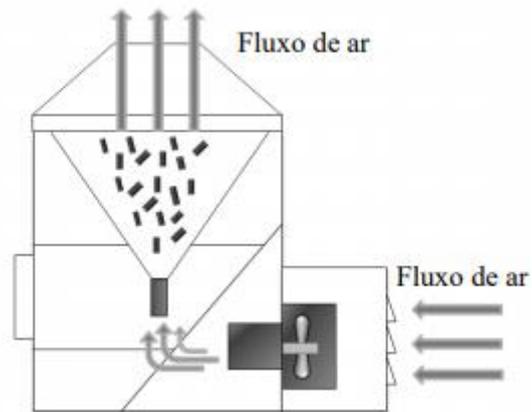


Figura 4. Equipamento Ligno-Tester, Holmen®. Fonte da Figura: PEREIRA (2014)

O poder calorífico superior foi obtido baseado na EN 14.918 (DIN, 2010d) e o poder calorífico útil (PCU) conforme o anexo E da norma DIN EN 14918 (DIN, 2010d).

Análise química imediata – Determinação do teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, de acordo com a NBR 8.112 (ABNT, 1986);

A densidade energética (GJ/m^3) foi obtida utilizando o produto do PCU pela densidade a granel. Para o cálculo do PCU para o lodo in natura e peletizado foi utilizado a umidade na base úmida de 31% e 6.7%, respectivamente.

Para se avaliar a degradação térmica do lodo durante o processo de peletização, foi realizada a caracterização termogravimétrica do lodo primário. Essa análise permite também avaliar algumas propriedades dos pellets e explicar seu comportamento durante a combustão. Análises termogravimétricas (TG/DTG) – foram realizadas no equipamento Shimadzu DTG 60H com fluxo de N_2 sintético (50 mL min^{-1}), faixa de temperatura de $25\text{-}1000^\circ\text{C}$ e taxa de aquecimento $10^\circ\text{C min}^{-1}$, utilizando massas de amostras de, aproximadamente, 2 mg, absolutamente secas.

4.2.4. Especificação dos pellets

A classificação dos pellets foi realizada e comparada com os limites estabelecidos na norma de comercializações de pellets europeias, EN 14.961-6 (DIN, 2012b) para pellets “não-madeira” destinado ao uso industrial (Tabela 6).

Tabela 6. Especificações para pellets não-madeireiros EN 14.961-6

Propriedade (Unidade)	Origem	
	A	B
	Mistura de biomassas; Biomassa herbácea; Biomassa de frutas	Mistura de biomassas; Biomassa herbácea; Biomassa de frutas
Diâmetro (mm)	6 ± 1	6 ± 1
Comprimento (mm)	$3,15 \leq C \leq 40$	$3,15 \leq C \leq 40$
Umidade, base úmida (%)	≤ 12	≤ 15
Umidade, base seca (%)	$\leq 13,6$	$\leq 17,6$
Teor de cinzas (%)	≤ 5	≤ 10
Durabilidade mecânica (%)	$\geq 97,5$	$\geq 96,0$
Finos (%)	≤ 2	≤ 3
Poder Calorífico Útil (MJ.kg⁻¹)	$\geq 14,1$	$\geq 13,2$
Densidade a granel (kg.m⁻³)	≥ 600	≥ 600
Nitrogênio (%)	$\leq 1,5$	$\leq 2,0$
Enxofre (%)	$\leq 0,20$	$\leq 0,20$
Cloro (%)	$< 0,20$	$< 0,30$

Fonte: Adaptado de DIN EN 14.961-6 (Deutsches Institut Für Normung, 2012b).

A Figura 5 está apresentando o fluxograma experimental da pesquisa, envolvendo todas as etapas necessárias para caracterização e produção dos lodos a partir dos lodos primários.

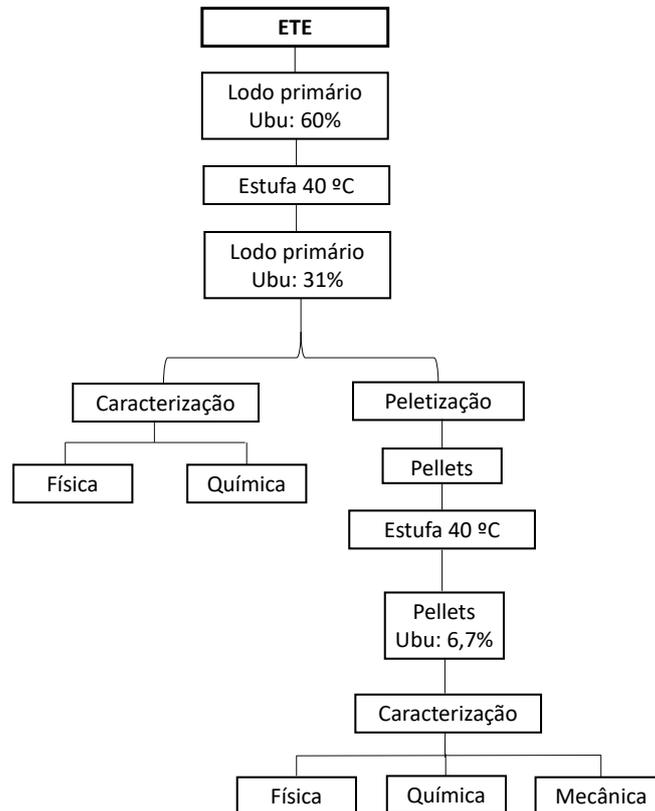


Figura 5. Fluxograma de caracterização e produção de pellets utilizando lodo primário

4.3. Análise estatística dos dados

O lodo primário foi caracterizado e a partir deles foram produzidos três lotes de pellets de lodo primário, realizou-se a análise descritiva dos pellets por meio dos valores médios, coeficiente de variação e desvio padrão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Propriedades químicas e energéticas do lodo *in natura* e peletizado

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios da caracterização do lodo primário antes e após a peletização.

Tabela 7. Caracterização do lodo primário e dos pellets produzidos

Parâmetros analisados	Lodo primário	Pellets
Poder calorífico superior (MJ.kg ⁻¹)	17,25 ^(0,0651)	17,00 ^(0,0266)
Poder calorífico útil (MJ.kg ⁻¹)	10,23	14,43
Teor de umidade _{bu} (%)	31,03 ^(0,389)	6,70 ^(0,012)
Densidade a granel (kg/m ³)	214 ^(5,188)	551 ^(9,445)
Densidade energética (GJ.m ⁻³)	2,19	7,95
Carbono fixo (%)	12,04	12,32
Material volátil (%)	86,75 ^(0,7986)	86,43 ^(0,1024)
Teor de cinzas (%)	1,21 ^(0,0834)	1,25 ^(0,0359)
Carbono (%)	45,80 ^(0,4243)	45,25 ^(0,0707)
Hidrogênio (%)	6,05 ^(0,0071)	6,23 ^(0,1626)
Oxigênio (%)	46,35 ^(0,0040)	46,9 ^(0,0001)
Nitrogênio (%)	0,065 ^(0,2120)	0,062 ^(0,0156)
Enxofre (%)	0,275 ^(0,0354)	0,266 ^(0,0438)
Cloro (%)	0,028 ^(0,0001)	0,028 ^(0,0001)
Finos (%)	-	0,06 ^(0,009)
Durabilidade	-	99,3 ^(0,124)

* Valores entre parênteses indicam desvio padrão da média.

Os valores médios de poder calorífico superior (PCS) obtidos para o lodo antes e após a formação dos pellets foram similares. O PCS está diretamente relacionado à composição do material. O processo de peletização modifica algumas propriedades físicas do lodo, mas mantém a composição química da estrutura da biomassa. O PCS representa a maior quantidade de energia que pode ser recuperada da biomassa (XING *et al.*, 2019).

O poder calorífico superior encontrado neste estudo (17,0 MJ kg⁻¹) apresentou valores próximos aos de outros resíduos lignocelulósicos. Scatolino *et al.* (2018) obtiveram em seus estudos valores de PCS de pellets produzidos a partir de resíduos de bagaço de soja e cana-de-açúcar de 16,77 e 17,46 MJ kg⁻¹, respectivamente (SCATOLINO *et al.*, 2018). Quando comparado aos pellets comerciais de *Pinus* (20,65 MJ kg⁻¹) e eucalipto (19,71 MJ kg⁻¹), esse valor ainda é um pouco menor (GARCIA *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2020). Isso pode ser explicado pelas maiores concentrações de lignina e carbono dessas biomassas, associadas ao menor teor de cinzas. Essas propriedades irão inferir diretamente nas características de energia do combustível (SANTANA *et al.*, 2020; SCATOLINO *et al.*, 2018).

O processo de peletização consiste na compactação da biomassa, causando um aumento na densidade energética, conforme mostrado na Tabela 7. De acordo com os resultados, a peletização aumentou a densidade a granel do lodo primário em 158% promovendo um aumento de 5,76 GJ.m⁻³ (263%) na quantidade de energia por unidade de

volume. O valor da densidade energética está diretamente relacionado com o PCU e com a densidade a granel. Valores mais altos de densidade energética tendem a reduzir os custos de transporte e facilitar o armazenamento e uso de energia de combustível, tornando o processo de peletização da biomassa atraente do ponto de vista econômico e prático (CASTRO *et al.*, 2021; GARCIA *et al.*, 2019; SANTANA *et al.*, 2020). Os fatores responsáveis pela obtenção do poder calorífico útil são o PCS, a composição elementar da biomassa e o teor de umidade (CARROL; FINNAN, 2012). Houve um aumento de 43,3% no PCU e foi ocasionado pela redução do teor de umidade do lodo. a relação entre PCU e teor de umidade pode ser evidenciada na Figura 6.

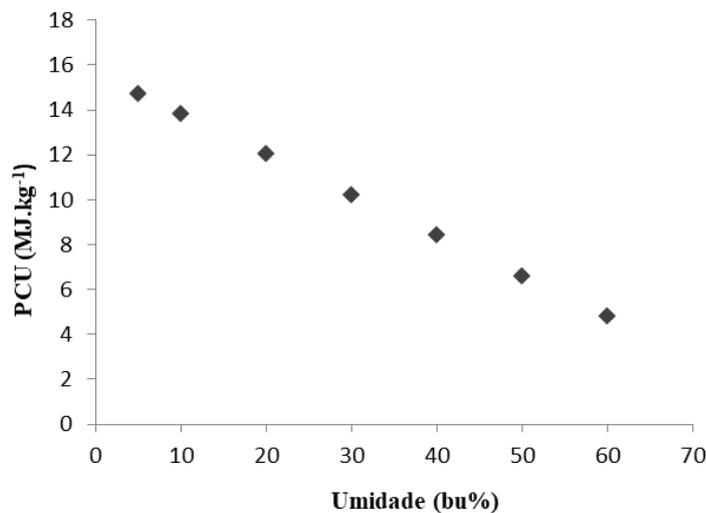


Figura 6. Relação entre o teor de umidade e o poder calorífico útil (PCU)

Para reduzir o teor de umidade dos lodos de 60% para 31% (base úmida) em um contexto industrial, sugere-se o aproveitamento da energia térmica que comumente se perde durante os processos fábrics, como no forno da cal, caldeira de biomassa e gases de combustão da caldeira de recuperação. A redução do teor de umidade dos pellets acontece em duas etapas, a primeira etapa é durante o processo de peletização, devido a elevação da temperatura do processo que ocorre como consequência do atrito da biomassa com a parede metálica da matriz, e a segunda etapa é posterior ao processo e consiste na redução do teor de umidade a partir da secagem dos pellets. Apesar de o presente trabalho ter utilizado estufa para atingir umidade final de 6,7%, em um contexto industrial não há essa necessidade, uma vez que o próprio processo de peletização pode reduzir de 12-14% do teor de umidade da biomassa. Nesse caso, o conteúdo de água ao final do processo estaria entre 17-19% o que já permitiria a utilização dos pellets como combustível na caldeira de biomassa (TUMULURU, 2018).

A presença da água no lodo primário foi de grande importância para a sua peletização, uma vez que a água atuou como um ligante, proporcionando o aumento nas interações entre as partículas pelas forças de van der Waals e redução da temperatura de transição vítrea de alguns componentes ligantes que estão presentes na biomassa. A influência do teor de umidade no processo auxiliou a obtenção de pellets de qualidade e com boas características de resistência. (MOSTAFA *et al.*, 2019; TUMULURU, 2018).

Os materiais voláteis e o carbono fixo encontrados nas amostras foram 86,75% e 12,32%, respectivamente. Combustíveis com alto teor de materiais voláteis e baixo teor de carbono fixo tendem a queimar mais rápido (GARCIA *et al.*, 2018). O teor de cinzas encontrado no lodo *in natura* (1,21%) e nos pellets produzidos (1,25%) foi superior ao observado por Lopes *et al.* (2018), que relatou 0,6% de cinzas no lodo primário de uma fábrica de celulose kraft branqueada que usa eucalipto como matéria-prima. O conteúdo de cinzas presente no lodo está diretamente relacionado com o tipo de polpa celulósica obtida ao fim do processo e os reagentes que são utilizados, sendo que indústrias que produzem celulose branqueada tendem a gerar resíduos com teores mais elevados de cinzas quando comprados às fábricas de celulose que produzem polpa marrom (BAJPAI, 2015c).

Altos valores de materiais voláteis e carbono fixo influenciam positivamente no poder calorífico do combustível, enquanto as cinzas têm efeito contrário, promovendo a redução do poder calorífico, além de serem responsáveis por incrustação e corrosão dos equipamentos (SANTANA *et al.*, 2020; SCATOLINO *et al.*, 2018).

O maior teor de cinzas do lodo pode ser explicado pela elevada quantidade de compostos inorgânicos que normalmente constituem o material. Os inorgânicos presentes nas cinzas dificultam a eficiência da combustão, mas têm sido amplamente utilizados para aplicação no solo como fonte de nutrientes agrícolas. Estudos também indicam que esses materiais podem ser utilizados na construção civil para a produção de clínquer (COSTA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2019; SIMÃO *et al.*, 2019).

De modo geral, não houve alterações nas propriedades químicas do lodo após a peletização, tal fato pode ser explicado devido as baixas temperaturas alcançadas durante o processo, as quais não ultrapassaram 70°C. Para que ocorram alterações químicas significativas no material essa temperatura deveria ser superior à 150°C. Temperaturas superiores a 110 °C durante a peletização pode resultar propriedades negativas nos pellets devido ao baixo módulo de elasticidade das partículas da biomassa e dos espaços vazios

formados. Para que ocorram modificações significativas (JIANG *et al.*, 2014).

O lodo primário consiste principalmente de fibras de celulose e hemicelulose, logo possui alto teor de carbono, oxigênio e hidrogênio em sua composição (MALAISKIENE *et al.*, 2018). Por outro lado, devido aos reagentes utilizados no processo de polpação (NaOH e Na₂S), o lodo gerado nas estações de tratamento de efluentes de fábrica de celulose kraft tem, em média, teor de enxofre de 0,275%. Normalmente, os resíduos da madeira bruta, como finos e cascas, têm teores de enxofre abaixo de 0,02%. Valores de enxofre acima de 0,1% podem causar a corrosão de equipamentos devido à presença de sais alcalinos na biomassa. Outro problema associado às concentrações de enxofre superiores a 0,2% é o aumento da emissão de óxidos de enxofre (SO_x) durante a queima (OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006; SOUZA *et al.*, 2020).

A peletização do lodo via rota úmida, não alterou o teor de cloro. A presença de cloro não é desejada na biomassa. Um teor de organoclorado superior a 0,2% pode causar danos significativos, uma vez que o cloro pode levar à deposição e corrosão de equipamentos, além de ser responsável pela emissão de gases como cloreto de hidrogênio (HCl) e cloreto de metila (CH₃Cl) (MARTINEZ *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017).

Enquanto o carbono, o hidrogênio e o enxofre atuam positivamente na liberação de energia durante a combustão, o oxigênio e o nitrogênio atuam negativamente, reduzindo a eficiência energética do processo. Eles também contribuem para a formação de compostos nitrogenados indesejáveis, como NO_x, N₂O e HCN (MARTINEZ *et al.*, 2019; OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006).

A durabilidade mecânica dos pellets pode afetar o nível de finos, uma vez que pellets com baixa durabilidade mecânica sofrem mais danos e podem se desintegrar durante o transporte e armazenamento, resultando em uma maior geração de finos (COSTA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2019). Os pellets produzidos a partir do lodo primário tiveram alta durabilidade mecânica (99,3%) e baixa geração de finos (0,062%), indicando uma alta resistência à desintegração mecânica do material. Um teor de finos de 0,1% e durabilidade mecânica de 99,12% podem ser encontrados em pellets comerciais de madeira de *Pinus* (SCATOLINO *et al.*, 2018). Esses resultados mostram que o processo de peletização úmido foi tecnicamente viável e produziu pellets mecanicamente resistentes ao aumentar as ligações interfibras

Após a formação dos pellets, o combustível apresentou uniformidade na forma e tamanho (Figura 7), tendo um comprimento e diâmetro médios de 18,2 e 5,9 mm,

respectivamente.

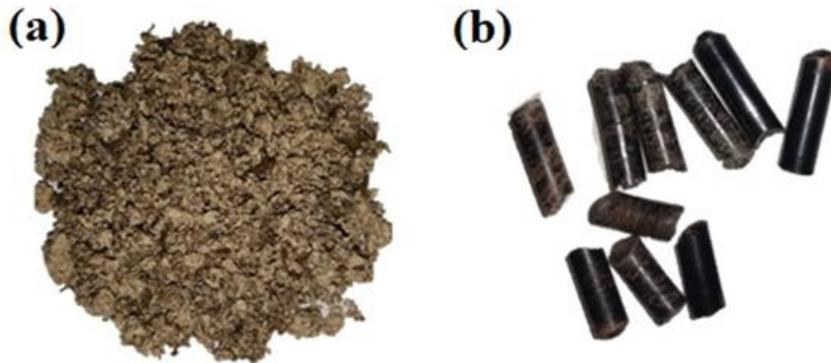


Figura 7. Lodo primário in natura (a) e pellets produzidos a partir do lodo primário (b)

5.2. Análise termogravimétrica (TG) do lodo primário

Na Figura 8 é apresentado o termograma de degradação térmica do lodo primário. Geralmente para curva da TG pode-se considerar quatro estágio, a fase de desidratação, combustão de materiais voláteis, combustão de carbono fixo e queima (JIANG *et al.*, 2014). Nota-se que existe um pico principal de perda de massa, correspondente ao pico da DTG (Derivative Thermogravimetry), entre as temperaturas de 254 a 389 °C. Essa perda de massa pode ser explicada pela degradação térmica dos principais constituintes da biomassa (celulose e hemicelulose). (MALAISKIENE *et al.*, 2018).

A degradação térmica da hemicelulose geralmente ocorre em temperaturas de 225 a 325 °C, enquanto a da celulose, por sua maior estabilidade térmica, ocorre entre 305 e 375 °C. Dentro desta faixa total (225 a 375 °C), uma perda significativa de massa do material pode ocorrer devido à decomposição de ambos os componentes (BURATTI *et al.*, 2015; PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006).

A lignina também vai estar presente no lodo, esse componente é conhecido pela sua alta resistência à degradação térmica. Ao contrário dos polissacarídeos citados anteriormente, a degradação da lignina ocorre em uma faixa ampla de temperatura de 100 °C até 900 °C, o que indica que a massa residual em temperaturas superiores a 400 °C tem em sua constituição lignina, uma vez que a celulose e hemicelulose já foram degradadas em temperaturas inferiores (YANG *et al.*, 2007; YARAS *et al.*, 2021). Lopes *et al.*, 2018 encontrou 5,7% de lignina no lodo primário gerado em uma fábrica de celulose branqueada, confirmando a presença desse componente na biomassa (LOPES *et al.*, 2018).

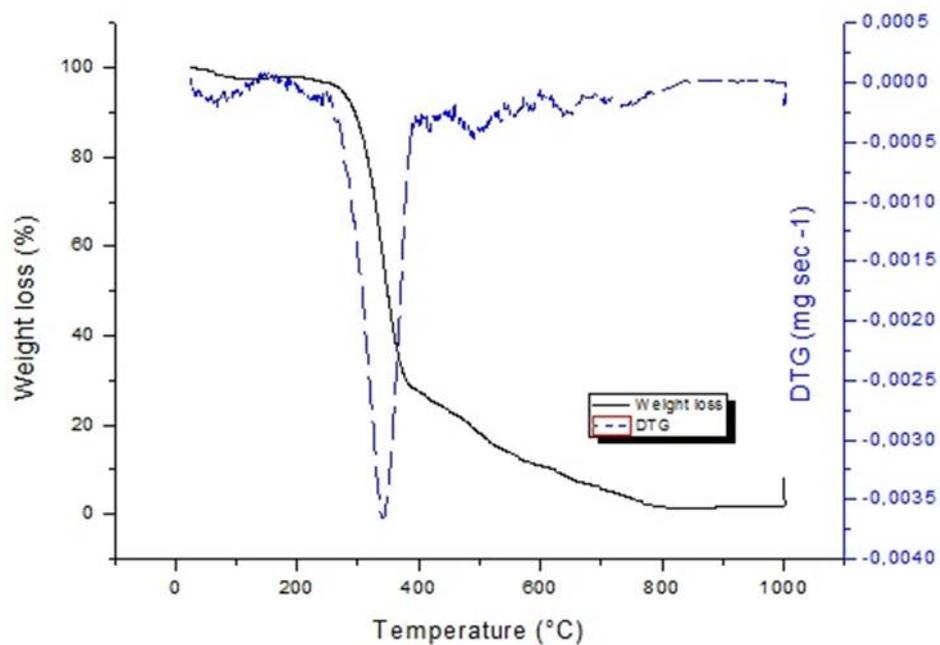


Figura 8. Curvas termogravimétricas (TG / DTG) com fluxo de nitrogênio sintético (50 mL min^{-1}) e relação de aquecimento de $10 \text{ }^\circ \text{C min}^{-1}$ lodo primário

5.2. Especificação de pellets de acordo com o padrão de qualidade europeu

Na Tabela 8 é apresentada a classificação dos pellets produzidos a partir de lodo primário, de acordo com a norma europeia de comercialização EN 14961-6 (DIN, 2012b) e os valores médios obtidos para os pellets de lodo.

Tabela 8. Classificação de pellets, não madeireiros, de acordo com a norma EN 14961-6

<i>Propriedades</i>	Valores especificados EN 14961-6	Pellets de lodo Primário
Umidade- base úmida (%)	≤ 15	6,7
Umidade- base seca (%)	$\leq 17,6$	7,18
Densidade a Granel (kg m^{-3})	≥ 600	551
Poder calorífico Útil (MJ kg^{-1})	$\geq 13,2$	14,43
Teor de Cinzas (%)	≤ 10	1,25
Diâmetro (mm)	6 ± 1	5,88
Comprimento (mm)	$3,15 \leq C \leq 40$	18,2
Durabilidade Mecânica (%)	≥ 96	99,3
Finos (%)	$\leq 3,0$	0,062
Nitrogênio (%)	$\leq 2,0$	0,062
Enxofre (%)	$\leq 0,2$	0,266
Cloro (%)	$\leq 0,3$	0,03

As propriedades dos pellets produzidos com lodo primário ficaram em consonância com os valores médios especificados na norma europeia EN 14961-6, exceto em relação à densidade a granel, que foi inferior (551 kg m^{-3}). A densidade dos pellets está diretamente relacionada com a densidade da biomassa da qual se originou e a taxa de compactação do processo. Outros fatores que também podem interferir na densidade são a umidade do material, o tamanho das partículas e a temperatura atingida durante sua formação. (CASTELLANO *et al.*, 2015).

A produção de pellets a partir do lodo primário foi realizada com 31% de umidade para garantir a formação e resistência mecânica dos pellets. Esse alto teor de umidade resultou na redução da temperatura do processo, que ficou em torno de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. O teor de umidade do lodo primário utilizado nesta pesquisa para a produção dos pellets foi superior ao utilizado por NOSEK *et al.* (2017) que utilizaram a biomassa com teores variando de 20-25%, base úmida. No entanto, em ambos os estudos alcançou-se altos valores de durabilidade mecânica atendendo ao especificado na norma europeia. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram a viabilidade de se produzir pellets a partir de biomassa com 31% de umidade, o que resulta em economia devido a menor demanda de energia para secagem do *in natura*.

Durante o processo de peletização, o material torna-se mais denso e o teor de umidade é reduzido, produzindo um material com maior poder calorífico útil e maior facilidade de armazenamento e transporte. Esses fatos possibilitam sua comercialização para outras indústrias. A utilização dos pellets dentro da própria fábrica também é uma alternativa interessante, uma vez que elimina operações de transporte a longas distâncias e permite o aumento da matriz energética industrial. A integração desses novos processos contribui para a redução de custos e de materiais dispostos em aterros, além da geração de novos produtos, fomentando dessa forma a economia circular (CARROLL; FINNAN, 2012; CASTELLANO *et al.*, 2015; GARCIA-MARAVÉ *et al.*, 2015).

Existem alguns fatores que devem ser considerados ao implementar a utilização de um novo combustível na caldeira, como sua granulometria, teor de umidade e poder calorífico. Geralmente na caldeira de biomassa os principais combustíveis utilizados são cavacos de madeira, finos e cascas (ORANG; TRAN, 2015). Os pellets entrariam como combustível complementar às biomassas já empregadas, uma análise criteriosa deve ser realizada para a obtenção das propriedades de queima desses combustíveis em conjunto. A densidade dos pellets associada a sua alta durabilidade mecânica pode tornar a queima do

combustível lenta interferindo na geração de vapor. A reação de queima é constituída por duas etapas principais, difusão do oxigênio (O_2) até a superfície da partícula e a cinética da reação heterogênea entre o carbono e O_2 que ocorre nessa superfície, combustíveis mais densos e de baixa superfície específica dificulta essas reações, tornando o processo de queima mais lento (MORGADO, 2019).

A ineficiência da combustão nas caldeiras de biomassa é um corriqueiro problema observado que ocorre devido à heterogeneidade do combustível, que possui diferentes teores de umidade e tamanhos granulométricos distintos. Como os pellets são materiais homogêneos, tanto em suas dimensões quanto em seu teor de umidade, esse combustível pode otimizar o funcionamento da caldeira, permitindo que a temperatura da câmara de combustão permaneça constante, o que proporciona estabilidade na pressão de vapor, resultando em maior eficiência energética (ORANG; TRAN, 2015).

5.3. Aspectos ambientais e econômicos

A peletização do lodo tem como principal vantagem a redução de resíduos destinados ao aterro. Os aterros são um dos principais responsáveis por emissões antropogênicas de gases poluentes, principalmente o gás metano (CH_4). Além de apresentar risco potencial de contaminação de lençóis freáticos e do solo, interferindo na biodiversidade do local e na qualidade de vida das pessoas que vivem ao seu entorno (NJOKU; EDOKPAYI; ODIYO, 2019).

Além dos aspectos ambientais e sociais mencionados, há ainda a questão econômica, uma vez que a disposição do lodo em aterros representa 60% dos custos totais da estação de tratamento de efluentes (GURRAM *et al.*, 2015). Quando há a realocação desse resíduo tornando-o matéria prima gera-se um saldo econômico positivo, uma vez que não serão necessárias operações realizadas no aterro, como transporte, manutenção e monitoramento.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a maior sustentabilidade da cadeia produtiva de celulose, uma vez que o processo de peletização permite a formação de um combustível auxiliar de alto desempenho para uso nas caldeiras, o que agrega valor ao lodo e garante a diversificação da matriz energética mundial (SANTANA *et al.*, 2020b). A proposta do referido trabalho oferece alternativas que auxiliam direto e indiretamente no cumprimento das metas do desenvolvimento sustentável (ODS), que foi proposto pela ONU em 2015.

6. CONCLUSÕES

O lodo primário in natura apresentou alto teor de umidade (60%) e os elementos mais presentes na sua constituição foram o carbono (45,8%), oxigênio (46,35%) e hidrogênio (6,05%). O poder calorífico do material ($17,25 \text{ MJ.kg}^{-1}$) foi similar a outros resíduos lignocelulósicos. A degradação térmica dos principais constituintes do lodo ocorreu em uma faixa de temperatura de 225-375 °C.

A utilização de lodo primário com 31% de umidade permitiu a formação de pellets com propriedades físicas e mecânicas adequadas para fins energéticos, atendendo aos critérios da norma europeia, exceto para a densidade a granel dos pellets. Os pellets apresentaram alta durabilidade mecânica (99,3%) e baixo teor de finos (0,062%). O processo de produção de pellets não promoveu alterações nas propriedades química da biomassa.

A peletização via processo úmido possibilitou a padronização de forma e tamanho, além disso, promoveu aumento na densidade a granel (158%) e da densidade energética (263%) do material. Tais características tornam o material atraente para processos de combustão visando à produção de energia, evitando o descarte em aterro.

7. RECOMENDAÇÕES

Realizar estudos de produção de pellets utilizando lodo primário e secundário definindo as melhores proporções de mistura de acordo com sua geração na fábrica;

Realizar estudos de produção de pellets com diferentes teores de umidades visando obter os parâmetros ótimos de produção;

Realizar estudos das propriedades de queima dos pellets de lodo na caldeira de biomassa, definindo a cinética das reações, combustibilidade, fusibilidade das cinzas, seja na combustão direta ou nos sistemas de co-combustão com outras biomassas;

Realizar estudos das emissões atmosféricas em detrimento da adição dos pellets de lodo como combustível complementar na caldeira de biomassa;

Realizar o estudo de viabilidade econômica da integração do processo de peletização na fábrica de celulose, levando em consideração o valor economizado com as operações de destinação do lodo para o aterro;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. A. R. de. **Avaliação técnica, econômica e ambiental do aproveitamento de lodos como combustível em fábrica de celulose**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2019.

ALVARENGA, P.; RODRIGUES, D.; MOURINHA, C.; PALMA, P.; VARENNE, A. de; CRUZ, N.; TARELHO, L. A. C.; RODRIGUES, S. Use of wastes from the pulp and paper industry for the remediation of soils degraded by mining activities: Chemical, biochemical and ecotoxicological effects. **Science of The Total Environment**, v. 686, p. 1152–1163, 10 out. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.038.

ASTM. **ASTM D2015 - Standard test method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the adiabatic bomb calorimeter**. Philadelphia, PA, U.S.A.: ASTM International - American Society for Testing and Materials, 1982.

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; PEDROTI, L. G. Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 335–346, 10 ago. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.011.

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. Technological and environmental comparative of the processing of primary sludge waste from paper industry for mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119336, 10 mar. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119336.

BAJPAI, P. Composition of Waste. *In*: BAJPAI, Pratima (org.). **Management of Pulp and Paper Mill Waste**. Cham: Springer International Publishing, 2015a. p. 19–29. DOI: 10.1007/978-3-319-11788-1_3.

BAJPAI, P. Generation of Waste in Pulp and Paper Mills. *In*: BAJPAI, Pratima (org.). **Management of Pulp and Paper Mill Waste**. Cham: Springer International Publishing, 2015c. p. 9–17. DOI 10.1007/978-3-319-11788-1_2.

BAJPAI, P. Options for Utilization of Waste. *In*: BAJPAI, Pratima (org.). **Management of Pulp and Paper Mill Waste**. Springer International Publishing, 2015d. p. 79–180. DOI 10.1007/978-3-319-11788-1_6.

BEKHTA, P.; SEDLIACIK, J.; KAČÍK, F.; NOSHCHENKO, G.; KLEINOVA, A. Lignocellulosic waste fibers and their application as a component of urea-formaldehyde adhesive composition in the manufacture of plywood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 77, p. 495–508, 6 abr. 2019. DOI: 10.1007/s00107-019-01409-8.

BHATT, D.; SHRESTHA, A.; DAHAL, R. K.; ACHARYA, B.; BASU, P.; MACEWEN, R. Hydrothermal Carbonization of Biosolids from Waste Water Treatment Plant. **Energies**, v. 11, n. 9, p. 2286, set. 2018. DOI: 10.3390/en11092286.

BRANCO, Rita; SERAFIM, Luísa; XAVIER, Ana. Second Generation Bioethanol Production: On the Use of Pulp and Paper Industry Wastes as Feedstock. **Fermentation**, v. 5, p. 4, 24 dez. 2018. DOI: 10.3390/fermentation5010004.

BRAND, M. A.; RODRIGUES, T. M.; SILVA, J. P. da; OLIVEIRA, J. Recovery of agricultural and wood wastes: The effect of biomass blends on the quality of pellets. **Fuel**, v. 284, p. 118881, 15 jan. 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118881.

BURATTI, C.; BARBANERA, M.; BARTOCCI, P.; FANTOZZI, F. Thermogravimetric analysis of the behavior of sub-bituminous coal and cellulosic ethanol residue during co-combustion. **Bioresource Technology**, v. 186, p. 154–162, 1 jun. 2015. DOI 10.1016/j.biortech.2015.03.041.

BURUBERRI, L. H.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, p. 252–260, 9 abr. 2015. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.12.053.

CALISTO, V.; FERREIRA, C. I. A.; SANTOS, S. M.; GIL, M. V.; OTERO, M.; ESTEVES, V. I. Production of adsorbents by pyrolysis of paper mill sludge and application on the removal of citalopram from water. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 335–344, 1 ago. 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.047.

CAO, Y.; PAWŁOWSKI, A. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1657–1665, 1 abr. 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2011.12.014.

CARRILLO-PARRA, A.; CONTRERAS-TREJO, J. C.; POMPA-GARCÍA, M.; PULGARÍN-GÁMIZ, M. A.; RUTIAGA-QUIÑONES, J. G.; PÁMANES-CARRASCO, G.; NGANGYO-HEYA, M. Agro-Pellets from Oil Palm Residues/Pine Sawdust Mixtures: Relationships of Their Physical, Mechanical and Energetic Properties, with the Raw Material Chemical Structure. **Applied Sciences**, v. 10, n. 18, p. 6383, jan. 2020. DOI: 10.3390/app10186383.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151–159, 1 jun. 2012. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.03.012.

CASTELLANO, J. M.; GÓMEZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; ESTEBAN, L. S.; CARRASCO, J. E. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **Fuel**, v. 139, p. 629–636, 1 jan. 2015. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.033.

CASTRO, J. de S.; ASSEMANY, P. P.; CARNEIRO, A. C. de O.; FERREIRA, J.; JESUS JÚNIOR, M. M.; RODRIGUES, F. de A.; CALIJURI, M. L. Hydrothermal carbonization of microalgae biomass produced in agro-industrial effluent: Products, characterization and applications. **Science of The Total Environment**, v. 768, p.1480, 10 maio 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144480.

CASTRO, P. G. S.; SIQUEIRA, H. F.; CASTRO, V. R.; ZANUNCIO, A. J. V.; ZANUNCIO, J. C.; BERGER, M. da S.; MARTINS, F. D. R.; CARNEIRO, A. de C. O.; GOMINHO, J.; ARAÚJO, S. de O. Quality of Pinus sp. pellets with kraft lignin and starch addition. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 900, 13 jan. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78918-7>.

CAVDAR, A. D.; YEL, H.; BORAN, S.; PESMAN, E. Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 410–416, 1 jul. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.099.

CHEN, H.; HAN, Q.; DANIEL, K.; VENDITTI, R.; JAMEEL, H. Conversion of Industrial Paper Sludge to Ethanol: Fractionation of Sludge and Its Impact. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 174, 28 ago. 2014. DOI: 10.1007/s12010-014-1083-z.

COIMBRA, R. N.; PANIAGUA, S.; ESCAPA, C.; CALVO, L. F.; OTERO, M. Thermal Valorization of Pulp Mill Sludge by Co-processing with Coal. **Waste and Biomass Valorization**, v. 7, n. 4, p. 995–1006, 1 ago. 2016. DOI 10.1007/s12649-016-9524-2.

COIMBRA, R. N.; PANIAGUA, S.; ESCAPA, C.; CALVO, L. F.; OTERO, M. Combustion of primary and secondary pulp mill sludge and their respective blends with coal: A thermogravimetric assessment. **Renewable Energy**, v. 83, p. 1050–1058, 1 nov. 2015. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.046.

COSTA, T. P. da; QUINTEIRO, P.; TARELHO, L. A. C.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. **Waste Management**, v. 101, p. 126–140, 1 jan. 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.10.006.

DIN. **DIN EN 14774-1 - Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method**. Berlin, BE, Germany: DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2009.

DIN. **DIN EN 14774-2 - Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method**. Berlin, BE, Germany: DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010a.

DIN. **DIN EN 14918 - Determination of calorific value**. Berlin, BE, Germany: DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010b.

DIN. **DIN EN 15103 - Solid biofuels - Determination of bulk density**. Berlin, BE, Germany: DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010c.

DIN. **DIN EN 15210-1 - Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets**. Berlin, BE, Germany: DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010d.

DIN. **DIN EN 16127 - Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets**. Berlin, BE, Germany: DIN-DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2012.

DU, H.; PARIT, M.; WU, M.; CHE, X.; WANG, Y.; ZHANG, M.; WANG, R.; ZHANG, X.; JIANG, Z.; LI, B. Sustainable valorization of paper mill sludge into cellulose nanofibrils and

cellulose nanopaper. **Journal of Hazardous Materials**, v. 400, p. 123106, 5 dez. 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123106.

ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T. Survey benchmarks generation, management of solid residues. **Pulp Pap**, v. 79, n. 12, p. 49–55, 2005. DOI: 10.1016/j.watres.2007.06.017

FAHIM, S.; NISAR, N.; AHMAD, Z.; ASGHAR, Z.; SAID, A.; ATIF, S.; GHANI, N.; QURESHI, N.; SOOMRO, G. A.; IQBAL, M.; NAZIR, A. Managing Paper and Pulp Industry By-Product Waste Utilizing Sludge as a Bio-Fertilizer. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 28, n. 1, p. 83–90, 20 nov. 2018. DOI: 10.15244/pjoes/83614.

FANG, S.; YU, Z.; MA, X.; LIN, Y.; LIN, Y.; CHEN, L.; FAN, Y.; LIAO, Y. Co-pyrolysis characters between combustible solid waste and paper mill sludge by TG-FTIR and Py-GC/MS. **Energy Conversion and Management**, v. 144, p. 114–122, 1 jul. 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.046.

FAUBERT, P.; BARNABÉ, S.; BOUCHARD, S.; CÔTÉ, R.; VILLENEUVE, C. Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 108, p. 107–133, 1 mar. 2016a. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.01.007.

FAUBERT, P.; BÉLISLE, C. L.; BERTRAND, N.; BOUCHARD, S.; CHANTIGNY, M. H.; PARÉ, M. C.; ROCHETTE, P.; ZIADI, N.; VILLENEUVE, C. Land application of pulp and paper mill sludge may reduce greenhouse gas emissions compared to landfilling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 150, p. 104415, 1 nov. 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104415.

FAUBERT, P.; LEMAY-BÉLISLE, C.; BERTRAND, N.; BOUCHARD, S.; CHANTIGNY, M. H.; DUROCHER, S.; PARÉ, M. C.; ROCHETTE, P.; TREMBLAY, P.; ZIADI, N.; VILLENEUVE, C. Greenhouse gas emissions following land application of pulp and paper mill sludge on a clay loam soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 250, p. 102–112, 1 dez. 2017. DOI: 10.1016/j.agee.2017.07.040.

FERREIRA, C. I. A.; CALISTO, V.; OTERO, M.; NADAIS, H.; ESTEVES, V. I. Comparative adsorption evaluation of biochars from paper mill sludge with commercial activated carbon for the removal of fish anaesthetics from water in Recirculating Aquaculture Systems. **Aquacultural Engineering**, v. 74, p. 76–83, 1 set. 2016. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2016.06.003.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F. H. A.; PROTÁSIO, T. de P. Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). **Renewable Energy**, v. 139, p. 796–805, 1 ago. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.103.

GARCÍA, R.; GIL, M. V.; RUBIERA, F.; PEVIDA, C. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. **Fuel**, v. 251, p. 739–753, 1 set. 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.141.

GARCIA-MARAVAR, A.; RODRIGUEZ, M. L.; SERRANO-BERNARDO, F.; DIAZ, L. F.; ZAMORANO, M. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive

trees. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 1–7, 1 jan. 2015. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.08.018.

GOEL, G.; KALAMDHAD, A. S. An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 334–343, 1 set. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.087.

GOTTUMUKKALA, L. D.; HAIGH, K.; COLLARD, F. X.; RENSBURG, E. V.; GÖRGENS, J. Opportunities and prospects of biorefinery-based valorisation of pulp and paper sludge. **Bioresource Technology**, Waste Biorefinery - Advocating Circular Economy. v. 215, p. 37–49, 1 set. 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.015.

GRIMM, A.; ETULA, J.; SALH, R.; KALÉN, G.; SEGERSTRÖM, M.; BRÜCHER, J.; SÖDERBERG, C.; SOUKUP, D.; PFEIFER, C.; LARSSON, S. Slagging and fouling characteristics during co-combustion of Scots pine bark with low-temperature dried pulp and paper mill chemical sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 193, p. 282–294, out. 2019. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.05.019.

GUEDES, R. E.; LUNA, A. S.; TORRES, A. R. Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 129, p. 134–149, 1 jan. 2018. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.11.019.

GURRAM, R. N.; AL-SHANNAG, M.; LECHER, N. J.; DUNCAN, S. M.; SINGSAAS, E. L.; ALKASRAWI, M. Bioconversion of paper mill sludge to bioethanol in the presence of accelerants or hydrogen peroxide pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 192, p. 529–539, set. 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.06.010.

HEILAND, C. **Alternativas de destino de lodo biológico em indústrias de celulose – Processo Kraft**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologia de Produção de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

HUANG, Y.; FINELL, M.; LARSSON, S.; WANG, X.; ZHANG, J.; WEI, R.; LIU, L. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 98, p. 8–14, mar. 2017. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.01.002.

JARIA, G.; CALISTO, V.; SILVA, C. P.; GIL, M. V.; OTERO, M.; ESTEVES, V. I. Obtaining granular activated carbon from paper mill sludge – A challenge for application in the removal of pharmaceuticals from wastewater. **Science of The Total Environment**, v. 653, p. 393–400, 25 fev. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.346.

JARIA, G.; SILVA, C. P.; FERREIRA, C. I. A.; OTERO, M.; CALISTO, V. Sludge from paper mill effluent treatment as raw material to produce carbon adsorbents: An alternative waste management strategy. **Journal of Environmental Management**, v. 188, p. 203–211, 1 mar. 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.004.

JARIA, G.; SILVA, C. P.; OLIVEIRA, J. A. B. P.; SANTOS, S. M.; GIL, M. V.; OTERO, M.; CALISTO, V.; ESTEVES, V. I. Production of highly efficient activated carbons from industrial wastes for the removal of pharmaceuticals from water—A full factorial design.

Journal of Hazardous Materials, II International Caparica Congress on Pollutant Toxic Ions and Molecules. v. 370, p. 212–218, 15 maio 2019. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.053.

JIANG, L.; LIANG, J.; YUAN, X.; LI, H.; LI, C.; XIAO, Z.; HUANG, H.; WANG, H.; ZENG, G. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*, v. 166, p. 435–443, ago. 2014. DOI:10.1016/j.biortech.2014.05.077.

JIANG, L.; YUAN, X.; XIAO, Z.; LIANG, J.; LI, H.; CAO, L.; WANG, H.; CHEN, X.; ZENG, G. A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties. **Energy Conversion and Management**, v. 126, p. 509–515, 15 out. 2016. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.035.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337–359, Mar. 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005

KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 114, p. 326–342, abr. 2015. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.05.005.

KHAN, T. A.; SAUD, A. S.; JAMARI, S. S.; RAHIM, M. H. A.; PARK, J. W.; KIM, H. J. Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for carbon rich material preparation: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 130, p. 105384, 1 nov. 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105384.

KUOSA, M.; KOPRA, R. Novel methods for monitoring the sludge dewatering operation of a belt filter: a mill study. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 34, n. 4, seç. Nordic Pulp & Paper Research Journal, p. 550–557, 18 nov. 2019. DOI: 10.1515/npprj-2019-0012.

LEE, J. Y.; KIM, C. H.; KOWN, S.; PARK, H. H. Effect of composting of paper mill sludge for land spreading. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 32, n. 4, p. 691–698, 20 dez. 2017. DOI: 10.3183/npprj-2017-32-04_p691-698_kim.

LIKON, M.; TREBSE, P. Recent Advances in Paper Mill Sludge Management. **Chemosphere**, v. 277, p. 130–310, ago. 2012. DOI: 10.5772/37043.

LOPES, A. do C. P.; SILVA, C. M.; ROSA, A. P.; RODRIGUES, F. de A.. Biogas production from thermophilic anaerobic digestion of kraft pulp mill sludge. **Renewable Energy**, v. 124, p. 40–49, 1 ago. 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.044.

MAGALHÃES, M. A. de. **Tratamento térmico de partículas e pellets de madeira em reator tipo rosca sem fim**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

MÄKELÄ, M.; FRAIKIN, L.; LÉONARD, A.; BENAVENTE, V.; FULLANA, A. Predicting the drying properties of sludge based on hydrothermal treatment under subcritical conditions. **Water Research**, v. 91, p. 11–18, 15 mar. 2016. DOI: 10.1016/j.watres.2015.12.043.

MALAIKIENE, J.; KIZINIEVIC, O.; KIZINIEVIC, V.; BORIS, R. The impact of primary sludge from paper industry on the properties of hardened cement paste and mortar.

Construction and Building Materials, v. 172, p. 553–561, 30 maio 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.011.

MARTINEZ, C. L. M.; ROCHA, E. P. A.; CARNEIRO, A. de C. O.; GOMES, F. J. B.; BATALHA, L. A. R.; VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 68–76, 1 jan. 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.003.

MATÚŠ, M.; KRÍŽAN, P.; ŠOOŠ, 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, 1 maio 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.089.

MOHAMMADI, A.; SANDBERG, M.; VENKATESH, G.; ESKANDARI, S.; DALGAARD, T.; JOSEPH, S.; GRANSTRÖM, K. Environmental performance of end-of-life handling alternatives for paper-and-pulp-mill sludge: Using digestate as a source of energy or for biochar production. **Energy**, v. 182, p. 594–605, 1 set. 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.065.

MOLINA-MORENO, V.; LEYVA-DÍAZ, J. C.; SÁNCHEZ-MOLINA, J.; PEÑA-GARCÍA, A. Proposal to Foster Sustainability through Circular Economy-Based Engineering: A Profitable Chain from Waste Management to Tunnel Lighting. **Sustainability**, v. 9, n. 12, p. 22-29, dez. 2017. DOI: 10.3390/su9122229.

MONTE, M. C.; FUENTE, E.; BLANCO, A.; NEGRO, C. Waste management from pulp and paper production in the European Union. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 293–308, 1 jan. 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.02.002.

MORGADO, G. A. G. **Estudo da queima de briquetes de biomassa numa caldeira**. 2019. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.

MOSTAFA, M. E.; HU, S.; WANG, Y.; SU, S.; HU, X.; ELSAYED, S. A.; XIANG, J. The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 332–348, maio 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.053.

NIELSEN, S. K.; MANDØ, M.; ROSENØRN, A. B. Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. **Powder Technology**, v. 364, p. 971–985, 15 mar. 2020. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.10.051.

Niju S., Vijayan V. Paper Mill Sludge as a Potential Feedstock for Microbial Ethanol Production. In: Srivastava N., Srivastava M., Mishra P.K., Gupta V.K. (eds) **Microbial Strategies for Techno-economic Biofuel Production. Clean Energy Production Technologies**. Springer International Publishing 19 set. 2019. DOI: 10.1007/978-981-15-7190-9_2

NGUYEN, Q. N.; CLOUTIER, A.; ACHIM, A.; STEVANOVIC, T. Effect of process parameters and raw material characteristics on physical and mechanical properties of wood

pellets made from sugar maple particles. **Biomass and Bioenergy**, v. 80, p. 338–349, 1 set. 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.06.010.

NJOKU, P. O.; EDOKPAYI, J. N.; ODIYO, J. O. Health and Environmental Risks of Residents Living Close to a Landfill: A Case Study of Thohoyandou Landfill, Limpopo Province, South Africa. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 12, p. 2125, jan. 2019. DOI: 10.3390/ijerph16122125.

NOSEK, R.; HOLUBCIK, M.; JANDACKA, J.; RADACOVSKA, L. Analysis of Paper Sludge Pellets for Energy Utilization. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 7032–7040, 7 ago. 2017. DOI: 10.15376/biores.12.4.7032-7040

NOSEK, R.; WERLE, S.; BORSUKIEWICZ, A.; ŻELAZNA, A.; ŁAGÓD, G. Investigation of Pellet Properties Produced from a Mix of Straw and Paper Sludge. **Applied Sciences**, v. 10, n. 16, p. 5450, jan. 2020. DOI: 10.3390/app10165450.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. **Applied Energy**, v. 127, p. 135–140, 15 ago. 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.042.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 653–669, 1 dez. 2004. DOI 10.1016/j.biombioe.2003.07.006.

ORANG, N.; TRAN, Ho.. Effect of feedstock moisture content on biomass boiler operation. **Tappi Journal**, v. 14, p. 629–637, out. 2015. DOI: 10.32964/TJ14.10.629.

OUADI, M.; BRAMMER, J. G.; YANG, Y.; HORNUNG, A.; KAY, M. The intermediate pyrolysis of de-inking sludge to produce a sustainable liquid fuel. **Journal of Analytical and**

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

PERVAIZ, M.; SAIN, M. Recycling of Paper Mill Biosolids: A Review on Current Practices and Emerging Biorefinery Initiatives. **CLEAN – Soil, Air, Water**, v. 43, n. 6, p. 919–926, 2015. DOI: 10.1002/clen.201400590.

PETERSON, A. A.; VOGEL, F.; LACHANCE, P. R.; FRÖLING, M.; MICHAEL J. ANTAL; TESTER, W. J. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: A review of sub- and supercritical water technologies. **Energy & Environmental Science**, v. 1, n. 1, p. 32–65, 2008. DOI: 10.1039/B810100K.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater a review. **Science of The Total Environment**, v. 333, n. 1, p. 37–58, 15 out. 2004. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.05.017.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. **Fuel Processing Technology**, v. 181, p. 215–232, 1 dez. 2018. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.09.021.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, n. 1, p. 28–34, 1 ago. 2006. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.01.002.

PROSKURINA, S.; HEINIMÖ, J.; SCHIPFER, F.; VAKKILAINEN, E. Biomass for industrial applications: The role of torrefaction. **Renewable Energy**, v. 111, p. 265–274, 1 out. 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.04.015.

RECKAMP, J. M.; GARRIDO, R. A.; SATRIO, J. A. Selective pyrolysis of paper mill sludge by using pretreatment processes to enhance the quality of bio-oil and biochar products. **Biomass and Bioenergy**, v. 71, p. 235–244, dez. 2014. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.10.003.

RENTIZELAS, A. A.; TOLIS, A. J.; TATSIPOULOS, I. P. Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 4, p. 887–894, maio 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2008.01.003.

RIDOUT, A. J.; CARRIER, M.; COLLARD, F. X.; GÖRGENS, J. Energy conversion assessment of vacuum, slow and fast pyrolysis processes for low and high ash paper waste sludge. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 103–114, mar. 2016. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.043.

RODRIGUEZ, D. R. O.; ANDRADE, G. de C.; BELLOTE, A. F. J.; TOMAZELLO-FILHO, M. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p. 179–189, 15 ago. 2018. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.016.

ROSA, T. S. da; TRIANOSKI, R.; MICHAUD, F.; BELLONCLE, C.; IWAKIRI, S. Efficiency of Different Acetylation Methods Applied to Cellulose Fibers Waste from Pulp and Paper Mill Sludge. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–14, 15 mar. 2020. DOI: 10.1080/15440478.2020.1731909.

SAARI, J.; SERMYAGINA, E.; KAIKKO, J.; HAIDER, M.; HAMAGUCHI, M.; VAKKILAINEN, E.. Evaluation of the Energy Efficiency Improvement Potential through Back-End Heat Recovery in the Kraft Recovery Boiler. *Energies*, v. 14, n. 6, p. 15-50, jan. 2021. DOI:10.3390/en14061550.

SAHA, N.; SABA, A.; SAHA, P.; MCGAUGHY, K.; FRANQUI-VILLANUEVA, D.; ORTS, W. J.; HART-COOPER, W. M.; REZA, M. T. Hydrothermal Carbonization of Various Paper Mill Sludges: An Observation of Solid Fuel Properties. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 8-58, jan. 2019. DOI: 10.3390/en12050858.

SANTANA, D. A. R.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; BARROS, Udson de O. B.; GARCIA, D. P.; ANDRADE, C. R.; CARNEIRO, A. de C. O.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. de P. Pelletizing of lignocellulosic wastes as an environmentally friendly solution for the energy supply: insights on the properties of pellets from Brazilian biomasses. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 11598-11617, 30 out. 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-11401-y.

SCAN. **Scan – W.9: 89. Organically bound chlorine by the AOX method**. Stockholm, Sweden: Scanbdina – VIAN Pouep, Paper and Board, 1 fev. 1989.

SCATOLINO, M. V.; NETO, L. F. C.; PROTÁSIO, T. de P.; CARNEIRO, A. de C. O.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; MENDES, L. M. Options for Generation of Sustainable Energy: Production of Pellets Based on Combinations Between Lignocellulosic Biomasses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 3, p. 479–489, 1 mar. 2018. DOI: 10.1007/s12649-017-0010-2.

SETHUPATHY, A.; SIVASHANMUGAM, P. Amelioration of methane production efficiency of paper industry waste sludge through hydrolytic enzymes assisted with poly3hydroxybutyrate. **Energy**, v. 214, p. 119083, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119083.

SHAW, M; **Feedstock and process variables influencing biomass densification**. PhD dissertation submitted to Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada; 2008.

SHI, S.; KANG, L.; LEE, Y. Y. Production of Lactic Acid from the Mixture of Softwood Pre-hydrolysate and Paper Mill Sludge by Simultaneous Saccharification and Fermentation. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 175, n. 5, p. 2741–2754, 1 mar. 2015. DOI: 10.1007/s12010-014-1451-8.

SILVA, C. P.; JARIA, G.; OTERO, M.; ESTEVES, V. I.; CALISTO, V. Adsorption of pharmaceuticals from biologically treated municipal wastewater using paper mill sludge-based activated carbon. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 13, p. 13173–13184, 21 mar. 2019. DOI: 10.1007/s11356-019-04823-w.

SILVA, C. M. S. da; VITAL, B. R.; RODRIGUES, F. de A.; ALMEIDA, Ê. W. de; CARNEIRO, A. de C. O.; CÂNDIDO, W. L.. Hydrothermal and organic-chemical treatments of eucalyptus biomass for industrial purposes. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121731, 1 out. 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121731.

SILVA, S. B.; ARANTES, M. D. C.; ANDRADE, J. K. B.; ANDRADE, C. R.; CARNEIRO, A. de C. O.; PROTÁSIO, T. de 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, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.131

SIMÃO, L.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 35, n. 1, p. 237–246, 31 jan. 2019. DOI: 10.20937/RICA.2019.35.01.17.

SOUZA, H. J. P. L.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; ANDRADE, C. R.; CARNEIRO, A. de C. O.; SOUZA, D. P. L.; PROTÁSIO, T. de P. Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. **Renewable Energy**, v. 149, p. 128–140, 1 abr. 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.015.

STREZOV, V.; EVANS, T. J. Thermal processing of paper sludge and characterisation of its pyrolysis products. **Waste Management**, First international conference on environmental management, engineering, planning and economics. v. 29, n. 5, p. 1644–1648, maio 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.11.024.

TAN, P.; MA, L.; XIA, J.; FANG, Q.; ZHANG, C.; CHEN, G. Co-firing sludge in a pulverized coal-fired utility boiler: Combustion characteristics and economic impacts. *Energy*, v. 119, p. 392–399, 15 jan. 2017. DOI:10.1016/j.energy.2016.12.084.

TAPPI. **TAPPI T 257 om-85 - Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta, GA, U.S.A: TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry, 1985.

TAPPI. **TAPPI T 266 om-18 - Determination of Sodium, Calcium, Copper, Iron, and Manganese in Pulp and Paper by Atomic Absorption Spectroscopy**. Atlanta, GA, U.S.A: TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry, 2006.

TUMULURU, J. S. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*, v. 1, n. 1, p. 44–54, 1 abr. 2018. DOI: 10.1016/j.crcon.2018.06.002.

VAEZ, E.; ZILOUEI, H. Towards the development of biofuel production from paper mill effluent. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1408–1415, 1 fev. 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.059.

VELUCHAMY, C.; KALAMDHAD, A. S. Screening of different thermal heating processes for increased methane production from lignocellulose waste material. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12 jul. 2020. DOI: 10.1007/s13399-020-00886-9.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M.; RODRIGUEZ, R. J. Sanchez; CANDIDO, V. S.; MONTEIRO, S. N. Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. *Applied Clay Science*, v. 133, p. 753–759, nov. 2016. DOI: 10.1016/j.clay.2016.07.001.

WANG, Y.; WU, H.; SÁROSSY, Z.; DONG, C.; GLARBORG, P. Release and transformation of chlorine and potassium during pyrolysis of KCl doped biomass. *Fuel*, v. 197, p. 422–432, jun. 2017. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.02.046

WARAJANONT, S.; SOPONPONGPIPAT, N. Effect of particle size and moisture content on cassava root pellet fuel's qualities follow the acceptance of pellet fuel standard. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 2, n. 2, p. 74-79, 2 mar. 2013. DOI: 10.11648/j.ijrse.20130202.17.

XIAO, Z.; YUAN, X.; JIANG, L.; CHEN, X.; LI, H.; ZENG, G.; LENG, L.; WANG, H.; HUANG, H. Energy recovery and secondary pollutant emission from the combustion of co-pelletized fuel from municipal sewage sludge and wood sawdust. *Energy*, v. 91, p. 441–450, nov. 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.08.077.

XIE, T.; WEI, R.; WANG, Z.; WANG, J. Comparative analysis of thermal oxidative decomposition and fire characteristics for different straw powders via thermogravimetry and cone calorimetry. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 134, p. 121–130, fev. 2020. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.028.

XING, J.; LUO, K.; WANG, H.; GAO, Z.; FAN, J. A comprehensive study on estimating higher heating value of biomass from proximate and ultimate analysis with machine learning approaches. *Energy*, v. 188, p. 116077, dez. 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116077.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, v. 86, n. 12, p. 1781–1788, ago. 2007. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

YARAS, A. Combined effects of paper mill sludge and carbonation sludge on characteristics of fired clay bricks. ***Construction and Building Materials***, v. 249, p. 118722, 20 jul. 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118722.

YARAS, A.; DEMIREL, B.; AKKURT, F.; ARSLANOGLU, H. Thermal conversion behavior of paper mill sludge: characterization, kinetic, and thermodynamic analyses. ***Biomass Conversion and Biorefinery***, 3 jan. 2021. DOI: 10.1007/s13399-020-01232-9.

ZAMBARE, V. P.; CHRISTOPHER, L. P. Integrated biorefinery approach to utilization of pulp and paper mill sludge for value-added products. ***Journal of Cleaner Production***, v. 274, p. 122791, 20 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122791.