

**O POTENCIAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE LODO DE FRIGORÍFICO E SERRAGEM DE MADEIRA****THE POTENTIALITY OF THE ENERGY GENERATION FROM SLAUGHTERHOUSE SLUDGE AND WOOD SAWDUST**

MENEZES, Kadja Maisa da Silva<sup>1\*</sup>; PRADOS, Carolina Porto<sup>2</sup>; FIGUEREDO, Kytéria Sabina Lopes de<sup>3</sup>;

<sup>1,2</sup> Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Gurupi, Colegiado de Ciências Exatas e Biotecnológicas, Gurupi, Tocantins, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Curso de Engenharia Ambiental, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

\* *Autor correspondente*  
e-mail: carolinaprados@mail.uft.edu.br

Received 05 August 2019; received in revised form 18 October 2019; accepted 18 October 2019

**RESUMO**

A utilização de resíduos para produção de energia através de processos como pirólise, combustão e extração de óleos é uma solução sustentável para problemas ambientais sérios como a centralização da matriz energética em materiais não renováveis e poluentes e o volume de resíduos sólidos urbanos. Nesse contexto, este trabalho objetivou analisar o potencial energético de duas biomassas de resíduos sólidos: lodo de abatedouro municipal e serragem de madeira gerados na cidade de Gurupi –TO. Foram avaliados os teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo através da análise imediata e poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) para todas as amostras coletadas. Na análise imediata verificou-se que a amostra de lodo apresentou teor de cinzas superior ao da serragem e ambas apresentaram elevados teores de voláteis. A serragem apresentou maior poder calorífico (4882 cal kg<sup>-1</sup>) que o lodo (3952,5 cal kg<sup>-1</sup>), mas o processo de obtenção de energia a partir do lodo requer menor quantidade de calor. Pode-se concluir ainda que ambos os materiais apresentam alternativas viáveis para obtenção de energia.

**Palavras-chave:** Poder Calorífico; biomassa; Fontes renováveis de energia.

**ABSTRACT**

The use of waste for energy production through processes like pyrolysis, combustion and oil extraction is a sustainable solution to serious environmental problems like centralization of the energy matrix in non-renewable materials and pollutants and the volume of urban solid waste. In this context, this work aimed to analyze the energy potential of two solid waste biomasses: municipal slaughter sludge and wood sawdust generated in the city of Gurupi –TO. Were evaluated the contents of humidity, volatile content, ash, fixed carbon through the immediate analysis and upper (PCS) and lower (PCI) calorific value were evaluated for all samples collected. In the immediate analysis it was found that the sludge sample had higher ash content than the sawdust and both had high volatile contents. The sawdust presented higher calorific power (4882 cal kg<sup>-1</sup>) than the sludge (3952.5 cal kg<sup>-1</sup>), but the process of obtaining energy from the sludge requires less heat. It can also be concluded that both materials present viable alternatives for obtaining energy.

**Keywords:** Calorific Value, biomass, Renewable sources of energy.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir de resíduos sólidos que acarretam em graves impactos ambientais representa uma solução sustentável para gestão desses resíduos que tem sido problemática para a maioria dos países nos últimos anos (Chen, 2018; Song; Li; Zeng, 2015). Em especial os provenientes de processos industriais e sanitários devido ao potencial poluidor e os resíduos de maior volume pelas complicações logísticas. Para essa finalidade é essencial compreender a disponibilidade e o rendimento energético nos materiais, o que pode ser feito através de uma análise imediata e medida ou estimativa do poder calorífico (Chen, 2018; Milbrandt *et al.*, 2018).

Ao estabelecer um caminho sustentável econômica e ambientalmente para o aproveitamento energético ocorre a reinserção na cadeia produtiva, transformando os resíduos em matéria prima e aumentando o seu ciclo de vida. Sendo que a aplicabilidade está condicionada à composição química, propriedade físicas e potencial poluidor do material residual. Pode-se dizer que trata-se de uma forma de reciclagem já que envolve submeter os resíduos a um processo de transformação química que levará à geração de algum produto de valor mercadológico como no caso da produção de energia (Borowski *et al.*, 2002; Nozela *et al.*, 2018).

Os países industrializados geram volumes significativos de resíduos e efluentes com composição química significativamente variada dependendo do processo industrial de que é proveniente. Esse tipo de resíduo geralmente tem um potencial danoso pela presença de metais pesados, poluentes orgânicos persistentes além de caráter extremo de acidez ou basicidade, ou seja, são quimicamente agressivos (Song; Li; Zeng, 2015). O lodo sanitário, por outro lado, é um problema difuso. Independentemente do tipo de atividade econômica, no mínimo o lodo sanitário residencial e proveniente de estações de tratamento de água e esgoto existirão (Guerra; Angelis, 2005).

Por outro lado, em localidades cuja economia é pautada na produção de produtos alimentícios, principalmente carnes, o volume de lodo sanitário é potencializado. Esse tipo de resíduo, apresenta alto teor de materiais voláteis, de óleos, e umidade, além de contaminantes biológicos. A periculosidade, nesses casos, está associada à presença de poluentes orgânicos

persistentes, resíduos de fármacos e, a depender da alimentação dos animais, metais pesados. Pode-se adicionar ainda ao rol de resíduos que geram preocupação, os resíduos sólidos urbanos compostos de plástico, madeira, papel, metais e resíduos de alimentos, que por si só, não são tão potencialmente danosos, mas representam uma preocupação devido ao volume que ocupam (Ahmad *et al.*, 2014).

Para a produção energética a serragem, que apesar de apresentar baixo potencial poluidor ocupa volume significativo, armazena quantidade significativa de energia nas macromoléculas orgânicas que a constitui. Outro resíduo que se destaca, principalmente pela oferta e ausência de destinação sustentável é o lodo sanitário, que também é constituído de compostos orgânicos que pode ter a energia das ligações químicas aproveitada.

Para Torquato (2016) as propriedades mais importantes que possibilitam a avaliação do potencial de uma biomassa para se transformar em combustível envolvem: o poder calorífico, a temperatura de ignição, análise elementar e imediata. Para o poder calorífico, a bomba calorimétrica possibilita sua análise empírica, onde “emprega-se uma determinada massa do material combustível a ser analisado, submetendo-o posteriormente à combustão completa dentro da cela reacional do calorímetro, que se encontra saturada de oxigênio” (Torquato, 2016, p. 37). Já, para a análise imediata, que determina teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo possibilitando a estimativa do poder calorífico, pode-se empregar mufla ou análise termogravimétrica. As mesmas envolvem o aquecimento seguido de pesagem para determinar cada um desses teores (Torquato, 2012).

O presente trabalho objetivou empregar algumas tecnologias para reciclar resíduos comumente gerados no município de Gurupi como, por exemplo, amostras de lodo provenientes de abatedouro municipal e a serragem da madeireiras, convertendo-os em energia. Soluções como esta apresentam uma série de vantagens, passando pela diversificação da matriz energética do país e pela diminuição dos impactos causados pela decomposição dos resíduos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de biomassas usadas neste estudo são provenientes do Município de Gurupi - TO sendo:

a - lodo de abatedouro: fornecido pelo Matadouro Municipal Gurupi: Grupo Paulon Maia (GAM) (Figura 1);



**Figura 1.** Amostras de lodo antes da secagem

b - serragem: fornecida pela Madeireira São Sebastião (Figura 2).



**Figura 2.** Amostras de serragem antes da secagem

Previamente aos ensaios, com exceção da análise de umidade, as amostras de lodo e de serragem foram submetidas ao processo de secagem em estufa de esterilização secagem digital 150 L Edutec. Nas seguintes condições:

- a - Lodo: 24 horas à  $(100 \pm 5) ^\circ\text{C}$  (Torquato, 2012) e
- b - Serragem: 24 horas à  $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$  (Quirino *et al.*, 2005).

## 2.1. Análise Imediata

As biomassas em estudo foram submetidas às análises de teor de umidade, cinzas, voláteis, carbono fixo e poder calorífico (real e estimado). As medições e análises foram realizadas no Laboratório de Química Analítica, do Complexo Laboratorial II, da Universidade Federal do Tocantins (UFT) - Campus Gurupi. As análises de cinzas e voláteis foram realizadas utilizando o forno mufla (GP Científica com um programador de temperatura DIGImec tipo FHMP). O poder calorífico foi estimado com base nos dados da análise imediata empregando-se as equações disponíveis na literatura.

### 2.1.1 Determinação da Umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com o método da Norma ASTM D 3173-85, em que pesou-se uma amostra de aproximadamente 1,000 g ( $m_1$ ) a temperatura

ambiente (quintuplicata) em cadinho de porcelana com peso constante já pré-determinado. Em seguida as amostras foram aquecidas na estufa com temperatura adequada ao tipo da amostra:

- a - Lodo: 1 hora à temperatura  $100 ^\circ\text{C}$  (Colen, 2011);
- b - Serragem: 1 hora à temperatura  $105 \pm 2 ^\circ\text{C}$  (NBR 8112).

Prosseguiu-se colocando os cadinhos contendo as amostras em um dessecador por 30 minutos para o resfriamento e em seguida os mesmos foram pesados. Esta operação foi repetida até peso constante já com amostra e a massa computada como  $m_2$  para o cálculo da umidade, conforme descrito na Equação 1 onde  $m_1$  é a massa da biomassa antes da secagem e  $m_2$  é a massa da biomassa após a secagem.

$$\text{Umidade}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

### 2.1.2 Determinação de matéria volátil

As amostras resultantes da determinação do teor de umidade foram aquecidas em uma mufla nas condições específicas para cada amostra:

- a - Lodo: 60 minutos à temperatura  $550 ^\circ\text{C}$  (ASTM D 2415-66);
- b - Serragem: 7 minutos à temperatura  $850 ^\circ\text{C}$  (NBR 8112).

Em seguida os cadinhos foram dispostos em dessecador para resfriamento durante 30 minutos. Os cadinhos contendo as amostras foram pesados até massa constante, anotaram-se as massas finais para cálculo do teor de matéria volátil ( $m_3$ ).

O teor de material volátil foi calculado segundo a Equação 2 onde  $m_2$  é a massa da biomassa antes da calcinação e  $m_3$  é a massa da biomassa após a calcinação.

$$\text{Teor de voláteis}(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

### 2.1.3 Determinação do teor de cinzas

As amostras resultantes do procedimento anterior foram colocadas novamente em forno mufla nas temperaturas adequadas aos tipos de amostras:

- a - Lodo: 1 hora à temperatura  $900 ^\circ\text{C}$  (ASTM D 2415-66);

b - Serragem: 7 horas à temperatura 700 °C (NBR 8112).

Os cadinhos contendo as amostras foram pesados até massa constante, anotou-se as massas finais para cálculo do teor de cinzas ( $m_4$ ).

O teor de cinzas foi calculado segundo a Equação 3 onde  $m_3$  é massa da biomassa antes da pirólise e  $m_4$  é a massa da biomassa após da pirólise.

$$\text{Teor de cinzas}(\%) = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

#### 2.1.4 Carbono fixo

O valor do carbono fixo foi calculado de modo simultâneo ao andamento das análises imediatas com base na fórmula indireta sendo obtido pela diferença entre a amostra total e os teores de cinzas e voláteis segundo Ribeiro (2018) expresso pela Equação 4 onde Cf é o carbono fixo, V (%) é o percentual de voláteis e Cz (%) refere-se ao percentual de cinzas.

$$Cf = 100 - (V\% + Cz\%) \quad (\text{Eq. 4})$$

#### 2.2. Determinação do poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) também foi estimado para as biomassas cujas análises foram realizadas em forno mufla. Para estimar o cálculo do poder calorífico das amostras utilizou-se modelos matemáticos com correlação com análise imediata destas. Esta análise fundamenta-se na soma dos calores desprendidos na combustão dos elementos que compõe o material chamado de poder calorífico superior da amostra (PCS) com erro absoluto de 3,74% (Ferreira *et al.*, 2014; Channiwala e Parikh, 2002).

O PCS estimado foi determinado com base na análise imediata através da Equação 5 para determinação de ambas as biomassas. Já os poderes caloríficos inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCL) foram estimados de acordo com as equações 6 e 7 (Brand, 2010) onde U é o percentual de umidade.

$$PCS = 84,5104 \times (Cf) + 37,2601 \times (V\%) - 1,8642 \times (Cz\%) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$PCI = PCS - 324 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$PCL = \left[ PCI \times \frac{100-U}{100} \right] - (6 \times U) \quad (\text{Eq. 7})$$

Os valores do poder calorífico (real) foram medidos no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB).

O Poder calorífico superior (PCS) das biomassas também foram determinados em bomba calorimétrica, modelo C 2000 basic da IKA em conformidade com a Norma ASTM 3286-66. As amostras foram secas previamente em estufa durante 24 horas, as amostras foram colocadas em cadinho metálico e este posicionado dentro da bomba calorimétrica.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

#### 3.1. Análise Imediata

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise imediata da umidade, voláteis cinzas e carbono fixo para as duas biomassas analisadas.

**Tabela 1.** Resultados dos valores médios da análise imediata: umidade, teor de voláteis, cinzas, carbono fixo.

Propriedade (% m/m)	Biomassa	
	Lodo	Serragem
Umidade	(6,39±0,67)	(10,26±1,57)
Voláteis	(70,88±1,28)	(74,47±4,49)
Cinzas	(19,91±1,17)	(1,29±0,09)
Carbono Fixo	(2,81±0,30)	(24,25±4,48)

Fonte: Autores, 2019

##### 3.1.1 Umidade

Os resultados para umidade estão demonstrados na Tabela 1. É possível observar que a umidade do lodo foi inferior à da serragem e a precisão da medida para o lodo foi superior. Os valores de umidade obtidos estão próximos aos encontrados em outros estudos. Souza (2010) por exemplo, encontrou um valor médio de 11,6% para serragem. Em estudo de avaliação energética desse tipo de material, Moulin (2010) encontrou valor médio de 10%. Em análise do lodo de uma estação de tratamento na cidade de Palmas -TO durante estação de chuva. Teixeira (2014) encontrou 6,85% de umidade.

O teor de umidade do lodo e da serragem é uma medida de extrema relevância para o aproveitamento energético pois está ligado ao consumo de energia durante a queima dessas biomassas. Um material com alta umidade demanda maior gasto energético na etapa de secagem do preparo do material. Segundo Vieira (2012) para escolher um combustível a umidade se torna um fator crucial, sendo valores acima de 50 % inexequíveis, pois a partir desse ponto a

energia liberada torna-se insuficiente para a combustão. Assim, o lodo e a serragem analisadas estão dentro da faixa de umidade ideal para produção de energia de acordo com esse parâmetro.

### 3.1.2 Voláteis

A proporção de voláteis presentes no resíduo é determinante no aproveitamento energético, principalmente para embasar o método a ser aplicado. Os voláteis são inversamente proporcionais ao carbono fixo. Além disso, o material volátil auxilia na ignição, porém quem mantém a chama é o carbono fixo.

O teor de material volátil variou entre 68,18 % a 72,15% com desvio médio de 1,28 para as amostras de lodo. Vale destacar que para conversão energética do lodo via pirólise Yang *et al.*, (2005) recomenda teor de volátil entre 65 e 85 %, demonstrando a aplicabilidade dos resíduos estudados para geração de energia empregando a pirólise.

Por outro lado, Telmo *et al.*, (2010) estipulou para biomassa lenhosa teor de voláteis variando entre 76% para 86%, assim como Białowiec *et al.*, (2017) que obteve um valor médio para voláteis para serragem muito próximo:  $77,6 \pm 0,25\%$  m/m. O resultado para serragem na presente pesquisa permaneceu entre 67,53% e 77,52% aproximando-se então dos materiais estudados por esses autores.

### 3.1.3 Cinzas

O valor médio de cinza da serragem foi de 1,29%, dentro da normalidade, conforme resolução SAA 11 (2015) que considera valor inferior a 1,5% como aceitável e desejável para serragem. Nogueira e Lora (2003), verificaram o baixo teor de cinzas presentes em diversos tipos de biomassas, principalmente na serragem, considerando satisfatório um teor de cinza de 0,09%. Por outro lado em amostras de lodo espera-se percentuais mais elevados de cinzas, no presente estudo o resultado foi em torno de 20% próximo ao encontrado por Yang *et al.*, (2005) que obteve valores entre 5% a 20%.

O teor de cinzas também é um parâmetro importante para o aproveitamento energético é desejável que se tenha o menor teor de cinzas possível. Assim como a umidade, o percentual de cinzas também interfere no poder calorífico causando perda de energia prejudicando a transferência de calor (Vieira, 2012). Para Vieira (2012) altas concentrações de cinzas podem

diminuir o poder calorífico, afetar a transferência de calor e podem ainda causar perda de energia havendo necessidade de sua remoção. Para Chaves *et al.*, (2013) as cinzas correspondem às substâncias que não entraram em combustão cuja forma sólida não serve para uso energético.

É importante destacar ainda que teores de cinzas elevado no lodo, no processo de pirólise, favorece o contato entre os metais das cinzas e a matéria orgânica, fazendo com que reações de desprendimento dos voláteis ocorram em temperaturas mais baixas, levando ao aumento no rendimento da fração gasosa (Colen, 2011). Assim esse tipo de material é melhor aproveitado na pirólise para produção de biogás.

### 3.1.4 Carbono Fixo

Os valores de carbono fixo ficaram próximos de 3%, para o lodo isso pode ter acontecido pelo alto teor de voláteis e cinzas presentes na amostra, e devido à natureza do lodo digerido.. Nota-se que os valores encontrados são inferiores ao esperado por Arazo (2017) de 14,1% e por Yang *et al.*, (2005) na faixa de 7% a 20%. Para serragem o valor médio encontrado foi de 24,25% sendo abaixo do pesquisado por Tumuluru, *et al.*, (2011) cujo carbono fixo variou de 28 a 35%. Vieira (2012) argumenta que quanto maior o percentual de carbono fixo presente na amostra mais lentamente o combustível irá queimar. É provável, portanto, que a serragem apresente maior poder calorífico devido ao maior tempo de queima.

## 3.2. Poder calorífico

A estimativa do poder calorífico da serragem e do lodo de acordo com as equações 5 a 7 estão apresentados na tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados dos valores médios do poder calorífico estimado

Poder Calorífico (Kcal kg <sup>-1</sup> )	Biomassa	
	Lodo	Serragem
PCS	2829,64	4.821,51
PCI	2.505,64	4.497,51
PCL	2.504,70	4.496,58

Fonte: Autores, 2019

O PCS da serragem é maior que o do lodo porque a serragem tem o teor de carbono fixo superior (24,25% m/m) ao do lodo, determinados na análise imediata. Essa relação direta do carbono fixo com o poder calorífico

proporciona ganho de poder energético. Além disso, a serragem possui alto teor de voláteis que juntamente com o carbono fixo são características determinantes para o poder calorífico. Uma biomassa ideal para produção de energia precisa apresentar baixa umidade, baixo teor de cinzas e teores elevados de voláteis, carbono fixo e PCS (Vieira, 2012).

As amostras de serragem apresentaram baixa umidade e poder calorífico alto o que demonstra que a relação entre essas propriedades é inversamente proporcional. Segundo Ribeiro (2018) isso ocorre devido à diminuição das hidroxilas da biomassa que faz com que aumente o teor de carbono fixo e, conseqüentemente, eleva o poder calorífico das amostras. Além disso nota-se maior facilidade de decomposição da biomassa quando existe baixa umidade e voláteis com menor pressão de vapor.

O valor médio calculado para o poder calorífico superior do lodo de abatedouro foi  $11,85 \text{ MJ kg}^{-1}$  inferior ao valor observado por Silva (2011) de  $16,2 \text{ MJ kg}^{-1}$  e  $21,80 \text{ MJ kg}^{-1}$  encontrado por Teixeira, (2014). Para a serragem analisada encontrou-se PCS  $24,32 \text{ MJ kg}^{-1}$  superior ao estimado por Telmo, *et al.*, (2010) que variou de 20,2 e  $20,5 \text{ MJ kg}^{-1}$  respectivamente, para amostras de madeira (macia ou dura). Assim, a serragem foi a que apresentou o melhor rendimento energético.

O poder calorífico superior obtido pela bomba calorimétrica para a serragem foi de  $4.882,5 \text{ kcal kg}^{-1}$  e para o lodo foi de  $3952,5 \text{ kcal kg}^{-1}$ . Fixando esses valores como valores reais observa-se que há um desvio de 1,27 % e de 39,7% nos valores obtidos para a serragem e para o lodo respectivamente. A maior discrepância para a medida do poder calorífico do lodo pode estar relacionada ao elevado teor de umidade e voláteis que agrega possibilidade de erro ao processo de pesagem durante a análise imediata e à presença de outros elementos químicos como nitrogênio e hidrogênio que também influenciam na quantidade de energia liberada.

Já o poder calorífico inferior estimado a partir do obtido em bomba calorimétrica foi de  $3.268,50 \text{ kcal kg}^{-1}$  para o lodo e de  $4.558,50 \text{ kcal kg}^{-1}$  para a serragem. O poder calorífico inferior reflete o valor mais preciso de energia que pode ser gerado, uma vez que calcula a energia após a perda da umidade.

Assim, observa-se que ambas as amostras apresentam poder calorífico adequado à geração de energia. O carvão, normalmente

empregado em termoelétricas, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2007) apresentam poder calorífico de  $2.400 \text{ kcal kg}^{-1}$ , valor inferior às biomassas estudadas.

Segundo Brand (2000) os valores de PCS para madeira em geral situa-se na ordem de  $4300 \text{ kcal kg}^{-1}$  e do PCI, obteve-se um valor médio de  $4000 \text{ kcal kg}^{-1}$ . Assim, os valores encontrados para o PCI da serragem foram bastante satisfatórios, já que os valores médios pelos dois métodos analisados variam entre  $3.982$  a  $4.558 \text{ kcal kg}^{-1}$  para serragem.

#### 4. CONCLUSÕES:

Foi possível verificar que a serragem apresentou características mais atrativas à reciclagem energética. O maior teor de cinzas do lodo, por exemplo, diminui seu poder calorífico consideravelmente. Além do teor de carbono fixo mais elevado da serragem também proporcionar maior potencial de geração de energia para essa biomassa. Apesar disso, deve-se considerar a elevada oferta do lodo e o seu potencial poluidor caso não haja uma destinação adequada.

A análise imediata proporcionou ainda a aquisição de dados determinantes à seleção do processo gerador de energia. Devido aos teores de voláteis para o lodo e para serragem serem altos revela-se um rendimento interessante para a produção de biogás.

Pode-se dizer que os resultados de poder calorífico apresentados pelas biomassas estudadas superiores ao do carvão utilizado nas termoelétricas são um indicativo da sua aplicabilidade como combustível na geração de energia.

Portanto, as propriedades físico-químicas e a capacidade de combustão das biomassas analisadas indicam que o uso do lodo do Matadouro Municipal de Gurupi e da serragem da Madeireira São Sebastião é uma alternativa eficaz para a eliminação dos grandes volumes destes resíduos e uma alternativa de diversificação da matriz energética.

#### 5. AGRADECIMENTOS:

Ao Programa de Pós-graduação em Química da Universidade Federal do Tocantins e à CAPES pela concessão da bolsa.

#### 6. REFERÊNCIAS:

1. Ahmad, M. I. *et al.* Anaerobic digestion of waste from a slaughterhouse. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2014**, 2, 3, 1320.
2. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR - 8112 (MB1857): Carvão Vegetal -Análise Imediata. **1986**.
3. Arazo, R. O. *et al.* Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor. *Sustainable Environment Research*, **2017**, 27, 1, 14.
4. ASTM D 2415-66. Standard Test Method for ash Determination, **1986**.
5. ASTM D 3173-85. Standard Test of Humidity, **1985**.
6. ASTM D 3286-66. Standard Test Method for The Gross Calorific Power Value by Bomb Calorimeter. **1986**.
7. Białowiec, A. *et al.* The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. *Waste Management*, **2017**, 70, 100.
8. Borowski, H. C. *et al.* Análise de um modelo de cogeração a partir de resíduos sólidos urbanos. *Revista Tecnologia*, **2002**.
9. Brand, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Inter ciência, 131, **2010**.
10. Brand, M. A. Rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, **2000**, 163.
11. Channiwala, S.A; Parikh, P.P. A Unified Correlation for Estimating HHV of Solid, Liquid and Gaseous Fuels. *Fuel*, **2002**, 81, 1063.
12. Chaves, Antônio M. Brito *et al.* Características energéticas da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, Goiânia, **2013**. 9, 17, 542.
13. Chen, Y. C. Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology. *Journal of Cleaner Production*, **2018**, 192, 269.
14. Colen, A. G. N. Caracterização físico-química e química do lodo de esgoto para aplicação como fonte de energia em processo de pirólise. Dissertação (Mestrado em Agroenergia). Universidade Federal do Tocantins. Palmas, **2011**, 159.
15. Ferreira, I. T. M. *et al.* Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, **2014**, 3, 297.
16. Guerra, R. C.; Angelis, D. F. D. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. *Arquivos do Instituto Biológico*, **2005**, 72, 1, 91.
17. MME, Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília (DF), 2007.
18. Milbrandt, A. *et al.* Wet waste-to-energy resources in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, **2018**, 137, 47.
19. Moulin, J. C. Avaliação energética da maravalha gerada em uma serraria no município de Jerônimo Monteiro - ES. Monografia - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, **2010**, 20.
20. Nogueira, L. A. H.; Lora, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2º ed. Rio de Janeiro: Interciência, **2003**, 200.
21. Nozela, W. C. *et al.* Mixture of biomass to energy reuse. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **2018**, 131, 1, 769.
22. Quirino, W.F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa & Energia*, **2005**, 1, 2, 182.
23. Ribeiro, K. P. Caracterização físico-química do lodo de estação de tratamento de esgoto para aproveitamento como biomassa energética. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina, **2018**, 53.
24. Silva, J. O. Caracterização do potencial

- energético e estudo físico-químico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE - Uberlândia - MG. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, **2011**, 66.
25. Song, Q.; Li, J.; Zeng, X. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal of Cleaner Production*, 104, 210, **2015**.
26. Souza, F; R. Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto. TESE (Doutorado em ciências e engenharia dos materiais) - Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, **2010**.
27. Teixeira, L. F. Estudo do processo de pirólise termocatalítica como alternativa ao aproveitamento do lodo de esgoto doméstico. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins. Palmas, **2014**. 108
28. Telmo, C.; Lousada, J.; Moreira, N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology*, **2010**, 101, 11, 3815.
29. Thipkhunthod, P.; *et al.* Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, **2005**, 84, 857.
30. Torquato, L. D. M. Estudo de degradação térmica e caracterização de lodos provenientes de diferentes sistemas de tratamento de esgotos. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Química, Araraquara, **2012**, 109.
31. Torquato, L. D. M. Estudo de viabilidade do emprego de lodo de esgoto e resíduos agrícolas para a geração de bioenergia. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Química, Araraquara, **2016**, 227.
32. Tumuluru, J. S. A. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*, **2018**, 1, 54.
33. Vieira, A. C. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, **2012**, 72.
34. YANG, Y. BIN *et al.* Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach - Identification of the controlling factors. *Fuel*, **2005**, 84, 16, 2130.