

142 - AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DE LODOS GERADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE AVES

Jociéle Padilha⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE.

Ana Paula Kurek⁽²⁾

Química Industrial e Mestre em Engenharia de Processos – UNIVILLE, Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e pós-doutoranda no Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE.

Ozair Souza⁽³⁾

Engenheiro Químico pela Universidade do Sul de Santa Catarina, mestrado e doutorado em Biotecnologia pela Universidade de São Paulo. Professor dos Departamentos de Engenharia Química e Engenharia Ambiental e Sanitária e Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE.

Noeli Sellin⁽⁴⁾

Engenheira Química pela Universidade Estadual de Maringá - UEM, Mestre e Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Professora dos Departamentos de Engenharia Química e Engenharia Ambiental e Sanitária e Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE.

Endereço⁽⁴⁾: R. Paulo Malschitzki, 10, Zona Industrial Norte, CEP 89219-710, Joinville/SC, Brasil; Tel: (47) 3461-9000; e-mail: anapkurek@gmail

RESUMO

Abatedouros e frigoríficos geram grande quantidade de efluentes, devido ao elevado consumo de água no processo. Após tratamento dos efluentes, há geração de lodo que, se não for destinado corretamente, causa sérios problemas ambientais. Visando agregar valor e avaliar o potencial como biomassa combustível em caldeiras, neste trabalho, foi realizada a caracterização de lodos gerados em abatedouro e frigorífico de aves por análise química aproximada e elementar, poder calorífico, análises térmicas, densidade aparente e energética e análise química das cinzas. Foram analisadas amostras de lodo primário proveniente dos efluentes da linha vermelha e de lodo secundário dos efluentes da linha verde. O lodo primário apresentou maiores teores de sólidos totais, materiais voláteis, carbono e hidrogênio. As duas biomassas exibiram alto poder calorífico superior e inferior, de 19 MJ/kg, e de densidade energética e baixos teores de nitrogênio e enxofre. Na caracterização química das cinzas, após combustão, os elementos em maiores concentrações foram óxido de alumínio e pentóxido de fósforo. O lodo primário exibiu potencialidade para uso como biomassa combustível e o lodo secundário torna-se viável se for desidratado e forem otimizadas algumas etapas do processo de tratamento de efluentes devido ao elevado teor de cinzas.

Palavras-chave: Valorização de resíduos, Biomassa, Caracterização, Geração de energia

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e o crescimento do número de indústrias no mundo, tem aumentado também a quantidade de lodos e resíduos industriais gerados. Sua destinação na maioria das vezes é incerta, e acabam ficando expostos ao meio ambiente, contaminando-o, e este problema é comum em várias partes do Brasil e do mundo. A gestão de resíduos sólidos provenientes de processos de tratamento de efluentes industriais e sanitários é uma questão de grande relevância na agenda ambiental da maioria dos países. Diante deste cenário de grande urgência mundial, vários estudos estão sendo desenvolvidos no sentido de valorizar lodos e resíduos de diferentes naturezas (MENEHINI *et al.*, 2014; MOREIRA, 2001).

A maioria dos países desenvolvidos já adequou seus sistemas para gerenciar os resíduos produzidos no processo de tratamento de água e efluentes, porém, um grande número de estações de tratamento ainda lança esse material diretamente nos cursos d'água, solo e outros locais indevidos ocasionando impactos ambientais significativos.

Em função disto, os órgãos ambientais cada vez mais vêm exigindo a implantação de outras alternativas de disposição final seguras em termos de saúde pública e ambientalmente aceitáveis (ANDREOLI, 2001; CAMARGO *et al.*, 2006)

A disposição final adequada do lodo é uma etapa problemática e apresenta um custo de até 50% dos orçamentos operacionais de um sistema de tratamento, e o planejamento e a execução do destino final são muitas vezes negligenciados nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil. Em muitos casos, os projetos de estações de tratamento ignoram a forma de destino desse resíduo, sendo gerenciado em situação emergencial pelos operadores, com altos custos financeiros e ambientais, vindo a comprometer, em muitos casos, os benefícios de todo o sistema de coleta e tratamento de efluentes. O destino final do lodo é uma atividade muito importante e complexa, pois frequentemente extrapola os limites das estações de tratamento e exige a integração com outros setores da sociedade (ANDREOLI, 2001; CAMARGO *et al.*, 2006).

No Brasil, o aterro sanitário ainda tem sido a principal alternativa de destinação dos lodos gerados em estações de tratamento de efluentes (ETE), resultando em custos elevados com transporte e desperdício de matérias primas, que poderiam ser reutilizadas e nos centros urbanos, já vem ocorrendo a escassez de áreas para a implantação de aterros industriais (ROSA *et al.*, 2014; ROSA, 2013)

As indústrias de processamento de carnes consomem aproximadamente 62 milhões de metros cúbicos de água anualmente em todo o mundo, sendo apenas uma pequena quantidade incorporada ao produto final. A maior parte desta água é transformada em efluentes com alta concentração de poluentes, contendo elevados valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), óleos e graxas, sólidos totais, nitrogênio, fósforo, cloretos, entre outros (SROKA *et al.*, 2004). Após o tratamento do efluente bruto por processos biológicos (lagoas) e físico-químicos (coagulação/floculação e flotação simples), uma grande quantidade de lodo é gerada e destinada, principalmente, a aterros industriais. A necessidade de gestão sustentável do lodo de abatedouros e frigoríficos tornou-se uma grande preocupação e, a partir disso, têm sido desenvolvidas muitas opções para o seu destino, como por exemplo, para fins agrícolas, florestais e de recuperação de áreas degradadas devido ao seu alto potencial fertilizante e condicionador do solo. Existem vários fatores que restringem o seu uso, como por exemplo a acumulação de indesejáveis substâncias presentes no lodo (metais pesados, patógenos e os poluentes orgânicos), que potencialmente passam para a cadeia alimentar (LOZADA, 2015). Em função da sua elevada fração orgânica e alto poder calorífico, o lodo seco de abatedouros e frigoríficos pode ser classificado como biomassa, sendo assim, outros procedimentos mais sustentáveis podem ser aplicados, como por exemplo para geração de energia, apresentando na maioria dos casos autossuficiência energética dos processos de conversão térmica, além de contribuir na redução dos custos com outros combustíveis tradicionalmente utilizados, como lenha, cavaco, etc., e também com disposição em aterros industriais (SENA, 2005; SPINOSA *et al.*, 2010; FYTILI *et al.*, 2006). Os processos de conversão térmica de biomassa mais comuns são combustão, pirólise e gaseificação, sendo que a combustão fornece mundialmente o maior suporte de energia para as operações industriais.

Na combustão, ocorre quebra das ligações químicas entre os elementos do combustível, oxidação e formação de gases e alta liberação de energia na forma de calor. Este processo possui benefícios, como a necessidade de uma menor área de disposição, a redução do volume de lodo, em torno de 85% do volume inicial, a possibilidade de gerar energia e utilizar a cinza na construção civil, devido à eliminação da matéria orgânica (FONTES, 2003). Porém, diversos parâmetros referentes ao controle desse processo devem ser monitorados, em função da formação de compostos poluentes durante a sua queima (dioxinas e furanos, composto orgânicos voláteis (VOC's), óxidos nitrosos (NOx), SO₂ e ácidos, que são poluentes gasosos e líquidos de origem natural ou antropogênica), e como poluentes sólidos a formação de cinzas (SENA, 2005).

No momento atual, há poucos sistemas de pirólise e gaseificação em operação, no mundo devido ao seu alto custo de implantação e operação. Em função disto, a combustão tem sido o processo de conversão térmica mais utilizado. Porém em comparação à pirólise e a gaseificação, produz menor energia. A tendência é de que no futuro a aplicação dos processos de pirólise e gaseificação aumente, em função dos avanços tecnológicos que tendem a reduzir os custos e aumentar a eficiência de obtenção de produtos úteis (HAANDEL, 2009).

Vários estudos vêm sendo realizados empregando lodo de ETE como biomassa combustível para geração de energia e os resultados demonstram a viabilidade e a possibilidade de agregar valor aos mesmos. Sena (2005) realizou um estudo afim de utilizar o lodo gerado no tratamento de efluentes de uma indústria de carnes para geração de energia. O lodo foi submetido previamente à secagem, e em seguida foi queimado em uma caldeira.

O monitoramento dos gases gerados na queima foi realizado, e as emissões de NO e SO₂ foram de 60 e 100 ppm, respectivamente. O poder calorífico superior do lodo foi de 25,6 MJ/kg, e esse valor foi maior, quando comparado com o cavaco de madeira, que apresentou valor de 17 MJ/kg.

Virmond (2007) avaliou o potencial de utilização do lodo gerado no tratamento primário de efluentes de um frigorífico como biomassa combustível, levando em consideração suas propriedades físico-químicas e o controle de emissão de poluentes atmosféricos no processo de combustão. Foi avaliada também, a combustão do cavaco de madeira e da mistura deste com lodo, a partir da análise da concentração dos gases gerados. A incorporação de 10% em massa de lodo ao cavaco, resultou em um aumento da potência térmica nominal do sistema em aproximadamente 2% e economia no consumo de cavaco. Em ambas as situações, a queima apresentou-se ineficiente. O autor ressalta que para o processo de combustão alcançar a máxima eficiência e quantidades mínimas de produtos indesejáveis, cada etapa deve ser otimizada, levando em consideração a tecnologia de combustão e o tipo de biomassa utilizada. Também, a escolha do coagulante utilizado no tratamento primário do efluente frigorífico é determinante na composição do lodo, em função da presença de elementos como o cloro, que pode resultar em compostos poluentes tóxicos como dioxinas e furanos.

Borges (2008) analisou lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes (ETE) doméstico, de processos industriais têxtil e de celulose e papel, a partir da caracterização térmica e química, e avaliou o potencial destes como biomassa combustível. Os resultados indicaram a possibilidade do uso dos três tipos de lodos como biomassa combustível, especialmente em função da potencialidade energética verificada, uma vez que exibiram poder calorífico, em torno de 19 MJ/kg, semelhante ao de outras biomassas combustíveis. O lodo proveniente de indústria de celulose e papel apresentou o maior teor de carbono (44,83%), o lodo doméstico exibiu maior teor de hidrogênio e nitrogênio e o lodo da indústria de celulose e papel o maior teor de sólidos voláteis, de 82%. Os teores de enxofre e nitrogênio encontrados foram relativamente baixos nos três tipos de lodo. Da análise dos gases gerados após a queima das amostras, houve geração de níveis significativos de monóxido e dióxido de carbono e baixos níveis de dióxido de enxofre e de monóxido e dióxido de nitrogênio.

Meneghini *et al.* (2015) avaliou a potencialidade térmica da mistura de lenha e lodo de um frigorífico (com percentuais em massa de 10%, 15% e 20%), a partir da co-combustão em uma caldeira a lenha. O autor concluiu que o lodo de frigorífico não deve ser queimado em percentuais acima de 15%, pois nesta concentração os níveis de emissões de gases ficaram acima dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 382 de 2006. A queima da mistura de lodo e lenha aumentou significativamente a quantidade de cinzas na caldeira, em 25%, devido ao teor de cinzas do lodo (17,5%), superior ao da lenha. O rendimento térmico da caldeira, determinado para 10, 15 e 20% de lodo, foi de 79, 81 e 84%, respectivamente, mostrando um aumento da eficiência energética da caldeira e redução no consumo de lenha, em função da adição do lodo.

Visando avaliar a potencialidade como biomassa combustível para geração de energia, lodos provenientes da estação de tratamento de efluentes (ETE) de um abatedouro e frigorífico de aves foram caracterizados por análises química aproximada e elementar, poder calorífico, análises térmicas (ATG) e (ATD), densidades aparente e energética e análise química semiquantitativa das cinzas por Fluorescência de Raios-X (FR-X).

METODOLOGIA

ORIGEM DAS AMOSTRAS DE LODOS (BIOMASSAS) NA ETE

Para o estudo de potencialidade energética, foram coletadas amostras de dois tipos de lodos (primário e secundário) gerados na estação de tratamento de efluentes provenientes de um abatedouro e frigorífico de aves, localizado no estado de Santa Catarina. As etapas do sistema de tratamento de efluentes que originou os dois lodos são apresentadas na Figura 1.

Nos abatedouros e frigoríficos de aves os efluentes líquidos são divididos em duas correntes, “linha vermelha” e “linha verde” (Figura 1). Os efluentes da linha vermelha são provenientes das áreas que contêm sangue, ou seja, das etapas do abate em diante, esses efluentes passam por uma peneira rotativa e os sólidos retidos são encaminhados para a produção de farinha. O efluente líquido é transportado para um tanque de equalização, depois é submetido à coagulação e floculação e enviado para o flotor 1, no qual ocorre a geração e a separação do lodo primário, que é removido por meio de raspagem por pás. Em seguida, é destinado para um tanque de aquecimento, com o intuito de facilitar a separação das partículas líquidas e sólidas, e então é desidratado em um equipamento denominado *Tridecanter*. Neste, ocorre a centrifugação, que separa o óleo, o residual de efluente

líquido e o lodo, que posteriormente é seco em digestor usando vapor d'água. O lodo primário seco é atualmente empregado pela empresa como biomassa combustível em uma cadeia para geração de vapor. Porém, a empresa não possui estudos sobre suas características e propriedades físicas e químicas, não aproveitando toda sua potencialidade energética.

O efluente da linha verde é composto pelos efluentes que não contém a presença de sangue, ou seja, das etapas de recepção e limpeza das aves e lavagem de pátios e caminhões. Na ETE, este efluente é encaminhado a uma peneira rotativa, que separa os resíduos sólidos e, em seguida, é enviado a uma lagoa anaeróbia, na qual é misturado ao efluente da linha vermelha (separado no flotador 1), e segue para uma lagoa aeróbia. Depois, é bombeado para o flotador 2, no qual é gerado o lodo secundário, que é removido por meio de raspagem por pás e desidratado em um equipamento denominado *Bidecanter*, que separa a fração líquida residual e o lodo. O lodo secundário, atualmente, é destinado a um aterro industrial.

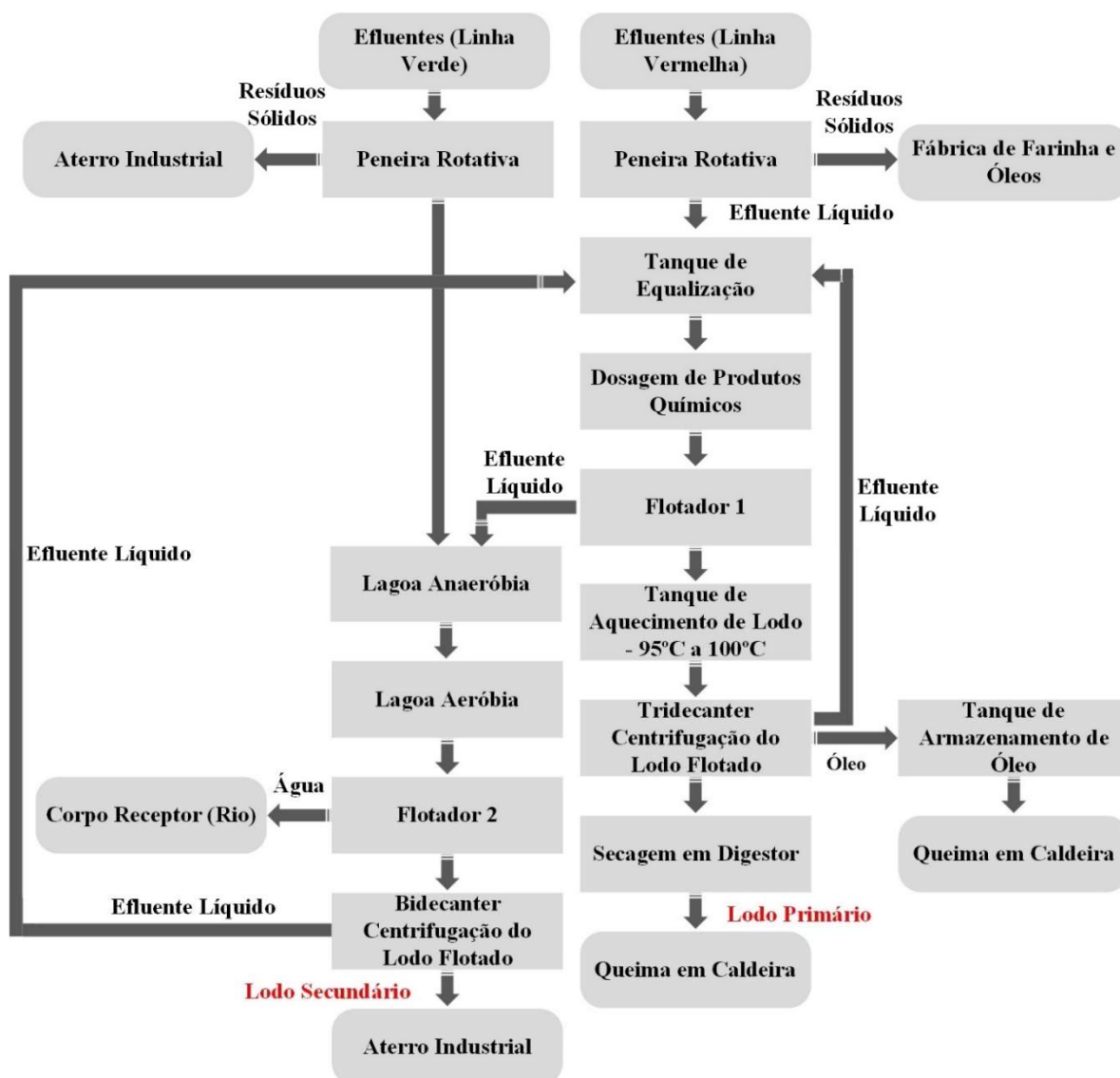


Figura 1: Fluxograma da ETE do abatedouro e frigorífico de aves em estudo.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODOS

Para realização das análises, química elementar, poder calorífico e densidade, as amostras de lodos foram previamente secas a 105 °C até a obtenção de massa constante. Nas demais análises, foram utilizadas as amostras na forma como foram coletadas na empresa.

Análise química aproximada

Foram determinados os teores de umidade (%U), materiais voláteis (%MV), cinzas (% cinzas), carbono fixo (%CF) e sólidos totais (%ST) das amostras de lodos utilizando o método de termogravimetria, que consiste na secagem em estufa e queima em mufla. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

A fim de determinar o teor de umidade, foram seguidos os procedimentos descritos na norma ASTM E871-82 (2013). Foram secos 50 g de amostra em estufa a 103 °C por 16 horas. Para o cálculo do teor de umidade (%U), foi utilizada a Equação 1.

$$\%U = \left(\frac{w_i - w_s}{w_i - w_c} \right) * 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde, w_i = massa úmida inicial da amostra com a massa do cadinho (g), w_s = massa da amostra após a secagem com a massa do cadinho (g) e w_c = massa do cadinho (g).

Para determinar os teores de materiais voláteis (%MV), foi empregada a metodologia ASTM E872-82 (2006) e as equações 2 e 3, descritas por Garcia *et al.* (2012).

$$A = \left(\frac{w_i - w_f}{w_i - w_c} \right) * 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde, w_f = massa da amostra e do cadinho após queima em mufla a 950 °C durante 7 minutos (g).

Para o cálculo do teor de materiais voláteis, foi usada a Equação 3, a partir da subtração da massa perdida durante a calcinação (Equação 2) pelo valor encontrado a partir da Equação 1.

$$\%MV = A - \%U \quad \text{Equação (3)}$$

Para determinação do teor de cinzas, 0,5 a 1 g de amostra, com aproximação de 0,1 mg foram submetidos à queima em mufla, a 575 °C pelo período de 3 horas, conforme procedimentos descritos na norma ASTM 1755-01 (2007) e para o cálculo foi empregada a Equação 4.

$$\%cinzas = \left(\frac{m_{ash} - m_c}{m_p - m_c} \right) \quad \text{Equação (4)}$$

Onde, m_{ash} = massa de cinzas residual após a queima, m_p = massa de amostra seca a 105 °C, antes da queima. O teor de carbono fixo foi obtido pela Equação 5, com os valores de sólidos voláteis e cinzas que foram determinados pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$\%CF = 100 - (\%cinzas + \%SV) \quad \text{Equação (5)}$$

Para determinar o teor de sólidos totais, foram seguidos os procedimentos descritos na norma ASTM E1756-08 (2008). Foram secas 0,5 de amostra em estufa a 105 °C por pelo menos 3 horas e no máximo 72 horas. Para o cálculo do teor de sólidos totais (%ST), foi utilizada a Equação 6.

$$\%ST = \left(\frac{w_f - w_c}{w_i - w_c} \right) * 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde, w_f = massa de amostra seca a 105 °C, após a queima (g), w_c = massa do cadinho (g) e w_i = massa úmida inicial da amostra com a massa do cadinho (g).

Análise química elementar

As amostras secas de lodos foram enviadas para análise elementar (CNH e S) na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de São Paulo – USP, onde foram determinados os teores de carbono (%C), hidrogênio (%H) e nitrogênio (%N) pelo analisador elementar Perkin-Elmer CHN 2400, e o enxofre (%S) em espectrômetro de emissão atômica com plasma induzido (ICP – OES), modelo Spectro Arcos SOP. As análises foram realizadas em duplicata.

Poder calorífico

A energia térmica proveniente da queima das biomassas pode ser analisada pelo seu poder calorífico, sendo medida em termos de energia por unidade de massa ou volume de combustível, para sólidos (MJ/kg), líquidos (MJ/L) e gases (MJ/Nm³) (NOGUEIRA, 2005). Essa propriedade está relacionada com a composição e o grau de umidade da biomassa. Existem dois tipos de poder calorífico: o Poder Calorífico Superior (PCS), caso em que a água está na forma líquida, ou seja, condições típicas de ensaio de combustíveis, sendo pouco aplicado em situações práticas, e o Poder Calorífico Inferior (PCI), caso em que a água está na forma de vapor, condição que ocorre nos produtos de combustão nas chaminés. Normalmente, o Poder Calorífico Superior é em média 10% maior que o Poder Calorífico Inferior, dependendo do teor de hidrogênio do combustível.

O poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) das amostras de lodos foi determinado por bomba calorimétrica (modelo 1241 Parr), conforme norma ABNT NBR 8633, no Núcleo de Extensão do Departamento de Química da UFMG. As análises foram realizadas em duplicata.

Análises térmicas

O comportamento térmico das amostras de lodos foi avaliado pela Análise Termogravimétrica (ATG) e Análise Térmica Diferencial (ATD), com a simulação do processo de combustão. As análises foram realizadas sob atmosfera oxidante (ar sintético), na faixa de temperatura ambiente 25 °C a 995 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e fluxo de gás de 100 mL/min, em analisador térmico simultâneo, modelo Netzsch STA 449F3, no Laboratório de Materiais Vitrocerâmicos (VITROCER) da Universidade Federal de Santa Catarina–UFSC. As curvas de Termogravimetria Derivada (DTG) foram determinadas pelo cálculo da primeira derivada ATG.

Densidades aparente e energética

Para determinação da densidade aparente dos resíduos, foi utilizado o Método da Proveta, conforme o Manual de Métodos de Análise do Solo, da EMBRAPA (1997). Foram utilizadas provetas de 100 mL de massas conhecidas e a quantidade de biomassa utilizada o suficiente para completar os 100 mL da proveta, de tal maneira que a biomassa estivesse bem compactada e o nível da amostra nivelado com o traço de aferimento da proveta. A densidade foi calculada pela razão entre a massa da biomassa utilizada e o volume do recipiente. A densidade energética foi determinada a partir da multiplicação da densidade aparente média dos lodos pelo poder calorífico superior, com resultados expressos em MJ/m³. As análises foram realizadas em triplicata.

Caracterização química das cinzas

Para avaliar a composição química das cinzas das amostras de lodos, estas foram queimadas em mufla a 575 °C pelo período de 3 horas, conforme procedimentos descritos na norma ASTM 1755-01 (2007). A caracterização química das cinzas foi realizada nos laboratórios da UDESC, utilizando-se a Análise Química Semiquantitativa por Fluorescência de Raios-X e Energia Dispersiva (EDS), em equipamento de bancada marca Shimadzu. O ensaio foi realizado em vácuo com a amostra na forma de pó.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E TÉRMICAS DAS AMOSTRAS DE LODOS

Análise Química Aproximada

Na Figura 2 estão apresentados os resultados da análise química aproximada (teores de umidade, sólidos totais, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) das amostras de lodos (primário e secundário úmido) gerados em um

abatedouro e frigorífico de aves. Segundo Rodrigues (2010), essa análise permite conhecer as formas disponíveis de energia na biomassa, ou seja, fornece a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como dá uma indicação do material residual (cinzas).

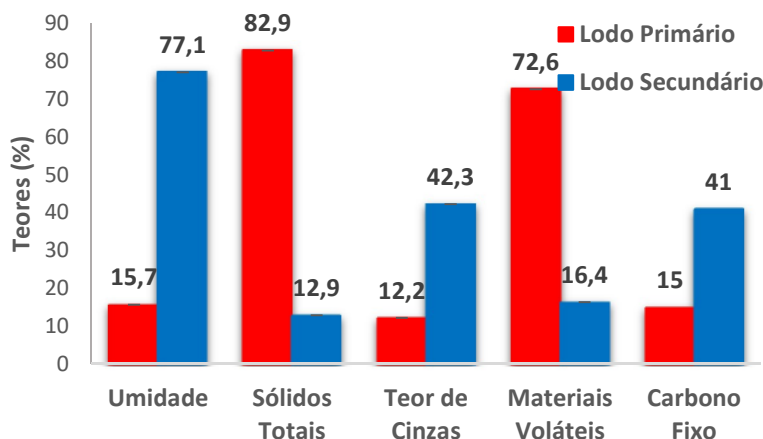


Figura 2: Análise química aproximada dos lodos de um frigorífico e abatedouro de aves.

O lodo primário apresentou baixo teor de umidade, de 15,7%, devido à secagem em digestor, enquanto o lodo secundário apresentou teor de umidade elevado, de 77,1%, pois o mesmo não foi submetido à secagem, houve apenas separação do efluente líquido pelo processo de centrifugação no *Bidecanter*. Sena (2005) encontrou valores de 70% de umidade para lodo de frigorífico e abatedouro que, após passar por um secador, foi reduzido para 15%, e Meneghini *et al.*, (2015) obteve valor médio de 12,8% de umidade para o lodo seco. A umidade interfere diretamente no processo de combustão, pois a maior parte da energia liberada durante processos térmicos é consumida para evaporar a água presente na biomassa, sendo assim, para gerar uma maior quantidade de energia a partir de uma menor massa de biomassa, torna-se importante a secagem do lodo antes da sua queima. Desta forma, deve existir uma etapa de secagem para o lodo secundário avaliado neste trabalho, a fim de proporcionar combustão mais eficiente (ABREU, 2015; BORGES, 2008).

O teor de sólidos totais do lodo primário foi de 82,9%, e do lodo secundário de 12,9%. O baixo valor para o lodo secundário foi devido à elevada umidade presente na biomassa. Meneghini *et al.*, (2015) encontrou teor de 81,7% de sólidos totais para o lodo de frigorífico e abatedouro seco.

O lodo primário apresentou teor de cinzas de (12,2%) e o lodo secundário de 42,3%. Este maior teor do lodo secundário é devido à maior quantidade de materiais inorgânicos, não voláteis, presentes no efluente a partir do qual o lodo foi gerado. Sena (2005) encontrou para lodos de abatedouro e frigorífico 5% de cinzas e Meneghini *et al.* (2015) de 17,5%. O alto teor de cinzas é insatisfatório para os processos de combustão, pois as cinzas são materiais inertes que não produzem calor, e o seu aumento, consequentemente, diminui o poder calorífico, ou seja, não contribuem para o calor total liberado na combustão (VIRMOND, 2007). As cinzas nas caldeiras das indústrias são indesejáveis. A temperatura de fusão delas depende da sua composição e, em elevadas temperaturas, podem fundir-se e ocorrer acumulação, formando incrustações e escórias, tendo como consequência dificuldade na transferência de calor pelos equipamentos. A formação de escória não é observada em combustíveis que possuem teores de cinzas inferiores à 6%, mas sim em teores superiores à 12%, porém, isso pode variar com a temperatura de fusão das cinzas, sendo assim quanto menor o seu teor melhor a qualidade do combustível (RENDEIRO, 2008).

O lodo primário apresentou teores de materiais voláteis de 72,6% e o lodo secundário de 16,4%. O lodo de frigorífico e abatedouro, analisado por Sena (2005), apresentou teor de materiais voláteis de 81,3% e o analisado por Meneghini *et al.* (2015) de 64,22%. Esse parâmetro representa o percentual de componentes presentes na biomassa que serão volatilizados durante a combustão. Biomassas combustíveis com altos teores de sólidos voláteis são favoráveis ao processo de combustão e geração de energia, pois, quanto maior este teor maior será a reatividade e, consequentemente, maior a ignição (VIEIRA, 2012; TOLEDO *et al.*, 2015).

O lodo primário exibiu baixo valor de carbono fixo, de 15%, e o lodo secundário de 41%. Sena (2005) obteve teores de carbono fixo para o lodo de abatedouro e frigorífico de 13%. Fischer (2015) encontrou, para o cavaco e para a serragem de madeira que, atualmente, são as biomassas mais utilizadas como combustíveis em caldeiras,

teores de 39,59 e 34,12%, respectivamente. O teor de carbono fixo apresenta relação inversamente proporcional ao percentual de materiais voláteis. O teor de carbono fixo representa a fração de material orgânico não liberado durante a volatilização, excluindo as cinzas e teores de umidade. Biomassas com elevados teores de carbono fixo (baixo índice de voláteis) terão uma queima mais lenta, sendo assim, requerem maior tempo de residência na fornalha até a sua queima total (MCKENDRY, 2001; AVELAR, 2012).

Análise Química Elementar

O conhecimento da composição química imediata ou elementar da biomassa também é importante para o dimensionamento da fornalha (TOLEDO *et al.* 2015). Na Figura 3 estão apresentados os resultados da análise química elementar das biomassas (lodo) provenientes do abatedouro e frigorífico de aves. O lodo primário apresentou o maior teor de carbono, de 40,3%, enquanto, que para o lodo secundário foi de 23,6%. O valor obtido para o lodo primário foi menor que o encontrado por Sena (2005), de 55%, o que pode ter ocorrido devido à grande quantidade de matéria orgânica ter sido retirada dos efluentes da linha vermelha na fábrica de farinha e óleos antes da sua chegada à estação de tratamento de efluentes. O maior teor de carbono do lodo primário é em função das águas residuárias que o mesmo é proveniente, que contêm sangue, gordura, excrementos, substâncias contidas no trato digestivo dos animais, fragmentos de tecidos, etc, caracterizando-se como um efluente com elevada concentração de matéria orgânica (MARIA, 2008). Segundo Toledo *et al.* (2015), quanto maior o teor de carbono na biomassa, maior será o seu poder calorífico.

O teor de hidrogênio do lodo primário foi de 7,9% e do lodo secundário de 5,3%. Sena (2005) obteve teor similar para o lodo de frigorífico, de 7,6%, enquanto Meneghini *et al.* (2014) encontrou teor mais elevado, de 11,5%. Segundo Maia (2013), o hidrogênio, assim como o carbono, durante a combustão, são oxidados e liberam energia na forma de calor. Não houve diferenças significativas entre os teores de N e S dos dois lodos avaliados. Estes valores foram menores que os obtidos por Sena (2005), que foram de 6% de nitrogênio e 0,62% de enxofre. Sendo assim, as duas biomassas em estudo possuem teores de nitrogênio e enxofre satisfatórios, pois garantem, durante a sua combustão, baixas emissões de gases poluentes formadores de óxidos nitrosos (NOx) e óxidos de enxofre (SOx), que são gases corrosivos e tóxicos (RODRIGUES, 2010).

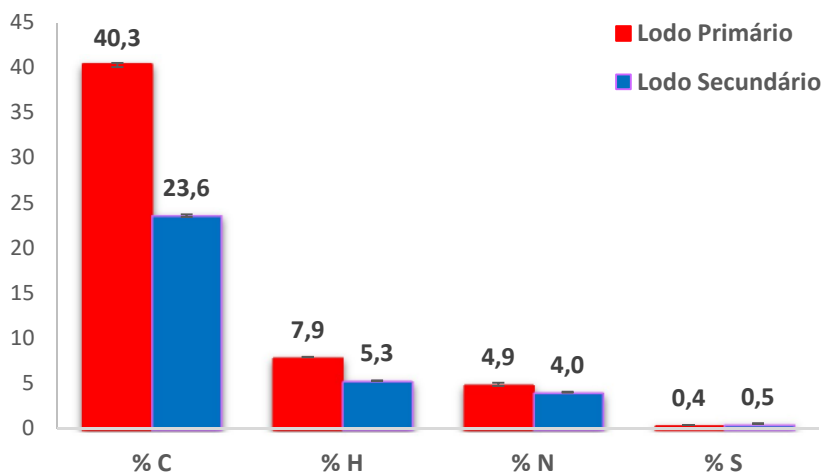


Figura 3: Teores de carbono (%C), hidrogênio (%H), nitrogênio (%N) e enxofre (%S) dos lodos provenientes de um abatedouro e frigorífico de aves em base seca.

Poder Calorífico

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados das análises de poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) das biomassas do abatedouro e frigorífico de aves, comparados com resultados obtidos da literatura. Observa-se, da Tabela 1, que o poder calorífico do lodo primário (superior de 22,3 MJ/kg e inferior de 20,7 MJ/kg) foi superior ao do lodo secundário. Essa diferença está relacionada aos teores determinados pelas análises químicas aproximada e elementar. Este resultado já era esperado, pois o lodo primário apresentou teores mais elevados de carbono e hidrogênio, acarretando, assim, em maior poder calorífico superior e inferior para esta biomassa. O lodo secundário apresentou elevado teor de cinzas, constituídas de material inerte, que não contribui na liberação

de energia durante a combustão, resultando em poder calorífico menor. Segundo Sena (2005), estas variações são causadas pelo percentual de carbono das amostras, oriundas das diferentes características dos efluentes, ou seja, estão relacionados às condições de abate, horários de produção, origem do efluente e a outros fenômenos do processo.

Tabela 1: Valores do poder calorífico das biomassas provenientes de um abatedouro e frigorífico de aves e de literatura.

BIOMASSA	PODER CALORÍFICO SUPERIOR (MJ/kg)	PODER CALORÍFICO INFERIOR (MJ/kg)
Lodo Primário	22,3	20,7
Lodo Secundário	18,5	17,4
Lodo Frigorífico Aves ¹	25,6	23,8
Lodo Frigorífico Aves ²	20,0	18,0
Lodo Frigorífico Bovino ³	21,6	17,0

¹Sena (2005), ²Meneghini *et al.*, (2015), ³Pasquini (2014).

Fischer (2015) encontrou poder calorífico superior e inferior para o cavaco de madeira de 8,04 e 9,37 MJ/kg, respectivamente, e para serragem de madeira o poder calorífico superior e inferior foi de 5,95 e 7,39 MJ/kg, respectivamente. O poder calorífico do lodo de abatedouros e frigoríficos é elevado, quando comparado com outras biomassas tradicionais, possibilitando assim a sua utilização como uma eficiente fonte energética. No entanto, esta biomassa contém alto teor de umidade, necessitando de secagem prévia antes de sua utilização como combustível (SENA, 2005).

A partir dos resultados obtidos na análise química elementar e poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), observou-se que, após secagem, as duas biomassas em estudo apresentam potencial para geração de energia, no entanto, deve ser dada atenção ao elevado teor de cinzas do lodo secundário, o qual pode causar muitos problemas durante a sua queima, inclusive, a redução do poder calorífico superior (VIEIRA, 2013).

Análises Térmicas

Nas Figuras 4, 5 e 6 estão apresentadas as curvas ATG (análise termogravimétrica) e DTG (termogravimetria derivada), em atmosfera oxidante, das amostras de lodos do abatedouro frigorífico de aves. Segundo Folgueras *et al.* (2003), essa análise contribui para melhorar o conhecimento do processo de conversão térmica das biomassas e, por conseguinte, o estabelecimento das condições ideais de operação, a fim de determinar a taxa de decomposição das substâncias.

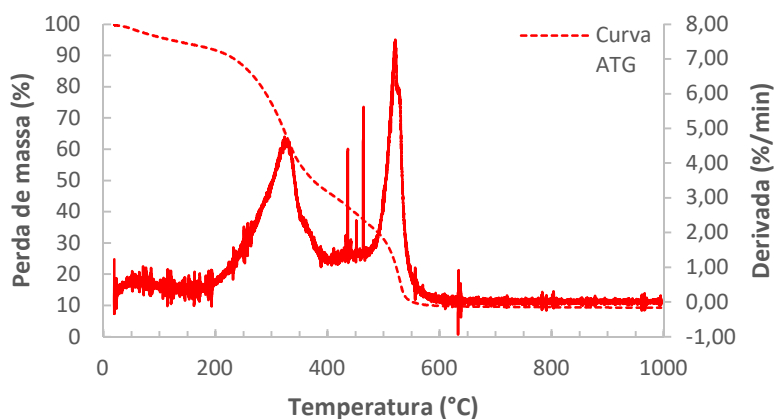


Figura 4: ATG e DTG da amostra de lodo primário.

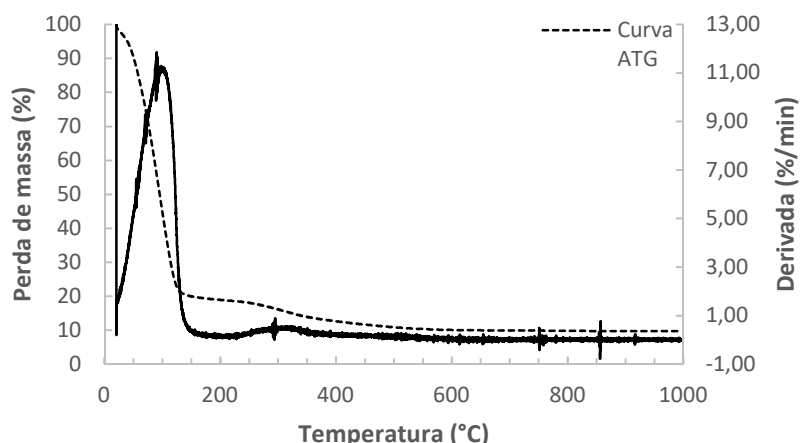


Figura 5: ATG e DTG da amostra de lodo secundário úmido.

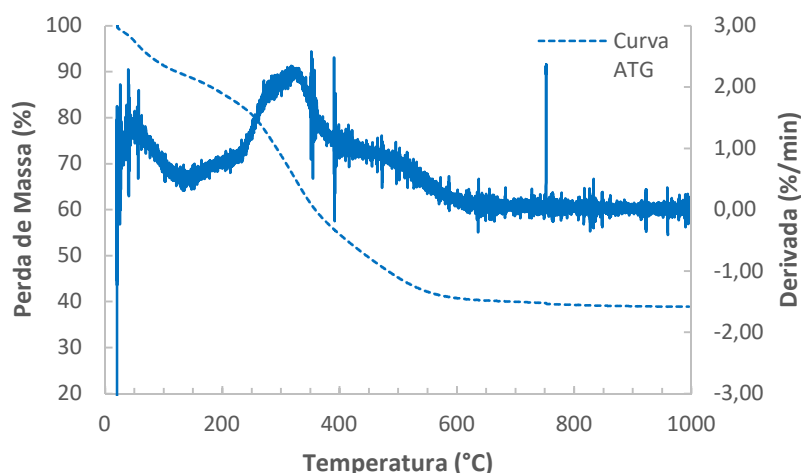


Figura 6: ATG e DTG da amostra de lodo secundário seco.

Observa-se das Figuras 4, 5 e 6, que as amostras de lodos primário e secundário seco apresentaram três estágios de degradação térmica e a de lodo secundário úmido dois estágios. O primeiro estágio está relacionado à evaporação da umidade. O lodo primário teve sua primeira perda de massa entre a temperatura ambiente e, aproximadamente, 180 °C, correspondente a uma perda de massa de 8%. Para o lodo secundário úmido, como a amostra não foi inicialmente seca, verificou-se, até a temperatura de 150 °C, perda de massa de 80%, e para o lodo secundário seco, até a temperatura de 150 °C, perda de 12% de sua massa. No segundo estágio, ocorreu a degradação dos materiais voláteis. O lodo primário teve seu segundo estágio de perda de massa entre 185 e 400 °C, de aproximadamente 46%, o lodo secundário úmido, entre 200 e 400 °C, de 8%, e o lodo secundário seco, de 150 a 400 °C, de 34%. Nesta região, ocorreu o maior percentual de perda de massa para quase todos os resíduos, exceto para o lodo úmido que continha uma elevada umidade (de aproximadamente 77%). O terceiro estágio, relacionado à perda de massa de materiais orgânicos de difícil degradação, ocorreu para o lodo primário entre 450 °C e 620 °C e para o lodo secundário seco entre 410 °C e 680 °C. O lodo secundário seco foi o que apresentou o maior percentual de resíduos no final da queima, totalizando, aproximadamente, 40%, valor bastante próximo ao teor de cinzas determinado pela análise química aproximada das amostras, de 42,5%. Embora os dois lodos secundários tivessem as mesmas características, as porcentagens de resíduos finais foram diferentes, devido à maior quantidade de umidade presente no lodo secundário úmido, que reduz o percentual de materiais inorgânicos.

Nas análises realizadas por Pasquini (2014), o lodo de frigorífico de carne bovina perdeu 38% de massa até a temperatura de 500 °C e 50% até 1000 °C, restando 12% de resíduo final (cinzas). Segundo Virmond (2007), o

lodo de frigorífico é constituído principalmente de compostos orgânicos de baixa estabilidade, apresentando taxas máximas de decomposição na faixa de temperatura de, aproximadamente, 209 a 346 °C, porém, o número de picos e a diversidade de localização destes nas curvas de TGA têm relação com a composição bioquímica do lodo.

A Figura 7 apresenta as curvas da análise térmica diferencial (ATD), em atmosfera oxidante, das amostras de lodos. Segundo Gómes (2002), a análise térmica diferencial (ATD) representa a variação do fluxo de calor produzido ou absorvido pela amostra analisada durante o seu aquecimento. Observa-se, na Figura 7, que as três biomassas apresentaram curvas bastante distintas. O lodo secundário úmido apresentou evento endotérmico (consumo de energia), da temperatura ambiente até 160 °C, bastante significativo, referente à evaporação da água presente, e pico exotérmico de baixa intensidade em 330 °C, relacionado à liberação de energia na degradação dos materiais voláteis. Os lodos primário e secundário seco apresentaram dois eventos exotérmicos, sendo o pico mais intenso para o lodo primário, indicando maior liberação de energia na combustão, em 527 °C, e maior estabilidade térmica, este pico está relacionado a decomposição da matéria inorgânica, como carbonato de cálcio, que é proveniente dos produtos químicos utilizados na estação de tratamento de efluentes. Pasquini (2014) observou pico máximo para um lodo de frigorífico de carne bovina em 305 °C.

Segundo Virmond (2007), a umidade do combustível é um fator limitante na combustão da biomassa devido a influência que exerce sobre o poder calorífico. A reação de combustão é exotérmica e a evaporação da água é altamente endotérmica. O limite autotérmico para a maioria das biomassas combustíveis é próximo a 65% de umidade. Acima desse limite, a energia liberada pela combustão é insuficiente para satisfazer a evaporação e a produção de calor.

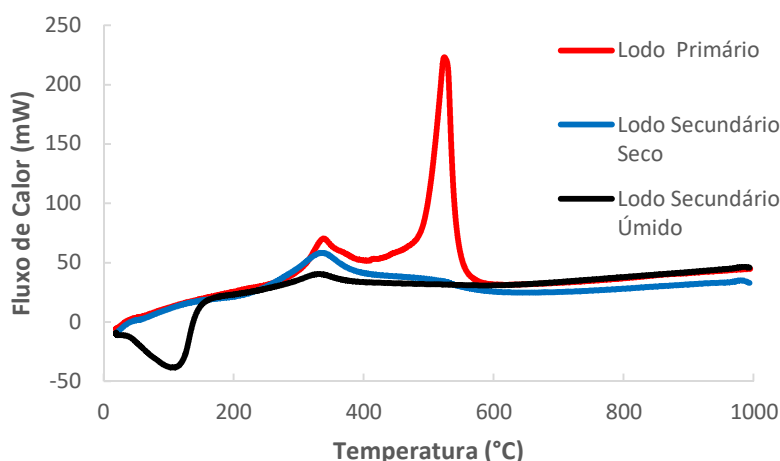


Figura 7: ATD das amostras de lodos do abatedouro e frigorífico de aves.

Densidades Aparente e Energética

Na Tabela 2 estão apresentados os valores de densidades aparente e energética das amostras de lodos.

Tabela 2: Densidades aparente e energética dos lodos provenientes de um abatedouro e frigorífico de aves.

BIOMASSA	DENSIDADE APARENTE (kg/m³)	DENSIDADE ENERGÉTICA (MJ/m³)
Lodo Primário	750 ± 10	16.762,5
Lodo Secundário	547 ± 9	10.146,8

O lodo primário apresentou densidade aparente de 750 kg/m^3 , maior que a do lodo secundário, cujo valor foi de 547 kg/m^3 . Rodrigues (2010) obteve valores de densidade aparente entre 1100 e 1500 kg/m^3 para briquetes produzidos com diferentes misturas de lodo de uma indústria de celulose misturado com finos de madeira. Esta alta densidade aparente nos briquetes foi em função da prensagem da biomassa. Gentil (2008) encontrou para a serragem de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* a granel densidade aparente de 306 kg/m^3 e após a sua briquetagem o valor foi de 1042 kg/m^3 .

Segundo Furtado *et al.* (2010), a densidade expressa a quantidade de material por unidade de volume, sendo assim, quanto maior, mais concentrada é a energia contida na biomassa, e assim maior será o potencial energético em um mesmo volume. O processo de briquetagem reduz o volume da biomassa, o que é muito importante para materiais com baixa densidade. Porém, estes demandam maior energia no processo de compactação durante a compactação, enquanto que materiais com alta densidade apresentam pouca variação (RODRIGUES, 2010). Como as biomassas em estudo apresentam densidade aparente relativamente baixa, não seria viável o processo de briquetagem. Este seria viável, somente se ocorresse a sua mistura com biomassa de densidade aparente mais elevada, a fim de equilibrar as suas densidades, e também nos casos em que for necessária a estocagem ou transporte previamente à combustão, afim de reduzir o seu volume, custos com transporte e armazenamento, concentrando um maior potencial energético em um menor espaço físico.

Com relação à densidade energética, o lodo primário apresentou maior valor, de $16.762,5 \text{ MJ/m}^3$, quando comparado com o lodo secundário. Essa biomassa possui maior quantidade de energia por unidade de volume, sendo, portanto, melhor do ponto de vista energético. Quando comparada com outras biomassas, os lodos avaliados no presente estudo apresentam densidade energética elevada. Gentil (2008) encontrou valores de densidade energética para a serragem de *Pinus sp* a granel de 8.368 MJ/m^3 e para o briquete sólido de 12.552 MJ/m^3 .

Características química das cinzas das amostras de lodo

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados da caracterização química semiquantitativa das cinzas das amostras dos lodos.

Tabela 3: Composição química semiquantitativa das cinzas dos lodos de abatedouros e frigorífico de aves.

METAIS	CONCENTRAÇÃO (%)	
	LODO PRIMÁRIO	LODO SECUNDÁRIO
Al_2O_3	41,867	62,503
P_2O_5	32,612	22,257
SiO_2	5,742	7,756
CaO	14,028	3,177
Fe_2O_3	2,752	2,136
SO_3	1,372	0,893
K_2O	0,851	0,871
TiO_2	0,196	0,187
CuO	0,236	0,14

Observa-se na Tabela 3, que o óxido presente em concentrações mais elevadas nas cinzas dos dois lodos é o óxido de alumínio, que é proveniente do coagulante utilizado no tratamento dos efluentes. A empresa utiliza o policloreto de alumínio 18 % (PAC 18), seu teor de Al_2O_3 está entre 16 e 18 %. O lodo secundário possui 21% a mais de óxido de alumínio em sua composição do que o lodo primário, e isso ocorre porque é adicionado coagulante no flotador 1 e, após, o efluente segue para as lagoas anaeróbia, aeróbia e para o flotador 2, onde é adicionado mais coagulante.

A fim de reduzir a quantidade de óxidos de alumínio presentes no lodo, e sucessivamente nas cinzas, uma das alternativas seria a substituição do coagulante PAC 18 pelo sulfato férrico (SF-PIX). Schoenhals *et al.* (2006) avaliou a eficiência do processo de coagulação/floculação aplicado como tratamento primário de efluentes de abatedouro de aves, pelo emprego de três coagulantes comerciais: SF-PIX, CF-PIX e PAC. O coagulante SF-PIX proporcionou os melhores resultados, reduzindo fortemente a carga poluidora do efluente e a maior variação nas dosagens ocorreu para o coagulante PAC, pois para um resultado satisfatório foi necessária uma dosagem maior em relação aos coagulantes férricos. Nos estudos realizados por Sena (2005), o SF-PIX também apresentou maior eficiência global, ressaltando também que o volume de lodo ainda pode ser reduzido quando um eficiente polímero aniônico (floculante) é utilizado juntamente com o coagulante.

Com a substituição do policloreto de alumínio pelo sulfato de ferro, a quantidade de óxido de ferro presente nas cinzas, que hoje está em torno de 2% sofreria aumento. Porém, em função da maior eficiência do sulfato de ferro, a quantidade de coagulante utilizado na estação de tratamento será menor, então, consequentemente, a quantidade de ferro será menor que as quantidades de alumínio que se encontram presentes no lodo e, posteriormente, nas cinzas.

Segundo Sena (2005), os sais de ferro são muito utilizados como coagulantes no tratamento de efluentes frigoríficos, suas reações são as de neutralização de cargas, e formação de hidróxidos insolúveis de ferro, que são as substâncias com ação coagulante, tendo sua faixa de atuação sobre pH entre 5,0 e 11,0. Além de uma faixa de pH mais abrangente para coagulação, os sais férricos são os mais utilizados para a flotação de efluentes agroindustriais, pois formam flocos de menor densidade, favorecendo os processos de flotação. Os sais de alumínio apresentam maior eficiência no tratamento de efluentes por decantação, porém um fator negativo é a necessidade de correção de pH, como por exemplo, a faixa de atuação do PAC é em pH de 7,5.

Outro fator que deve ser levado em consideração são os gases gerados na combustão das biomassas, pois o poli cloreto de alumínio (PAC 18) tem em sua composição o cloro, que acima de 200 °C degrada, ocasionando a liberação de gás cloro, o mesmo pode resultar na formação de HCl, dioxinas e furanos, e outras espécies organocloradas. Sendo assim, a utilização de coagulantes isentos de Cl, como o sulfato férrico, torna-se uma solução plausível para este propósito (SENA, 2005).

Duran (2014) estudou a viabilidade econômica da troca do policloreto de alumínio por cloreto férrico, sendo este mais atrativo, alcançando um custo mensal 29,6% inferior ao custo referente à compra de policloreto de alumínio se forem usados na mesma proporção. Segundo Sena (2005), o sulfato de alumínio é 30% mais barato em relação ao cloreto férrico, ou seja, a substituição do policloreto de alumínio pelo sulfato férrico torna-se viável. A fim de verificar essas informações, buscou-se valores com os fornecedores desses produtos, e constatou-se que o valor do sulfato férrico é 45% inferior ao policloreto de alumínio, ou seja, com a sua substituição a economia será de aproximadamente R\$ 640,00 (\$ 154,00) por tonelada de coagulante.

Outra alternativa para reduzir a quantidade de metais presentes no lodo, seria a utilização de coagulantes orgânicos, como é o caso do Tanfloc, que é obtido por meio de um processo de lixiviação da casca da acácia negra, sendo constituído basicamente por tanato quartenário de amônio (TANAC, 2008). Segundo Zolett (2013), a justificativa pela utilização desse coagulante é a questão ambiental, pois o produto tem origem vegetal e é biodegradável, facilitando a disposição final do lodo ou a sua utilização para fins mais específicos, como por exemplo na agricultura, já que o mesmo possui ausência de metais. Porém, Solana (2014) estudou a viabilidade da utilização de um polímero de base orgânica em substituição ao cloreto férrico no tratamento de efluente industrial, e concluiu que, economicamente, a substituição dos coagulantes foi inviável, mas tecnicamente, foi viável, pois aumentou a eficiência do processo e gerou ganhos com a menor produção de lodo, que passou a ser biodegradável e sem a presença de metais, o que poderá evitar problemas com corrosão de equipamentos.

O segundo óxido mais abundante nos dois tipos de cinzas em estudo é o pentóxido de fósforo, que tem origem dos dejetos de aves e dos detergentes e outros produtos químicos utilizados nas higienizações. As cinzas do lodo primário contêm 10% de pentóxido de fósforo a mais do que as provenientes do lodo secundário, e isso ocorre devido a remoção de fósforo no flotador 1 e nas lagoas, porém, a quantidade nas cinzas do lodo secundário ainda é elevada.

Segundo Von Sperling (2002), as lagoas de estabilização bem projetadas e operadas apresentam eficiências significativas de remoção de fósforo. A fim de melhorar essa eficiência para reduzir a quantidade de fósforo no lodo secundário, algumas ações precisam ser realizadas, tais como a verificação do tempo de detenção das lagoas, que pode estar sendo baixo, em função do volume de efluente que está sendo tratado ser maior do que o previsto

em projeto; e o acúmulo de lodo no fundo das lagoas, que consequentemente diminuem a sua altura e o seu tempo de detenção. O efluente entra na lagoa anaeróbia com 0,8 mL/L de sólidos sedimentáveis, e sai da lagoa aeróbia com 0,4 mL/L, ou seja, metade desses sólidos sedimentam no fundo das lagoas. Sendo assim, deve ser estabelecida uma periodicidade de remoção desses sólidos e também uma reavaliação de projeto dessas lagoas, e se necessário aumentar o tamanho delas.

As cinzas do lodo secundário contêm cerca de 7% de dióxido de silício, e as provenientes do lodo primário 5%. Essa maior porcentagem do lodo secundário é em função das características dos efluentes da linha verde, que é proveniente de lavagens de caminhões e que carregam com eles resíduos como areia, argila e rochas. A sílica sozinha não apresenta grandes problemas, porém se seus teores forem elevados, as probabilidades de reagirem com os metais é grande, e assim podem provocar problemas operacionais (MCKENDRY, 2001). As cinzas provenientes do lodo primário contêm 14% de óxido de cálcio, que é proveniente da adição de cal hidratada no flotor 1 para controlar o pH. Se for utilizado o sulfato férrico, não será necessário controlar o pH, consequentemente, a quantidade de óxido de cálcio presente no lodo reduzirá. Os óxidos minoritários nas duas amostras analisadas foram semelhantes, sendo por ordem decrescente K_2O , TiO_2 , CuO , ZnO .

O conteúdo das cinzas é fortemente influenciado pelo tipo de biomassa, sendo este um grande parâmetro que influencia nos custos do processo de conversão de energia da biomassa (MCKENDRY, 2001). Segundo Silva (2012), as características das cinzas resultantes do processo de combustão variam em função do tipo e origem do combustível e das condições de combustão. Ela está apresentada na forma de óxidos, e a concentração de óxidos principais varia devido à sua origem. Existem dois tipos de óxidos, os óxidos de base que são Na_2O , K_2O , MgO , CaO e Fe_2O_3 , e os óxidos ácido que são SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 , os compostos básicos tendem a reduzir as temperaturas de fusão das cinzas enquanto que os óxidos ácidos a aumentar (MAGDZIARZ, 2016). Os metais presentes nas cinzas reagem com outros elementos do combustível, como a sílica e o enxofre, e causam problemas indesejáveis como incrustações; os cloretos facilitam esses acontecimentos, afetando também a operação de combustão. Por isso, a importância em conhecer o conteúdo dos metais alcalinos da biomassa, pois estes podem reagir com a sílica presente nas cinzas, e ocasionar problemas de incrustações, aglomeração e corrosão (MCKENDRY, 2001).

CONCLUSÃO

O lodo primário apresentou maiores teores de materiais voláteis e carbono, menores teores de umidade e cinzas e maiores estabilidade térmica e liberação de energia sob aquecimento em atmosfera oxidante, do que o lodo secundário seco. Devido ao alto teor de umidade, o lodo secundário úmido necessita de secagem prévia. Os teores de nitrogênio e enxofre foram relativamente baixos para as duas biomassas, garantindo baixas emissões de NO_x e SO_x durante o processo de combustão. Com relação ao potencial energético, mesmo com algumas características físicas e químicas diferenciadas, os dois lodos, primário e secundário secos, apresentaram elevado poder calorífico, de 18,5 e 22,3 MJ/kg, respectivamente, valores muito superiores aos de biomassas mais utilizadas atualmente como combustível, como é o caso da serragem de madeira. As duas biomassas apresentaram densidade energética média de 13.454, 8 MJ/m³, não necessitando serem compactadas na forma de briquetes para uso em processos de combustão. A partir da caracterização dos dois lodos provenientes de abatedouro e frigorífico de aves, verificou-se o potencial de utilização direta do lodo primário como biomassa combustível nos processos de combustão. Porém, em função do seu teor de cinzas (12,2%), pode ocorrer a formação de escória durante a sua combustão, sendo assim, alguns procedimentos da geração do lodo primário devem ser otimizados, a fim de reduzir esse teor e também aproveitar toda sua potencialidade energética. O lodo secundário apresentou elevado teor de cinzas de 42,3%, o que inviabiliza a sua utilização em processo de combustão. Os óxidos presentes em maiores quantidades nas cinzas provenientes dos dois tipos de biomassas, em ordem decrescente, foram o óxido de alumínio e o pentóxido de fósforo. A fim de reduzir o elevado teor de cinzas do lodo secundário, para tornar viável a sua combustão, algumas ações devem ser tomadas, a principal delas é a redução da quantidade de alumínio presente no lodo, através da substituição do coagulante policloreto de alumínio por sulfato férrico, sendo técnica e economicamente viável. O outro ponto positivo dessa substituição é a diminuição de produto químico utilizado para controlar o pH, visto que pode ser aplicado em extensa faixa de pH, e assim reduzirá a quantidade de óxido de cálcio no lodo, que atualmente é o produto utilizado. Ações para melhorar a remoção de fósforo nas lagoas de estabilização também devem ser tomadas. Com as etapas do processo de geração do lodo secundário otimizadas na ETE, sua utilização pode ser viável, ocasionando uma destinação mais nobre e contribuindo para a redução do uso de combustíveis primários. Finalmente, o uso como biomassas combustíveis

contribuirá para uma produção mais limpa e minimização de resíduos, práticas que cada vez mais vem ganhando destaque dentro dos parques fabris.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. _____. E 1755-01. Standard Test Method for Ash in Biomass, 2007.
2. _____. E 1756-08. Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass, 2008.
3. _____. E 871 - 82. Standard Test Method Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2013.
4. _____. E 872 - 82. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, 2006.
5. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.633: Determinação do poder calorífico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.
6. ABREU, C. E. S. Combustão *Smouldering*: Influência da umidade e da configuração do leito no tratamento termoquímico do lodo de esgoto. 2015. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
7. ANDREOLI, C. V. Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Curitiba: PROSAB, 2001.
8. AVELAR, N. V. Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos. 2012. 71f. Dissertação (*Magister Scientiae*) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
9. BORGES, F. Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes domésticos e industrial como combustível na geração de energia. 2008. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville.
10. CAMARGO, O.; BETTIOL, W. Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura. Embrapa Meio Ambiente. 1. ed. Jaguariúna, 2006.
11. DURAN, K. A. Estudo da viabilidade técnica e econômica de troca de Poli Cloreto de Alumínio por Cloreto Férrico no processo de coagulação do tratamento primário de efluente líquido em indústria de produtos lácteos. 2014. 30f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poço de Caldas.
12. EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.
13. FISCHER, S. O. Avaliação do potencial de uso de lodo têxtil como biomassa combustível para geração de energia. 2015. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville.
14. FOLGUERAS, M. B.; DÍAZ R. M.; XIBERTA J.; PRIETO I. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. Fuel. v. 82, p. 2051–2055, 2003.
15. FONTES, C. M. A. Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland. 2003. 120f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
16. FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND M. A.; BELLOTE A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. Pesquisa Floresta Brasileira, v. 30, p. 101-106, 2010.
17. FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. Renewable e Sustainable Energy Reviews. p. 117-138, 2006.
18. GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN. A. G.; BUENO, J. L. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technology. v. 103, p. 249-258, 2012.
19. GÓMEZ, E. O. Estudo da Pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão. 2002. 369f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
20. GENTIL, L. V. B. Tecnologia e economia do briquete de madeira. 2008. 296f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília.
21. HAANDEL, A. V. Potencial de geração de energia a partir do lodo de sistemas de tratamento de esgoto. Revista Aidis, v. 2, p. 125-142, 2009.
22. LOZADA, J. A. R. Prospecção de bactérias do lodo de esgoto de abatedouro de aves com potencial degradador de substâncias orgânicas e promotor do crescimento de plantas. 2015. 77f. Dissertação (*Magister Scientiae* em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

23. MAIA, B. G. O. Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes. 2013. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Joinville.
24. MAGDZIARZ, A.; WILK, M.; GAJEK, M.; NOWAK-WOZNY, D.; KOPIA, A.; KALEMBA-REC, I.; KOZINSKI, J. A. Properties of ash generated during sewage sludge combustion: A multifaceted analysis. *Energy*. v. 133, p. 85-94, 2016.
25. MARIA, R. R. Avaliação da eficácia no tratamento de efluentes líquidos em frigoríficos. 2008. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade Dinâmica das Cataratas – UDC, Foz do Iguaçu.
26. MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. v. 83, p. 37-46, 2001.
27. MENEGHINI, C.; PROINELLI R.; PINTRO D. A B. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor. 2015. 7f. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental - Universidade do Oeste de Santa Catarina, Porto Alegre.
28. MOREIRA A. H. Efeito da adição de águas residuais da indústria têxtil nas propriedades de materiais de construção. 2001. 5f. Artigo Científico (Departamento de Química Analítica e Físico-Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
29. NOGUEIRA, L. A. H.; HORTA F. J.; ROCHA. C. R. Eficiência energética no uso de vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
30. PASQUINI, N. C. Uso potencial como fonte de energia de lodo proveniente de esgoto doméstico e industrial. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, v. 16, p. 35-57, 2014.
31. RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.
32. RODRIGUES, V. A. J. Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem. 2010. 117f. Dissertação (*Magister Scientiae*) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
33. ROSA, A. P. Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. 2013. 152f. Tese (Doutorado ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
34. ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. *Revista DAE*. p. 55-62, 2014.
35. SENA, R. F. Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia. 2005. 83f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
36. SCHOENHALS, M.; SENA, R. F.; JOSÉ, H. J. Avaliação da eficiência do processo de coagulação/flotação aplicado como tratamento primário de efluentes de abatedouro de frangos. *Engenharia Ambiental*. p. 5-24, 2006.
37. SILVA, T. C. S. R. S. Características da cinza da combustão de diferentes tipos de biomassa. 2012. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade de Aveiro, Portugal.
38. SOLANA, I. Estudo da viabilidade de utilização de um polímero de base orgânica em substituição ao cloreto férrico no tratamento de efluente industrial. 2014. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira.
39. SPINOSA, L.; AYOL, A.; BAUDEZ, J. C.; CANZIANI, R.; JENICEK, P.; LEONARD. A.; RULKENS, W.; XU, G.; DIJK, L. V. Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management. *Water*. v. 3, p. 702-717, 2010.
40. SROKA, E.; KAMINSKI, W.; BOHDZIEWICZ, J. Biological treatment of meat industry wastewater. *Desalination*. v.162, p. 85-91, 2004.
41. TANAC. Boletim Informativo. Montenegro. Brasil, 2008, 57 p.
42. TOLEDO, M. Estudo preliminar do potencial energético de variedades de eucalipto cultivadas no Rio Grande do Sul. 2015. 7f. Artigo Científico (Centro de Estudos em Biorrefinaria) - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.
43. VIEIRA, A. C. Caracterização da Biomassa proveniente de resíduos agrícolas. 2012. 72f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.
44. VIRMOND, E. Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia. 2007. 134f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
45. VON SPERLING, M. Lagoas de Estabilização. *E atual*. v. 2. 2002.

46. ZOLETT, E. R. Uso de polímero natural a base de tanino (tanfloc) para o tratamento de água para o consumo humano. 2013. 8f. XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.