

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

EDUARDO DE PAULA SCHULZ

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE LODO BIOLÓGICO COMO
COMBUSTÍVEL EM CALDEIRAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2019

EDUARDO DE PAULA SCHULZ

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE LODO BIOLÓGICO COMO
COMBUSTÍVEL EM CALDEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Ambiental, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ilton Jose Baraldi
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

MEDIANEIRA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

Potencial de aproveitamento de lodo biológico como combustível em caldeiras

Por

Eduardo de Paula Schulz

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 15:30h do dia 06 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Ilton Jose Baraldi
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Orientador)

Prof. Dr. Eduardo Borges Lied
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

Prof. M.Sc. Felipe Martins Damaceno
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso -

“É difícil imaginar uma maneira mais perigosa de tomar decisões do que deixá-las nas mãos de pessoas que não pagam o preço por estarem erradas”

Thomas Sowell

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir estar concluindo mais uma etapa da minha vida.

Aos meus familiares, em especial, meus pais, por todo suporte, apoio e correção.

A todos os meus Professores que de alguma forma contribuíram nesta caminhada.

Aos meus orientadores, Professores Ilton e Eduardo, por toda compreensão e auxílio.

Ao meu Tio Luiz Schulz, que não mediu esforços para ajudar na proposta do TCC e na coleta de material.

A agroindústria que disponibilizou todos os dados e materiais necessários para a minha pesquisa.

A todos amigos e colegas que fizeram parte dessa caminhada junto a mim.

RESUMO

SCHULZ, Eduardo P. **Potencial de aproveitamento de lodo biológico como combustível em caldeiras**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

Em grande parte dos laticínios, são usados métodos biológicos para o tratamento dos efluentes, o que causa grande formação de lodo biológico. Esse resíduo sólido é armazenado dentro da própria planta industrial e posteriormente, destinados a outros locais fora da planta industrial geradora para ser tratado, elevando os custos operacionais. Por outro lado, a alta concentração de matéria orgânica presente no lodo o torna interessante para uso dentro da própria indústria, reintroduzindo-o como matéria prima energética para a queima em caldeira, que, por sua vez, é largamente utilizada na indústria para a produção de vapor para os mais diversos processos. Frente ao exposto, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a viabilidade técnica da queima de lodo na caldeira, por meio da comparação do potencial calorífico do lodo, em diferentes concentrações de umidade, combinado com o atual material usado na caldeira (cavaco). Para a realização do estudo foram utilizadas técnicas de secagem e calcinação em estufa de secagem com recirculação de ar e mufla, além de bomba calorimétrica para detecção do poder calorífico dos materiais analisados. Através deste trabalho, determinou-se o poder calorífico do lodo *in natura*, 2025,96 kJ/kg, que se encontra uma concentração de sólidos de 17,99%, projetando uma economia na ordem de R\$38.334,45 por mês com a queima do lodo em caldeira dentro da própria planta industrial geradora do resíduo. Foi analisada a economia prevista com a queima de lodo com pré-secagem até a concentração de sólidos de 50%, que detém um poder calorífico de 9646,55 kJ/kg, resultando em uma economia de R\$41.104,50 por mês. Portanto, foi possível concluir que a destinação do lodo *in natura* para a caldeira gera uma economia inferior quando comparado com a queima do lodo previamente seco, de forma que tenha tendência de viabilidade de instalação de uma planta de secagem do lodo na agroindústria. Necessita-se de mais estudos sobre o atendimento das legislações pertinentes da queima do *blend* energético de cavaco de lenha e lodo em diferentes concentrações de umidade.

Palavras-chave: Valoração de resíduos, economia, eficiência energética.

ABSTRACT

SCHULZ, Eduardo P. **Potential to use biological sludge as fuel in boilers.** 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

In most dairy products, biological methods are used for effluent treatment, or that cause large formation of biological sludge. This solid waste is stored within the industrial plant itself and subsequently uses other locations outside the generating industrial plant for treatment, increasing operating costs. On the other hand, a high concentration of organic matter present in the sludge or becomes interesting for use within the industry itself, reintroducing it as an energetic raw material for boiler burning, which, in turn, is widely used in the industry for production. Steam for the most diverse processes. In view of the exposure, the objective of this work is to evaluate the technical feasibility of boiler sludge burning by comparing the caloric potential of sludge at different filtration levels, combined with the material used in the boiler (chip). To perform the study, drying and calcination techniques were used in the drying oven with recirculating air and flakes, as well as the calorimetric pump to detect the calorific power of the analyzed materials. Through this work, the calorific power of in natura sludge was determined, 2025.96 kJ / kg, which finds a concentration of efforts of 17,99%, projecting a saving of R\$ 38.334,45 per month with burning of sludge in the boiler inside the waste generating plant itself. An estimated savings of burning pre-dried sludge to a concentration of 50%, which detects a calorific value of 9.646,55 kJ / kg, resulting in a saving of R\$ 41.104,50 per month was analyzed. Therefore, it was possible to conclude that the destination of fresh sludge for the boiler generates a lower economy when observed with the burning of dry sludge, so that there is a tendency of viability of installing a sludge drying plant in the agroindustry. Further studies are required on compliance with legislation related to the burning of energy mixtures of wood and sludge cavities at different scales of determination.

Keywords: Waste recovery, economy, energy efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do efluente do laticínio em estudo.....	14
Tabela 2 - Características químicas do solo utilizado no experimento.....	24
Tabela 3 – Geração de cinza para cada quilograma de lodo e cavaco queimado.....	32
Tabela 4 - Percentual de umidade, ST, SF e SV das amostras de lodo e cavaco.....	34
Tabela 5 - PCI do lodo e da cinza sem presença de umidade.....	34
Tabela 6 – PCI do lodo em diferentes concentrações de umidade.....	35
Tabela 7 – Quantificação e custos operacionais do lodo, cinza e cavaco mensalmente.....	36
Tabela 8 – Equivalência energética de lodo em diferentes concentrações de umidade com o cavaco seco, em kg.....	37
Tabela 9 – Consumo e geração de energia diária com queima de cavaco.....	38
Tabela 10 – Economia diária com a queima de lodo a 50% de umidade.....	40
Tabela 11 – Concentração média dos parâmetros estabelecidos na resolução SEMA 042/2008.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Geração de energia com a queima de lodo e redução no consumo de cavaco.....	39
Quadro 2 – Economia com a queima de lodo descontado a geração de cinzas.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Caldeira fogo tubular.....	26
Figura 2: Caçamba de armazenamento do lodo.....	27
Figura 3: Barracão de armazenamento do cavaco.....	28
Figura 4: Fluxograma da caldeira em estudo.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
ETA	- Estação de Tratamento de Água
ETE	- Estação de Tratamento de Efluentes
NBR	- Norma Brasileira
PCI	- Poder Calorífico Inferior
pH	- Potencial Hidrogeniônico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 LATICÍNIOS, PRODUÇÃO DE LEITE E SORO DE LEITE.....	17
3.2 EFLUENTES DE LATICÍNIOS.....	17
3.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	18
3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES NA INDÚSTRIA OBJETO DE ESTUDO.....	19
3.4.1 Gradeamento.....	19
3.4.2 Caixa de gordura.....	19
3.4.3 Digestão anaeróbia.....	20
3.4.4 Digestão aeróbia.....	20
3.4.5 Lodos Ativados.....	21
3.5 LODO BIOLÓGICO.....	22
3.6 TRATAMENTO E SECAGEM DO LODO.....	22
3.7 DISPOSIÇÃO DO LODO.....	23
3.8 CALDEIRA E BIOMASSA.....	25
4 METODOLOGIA	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6 CONCLUSOES	42
7 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o Brasil tem visto o aumento da produção leiteira, atingindo o posto de quarto maior produtor de leite do mundo, produzindo cerca de 35 milhões de litros de leite por ano. O Paraná, em especial a região oeste, possui um grande destaque a nível nacional, sendo o terceiro maior estado em produção leiteira, com aproximadamente 4,7 milhões de litros de leite anualmente (EMBRAPA, 2018). A grande produção leiteira, exige cada vez mais, empresas especializadas na transformação do leite bruto em outros produtos derivados.

Alternativas precisaram ser desenvolvidas para o adequado gerenciamento dos subprodutos líquidos oriundos da produção leiteira, como o soro de leite, por exemplo, de modo a agregar valor econômico a esses subprodutos, que normalmente são descartados. Assim, surgiu a produção de concentrados proteicos, bebidas lácteas e soro em pó concentrado, otimizando o uso da matéria prima, reduzindo os custos com o tratamento dos efluentes e maximizando ganhos monetários no setor leiteiro.

Com o avanço econômico nos processos produtivos do leite e seus derivados, houve também o aumento da geração de efluentes líquidos. A geração dos efluentes líquidos nos laticínios e indústrias de reaproveitamento de soro de leite, dá-se por três principais fontes, sendo elas: efluente residual oriundo dos processos produtivos e da limpeza industrial interna, água de utilidades de caldeiras e torres de resfriamento e efluentes domésticos.

Os efluentes líquidos oriundos dos processos produtivos do soro de leite, quando não tratado corretamente, podem causar sérios impactos ambientais negativos. Segundo Saraiva (2009), a cada metro cúbico de leite processado, 1,1 m³ a 6,8 m³ de efluentes líquidos são gerados.

Estes efluentes são ricos em matéria orgânica, sólidos, proteínas, nutrientes, óleos e graxas (ANDRADE, 2011).

Tabela 1: Parâmetros de efluente do laticínio em estudo

Parâmetros	Saída ETE	Entrada ETE
Cor (uH):	207	>500
DBO (mg/L):	30	2.110,50
DQO (mg/L):	66	4.300
Dureza total (em CaCO ₃) (mg/L):	181,49	901,05
Matéria orgânica (mg/L):	11,5	166,27
Nitratos (mg/L):	8,68	9,5
pH:	8,5	5,36
Sódio (mg/L):	243	990
Sólidos totais dissolvidos(mg/L):	1666	6.236
Sólidos totais suspensos(mg/L):	16	96
Turbidez(NTU):	20	408

Fonte: Empresa do estudo, 2019

Métodos biológicos são comumente usados para o tratamento de efluentes líquidos oriundos de laticínios, como processos de lodo ativado, lagoas aeradas, sequenciamento de reatores (SBR), entre outros (PORWAL; MANE; VELHAL, 2015). O uso de tratamentos biológicos gera grandes quantidades de material sólido, comumente chamado de lodo, podendo causar problemas ambientais devido ao incorreto manejo deste resíduo sólido.

No Brasil, mínimo é o aproveitamento energético do lodo das estações de tratamento de efluentes, havendo grande desperdício de matéria prima energética. O lodo gerado no tratamento dos efluentes é destinado a aterros sanitários, aumentando os custos da indústria geradora, diminuindo a vida útil dos aterros e desperdiçando energia presente no lodo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001)

O grande desafio do uso de lodo biológico como combustível nas caldeiras das agroindústrias que trabalham com soro de leite, é o percentual de água presente no lodo, chegando a valores aproximados de 80% (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Desta forma, necessita-se da verificação da viabilidade técnica e econômica da queima do lodo *in natura*, apurando a necessidade ou não de

processos de secagem, de forma a reduzir o percentual de umidade.

Uma problemática na queima de lodo biológico em caldeira são os eventuais produtos utilizados no processo de tratamento, como floculantes e coagulantes contendo alumínio e ferro (DI BERNARDO, 2003), que determinarão a classificação do resíduo conforme indica a ABNT NBR 10.004/04. Legislações estaduais devem ser observadas, como por exemplo, a Resolução nº 042/08 da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), que estabelece critérios para a destinação de resíduos em caldeiras.

Visto que grande parte dos custos das agroindústrias são oriundos da produção e geração energética, em concordância com a regulamentação para queima de resíduos em caldeira no estado do Paraná, o presente trabalho teve como objetivos, buscar soluções tecnológicas para maior aproveitamento da biomassa formada no tratamento dos efluentes industriais no setor leiteiro, analisando a viabilidade técnica e econômica da secagem e queima do lodo de uma agroindústria produtora de derivados do leite, localizada no oeste paranaense e utilizá-lo como combustível em caldeira.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de lodo biológico de estação de tratamento de efluentes industrial como fonte de energia para possível queima em caldeira.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar o potencial calorífico do cavaco de lenha e do lodo em diferentes concentrações de umidade.
- b) Analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de lodo biológico da ETE da indústria de soro de leite como combustível.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LATICÍNIOS, PRODUÇÃO DE LEITE E SORO DE LEITE

A produção de leite e seus derivados tem grandes impactos positivos na economia mundial, visto que gera empregos e renda ao longo de toda cadeia produtiva. Neste aspecto, o Brasil tem destaque, pois ocupa a quarta posição na produção leiteira do mundo, com produção próxima a 35 mil toneladas de litros de leite por ano (EMBRAPA, 2018).

O Paraná possui relevância na produção de leite, com a produção quadruplicada nos últimos vinte anos (IBGE, 2018). A expectativa é de a produção leiteira tenha continuidade de crescimento nos próximos anos na produção leiteira, tendo em vista a disponibilidade física para a expansão de rebanhos leiteiros e a demanda interna de leite e seus derivados.

O soro de leite possui grande quantidade de lactose, 70-80%, proteínas, 9%, e demais componentes, incluindo minerais e peptídeos hidrolisados, 8-20%, em base seca (DAUFIN, 1998).

3.2 EFLUENTES DE LATICÍNIOS

Laticínios operam no processamento de leite cru, transformando-o em produtos derivados, como queijos, manteigas, misturas para sorvetes, iogurtes e produtos para panificação (RIVAS, 2010). Agroindústrias em geral, bem como laticínios, geram grandes quantidades de efluentes, caracterizados pela alta carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) (DEMIREL; YENIGUN; ONAY, 2005).

O processamento do leite e seus derivados geram efluentes líquidos, compostos por residuais do leite e seu processamento de concentração de sólidos, produtos químicos oriundos da limpeza de equipamentos e lavagem da indústria (CARVALHO; PRAZERES; RIVAS, 2013).

Muitos laticínios descartam soro oriundo do processamento do leite e seus derivados, junto com seus efluentes líquidos. Isso faz com que o efluente se torne ainda mais poluente. O efluente lácteo tem como base em sua caracterização, resíduos de soro, ácidos, produtos de limpeza e gordura láctea. Diferentes períodos

dentro de uma mesma indústria podem alterar a caracterização de um mesmo efluente (ANDRADE, 2011).

O setor industrial de laticínios ocupa uma posição de destaque no setor alimentício, contribuindo significativamente com os despejos de carga orgânica em corpos hídricos, sendo fundamental o tratamento prévio desse efluente antes de seu despejo (NIRENBERG; FERREIRA, 2005).

A carga de dos efluentes pode variar com o consumo de ácidos e detergentes usados na limpeza industrial, visto que cada quilograma de sanitizante usado, são gerados 0,25 a 0,85 Kg de DBO₅, conforme Machado (2011).

3.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os efluentes líquidos só poderão ser lançados a corpos hídricos receptores quando passarem por um prévio processo de tratamento, de modo a atender os padrões de lançamento conforme a Resolução CONAMA n° 430/2011.

Os tratamentos são divididos em quatro etapas, sendo comumente usados as três primeiras etapas em laticínios, sendo elas, tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário ou avançado. Tratamentos preliminares tem como objetivo a retenção de sólidos grosseiros, sólidos finos inertes e óleos e graxas. Tratamentos primários objetivam o ajuste de pH, remoção de sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos e material coloidal. Tanto o tratamento preliminar como primários são caracterizados por operações unitárias físicas e/ou físico-químicas. Os tratamentos secundários objetivam a remoção de matéria carbonácea biodegradável, conversão e remoção parcial de nutrientes. Neste nível de tratamento, sistemas biológicos são usados em larga escala. Tratamentos terciários ou avançados, visam remover outros poluentes não removidos nos tratamentos anteriores, complementando-os (VON SPERLING, 2002).

As diferentes caracterizações dos efluentes industriais dificultam a padronização de um sistema único de tratamento (MACHADO, 2011). Diferentes combinações de procedimentos tendem a melhorar a eficiência do tratamento dos efluentes, atendendo-se para as limitações de cada etapa do tratamento quanto a sua eficiência e custo (LOURES, 2011).

Segundo Von Sperling (2002), uma planta de tratamento não precisa necessariamente apresentar todos os níveis de tratamento, variando conforme a

caracterização do efluente e a necessidade de remoção de determinado material. Ambos níveis de tratamento consistem em mecanismos físicos, químicos e biológicos.

Grandes quantidades de matéria orgânica biodegradável nos efluentes de indústrias alimentícias, favorecem o uso de tratamentos biológicos. A remoção de matéria orgânica dá-se por metabolismo de oxidação e síntese de células dos microrganismos (NIRENBERG; FERREIRA, 2005).

3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA OBJETO DE ESTUDO

3.4.1 Gradeamento

O gradeamento faz parte do processo de tratamento preliminar dos efluentes líquidos. Constitui-se de tratamento físico, obstruindo a passagem de sólidos grosseiros nas demais fases do tratamento, sendo posicionado obrigatoriamente na primeira etapa do tratamento, protegendo assim as demais etapas do tratamento. O dimensionamento das grades varia conforme a característica do efluente, admitindo espaçamentos de 0 a 2 cm e pode ser feito com grades de limpeza mecanizada ou manual (GIORDANO, 2005). Em laticínios, o uso de grades se dá quase que exclusivamente para remoção de embalagens, coágulos da produção e fragmentos inerte (ANDRADE, 2011).

3.4.2 Caixa de Gordura

Óleos e graxas necessitam ser removidos do efluente para que este seja desaguado em corpo hídrico. Para isso, a remoção deve acontecer ainda no sistema primário, através de processos físico-químicos. Quando não removido nesta etapa do processo, o efluente irá carrear óleos e graxas até o corpo hídrico, não sendo feita a remoção nas fases seguintes do tratamento.

A degradação dos óleos e graxas acontece de forma lenta, podendo reduzir o oxigênio dissolvido no meio, reduzindo assim a atividade microbiológica e sua degradação da matéria orgânica (CHIPASA e MECHZYKA, 2006). Andrade fala sobre a problemática de óleos e graxas nos efluentes, implicando na fase metanogênica dos processos anaeróbios e dificultando a troca gasosa do meio aeróbio.

Caixa de gordura configuram um sistema com alta eficiência na remoção de

óleos e graxas quando bem operados e dimensionados, além de apresentarem baixos custos de implantação e operação quando comparados a outros sistemas. Esse sistema consiste em efetuar a retenção dos óleos e graxas através da flotação, por meio físico em caixa de retenção, visto que a densidade dos óleos e graxas é inferior a água (MACHADO 2011).

3.4.3 Digestão Anaeróbia

Os processos anaeróbios de tratamento de efluentes caracterizam-se pela ausência de oxigênio, bem como a utilização de nutrientes como carbono, enxofre e nitrogênio, como aceptor de elétrons para efetuar a conversão da matéria orgânica em compostos menores e mais simples, como dióxido de carbono e metano (LOURES, 2011). A remoção de DBO por sistemas biológicos anaeróbios pode corresponder a taxas superiores a 80%, mas caracteriza-se por ser um sistema instável quanto a sua operação, por vezes necessitando adição de alcalinidade (CARVALHO; PRAZERES; RIVAS, 2013). Vantagens do sistema anaeróbio são o baixo custo de implementação e operação, além da alta taxa de degradação da matéria orgânica, 50-70%, e baixa conversão de matéria orgânica em biomassa microbiana, ou seja, formação de lodo (CHERNICHARO, 1997).

As cargas orgânicas biodegradáveis dos efluentes de laticínios são altas e mesmo com a alta remoção de matéria orgânica nos sistemas anaeróbios, ainda assim existe a necessidade de sistemas posteriores a este, garantindo uma maior eficiência do tratamento do efluente. Isso pode ser garantido pela sequência de um tratamento com microrganismos aeróbios, que necessitam de oxigênio para hidrólise da matéria orgânica (SILVEIRA, 2010).

3.4.4 Digestão Aeróbia

Este sistema está ligado em sequência do sistema anaeróbio, consumindo o residual de matéria orgânica presente no efluente, utilizando o oxigênio como aceptor de elétrons para conversão da matéria orgânica biodegradável em água e dióxido de carbono (LOURES, 2011). Esse sequenciamento de tratamento, anaeróbio-aeróbio, aumenta consideravelmente a eficiência do sistema de tratamento, chegando o sistema aeróbio a uma remoção de matéria orgânica na ordem de até 99% em efluentes de soro de leite (CARVALHO; PRAZERES; RIVAS, 2013).

Desvantagens deste tipo de tratamento são a grande geração de lodo quando comparado ao sistema anaeróbio e o alto custo operacional com a aeração do reator (PARSEKIAN, 2003).

3.4.5 Lodos Ativados

Lodos ativados são largamente utilizados, sendo mais comum o uso em países desenvolvidos, visto o seu maior custo operacional. Utiliza-se o sistema de lodo ativado quando se necessita um efluente de alta qualidade final e quando a área disponível para o sistema de efluentes é reduzido, sendo assim o lodo ativado uma boa alternativa (VON SPERLING, 2005).

O sistema de lodos ativados consiste na oxidação bioquímica da matéria orgânica e inorgânica presente no efluente, por população microbológica altamente diversificada, mantendo-a em suspensão através de oxigenação em meio aeróbio (MICROFAUNA; ESTAÇÃO, 2005). Para a oxidação da matéria orgânica, os microrganismos necessitam de nutrientes, assim como acontece nos reatores anaeróbios. No entanto, para que o nitrogênio possa ser utilizado pelos microrganismos no sistema de lodo ativado, precisa estar na forma amoniacal ou nitrato, possibilitando a assimilação deste nutriente pela biota (VON SPERLING, 1997). Ainda segundo Von Sperling, a DBO do efluente deve ser quantificada, bem como o teor de nitrogênio e fósforo, para verificação da correção da proporção desses nutrientes caso necessário, que se dá na proporção ideal de cem partes de DBO, para cinco partes de nitrogênio e uma parte de fósforo (DBO:N:P/100:5:1).

Quando necessária correção de nutrientes, pode ser feita com a adição de produtos químicos, como a uréia, nitrato de amônia para correção do nitrogênio e fosfato de amônia para correção do fósforo, por exemplo, sempre em solução aquosa (DIEZ, 2002). O pH é fator determinante na correta operação deste sistema, sendo necessário estar na faixa neutra, próximo a 7,0. Quando necessário a correção também poderá ser feita com a adição de produtos químicos aquosos, como ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, por exemplo. A adição de produtos químicos deverá ser feita com cautela, visto que alguns elementos causam a inativação microbiana, como por exemplo o cloro.

Lodos ativados consistem na estabilização da matéria orgânica pela aglomeração física, floculação e adsorção dentro dos flocos biológicos dos sólidos.

Assim sendo, ocorre a oxidação biológica, gerando os produtos da degradação da matéria orgânica, dióxido de carbono, água e amônia. O sistema de lodos ativados deve ser parte do processo, não o processo total em si (VON SPERLING, 2012).

3.5 LODO BIOLÓGICO

O lodo biológico é oriundo dos processos de degradação de matéria orgânica por microrganismos biológicos, constituída na segunda etapa do tratamento de efluentes, caracteriza-se pela biomassa microbiana. Esse lodo necessita ser removido periodicamente dos reatores, pois diminui o volume suportado pelos reatores, conseqüentemente diminuindo o tempo de detenção hidráulico em cada reator e afetando na operação e eficiência do mesmo. A remoção deste lodo, bem como a frequência e volume, depende de cada tipo de processo de tratamento do efluente que está ocorrendo no reator (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). A alta concentração, de nutrientes e matéria orgânica nos lodos, propicia um bom composto para queima e geração de energia quando seco.

3.6 TRATAMENTO E SECAGEM DO LODO

O tratamento do lodo pode se dar de três formas distintas, sendo o tratamento biológico, químico e térmico, sendo o primeiro o mais usado. O tratamento biológico dá-se pela estabilização da matéria orgânica por tecnologias como a compostagem. O tratamento químico é feito com a oxidação química da parte não inorgânica do lodo. Já a estabilização térmica, o calor age sobre a parcela volátil da matéria (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). O processo de estabilização normalmente cessa o mau odor proveniente do lodo (DOS SANTOS, 2009).

O lodo geralmente possui uma concentração de sólidos na ordem de 20%. Para determinadas destinações, o processo de desidratação e secagem se torna interessante, reduzindo massa e volume, e possibilitando outras destinações. Para isso, existem alguns processos de secagem deste lodo, sendo os naturais amplamente empregados em regiões quentes como o Brasil, como leitos e lagoas de secagem, que tem como princípio físico gravitacional, percolação e evaporação (SOARES; MATOS; BERNARDES, 2001).

Processos naturais de redução de umidade do lodo são processos mais simples de operação e menos custosos, mas que demandam extensa área para

alocação destes lodos. O processo de secagem de forma natural pode variar com o clima e temperatura do ambiente, tornando-se altamente sensível a esses fatores. Nos processos naturais, destacam-se os leitos de secagem, que são constituídos de tanques retangulares, com laterais e base formado de concreto, garantindo a impermeabilização do meio. São instalados dentro do tanque sistemas de drenagem na água que irá percolar, composto por tubos de PVC com perfurações na base, seguido de camadas de material inerte de diferentes granulometrias (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Sistemas mecânicos são menos usuais devido seu alto custo, necessitando de manutenção e operação mais refinada, mas operando em áreas reduzidas. Destacam-se processos de centrifugação e adensamento, onde parte da água é separada do material sólido, chegando a concentração de sólidos de 20 a 30 % ao final do processo. A água volta para o sistema de tratamento de efluentes, enquanto o material sólido, lodo, é armazenado em local apropriado até sua destinação final (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES; 2001, LARA, 1999).

Faij (1997) indica que lodos quando submetidos a processos de concentração de sólidos, elevam o poder calorífico, de forma que ultrapassem o poder calorífico da madeira, comumente usada como combustível de caldeiras.

3.7 DESTINAÇÃO DO LODO

Muitas são as formas possíveis de destinação do lodo produzido no sistema de tratamento dos efluentes líquidos, como por exemplo a reutilização industrial, incineração, disposição em aterro e solo para cultivos agrícolas do lodo (CALDEIRA, 2013).

A disposição deste resíduo sólido em aterro demanda altos custos com o transporte e adequação dos parâmetros legais para esta destinação, além da perda de material com alto potencial energético. Países da União Europeia tem demandado de forma crescente o processo de incineração do lodo como forma de tratamento. A reciclagem configura a forma mais sustentável de destinação deste resíduo, além de conferir baixo custo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Schulz (2015) caracterizou lodo da mesma origem do utilizado neste trabalho, encontrando as seguintes características:

Tabela 1 - Características químicas do solo utilizado no experimento

pH	M.O.	P	H ⁺ Al	Al ₃ ⁺	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Cd	Pb	Cr
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----							%	-----mg kg ⁻¹ ---		
6,69	41,01	216,29	2,55	0	1,34	11,03	15,92	17,26	19,81	87,13	0	27	< 0,01

H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases), CTC (capacidade de troca catiônica), V% (saturação por bases), M.O. (matéria orgânica).

Fonte: Schulz (2015).

A destinação de lodos de sistemas de tratamento de efluentes em solo de cultivo agrícola, favorece esse meio, incorporando matéria orgânica, condicionando o solo, melhorando a troca gasosa, circulação de água e fornecimento de nutrientes essenciais para o desenvolvimento da vegetação (BEZERRA, 2008).

É verificada a existência de aspectos altamente favoráveis a incineração ou co-incineração de resíduos, reaproveitando a energia contida nesses materiais sólidos, substituindo fontes tradicionais de energia, como óleo combustível e gás natural (LUNDIN, 2004). O reaproveitamento do resíduo dentro da própria planta industrial, reduz custos logísticos com outras formas de destinação, além de adotar práticas mais limpas de obtenção energética.

A incineração de lodo dentro da planta industrial, torna esse gerenciamento do resíduo sólido mais interessante, de forma que a estação de tratamento possa ser autossuficiente energeticamente, podendo inclusive produzir excessos energéticos, sendo utilizados por outras atividades dentro da mesma planta industrial ou dependendo da quantidade e qualidade do excedente energético, ser enviado para a rede de distribuição elétrica (HOUDKOVÁ, 2008).

A produção energética através da combustão do lodo, é amplamente difundida em países desenvolvidos, devido sua facilitada operação, baixa exigência limitante, e ampla aplicabilidade em ETE's dos mais diferenciados tamanhos, contudo, é preciso um rigoroso controle dos poluentes atmosféricos gerados, principalmente dioxinas e furanos (SABESP, 2015).

Segundo Paro (2008), o processo de incineração de resíduos gera quatro vezes mais energia elétrica quando comparado a energia produzida por aterros sanitários, além de emitir dez vezes menos dióxido de carbono.

Leite (2016) definiu o poder calorífico como a quantidade de calor que é

liberada pela combustão de um material, medido em massa. É comumente expresso em quilo joules por quilograma (kJ/kg). Ainda segundo Leite (2016), o poder calorífico inferior é a energia efetiva liberada por um material quando em combustão, descontando a perda energética com a evaporação da água.

Os subprodutos da incineração do lodo, podem ser reaproveitando dentro da própria planta industrial. Cinzas de caldeiras podem ser utilizado no processo de compostagem. Segundo Bellote (1998), cinzas de caldeiras são configuradas com altas concentrações de cálcio e fósforo, além da elevada relação carbono/nitrogênio (BELLOTE, 1998). A presença de cinzas na compostagem, favorece a retenção de água e na disponibilidade de nutrientes de forma mais rápida (FERREIRA, 2005).

Segundo Liu (2011), a perda de calor das caldeiras devido aos gases de exaustão, correspondem a ordem entre 50 e 80%. A recuperação dos gases de exaustão pode melhorar a eficiência energética da indústria e consequentemente, contribuir para um desenvolvimento mais sustentável e menos custoso (JIN; GAO; ZHU, 2019). Desta forma, a queima do lodo torna-se ainda mais interessante, haja visto que o potencial calorífico tende a aumentar com um menor grau de umidade e pela disponibilidade de material secante do lodo na própria planta industrial.

Assim sendo, o processo de incineração de lodo pode contribuir não só nos aspectos financeiros de uma empresa, mas também nos aspectos ambientais, reaproveitando resíduos e valorando-os, dentro do próprio empreendimento, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e uma produção mais limpa dentro da cadeia produtiva.

3.8 – Caldeiras a biomassa

As caldeiras normalmente utilizadas em agroindústria são as fogo tubulares (Figura 1), sendo a biomassa adicionada na tremonha de alimentação (4), e a combustão da biomassa se dá ao logo da esteira de alimentação (1), sendo as cinzas descarregadas no carrinho removedor de cinzas (9). O ar de combustão é insuflado ao longo da esteira de alimentação por um ventilador (7), e os gases quentes após a combustão, circulam pelo interior dos tubos, produzindo o vapor saturado (TAPLIN, 2014).

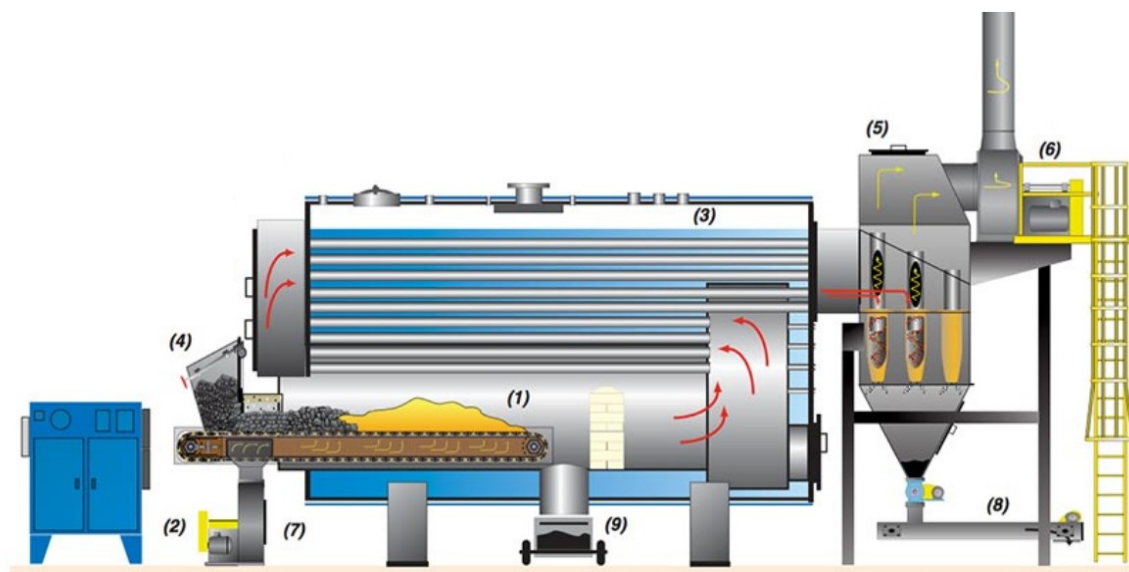


Figura 1: Caldeira fogo tubular, sendo: (1) esteira de alimentação de biomassa, (2) painel de controle mestre, (3) saída de vapor saturado, (4) tremonha de alimentação, (5) sistema recuperador de cinzas, (6) ventilador de gases de exaustão, (7) ventilador de ar de combustão, (8) correia removedora de cinzas, (9) carrinho removedor de cinzas.

Fonte: Taplin (2014).

4 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Medianeira. As análises laboratoriais foram conduzidas no período de fevereiro de 2019 a novembro de 2019.

Os materiais utilizados neste estudo, lodo biológico e cavaco de eucalipto, foram obtidos em uma agroindústria que agrega valor no soro de leite, localizada na região oeste do Paraná.

O lodo utilizado no experimento foi oriundo de uma planta de tratamento de efluentes, do descarte de uma lagoa aerada de um sistema de lodos ativados. O material foi removido do fundo dos decantadores secundários, que passaram por adensamento em tanques e posteriormente foram desidratados em decanter centrífugo.

Amostras de lodo biológico foram coletadas diretamente da caçamba de armazenamento deste resíduo, após terem passado pelo decanter centrífugo, nos meses de fevereiro e agosto de 2019, para uma melhor amostragem do material e nos dois períodos mais extremos de temperatura, isto é, verão e inverno. Amostras de cavaco também foram coletadas na agroindústria, no barracão de armazenamento, nos respectivos meses.



Figura 2: Caçamba armazenadora do lodo

Fonte: próprio autor, 2019



Figura 3: Barracão de armazenamento do cavaco

Fonte: próprio autor, 2019

A caracterização inicial das amostras coletadas deu-se em relação ao teor de umidade, sendo secas conforme descreve Donagemma, Fontana e Teixeira (2017), em estufa com recirculação de ar, a uma temperatura de 105°C, até atingir peso constante, garantindo a evaporação completa da água. Todas as análises foram feitas em triplicatas.

O processo de secagem foi realizado até se obter peso constante dos cadinhos em três medidas seguidas, confirmando a secagem completa dos materiais. Ainda segundo Donagemma, Fontana e Teixeira (2017), os cálculos para a determinação de umidade em base gravimétrica, foram realizados seguindo a equação 1:

$$CGA = \frac{(a-b)}{b} \times 100\% \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

CGA: Conteúdo gravimétrico de água em %

a: Massa da amostra úmida em gramas

b: Massa da amostra seca (sólidos totais) a 105°C até atingir peso constante (g)

Após a secagem do material, parte das amostras foram calcinadas em Mufla, em temperatura de 550°C, durante 2h. Os cálculos para determinação dos sólidos podem ser verificados pelas equações 2 e 3:

$$SV = \left(\frac{Ma - Mac}{Ma} \right) \times 100\% \quad \text{Eq (2)}$$

$$SF = \left(\frac{Ma}{Mac} \right) \times 100\% \quad \text{Eq (3)}$$

Onde:

SV = Sólidos voláteis (%)

SF = Sólidos fixos (%)

Ma = Massa da amostra (g)

Mac = Massa da amostra calcinada (g)

Outra parte das amostras foram usadas para determinação do poder calorífico inferior (PCI) das três amostras, duas amostras de lodo nos meses de fevereiro e julho e uma amostra de cavaco, referente ao mês de fevereiro, todas previamente secas em estufa. Com os materiais secos, o procedimento foi feito em Bomba Calorimétrica IKA C2000, conforme descrito por Karaca (2018).

Em posse do poder calorífico do lodo e do cavaco, ambos secos, foi possível verificar se o poder calorífico dos materiais em diferentes porcentagens de umidade, encontrando uma umidade máxima para viabilização da queima do lodo em caldeira. Foi utilizada a equação 4 para calcular a energia liberada pelo lodo, considerando diversos percentuais de umidade:

$$PCI_{LODO} = (PCI^{SECO} \times \%_{Sólidos} - \Delta H_{vaporização}^{água} \times \%_{Água}) / 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

PCI_{LODO} : Energia liberada na combustão do lodo com $\%_{Sólidos}$ conhecida (kJ/kg).

$\%_{Sólidos}$:= porcentagem em massa de sólidos na amostra (%).

$\Delta H_{\text{vaporização}}^{\text{água}}$: 2257 kJ/kg (pressão atmosférica).

$\%_{\text{água}}$: porcentagem em massa de água na amostra (%)

Inicialmente, a amostra de lodo analisada, possui um teor de sólidos de 100%. Os valores energéticos de lodo para concentrações diferentes de 100%, foram caracterizados teoricamente pela equação 4.

De posse dos custos de destinação do lodo e das cinzas, fornecidas pela empresa de estudo, o custo de compra do cavaco e as respectivas quantidades geradas em média por mês, foi possível determinar o custo de destinação específico de cada material em R\$ por quilograma, conforme Equação 5:

$$\frac{\text{R\$}}{\text{kg}} = \frac{\text{Consumo médio mensal do material (kg)}}{\text{Custo médio mensa do material (R\$)}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Por meio da Equação 6, foi determinada a massa de lodo em quilograma, em diversas concentrações de umidade, necessária para se atingir o mesmo potencial calorífico do cavaco de lenha:

$$\text{Equivalência do PCI em kg} = \frac{\text{PCI}_{\text{cavaco}}}{\text{PCI}_{\text{lodo}}} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

Equivalência do PCI em kg = Quantidade de lodo em quilograma, para equivaler a energia gerada por 1 quilograma de cavaco

PCI = poder calorífico inferior (kJ/kg)

Sabendo do PCI do cavaco de lenha e o seu consumo diário, foi calculado a energia total da caldeira gerada em um dia, conforme equação 7:

$$\Delta H_{\text{Dia}} = \text{PCI}_{\text{cavaco}} \times \text{CCD} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

ΔH_{Dia} = Energia atual gerada na caldeira com a queima de cavaco (kJ/dia)

PCI = Energia gerado pela queima de um quilograma de cavaco (kJ/kg)

CCD = Consumo de cavaco diário (kg)

A proporção de lodo gerado diariamente em relação ao cavaco consumido diariamente, foi realizada com base nos valores médios mensais fornecidos pela agroindústria, conforme equação 8:

$$PLC = \frac{\text{Massa de lodo}}{\text{Massa de cavaco}} \times 100\% \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

PLC = Proporção de lodo/cavaco (%)

Para calcular as massas de cavaco e lodo necessárias para a geração atual de energia, encontrando a proporção ideal do lodo a ser incrementada ao cavaco para se manter o poder calorífico gerado diariamente, foram utilizadas as equações 9 e 10:

$$A \times PCI_{Lodo} + B \times 17699 = PCI_{Caldeira/dia} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$A = B \times \text{Proporção} \frac{\text{lodo}}{\text{cavaco}} \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

A – Massa de lodo no *blend* energético, em kg

B – Massa de cavaco no *blend* energético, em kg

A quantidade de cavaco encontrada por meio das equações 9 e 10, foi subtraída da quantidade de cavaco utilizado na caldeira por dia atualmente. A diferença de massa possibilitou o cálculo de economia com a queima de cavaco (Massa de cavaco economizada). Foi considerado que 100% do lodo gerado diariamente foi queimado em caldeira (Massa de lodo incinerada). As equações 11 e 12 demonstram como foram obtidos os valores de economia com a inserção de lodo na queima em caldeira:

$$E_C = \text{Massa de cavaco economizada} \times \text{custo do cavaco} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$E_L = \text{Massa de lodo incinerada} \times \text{custo de destinação do lodo} \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde:

E_C = Economia com cavaco (R\$)

E_L = Economia com lodo (R\$)

Para os cálculos dos custos da destinação da cinza gerada pela queima do lodo e pela redução da queima de cinzas, foram utilizadas as equações 13 e 14, conforme pode ser observado a seguir:

$$CDCL = \text{Massa de lodo incinerada} \times 0,2008 \times 0,088 \quad \text{Eq. (13)}$$

$$CDCC = \text{massa de cavaco não incinerada} \times 0,0285 \times 0,088 \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

CDCL = Custo de destinação das cinzas do lodo (R\$)

CDCC = Custo de destinação das cinzas do cavaco (R\$)

Os valores de multiplicação de 0,2008 e 0,0285 nas equações 13 e 14, são referentes ao percentual médio de sólidos fixos encontrado nas análises em mufla, que podem ser conferidos na Tabela 1. Já o valor de 0,088 encontrado em ambas equações, referem-se ao custo de destinação da cinza por quilograma.

Tabela 2 – Geração de cinza para cada quilograma de lodo e cavaco queimado

Geração de cinza		
	Lodo (kg)	Cavaco (kg)
Cinza (kg)	0,2008	0,0285

Fonte: próprio autor, 2019

Foi considerado o tempo de 30 dias equivalente a um mês, para todos os cálculos pertinentes. Todas as análises foram realizadas com triplicata de amostras.

Todos os cálculos descritos anteriormente, foram desenvolvidos no *software* Excel, possibilitando balanços de massa e energia. No mesmo *software*, foi verificada a viabilidade econômica da disposição das cinzas geradas da queima do lodo e a redução de cavaco de lenha utilizado na produção de vapor na caldeira, confrontados

valores gastos atualmente e possíveis economias provenientes da mudança na destinação final do lodo gerado na agroindústria. O balanço de massa e energia da caldeira pode ser observado na Figura 4:

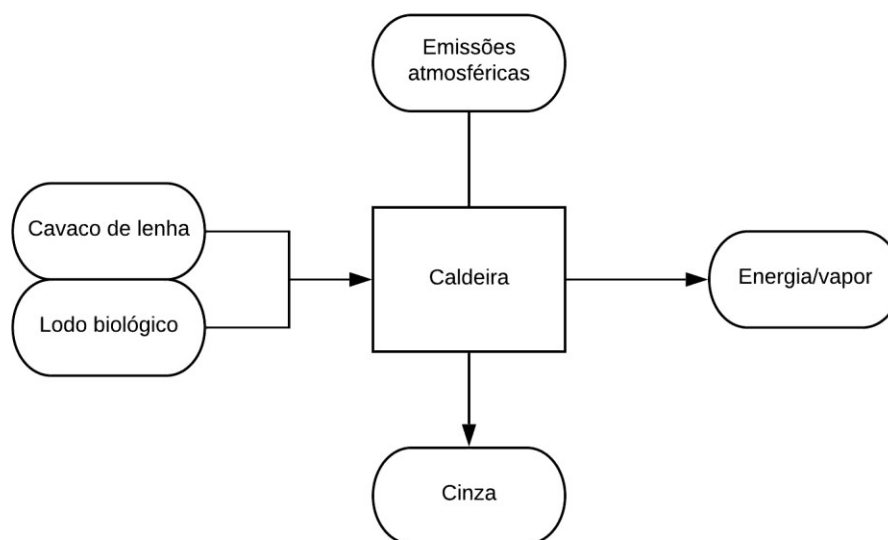


Figura 4: Fluxograma da caldeira em estudo

Fonte: próprio autor, 2019

Segundo Schwantes (2017), que trabalho com o mesmo lodo, foi classificado como Resíduo Classe II A – Não Inerte, conforme ABNT NBR 10.004/04. Resíduos Classe II A, são caracterizados por possuírem características de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os percentuais de umidade e sólidos encontrados nas amostras de lodo e de cavaco.

Tabela 3 – Percentual de umidade, ST, SF e SV das amostras de lodo e cavaco.

Características das biomassas	Lodo (Fevereiro)	Lodo (Agosto)	Cavaco (Fevereiro)
Umidade (%)	82,01	89,95	2,92
Sólidos totais (%)	17,99	10,05	97,08
Sólidos fixos (%)	20,08	43,09	2,86
Sólidos voláteis (%)	79,92	56,91	97,14

Fonte: próprio autor, 2019

Os cálculos de sólidos fixos e voláteis foram determinados em base úmida, não desprezando o percentual de água presente no lodo, que por sua vez, apresenta elevada concentração de água em sua composição. Shen (2008), em seu estudo com lodo biológico de uma ETE doméstico, encontrou lodo de um reator UASB com umidade média de 79,60%. Já Baron (2003), trabalhando com lodo de uma ETA, encontrou umidade média de 86,95%.

O lodo do mês de agosto, possui uma concentração de sólidos inferior ao mês de fevereiro. Isso ocorreu devido problemas no sistema de tratamento da agroindústria, em especial no decantador secundário do sistema de lodos ativados.

Com as amostras secas, pôde-se determinar o PCI. Para este experimento, foi realizado o poder calorífico da amostra de lodo e de cavaco do mês de fevereiro. Os valores de PCI podem ser observados na Tabela 4:

Tabela 4 – PCI do lodo e do cavaco sem presença de umidade

Biomassas	PCI (kJ/kg)
Lodo	21.550
Cavaco	17.699

Fonte: Próprio autor (2019).

Werle e Wilk (2010) estimaram que o potencial calorífico de lodo de uma ETE

de esgoto, está na faixa de 13,30-17,50 kJ/kg, metade do potencial calorífico padrão do carvão (29,27 kJ/kg). Segundo Radin (2014), o PCI do cavaco de eucalipto é de aproximadamente 1715,4 kJ/kg.

O lodo em estudo, sem a presença de umidade, pode alcançar um poder calorífico de 21.550 kJ/kg, superando o potencial calorífico do próprio combustível usado atualmente na caldeira, isto é, o cavaco de lenha, que produz 17.699 kJ/kg. Desprezando os custos de secagem do lodo até uma concentração de umidade próxima a 0%, este pode apresentar um poder calorífico superior ao cavaco em aproximadamente 22%.

A partir dos dados evidenciados na Tabela 4 foi possível calcular o PCI do lodo em diversas concentrações de umidade, verificando assim, em qual concentração de sólidos o lodo torna-se interessante do ponto de vista da viabilidade energética. Na Tabela 5 são apresentados os PCI do lodo em diferentes concentrações de umidade, obtidos através de simulações, tendo como base o PCI do lodo seco, sem presença de umidade.

Tabela 5 – PCI do lodo em diferentes concentrações de umidade utilizando a equação 4

Concentração de sólidos	Concentração de umidade	Poder calorífico (kJ/kg)	Potencial calorífico
100%	0%	21550,00	100,00%
90%	10%	19169,31	88,95%
80%	20%	16788,62	77,91%
70%	30%	14407,93	66,86%
60%	40%	12027,24	55,81%
50%	50%	9646,55	44,76%
40%	60%	7265,86	33,72%
30%	70%	4885,17	22,67%
20%	80%	2504,48	11,62%
17,99%	82,01%	2025,96	9,40%
10%	90%	123,79	0,57%
9,5%	90,5%	4,76	0,02%

Fonte: próprio autor, 2019

É possível verificar através da Tabela 5 que a queima do lodo em caldeira torna-se viável a partir de uma concentrações de sólidos superiores a 9,5%, gerando

energia. Lodos com concentração de sólidos inferior a 9,5%, demandam mais energia para vaporização da água do que liberam com a combustão, tornando o processo de geração térmica inviável do ponto de vista técnico e econômico (Tabela 5), apesar de ser uma alternativa para a destinação do lodo, que ainda assim pode gerar alguma economia com a destinação de maior quantidade de cinzas ao lugar do lodo com alta concentração de água.

Pode-se observar também que, na concentração de sólidos do lodo nas condições normais de operação, 17,99% (Tabela 5), o lodo apresenta um poder calorífico considerável, com 2025,96 kJ/kg, que representa aproximadamente 10% de todo seu potencial energético, demonstrando assim que, considerando apenas este potencial energético, sem levar em conta a diminuição do lodo destinado para empresas externas e o aumento de geração de cinzas, a queima do lodo encontrado na agroindústria torna-se viável economicamente para queima em caldeira.

Desprezando custos de secagem do lodo, quando encontrado com uma umidade de 15%, o seu potencial calorífico é equivalente ao potencial calorífico do cavaco, mostrando que é uma alternativa viável tecnicamente para queima em caldeira, conforme ilustrado na Tabela 5.

Por meio da Tabela 6, com dados coletados na agroindústria em estudo, foi possível quantificar a geração de lodo e cinza e também observar os custos atuais da destinação destes resíduos mensalmente. Nesta tabela, são evidenciados o consumo de cavaco e o custo mensal de compra. Esses valores foram obtidos diretamente com a empresa, fazendo a média de oito meses do ano de 2019, retirando os meses de junho e julho, pois nesses meses ocorreram problemas no sistema de lodos ativados e a produção foi muito acima da média.

Tabela 6 – Quantificação e custos operacionais do lodo, cinza e cavaco mensalmente.

	Kg/mês	R\$/mês	R\$/kg
Lodo	184.550,00	R\$ 36.200,73	R\$ 0,196
Cinza	135.010,00	R\$ 11.877,90	R\$ 0,088
Cavaco	1.778.860,00	R\$ 266.829,00	R\$ 0,150

Fonte: próprio autor, 2019

Através da Tabela 6 é possível observar a elevada geração de lodo e cinzas da agroindústria, implicando diretamente nos elevados custos de destinação destes resíduos. A empresa, por operar ininterruptamente ao longo do ano, demanda de

muita energia térmica em seus processos, fazendo com que o consumo de cavaco seja extremamente elevado e conseqüentemente, seus custos também. Atualmente, o lodo e as cinzas produzidas pela agroindústria são enviados para compostagem em empresa especializada, com um custo médio mensal de R\$48.088,63.

Levando em consideração apenas a Tabela 6, fica evidente a viabilidade econômica da queima de lodo em caldeira, haja visto que é o material com maior custo por quilograma para se destinar e a cinza possui o menor custo por quilograma para se destinar a compostagem.

De posse do PCI do lodo e do cavaco, foi possível encontrar proporções em massa de lodo, com diferentes concentrações de umidade, para que se alcance o mesmo PCI do cavaco seco, sem a presença de umidade, como demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Equivalência energética de lodo em diferentes concentrações de umidade com o cavaco seco, em kg

Material	Potencial calorífico kJ/kg	Equivalência de PCI em kg
Cavaco	17.699,00	1
Lodo 100%	21.550,00	1,22
Lodo 90%	19.169,31	0,92
Lodo 80%	16.788,62	1,05
Lodo 70%	14.407,93	1,23
Lodo 60%	12.027,24	1,47
Lodo 50%	9.646,55	1,83
Lodo 40%	7.265,86	2,44
Lodo 30%	4.885,17	3,62
Lodo 20%	2.504,48	7,07
Lodo 17,99%	2.025,96	8,74
Lodo 10%	123,79	142,98
Lodo 9,5%	4,75	3.721,80

Fonte: próprio autor, 2019

Em uma situação ideal, seriam necessários 0,82 kg de lodo seco para alcançar o mesmo potencial calorífico liberado por 1 kg de cavaco. Na situação atual, para a queima do lodo úmido (82,01%) em caldeira obter o mesmo potencial calorífico do cavaco seco, são necessários 8,74 kg de lodo, para se equivaler energeticamente com 1 kg de cavaco seco. Ou seja, para gerar vapor na caldeira, apenas com a queima

de lodo, na situação atual, seria necessárias 15.540,30 toneladas de lodo por mês, o que não é possível, visto que são gerados 184,55 toneladas/mês de lodo. Mesmo com um aumento produtivo e aumento da geração de lodo, não seria possível trabalhar com a queima apenas de lodo, isso porque a demanda energética aumentaria com o aumento produtivo, necessitando de ainda mais combustível – lodo – sendo queimado na caldeira.

Ainda que fosse queimado o lodo seco, sem a presença de umidade, não existiria demanda suficiente de lodo para suprir todo o consumo de cavaco, pois seriam necessários 1460,98 toneladas/mês de lodo, ao ponto que são geradas apenas 184,55 toneladas/mês, com grande parcela deste peso sendo água.

Para o cálculo da geração de cinzas na queima do lodo, foi desprezada a análise de lodo coletada em julho, ante os problemas encontrados no período, condicionando o estudo em uma situação mais próxima da realidade rotineira da indústria.

Na Tabela 8 é evidenciado o consumo diário de cavaco e o potencial energético gerado por dia:

Tabela 8 – Consumo e geração de energia diária com queima de cavaco

Consumo mensal (kg)	Consumo diário (kg)	Potencial energético (kJ/kg)	Energia gerada (kJ/dia)
1.778.860	59.295,33	17.699	1.049.468.105

Fonte: próprio autor, 2019

Conhecendo a energia gerada diariamente pela caldeira, é possível determinar o percentual de cavaco e lodo no *blend* energético, mantendo a mesma geração de energia atual, reduzindo apenas o consumo de cavaco e incrementando o consumo de lodo, reaproveitando assim o lodo dentro da própria planta industrial. Através do Quadro 1, é possível verificar a quantidade de cavaco economizada diariamente, com a inserção de lodo na queima em caldeira.

Massa de lodo gerado diariamente (kg)	6.151,67
Massa de cavaco consumida diariamente (kg)	59.295,33
Proporção cavaco/lodo diária	10,37%
Massa de lodo queimada (kg)	6.151,67
Energia gerada (Lodo) (kJ)	12.463.037,35
Massa de cavaco queimada (kg)	58591,17
Redução de cavaco queimado diariamente (kg)	704,16
Energia gerada (Cavaco) (kJ)	1.037.005.118
Energia total da queima do <i>blend</i> (kJ)	1.049.468.155

Quadro 1 – Geração de energia com a queima de lodo e redução no consumo de cavaco

Fonte: próprio autor, 2019

Com a formação de um *blend* energético, na proporção de 9/1 de cavaco para lodo úmido, ocorrerá uma diminuição de 704,16 kg do consumo diário de cavaco, gerando uma economia de R\$ 105,62 diariamente. Com a nova destinação do lodo, também será possível uma economia diária no valor de R\$ 1.205,73.

É necessário recalcular a massa de cinza gerada, uma vez que um quilograma de cavaco gera aproximadamente apenas 15% da cinza gerada com a queima do lodo úmido, conforme evidenciado na Tabela 2.

Massa de lodo queimada (kg)	6.151,67
Massa de cinzas gerada (kg)	222,22
Custo adicional	R\$ 19,56
Massa de cavaco não queimada (kg)	704,16
Cinza não gerada (kg)	20,07
Redução de custo	R\$ 1,77
Economia diária	R\$ 1.293,40
Economia mensal	R\$ 38.802,05

Quadro 2 – Economia com a queima de lodo descontado a geração de cinzas

Fonte: próprio autor, 2019

Desta forma, a agroindústria conseguiria uma economia máxima de R\$ 38.802,05 mensalmente, com a mudança de destinação do lodo úmido. É possível afirmar que, todo o custo de destinação do lodo será economizado, caso essa alteração seja feita na indústria. A implementação de um sistema de secagem do lodo pode ser avaliada, haja visto o alto potencial calorífico do lodo em concentrações de umidades inferiores a 20%, em especial em umidades inferiores a 15%, onde o lodo passa a ter um poder calorífico superior que o combustível principal, cavado de lenha.

Utilizando as equações 7 e 8, com o lodo em uma concentração de sólidos de

50%, foi possível criar um cenário onde o lodo úmido passou por uma pré-secagem antes da queima em caldeira. Com a pré-secagem, a massa de lodo disponível para queima diminui, enquanto seu poder calorífico aumenta, conforme demonstrado na Tabela 6.

Na Tabela 9, é evidenciado a economia máxima que a agroindústria pode obter com a queima do lodo úmido, após processo de pré-secagem até chegar em uma concentração de sólidos de 50%. Para esses cálculos, já foi descontado os custos com a geração de cinzas provenientes do lodo.

Tabela 9 – Economia com a queima de lodo a 50% de umidade

Cavaco não queimado (kg)	Economia diária com cavaco	Lodo não destinada a compostagem (kg)	Economia diária com destinação do lodo	Economia diária	Economia mensal
1206,36	R\$ 180,95	6.151,67	R\$ 1.205,73	R\$ 1370,15	R\$ 41.104,50

Fonte: próprio autor, 2019

A secagem do lodo apresenta uma maior viabilidade técnica e econômica. Com a secagem, é possível obter-se uma economia mensal de R\$ 41.104,50, valor 5,6% superior quando comparado com a queima do lodo úmido à 17,99% de sólidos.

Ainda com a redução global da massa de lodo devido a pré-secagem, o aumento no PCI compensa a perda de massa global, viabilizando a secagem e possibilitando futuros estudos relacionados a viabilidade da instalação de um sistema de secagem na agroindústria.

Frisa-se que o custo com a geração de cinzas será o mesmo em ambos os casos, queima de lodo à 17,99% e 50% de sólidos, uma vez que a massa total de sólidos na amostra é a mesma, reduzindo apenas a massa de água presente na amostra.

De acordo com Cristina (2019), que estudou a queima de lodo de um processo físico químico de um frigorífico de aves, o lodo *in natura* não atende todos os parâmetros estabelecidos na Resolução SEMA 042/2008, que determina parâmetros para queima de resíduos em caldeira. Dias et al. (2015) trabalhou com lodo de sistemas de lodo ativados em laticínios e também verificou na caracterização do lodo *in natura* a não conformidade com a Resolução SEMA 042/2008, conforme demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Concentração média dos parâmetros estabelecidos na resolução SEMA 042/2008

Elemento	Concentração média (mg/kg de resíduo)	Resolução SEMA 042/2008 (mg/kg de resíduo)
Arsênio	1,0	1,0
Cádmio	0,2	0,5
Chumbo	7,8	1,0
Cobre	13,0	1,0
Mercúrio	0,4	0,5
Níquel	8,2	1,0
Selênio	1,0	1,0
**Telúrio	0,0	1,0
***Tálio	0,0	0,5

Fonte: Adaptado de Dias et al. (2015).

Ainda segundo Cristina (2019), o incremento de pequenas massas de lodo (10%) junto ao cavaco de lenha para queima em caldeira, tende a fazer com que a concentração dos parâmetros requeridos na Resolução SEMA 042/2008 diminuam, de forma que os parâmetros atinjam as concentrações máximas permitidas, possibilitando a queima em caldeira de lodos oriundos dos decantadores dos sistemas de lodos ativados.

A formação do *blend*, combustível a base de lodo úmido e cavaco de lenha, além de propiciar um aproveitamento energético de um subproduto, transformando-o o custo em economia com a disposição deste resíduo, corrobora para o atendimento dos parâmetros estipulados pela Resolução SEMA 042/2008, além de configurar um bom combustível oriundo da biomassa, sem descaracterizar o combustível principal, cavado de lenha, conforme é exigido pela mesma resolução.

Faz-se necessário em estudos futuros, a verificação quanto ao atendimento da Resolução CONAMA 382/06, que trata sobre os padrões de emissões atmosféricas. A caracterização da cinza oriunda do lodo, é necessária também para caracterizá-la conforme ABNT NBR 10004/04, verificando possíveis destinações deste resíduo conforme sua classificação.

Os dados obtidos experimentalmente quanto ao teor de cinzas gerado pela queima de cavaco, diferem dos dados repassados pela empresa, necessitando um maior estudo a respeito, verificando se a queima em caldeira difere da calcinação em mufla, diferenciando o teor de cinzas geradas.

6 CONCLUSÕES

O lodo gerado na lagoa aerada, do sistema de tratamento dos efluentes da agroindústria, possui viabilidade técnica e econômica para a formação de um *blend* energético com cavaco de lenha, para posterior queima em caldeira, sem necessidade de nenhum tratamento prévio.

Quando aplicado um tratamento de secagem no lodo, a viabilidade técnica e econômica aumenta, possibilitando mais economia para a agroindústria.

Em ambos os casos estudados, a viabilidade se deu em grande parte, não pela queima do lodo, mas pela mudança na sua destinação final, que apresenta o maior custo. Desta forma, os objetivos propostos neste estudo foram atendidos.

Sugere-se a continuidade do estudo, confirmando o atendimento da Resolução SEMA 042/2008 no *blend* de cavaco/lodo antes de iniciar a queima em caldeira.

7 REFERÊNCIAS

ANDREOLI, Cleverson Vítório; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 483 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Classificação de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, p. 77. 2004.

BARON, A.; CARATERIZAÇÃO, O.; BARON, O. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO CENTRIFUGADO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PASSAÚNA – CURITIBA / PR. 2003.

BELLOTE, A. F. J. et al. Resíduos da Indústria de celulose em plantios florestais. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 37, p. 99-106, jul./dez. 1998. Disponível em: . Acesso em: 03 jan 2018

BEZERRA, J. R. M. V. **Tecnologia de Fabricação de Derivados do Leite**. Guarapuava: UNICENTRO, 2008. 55 p.

CALDEIRA, M.V.; DELARMELINA, W. M.; PERONI, L; GONÇALVES, E. O.; SILVA, A. G. da; Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. **Pesq. Agropec. Trop.**. Goiânia, v. 43, n. 2, p. 155-163, abr./jun. 2013.

CARVALHO, F.; PRAZERES, A. R.; RIVAS, J. Science of the Total Environment Cheese whey wastewater : Characterization and treatment. **Science of the Total Environment, The**, v. 445–446, p. 385–396, 2013.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - Pampulha, 1997. 245 p.

CRISTINA, K. et al. Journal of Environmental Chemical Engineering An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 102996, 2019.

DEMIREL, B.; YENIGUN, O.; ONAY, T. T. Anaerobic treatment of dairy wastewaters : a review. v. 40, p. 2583–2595, 2005.

Dias, Ozanan de Almeida; Aguiar, Fernanda Silva; Silva, Thainá de Paula; Veloso, Vitor Hugo Silva Veloso; Lima, Paulo Adriano Catulé. **LODOS DE INDÚSTRIAS DE LATICÍNIOS: REQUISITOS PARA DISPOSIÇÃO NO SOLO**. IX SBEA, Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, 2015.

DIEZ, M. C. et al. Operational factors and nutrient effects on activated sludge treatment of Pinus radiata kraft mill wastewater. Bioresource Technology, v. 83, p. 131-138, 2002.

DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **MANUAL DE MeTODOS**. 2017.

DOS SANTOS, E. R. **Caracterização química, microbiológica e toxicidade do lodo de esgoto da estação Mangueira, Pernambuco, Brasil**. 2009. 69 f. Dissertação (Pós-graduação em desenvolvimento de processos ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco. Recife. 2009.

EMBRAPA, 2018. **Indicadores: Leite e Derivados**. – Ano 9, n. 78 (Maio/2018) – Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2018. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/176816/1/Indicadores-leite-78-Maio.pdf>>. Acesso: 25 de abril de 2019.

FAAIJ,A.; VAN REE, R.; WALOHEIML.; OLSON, E.; OUOHUISA.; VANW IJK, A.; DAEY-OUWENC.S.; TURKENBERWG. Gasification of biomass wastes and residues

for electricity production. *Biomass and Bioenergy*. v. 12,(6), p.387, 1997.

FEDERAL, U.; GERAIS, D. E. M. Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso. 2011.

FERREIRA, C. A. et al. Módulo para compostagem rápida de resíduos orgânicos na pequena propriedade. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 21. Colombo, Paraná, p. 1-24, dez 2005. Disponível em: . Acesso em: 25 mar 2018

GANDHI, GIORDANO. **Tratamento e Controle de Efluentes Industriais** Eng^o e Prof^o. Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro – RJ. (2005).

GARCIA, Natalia Nunes. Uso do lodo de flotador de abatedouro de aves na produção de biochar. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Departamento acadêmico de ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

GIORDANO, G. TRATAMENTO E CONTROLE EFLUENTES INDUSTRIAIS. 2005.

HOUDKOVÁ, L.; BORAN, J.; UCEKAJ, V.; ELSASER, T.; STEHLIK, P. (2008) Thermal processing of sewage sludge - II. *Applied Thermal Engineering* , v. 28, p. 2083-2088.

JIN, Y.; GAO, N.; ZHU, T. Techno-economic analysis on a new conceptual design of waste heat recovery for boiler exhaust fl ue gas of coal- fi red power plants. **Energy Conversion and Management**, v. 200, n. 4800, p. 112097, 2019.

KARACA, C. et al. High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. **Waste Management**, v. 78, p. 217–226, 2018.

LARA, A. I. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 97 p.

LEITE, Clauber Barão. **Tratamento de Resíduos Sólidos com Aproveitamento Energético: Avaliação Econômica entre as Tecnologias de Digestão Anaeróbia e Incineração** 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LOURES, C. C. A. **Estudo da aplicação de UV/FENTON ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) no tratamento de efluentes de laticínio**. 2011. 229 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo. Lorena. 2011.

LUNDIN, M.; OLOFSSON, M.; PETTERSSON, G. F.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resources Conservation*, v. 41, p. 255 - 278, 2004.

MICROFAUNA, D. A.; ESTAÇÃO, E. M. TRATAMENTO DE ESGOTOS DO TIPO LODOS ATIVADOS : UM WASTEWATER TREATMENT PLANT : AN INSTRUMENT OF ASSESSMENT. v. 10, p. 329–338, 2005.

PARSEKIAN, M. P. S. **Aplicação de lise celular forçada em sistema de tratamento aeróbio precedido de reator UASB**. 2003. 250 f. Tese (Obtenção de título de doutor em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

PARO, A. C., COSTA, F. C., COELHO, S. T. Estudo comparative para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 113-125, 2008.

PORWAL, H. J.; MANE, A. V; VELHAL, S. G. Biodegradation of dairy effluent by using microbial isolates obtained from activated sludge. **Water Resources and Industry**, v. 9, p. 1–15, 2015.

Radin, G. Maia. Carlos, H. Custo energético de lenha e cavaco de madeira para secagem de grãos em agroindustria. 2014.

S. Werle , RK Wilk. **Uma revisão dos métodos para a utilização térmica do lodo de esgoto: a perspectiva polonesa.** Renovar. Energia, 35 (9) (2010), pp. 1914-1919

SABESP, 2015. **Revista DAE.** Vol. 198, 88 p.

SARAIVA, C. B. INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS Water consumption and effluent generation in a small dairy industry. p. 10–18, 2009.

SCHWANTES, D. et al. Biofertilization of Tifton 85 with Sludge from Sewage Treatment Station of Whey Biofertilization of Tifton 85 with Sludge from Sewage Treatment Station of Whey Industry. n. January, 2017.

SHEN, E. et al. CARACTERIZAÇÃO DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) E ESTUDO SOBRE SEU POTENCIAL ENERGÉTICO. v. d, n. 1, p. 1–9, 2008.

SOARES, S. R. A.; MATOS, Z. M. R.; BERNARDES, R. S. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v.5, n.2, p.313-319, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662001000200023>. Acesso em: 23 de outubro de 2019.

TAPLIN, R. **Boiler Plant and Distribution System Optimization Manual.** The Fairmount Press, Inc. Lilburn, GA – USA, 2014. p. 293.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. p. 416.

Zy Liu. **Relatório anual sobre o desenvolvimento da indústria de energia elétrica da China.** Conselho da Eletricidade, Pequim (2011).