

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – CAMPUS FELIZ

Tainá Klein

AVALIAÇÃO DO LODO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE
UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE
BIOMASSA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia
Química.

Área da Engenharia Química: Tratamento e Aproveitamento de Rejeitos

Sub-área: Tratamento de Efluentes

Orientador: Francisco Cunha da Rosa

Feliz

2021

TAINÁ KLEIN

**AVALIAÇÃO DO LODO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE
UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE
BIOMASSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flavia Dagostim Minatto

Prof. Eduardo Echevengúá Barcellos

ORIENTADOR

Prof. Francisco Cunha da Rosa

Feliz, 03 de setembro de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha vó Nair, sempre me apoiou e sempre fez o que podia para a conclusão desta etapa. Dedico também ao meu pai, Ricardo, sem ele eu, com certeza, não teria chegado até aqui e, por último a minha tia/madrinha Alice, sempre me apoiou o máximo que podia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, professor Chico, por aceitar me orientar iniciando meu trabalho com um mês de atraso, pelo tempo dedicado a este trabalho, por me acompanhar durante a jornada e por ser um professor incrível durante toda minha caminhada.

Agradeço ao IFRS pela possibilidade de um ensino superior gratuito e de alta qualidade, permitindo a minha formação profissional que durante anos foi buscada e sonhada.

Agradeço ao apoio de toda a minha família pela ajuda e compreensão disponibilizados durante este período. Ao concluir esta etapa não concluirei apenas um sonho e um desejo meu, mas sim um sonho e um desejo que foram traçados e buscados por toda a minha família, que não economizou esforços para que isso tudo fosse concretizado.

Agradeço ao meu namorado pelo apoio desempenhado ao longo de toda a graduação, pela paciência diante dos momentos de irritabilidade, pelo carinho e amor fornecidos durante anos que deixaram os dias mais leves e fáceis de enfrentar, mesmo diante das mais diversas dificuldades.

Agradeço as minhas colegas de trabalho pelo apoio, pela ajuda na ideia do projeto, pelo suporte durante esses meses. Principalmente a colega Silvia, pela dedicação em me ajudar sem pestanejar.

RESUMO

O lodo é o subproduto do tratamento de efluentes, gerado a partir da matéria orgânica e inorgânica do efluente. O lodo gerado em ETE de laticínios pode ser até cem vezes mais poluidor do que o lodo doméstico por conta da alta carga orgânica retida no mesmo. Este trabalho buscou avaliar as características físico-químicas de um lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de laticínios como o intuito de analisar a potencialidade de seu uso como combustível para recuperação de energia através da sua queima, promovendo assim energia e redução do volume de resíduos gerados. Para tanto, estudou-se o uso da biomassa gerada na própria estação de tratamento. Para este estudo, os principais parâmetros avaliados do lodo foram condições de secagem, teor de umidade, acidez volátil, poder calorífico e inflamabilidade do lodo após seco. Com os resultados obtidos, é possível dizer que o lodo seco pode ser utilizado como biomassa, mesmo com poder calorífico menor que a madeira. Isso demonstra que a aquisição de um sistema de secagem para este lodo pode ser viável economicamente para a empresa em médio prazo, além de contribuir significativamente com a redução do volume de resíduos e poluentes gerados, trazendo benefícios claros à sociedade e ao meio ambiente como um todo.

Palavras-chave: ETE, Lodo, Biomassa, Gravimetria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da ETE estudada.....	6
Figura 2: ETE do estudo. a) Visão geral da ETE. b) Tanque de floculação do lodo. c) visão geral do adensador. d) Contêiner de armazenamento do lodo do estudo. e) Lodo adensado bombeado para o contêiner. F) efluente clarificado segue o tratamento de efluentes para a lagoa aeróbia (h). g) Efluente clarificado no adensador. h) Laboa aeróbia.	6
Figura 3: Fluxograma de processo de Tratamento do lodo.	11
Figura 4: Fluxograma do equipamento de secagem do lodo.....	16
Figura 5: Tambor de secagem	16
Figura 6: Exaustor centrífugo.....	18
Figura 7: Fluxograma representativo das etapas da parte experimental.	26
Figura 8: Aspecto inicial do lodo.	28
Figura 9: Medição da massa do lodo na balança.	29
Figura 10: Em a) Sistema montado para captação da água livre do lodo para realização da acidez volátil e em b) Recipiente da coleta da umidade do lodo.	30
Figura 11: Comparação de perda de massa durante secagem em estufa nas temperaturas de (--) 90 °C, (--) 100 °C e (--) 105 °C	36
Figura 12: Aspecto físico do lodo após secagem em estufa em diferentes temperaturas, em a) 90 °C; em b) 100 °C e em c) 105 °C.....	37
Figura 13: Aspecto do lodo após 550°C por 1h.....	40
Figura 14: Amostra final no teor de carbono total.....	42
Figura 15: Imagem do teste de chama no lodo seco ao logo do tempo: em a) momento inicial; em b) após 3,5 minutos e em c) após 7 minutos.....	43
Figura 16: Aparência do lodo após a queima.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Origem do efluente de laticínio.....	9
Tabela 2: Comparação de poder calorífico de lodos de diferentes origens.	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
Objetivo geral	4
Objetivos específicos	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 TRATAMENTO DE EFLUENTES	5
2.1.1 ETAPAS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	7
2.1.2 GERAÇÃO DE EFLUENTES EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS	8
2.2 TRATAMENTO DE LODO	9
2.2.1 Condicionamento do lodo e desidratação do lodo	12
2.2.2 Biomassa	13
2.2.3 Composição do lodo	13
2.2.4 SECAGEM DO LODO.....	16
2.3 COMBUSTÃO	18
2.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE UM LODO PARA COMBUSTÃO	21
2.4.1 Poder Calorífico.....	21
2.4.2 Teor de Cinzas.....	22
2.4.3 Teor de Carbono e de Voláteis.....	22
2.4.4 Secagem.....	23
2.4.5 pH e Acidez volátil.....	24
2.4.6 Teste de chama	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 MATERIAIS	27
3.2 AMOSTRAS	27
3.3 AVALIAÇÕES DO LODO	28
3.3.1 Secagem.....	28
3.3.2 Avaliações de pH e acidez volátil	30
3.3.3 Teor de umidade.....	30

3.3.4 Poder calorífico	31
3.3.5 Teor de cinzas	31
3.3.6 Teor de voláteis e Teor de carbono fixo	31
3.3.7 Teste de chama	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LODO	33
4.2 SECAGEM	35
4.3 TEOR DE UMIDADE.....	37
4.4 AVALIAÇÕES DE PH E ACIDEZ VOLÁTIL	38
4.5 PODER CALORÍFICO	39
4.6 TEOR DE CINZAS	40
4.7 TEOR DE CARBONO FIXO E TEOR DE VOLÁTEIS	41
4.8 TESTE DE CHAMA	42
4.9 VIABILIDADE ECONÔMICA	44
5 CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de tratar do esgoto urbano é fator importante para se manter a qualidade dos recursos hídricos e a saúde humana. O processo tratamento do esgoto ocorre nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) e como subproduto gera-se um resíduo sólido conhecido como lodo (CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2011).

A disposição de resíduos em aterros sanitários, apesar de mais barata a curto prazo, não é a mais eficaz em termos ambientais e requer grandes áreas, sendo que o uso energético da biomassa dos aterros diminui os passivos ambientais gerados pelo aterro (VON SPERLING, 2001)

A destinação do lodo de esgoto em aterros sanitários gera um alto custo operacional para a ETE, além de aumentar a produção de gases e lixiviado nestes. Devido ao grande volume de lodo gerado diariamente, há um agravamento no problema do manejo do resíduo industrial (VON SPERLING, 2001). O esgoto não tratado, ameaça à saúde das pessoas e o meio ambiente, onde aproximadamente 15 bilhões de litros de esgoto sem tratamento são despejados a cada dia na natureza (BATISTELLA, 2015).

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. Neste cenário de grande urgência mundial, vários estudos estão sendo desenvolvidos a respeito da gestão alternativa do lodo industrial, dentre eles está seu emprego como fonte energética. Um exemplo típico é a queima de resíduos sólidos em caldeiras (MENEHINI, PROINELLI, PINTRO, 2015).

Todos os sistemas de tratamento biológicos de águas residuais geram lodo que se compõe em grande parte de material orgânico. A quantidade de lodo gerado por unidade de massa do material orgânico depende da natureza do sistema de tratamento (aeróbio ou anaeróbio) e da composição do material orgânico. Para converter a energia química do lodo em energia útil têm-se dois caminhos: aplicação da digestão anaeróbia e uso do biogás gerado ou processos térmicos (VAN HAANDEL, 2009).

Entre as alternativas de reutilização deste lodo, a secagem e utilização como biomassa para produção de energia na caldeira da empresa. Os métodos de secagem de lodo tradicionais têm sido substituídos por tecnologias térmicas que permitem

maiores reduções de peso e volume (LEITE, 2018). É possível obter sólidos na faixa de 90 a 95%, além da possibilidade de destruição de organismos patogênicos que se mantem presentes após o processo de estabilização, assim, constitui um processo de melhoria da qualidade do lodo ou do biossólido (LEITE, 2018).

Para todas as opções de gerenciamento de lodo de esgoto, fica evidente que a secagem se torna uma etapa fundamental, pois ela promove a redução do volume do lodo diminuindo os custos das etapas subsequentes como manuseio, transporte e armazenamento do produto (LEITE, 2018).

A utilização do lodo como biomassa na produção de energia apresenta inúmeras vantagens, pois é uma energia limpa e independente de combustível fóssil. Logo, com a utilização alternativa do mesmo para produção de energia, o volume de resíduos cujo destino são os aterros diminuirá, e conseqüentemente, o problema do manejo de resíduos urbanos também (LAZZARI, 2018).

Para alcançar boa eficiência no processo de combustão é preciso conhecer as propriedades físicas, químicas e térmicas da biomassa (SAIDUR et al., 2011). Para uma boa combustão, o combustível deve possuir elevado teor de carbono fixo, além de alto poder calorífico superior. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a combustão, enquanto altos teores de nitrogênio e enxofre poderão resultar em altos índices de emissões de NO_x e SO_2 (PASQUINI, 2014).

A indústria alvo deste estudo está localizada na cidade de Nova Petrópolis – RS, é um laticínio onde são produzidos, além de leite UHT, derivados de leite como queijo, nata, iogurte, bebida láctea e requeijão. A indústria possui um potencial exorbitante de consumo de água por conta das lavagens que são necessárias após o uso de cada equipamento. Periodicamente são realizadas análises da composição química de metais pesados e avaliação físico-química.

Com o intuito de diminuir o volume do lodo gerado na ETE de uma indústria de laticínios e, conseqüentemente, diminuir os custos com o manejo do resíduo até o aterro sanitário, priorizando a diminuição do impacto ambiental gerado pelo resíduo descartado em aterro sanitário, foi realizado este trabalho, buscando-se encontrar uma utilização viável e nobre ao resíduo mencionado. Não apenas em escala mundial, mas em escala municipal, gerando menor volume de resíduos e aumentando a qualidade de vida da população em torno do laticínio.

A escolha deste estudo é para atender uma exigência ambiental do local da indústria de laticínio, além de atender exigências legais atribuídas ao despejo do resíduo sólido.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos foram delimitados a fim de caracterizar o lodo proveniente da ETE de uma indústria de laticínios, para verificar a viabilidade da secagem para posterior uso do lodo seco como biomassa energética para caldeira.

Objetivo geral

Caracterizar o lodo seco proveniente da estação de tratamento de efluentes de um laticínio da serra gaúcha, para geração de energia através de biomassa utilizada na caldeira da indústria.

Objetivos específicos

São objetivos específicos:

- Caracterizar o resíduo industrial do qual o lodo é composto;
- Realizar análises gravimétricas com o intuito de determinar a umidade do lodo;
- Determinar a taxa de secagem do lodo em estufa;
- Determinar o teor de cinzas, teor de voláteis e teor de carbono fixo do material;
- Determinar a acidez volátil;
- Analisar o poder calorífico das amostras através de análise calorimétrica;
- Comparar o poder calorífico do lodo com o poder calorífico da madeira;
- Avaliar a viabilidade econômica do processo de secagem.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa do trabalho, serão detalhados os processos em que se obteve o lodo avaliado, da mesma maneira que serão explicados as análises e os processos aos quais o lodo foi submetido, depois e durante o processo de secagem.

2.1 TRATAMENTO DE EFLUENTES

Na indústria tema deste estudo, a primeira etapa do tratamento de efluentes é em uma lagoa anaeróbia, usada como lagoa de homogeneização. O efluente entra nesta lagoa logo após a saída da indústria de laticínios. Esta lagoa possui uma capa espessa para evitar propagação de odor proveniente da degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias. O pH na lagoa costuma variar conforme o que é realizado na empresa. Por exemplo, caso esteja sendo realizada limpeza com ácidos, o pH é inferior a 7,00. Porém, o pH sempre sai desta lagoa em torno de 7 a 8, já ajustado com o uso de substâncias ácidas ou alcalinas conforme a necessidade.

Após três dias, o efluente sai da lagoa anaeróbia, sendo bombeado até um tanque de flotação (Figura 2), onde o efluente flota e é separado por densidade. Após a separação em um adensador (Figura 2) o lodo, agora mais espesso, é bombeado e centrifugado de onde sai diretamente para o local de armazenamento. O efluente é armazenado em um contêiner (Figura 2), de onde, a cada dois dias é enviado a um aterro sanitário, a Figura 1 mostra o fluxograma da ETE estudada.

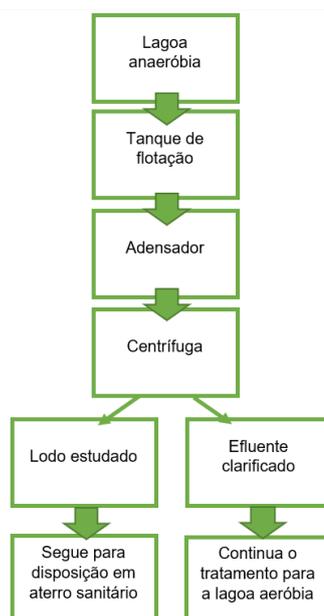


Figura 1: Fluxograma da ETE estudada.

Fonte: Autora

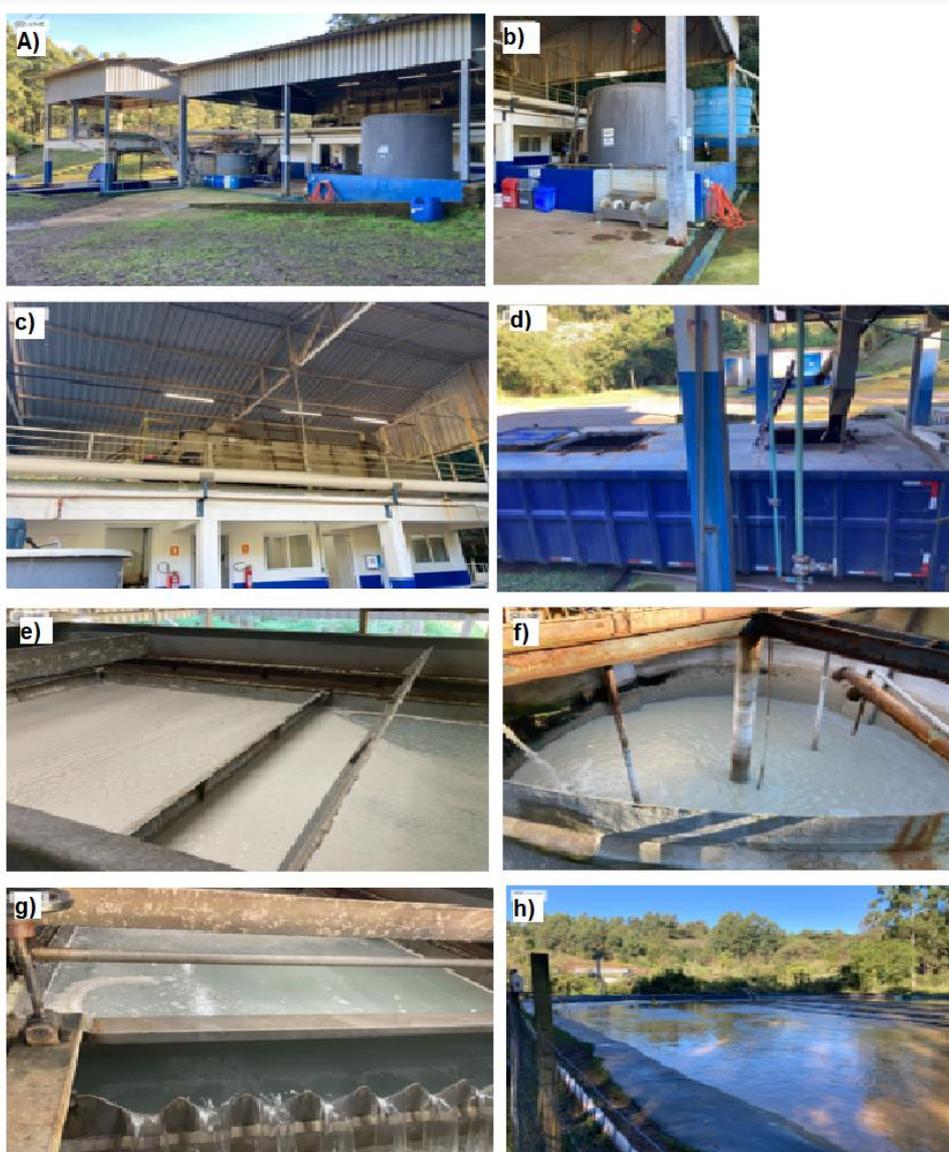


Figura 2: ETE do estudo. a) Visão geral da ETE. b) Tanque de floculação do lodo. c) visão geral do adensador. d) Contêiner de armazenamento do lodo do estudo. e) Lodo adensado bombeado para o contêiner. f) efluente clarificado segue o tratamento de efluentes para a lagoa aeróbia (h). g) Efluente clarificado no adensador. h) Lagoa aeróbia.

Fonte: Autora.

Os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA), mais conhecidos como reatores UASB (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) são unidades de tratamento biológico cuja finalidade é a remoção de matéria orgânica carbonácea (carboidratos, proteínas, lipídios ou seus metabólitos) em suspensão ou dissolvido nas águas residuárias. Diferentemente dos sistemas de tratamento aeróbio, o reator UASB

não remove nutrientes como nitrogênio e fósforo de forma satisfatória (VON SPERLING, 2005).

A estabilização do lodo é feita com o objetivo de reduzir a quantidade de organismos patogênicos presentes; eliminar odores ofensivos e inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação do lodo. Consegue a estabilização através de: redução biológica do conteúdo volátil, oxidação química do material volátil, adição de produtos químicos (DAVID, 2002).

2.1.1 Etapas da estação de tratamento de efluentes

Na indústria alvo deste estudo, o primeiro processo ao qual o efluente é submetido é a lagoa anaeróbia, onde permanece por cerca de três dias antes de passar para a etapa de flotação, já estabilizado. A estação de tratamento de efluentes possui duas etapas de adensamento do lodo que consistem em:

- Flotação –usualmente empregada para o adensamento do lodo ativado em excesso;
- Processos mecânicos - utilizando equipamentos como centrífugas e adensadores de esteira.

Após o adensamento do lodo, o resíduo com maior concentração de matéria sólida é despejado em um contêiner e a água clarificada segue o processamento de tratamento para despejo no riacho.

O resíduo adensado, depois de passar pelos processos de flotação, adensador esteira e centrífuga, é despejado em um contêiner (gerando diariamente em torno de 8 toneladas de resíduo), a cada dois dias este resíduo é levado ao aterro sanitário. Algumas imagens desta ETE podem ser visualizadas no Anexo I deste trabalho.

A digestão anaeróbia poder ser considerada como processo fermentativo de maior interesse para o tratamento de lodos, podendo ser a última fermentação, visto que seus produtos (dióxido de carbono e metano) não são mais suscetíveis a outras fermentações (VAN HAANDEL E SOBRINHO 2006).

Um processo biológico anaeróbio ocorre quando diferentes tipos de micro-organismos, na ausência de oxigênio molecular, promovem a transformação de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em produtos mais simples como metano e gás carbônico (FORESTI *et al.*, 1999).

Caso os digestores anaeróbios sejam operados em condições adequadas, pode haver uma redução de duas ordens de magnitude de coliformes fecais por exemplo. Os ovos de helmintos, no entanto, são mais resistentes ao processo. Por esta razão, a digestão anaeróbia é um processo de estabilização eficiente para diminuir o problema do mau odor, porém a redução de patógenos é pequena, impondo limites à sua utilização (FERNANDES *et al.*, 2001).

Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte da matéria orgânica presente no efluente é convertida em biogás (cerca de 70 a 90%), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), que constitui o lodo excedente do sistema. Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se mais concentrado e com melhores características de desidratação (CHERNICHARO, 2007).

2.1.2 GERAÇÃO DE EFLUENTES EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

Os efluentes da indústria de laticínios são compostos por quantidades variáveis de leite (perdas durante o processo) e materiais sólidos flutuantes (higienização), como: detergentes, desinfetantes, lubrificantes, areia, água, e esgoto doméstico. A carga poluente deste efluente varia de acordo com a água utilizada, o tipo de processo e o controle sobre a descarga destes resíduos (NIRENBERG & FERREIRA, 2005).

Em muitos laticínios o soro é descartado junto com os demais efluentes, o que aumenta o potencial poluidor devido ao soro ser cem vezes mais poluente que o esgoto doméstico. O soro, o leite e o leite ácido possuem alto valor nutritivo e elevadas cargas orgânicas, sendo sugerido que se faça o tratamento destes de forma separada dos demais efluentes gerados no laticínio (SILVA, 2011).

Silva (2011) afirma que muitos laticínios descartam o soro junto dos demais efluentes, sendo uma razão da poluição causada por esse segmento industrial. Diante da alta carga orgânica contida nos resíduos produzidos, a destinação correta dos mesmos é necessária para que impactos ambientais sejam reduzidos.

Entre os sólidos totais do soro de leite, destacam-se a lactose (aproximadamente 5% m/v), proteínas solúveis (aproximadamente 0,7% m/v) e ácido láctico (0,1%) (SANTOS, FERREIRA, 2001). Na tabela 1, observa-se a origem do efluente gerado na indústria de laticínio.

Operação	Descrição
Higienização	Enxágue para remoção de resíduos de leite ou seus componentes que ficam aderidos na superfície dos equipamentos, tubulações, mangueiras, bombas e utensílios utilizados diretamente na produção. Lavagem de pisos e paredes
Descartes	Descarga de mistura de sólidos de leite e água; Descarte de soro, leite e leite ácido; Descarte de sólidos de leite retidos nos clarificadores; Descarte de finos provenientes da produção de queijo; Produtos retornados a indústria.
Vazamentos e derramamentos	Vazamento de leite em tubulações e equipamentos correlatos devido a operações e manutenções; Transbordamentos de tanques e equipamentos.

Tabela 1: Origem do efluente de laticínio.

Fonte: Adaptado de MACHADO *et al.*, 2002.

2.2 TRATAMENTO DE LODO

O lodo é um dos subprodutos resultantes do processo de tratamento de esgotos que pode apresentar-se na forma sólida, semi-sólida ou líquida, rico em matéria orgânica e em nutrientes, com grande potencial poluidor (BATISTA, 2015).

Para o tratamento ou aproveitamento mais eficiente do lodo produzido em estações de tratamento de efluente, é importante conhecer as características do lodo

que será processado. As mesmas variam de acordo com a sua origem, tempo entre a sua geração e tipo de processamento pelo qual o lodo foi submetido (TCHOBANOGLIOUS, 2016).

Os lodos são estabilizados para reduzir a concentração de patógenos, eliminar maus odores e inibir/reduzir o potencial de putrefação. O lodo estudado passa pelo processo de digestão anaeróbia, que faz a conversão biológica de matéria orgânica por fermentação de um reator aquecido para produzir metano e dióxido de carbono, essa fermentação ocorre na ausência de oxigênio. Dos constituintes removidos do tratamento de efluente, o lodo é o que apresenta maior volume e seu processamento, reuso e disposição final são o problema mais complexo nesta área. (TCHOBANOGLIOUS, 2016).

De acordo com Tchobanoglous (2016), o tratamento de lodos corresponde a um conjunto de etapas relativamente complexas e de alto custo de uma ETE. Iniciando-se no tratamento primário: estabilização, adensamento por flotação e centrífuga, condicionamento e desidratação. Destacam-se as etapas:

- 1) Estabilização por tratamento anaeróbico e químico pela adição de sal;
- 2) Adensamento por flotação e centrifugação;
- 3) Processo de condicionamento em um contêiner;
- 4) O próximo passo proposto é a secagem térmica e encaminhamento para a incineração e a lavagem de gases do lodo.

As características do lodo afetam diretamente os processos de tratamento e disposição final, o conhecimento de suas características é fundamental para se definir as linhas mestras de manejo do lodo (BATISTA, 2015).

Os resíduos gerados pela Indústria são oriundos do setor produtivo, dos laboratórios de análises químicas e microbiológicas, além dos resíduos denominados domésticos, decorrentes de outros setores, como da área de higienização de equipamentos e dos banheiros e vestiários. Na geração dos produtos líquidos durante o processo industrial, os setores de queijaria, por exemplo, geram efluentes de soro proveniente da separação da coagulação do queijo, da mesma forma que o "leitelho", que é o resíduo da produção de manteiga. Nas instalações desse setor industrial existem ralos ou sistemas de escoamento dos resíduos. A produção de laticínios gera grande quantidade de efluentes, em especial pela necessidade de limpeza do piso da área industrial da empresa.

A Figura 3 mostra o fluxograma do pré-tratamento geral do lodo proveniente da indústria de laticínios até o tratamento de secagem do mesmo (DAVID, 2002).

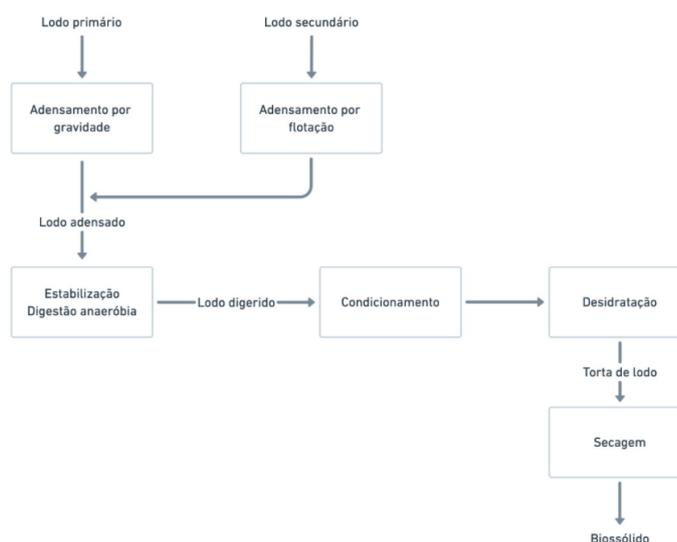


Figura 3: Fluxograma de processo de Tratamento do lodo.

Fonte: Adaptado de DAVID, 2002.

Segundo Von Sperling (2005), o termo “lodo” tem sido utilizado para designar os subprodutos do tratamento de efluentes. Esse material se caracteriza por possuir elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes, apresentando-se na forma sólida, semissólida ou líquida. De acordo com Metcalf e Eddy (2016), a produção de lodo, bem como suas características, pode variar de acordo com o tipo do processo de tratamento empregado. Neste contexto, destaca-se a geração de lodo por meio da remoção física de sólidos presentes no efluente bruto, por decantação ou flotação ou da biomassa microbiana excedente, oriunda de processos biológicos.

No adensamento por flotação, o ar é solubilizado em uma corrente líquida mantida a pressão elevada. Quando a solução é despressurizada, o ar dissolvido é liberado, formando bolhas no final, que são aprisionadas nas partículas de lodo, fazendo com que elas flitem e sejam removidas na superfície. O adensamento por flotação é utilizado de forma mais eficiente para lodos gerados em processos biológicos de tratamento de efluentes com crescimento em suspensão (TCHOBANOGLOUS, 2016).

As centrífugas são utilizadas tanto para adensamento como para desaguamento de lodos. O adensamento por centrifugação envolve a sedimentação

das partículas do lodo pela influência de uma força centrífuga. Os decantadores centrífugos consistem em um cilindro montado horizontalmente com uma das extremidades fechada. O lodo é alimentado continuamente, e os sólidos são concentrados na periferia do cilindro. Na parte interna, um dispositivo gira com velocidade pouco superior ao cilindro transportando os sólidos para a parte fechada do cilindro (TCHOBANOGLIOUS, 2016).

Atualmente na estação de tratamento de efluentes, apenas o efluente líquido é tratado, o lodo apenas sofre diminuição do volume por uma centrífuga, onde o lodo é despejado em um contêiner e enviado ao aterro sanitário.

2.2.1 Condicionamento do lodo e desidratação do lodo

O condicionamento do lodo é um processo utilizado para melhorar as características de separação das fases sólido-líquido do lodo, por meios físicos ou químicos, conforme Vann Haaden (2006), o condicionamento do lodo neutraliza ou desestabiliza as forças químicas ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão, imersos em meio líquido. Esse processo de desestabilização permite que as partículas pequenas se juntem para formar agregados maiores, os flocos. Essa formação de flocos vai beneficiar significativamente o processo seguinte que é a desidratação.

A desidratação dos lodos é uma operação física realizada para reduzir o conteúdo de água pelas seguintes razões (VANN HAADEN, 2006):

- Redução de volume para tratamentos posteriores;
- Diminuição do custo de transporte e de disposição final;
- Facilidade de manuseio;
- Redução da energia para secagem ou incineração;
- Redução da produção de chorume em aterro sanitário.

A umidade final (após a secagem) será de aproximadamente 20% para lodo. Esta umidade pode ser considerada adequada para utilizar o lodo como fonte de calor. A combustão dele nesse processo é indesejável, porque além de aumentar o percentual de cinzas há perda de poder calorífico do lodo. O processo apresenta uma baixa emissão de monóxido de carbono (CO), porém exaure forte odor (MENEHINI, PROINELLI, 2015).

2.2.2 Biomassa

No contexto energético, “[...] biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia” (ANEEL, 2005 *apud* KONRAD *et al*, 2018).

A lei geral de resíduos sólidos vislumbra a prevenção e a diminuição na produção de resíduos, propondo a prática de hábitos de consumo sustentável e uma gama de instrumentos para motivar o crescimento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, de acordo com as viabilidades econômica e técnica, e a disposição apropriada dos dejetos. Enfatiza também a logística reversa como elemento fundamental para a gestão dos resíduos sólidos industriais (SOLANI *et al*, 2019).

A forma correta de tratar os resíduos sólidos industriais constitui-se em uma significativa opção para preservação do meio ambiente e proteção à saúde humana. Ao serem dispostos em aterros, eles podem afetar a qualidade do solo, da água e do ar, visto que contemplam compostos orgânicos voláteis, pesticidas, solventes e metais pesados, dentre outros (SOLANI *et al*, 2019).

O valor calorífico médio do lodo bruto de indústria de laticínios é cerca de 17 MJ kg⁻¹ e para os lodos estabilizados (digestão anaeróbia e aeróbia) é em torno de 12 MJ kg⁻¹ (WERLE e WILK, 2010), valores semelhantes ao encontrado para a madeira (combustível bastante utilizado para geração de energia) que apresenta poder calorífico de 18 MJ kg⁻¹, aproximadamente (ATIENZA-MARTÍNEZ *et al.*, 2013).

Adicionalmente é possível destacar que Karlsson, Åmand e Liske (2015) verificaram que os efeitos corrosivos em caldeiras de combustão podem decrescer quando da combustão de lodo de esgoto sanitário com um resíduo composto por pellets de cascas e combustível sólido recuperado.

Sendo assim, infere-se que as propriedades químicas mais importantes para a avaliação da viabilidade do lodo em seu uso como biomassa incluem análises elementares e do poder calorífico. Com base na composição dos lodos de esgoto, a combustão pode ser vista como uma fonte potencial de vários poluentes como SO_x, NO_x e compostos clorados (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

2.2.3 Composição do lodo

Lodo secundário, lodo biológico, lodo biossólido, lodo ativado é gerado a partir do tratamento biológico das águas residuais, ele contém uma mistura de

microrganismos vivos, principalmente bactérias, que decompõe o material orgânico e contaminantes que permanecem após o tratamento primário (VON SPERLING, 2014).

Nos sistemas de tratamento de esgoto, o lodo produzido concentra os nutrientes, a matéria orgânica, os metais pesados, os organismos patogênicos e outros elementos que podem oferecer risco à saúde e ao meio ambiente, caso não sejam controlados e monitorados adequadamente (BATISTA, 2015).

Muitos metais são, em determinadas quantidades, essenciais aos organismos, como é o caso do Zn, Mg, Cu e Fe, chamados micronutrientes, enquanto outros não desempenham qualquer função no metabolismo, sendo tóxicos às plantas e aos animais. O Pb, Hg e Cd são metais pesados que não existem naturalmente em nenhum organismo, nem desempenham funções nutricionais ou bioquímicas, sendo prejudiciais em qualquer concentração (BATISTA, 2015).

Algumas alternativas de destino requerem lodo com uma faixa bem definida de sólidos. Na secagem térmica ou incineração, o lodo deve apresentar no mínimo 35% de sólidos, todavia, a eficiência deste processo aumenta quanto maior for a concentração de matéria seca. Em se tratando da compostagem, geralmente o teor ideal de sólidos se encontra na faixa de 15 a 20% e vai depender do resíduo estruturante utilizado (Fernandes *et al.*, 2001).

O NO-combustível é formado a partir da oxidação do nitrogênio do combustível (durante uma série de etapas de reações elementares), sendo o mecanismo mais importante em sistemas de combustão de biomassa. A emissão de NO_x aumenta com o aumento do excesso de ar e da concentração de N na biomassa (VIRMOND *et al.*, 2006).

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás produzido a partir da queima carvão, principalmente em usinas térmicas. Este gás é um dos principais contribuintes para poluição e formação de chuva ácida. Além disso, o SO₂ pode conduzir a doenças pulmonares. Segundo dados da Air Quality Standards (AQS), o valor médio de SO₂ no aré de 60 – 80 mg·m⁻³ (DEMIRBAS, 2005 *apud* BATISTELLA, 2015).

A maior parte dos combustíveis que apresentam enxofre em sua composição, se converte a SO₂. A formação de SO₃ pode ocorrer em duas regiões principais de um equipamento de combustão: no interior da chama e nas superfícies onde existem depósitos provenientes de impurezas do combustível, como as cinzas, os quais atuam como catalisadores da reação de oxidação de SO₂ e SO₃ (PASQUINI, 2014).

Durante a combustão, o enxofre presente no combustível forma SO_2 , SO_3 e sulfatos alcalinos. Nos queimadores, onde o gás de combustão é resfriado rapidamente, os sulfatos condensam nas cinzas leves ou nas superfícies das tubulações. Além disso, o SO_2 pode ser ligado às cinzas por reações de sulfatação. Testes e avaliações dos balanços de massa mostram que 40 a 90 % de todo o enxofre se liga às cinzas, o resto é emitido como SO_2 e em menor extensão como SO_3 (OBERNBERGER, BRUNNER e BARNTHALER, 2006). Lodos de esgotos são característicos por apresentar concentrações altas de S, e sua origem é atribuída aos compostos resultantes da decomposição das proteínas presentes nas fezes humanas, à presença de surfactantes e fertilizantes,, o ambiente altamente redutor do tratamento anaeróbio na ETE, favorece a formação de enxofre elementar (SÍGOLO e PINHEIRO, 2010 *apud* BATISTELLA, 2015).

Os conteúdos de C e H contribuem positivamente para o poder calorífico, e o conteúdo de O negativamente. O conteúdo de H também influencia o poder calorífico devido à formação de água. O C e o H são oxidados durante a combustão por reações exotérmicas (formação de CO_2 e H_2O) (PASQUINI, 2014).

As concentrações de metais pesados (exemplo Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, Cu e Zn) no lodo de esgoto dependem das atividades industriais em torno das fontes geradoras de esgoto. Portanto, o método viável de redução de metais pesados no lodo é a eliminação das fontes de contaminação (BATISTELLA, 2015).

Os metais pesados existem em lodos de esgoto sob a forma de hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos. Em sistemas de combustão, maioria dos metais é emitida na forma associada à fração leve de cinzas. As partículas de tamanho sub-micron são responsáveis por riscos de câncer (CHEN e YAN, 2012 *apud* BATISTELLA).

A redução dos níveis de metais emitidos com os gases de exaustão resulta em aumento de seu nível nas cinzas. Nas cinzas, o metal pode reagir com matéria mineral como silicatos para formar compostos estáveis, reduzindo as emissões de metais e tornando o processo de combustão ambientalmente correta (VIRMOND, 2006),

O nitrogênio em lodo de esgoto é proveniente das atividades humanas (fezes, urina, restos de alimentos e detergentes) e da biomassa microbiana, encontrado nas formas orgânica e inorgânica. A fração orgânica (proteínas, aminoácidos, amino açúcares e amidos) constitui a maior porção do N do lodo, variando de 70 a 90 %,

dependendo do tipo de biossólido (SPERLING, 2007; MANARA e ZABANIOTOU, 2012 *apud* BATISTELLA, 2015).

2.2.4 SECAGEM DO LODO

A secagem do lodo pode ser distribuída como no fluxograma da Figura 4. Sendo explicado cada passo a seguir.

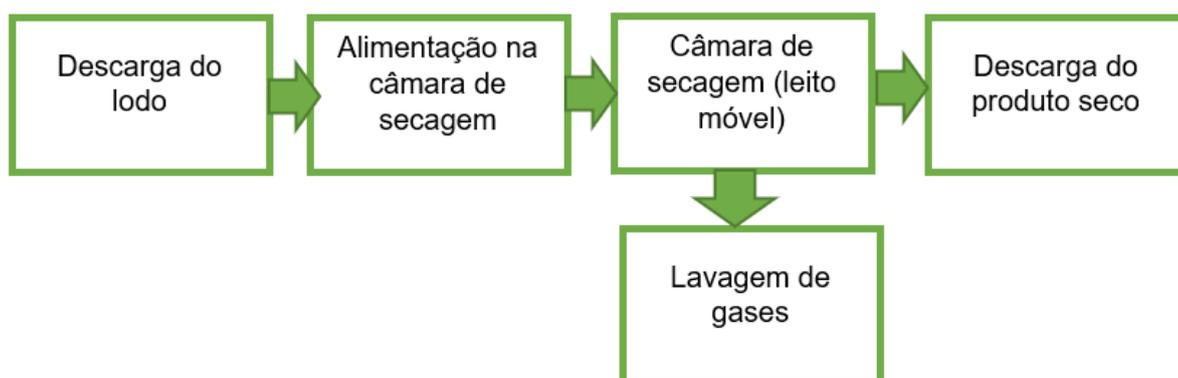


Figura 4: Fluxograma do equipamento de secagem do lodo.

Fonte: Adaptado de Albrecht. 2015

Para as empresas que adotam o processo de secagem do lodo, os sistemas propostos são como o que é apresentado na Figura 5. Esse sistema consiste em um equipamento denominado tambor de secagem.



Figura 5: Tambor de secagem
Fonte: Albrecht, 2015

Neste sistema, o resíduo desaguado é descarregado sobre uma moega de alimentação confeccionada em aço inox instalados sobre o secador. O sistema de

desaguamento será ajustado para capacidade máxima do secador, tornando o funcionamento contínuo e sem a necessidade de operador (ALBRECHT, 2015).

Em cotações atuais este equipamento custa aproximadamente 1,7 milhões de reais e possui uma capacidade secar 85 kg de lodo por hora a uma temperatura de 70 °C. Este secador possui uma vida útil de aproximadamente 10 anos. Suas demais características técnicas são apresentadas na Quadro 1 (ALBRECHT, 2015).

Características do equipamento	Carga do material (Kg/h com 80% de umidade)	340
	Massa da água evaporada (Kg/h)	255
	Massa do lodo seco (Kg/h)	85
	Umidade Inicial (%)	80
	Umidade final (%)	20
	Temperatura de saída dos gases (°C)	70
Consumo	Potência Elétrica Instalada (Kw)	5,9
	Vapor (kg vapor/h a 6Kgf/cm ²)	357
	Água de reuso (t/h)	300

Quadro 1: Características Técnicas do secador de lodo
Fonte: Adaptado de Albrecht, 2015.

2.2.4.1 Câmara de Secagem

A câmara de secagem é composta de um corpo construído em chapa de aço inox, cujo berço é dotado de calefação a vapor. O substrato é distribuído uniformemente dentro da câmara de secagem, formando um leito móvel transportado mecanicamente por meio de um helicóide confeccionado em aço carbono também dotado de calefação a vapor. O conceito de operação do Bruthus F alia o fornecimento de energia suficiente ao material para atendimento do nível de umidade final desejada, com o mínimo de ar de arraste (ALBRECHT, 2015).

O corpo do secador é isolado termicamente com lã de rocha revestida com chapa de aço inox 304. Este isolamento tem por finalidade garantir a proteção pessoal e a otimização energética. Demais itens, tais como base, suportes, dutos de vapor,

são fabricados em aço carbono, pintados com tinta epóxi ou tinta resistente a alta temperatura dependendo da aplicação (ALBRECHT, 2015).

2.2.4.2 Descarga

O material seco é descarregado da câmara de secagem por um transportador helicoidal diretamente na caçamba de descarte. A calha do transportador helicoidal é confeccionada em aço inox 304 é helicoidal e é confeccionado em aço carbono (ALBRECHT, 2015).

2.2.4.3 Filtragem dos Gases Residuais

Os gases contaminados com material particulado (finos) são direcionados ao filtro tipo torre de enchimento confeccionada em aço inox AISI 304, com retorno do condensado para estação de tratamento e os gases remanescentes são liberados para atmosfera. O exaustor centrífugo (Figura 6) confeccionado em aço inox é responsável pela exaustão do vapor de água liberada do resíduo e será montado na parte superior da torre de filtragem (ALBRECHT, 2015).



Figura 6: Exaustor centrífugo.
Fonte: Albrecht, 2015.

2.3 COMBUSTÃO

A incineração consiste num processo de oxidação seca a alta temperatura para transformar os resíduos orgânicos em matéria inorgânica (cinza) que por ser inerte

pode ser usada na construção civil. Pode ser utilizada para a geração de energia, vapor e ar refrigerado (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2017 *apud* SOLANI, 2019).

Em sistemas com incineradores, são importantes ao processo o controle odorífero e o conhecimento da composição e poder calorífico do lodo. O processo exige também sistemas de alimentação com temperatura adequada de combustão, tempo de residência para queima e instalações auxiliares específicas para controle ou recuperação de gases, líquidos e particulados segundo os padrões estabelecidos pela legislação ambiental. É necessária uma rotina de disposição final das cinzas em aterros sanitários. Alguns impactos ambientais negativos potencialmente causados pela incineração são: impacto visual decorrente da construção do incinerador e da fumaça produzida; contaminação de rios e aquíferos por vazamento de efluentes; poluição sonora decorrente do funcionamento do incinerador e poluição do ar por lançamento de diversos poluentes como CO, SO₂, compostos orgânicos complexos e particulados (ANDREOLI, 1999 *apud* BATISTA, 2015). É uma alternativa que exige vultoso investimento inicial e apresenta custo elevado de operação, requerem cuidados operacionais sofisticados.

Dentre as vantagens da incineração do lodo, estão: eficiência na redução dos volumes dos resíduos, diminuição do trajeto de veículos transportadores de resíduos pela implantação da planta de incineração em locais estratégicos (o que dificilmente pode ser feito com um aterro sanitário, devido às restrições de área), as cinzas geradas pelo processo de combustão podem ser reutilizadas, diminuindo a área necessária no aterro e possibilidade de geração de energia pela combustão dos resíduos (SANTOS, 2015).

Combustão é uma reação química de oxidação de materiais combustíveis. Os reagentes, como o oxigênio do ar e um hidrocarboneto, colidem entre si causando a sua “destruição”. Os elementos químicos resultantes dessa destruição se recombinam formando novas espécies químicas denominadas de produtos. Essa reação é seguida de recombinação, liberando calor e eventualmente emitindo luz. Resumindo, a combustão é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor e formando como produto um grupo de espécies diferente dos reagentes (RENDEIRO *et al*, 2008).

Ainda para Rendeiro *et al* (2008), compreender o fenômeno da combustão é entender os seguintes conceitos:

- Reagente: uma mistura de combustível e oxigênio capaz de reagir entre si com liberação ou absorção de calor (inicia a reação de combustão).

- Combustível: são as substâncias capazes de reagir com os oxidantes. Neste texto serão sempre hidrocarbonetos, ou seja, uma cadeia de carbonos e hidrogênios (no estudo, o combustível é o lodo seco ou a madeira).

- Oxidante: são as substâncias que fornecem oxigênio para o combustível (neste caso será sempre o oxigênio do ar).

- Produto: são substâncias residuais da reação dos reagentes. Neste texto serão compostos de CO_2 e H_2O , podendo também ter teores de CO , NO , hidrocarbonetos, particulados e outros, dependendo das condições da reação química e do combustível.

- Inerte: são substâncias químicas adicionadas aos reagentes que não reagem com o combustível ou oxidante e compõem os produtos. Neste texto N_2 é um típico inerte.

- Calor de Reação: é o calor liberado durante a combustão (reação química exotérmica).

Segundo Barreto *et al* (2008), as etapas de combustão em uma caldeira são:

- Aquecimento e secagem: é o processo de retirada da umidade contida no combustível sólido através da adição de calor, que provoca a evaporação da água.

- Pirólise: após a secagem do combustível sólido, se a sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido. Essa fase também é denominada de volatilização. Os gases liberados nessa fase, quando misturados com o oxigênio do ar em proporções adequadas, torna-se uma mistura inflamável.

- Combustão: nessa fase, os gases formados no processo de pirólise reagem com o oxigênio numa reação exotérmica tendo como produtos $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$ (produtos hipotéticos para uma reação ideal estequiométrica). O fogo normalmente é visível nesta fase.

- Pós-Combustão: ao final da pirólise, a biomassa tornou-se uma massa sólida composta de carvão e cinza. As partículas de menores dimensões são arrastadas pelos gases e saem na chaminé com a denominação de particulados. Uma fração do carbono e cinzas consegue gaseificar e entra no escoamento na forma de CO , CH_4 e

H₂ e outros gases. O restante do carvão e das cinzas é removido da câmara de combustão na forma de resíduos.

2.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE UM LODO PARA COMBUSTÃO

Neste item será desenvolvido o referencial teórico dos aspectos estudados sobre a queima do lodo.

2.4.1 Poder Calorífico

O ponto de partida para o dimensionamento de um sistema de potência por combustão é a quantificação da energia que existe no combustível. Deseja-se converter essa energia em calor. A maneira de quantificar essa energia é quantificando o calor de reação. Calor de reação é definido como a quantidade de calor liberado durante a reação estequiométrica de combustão até que o produto alcance a mesma temperatura do reagente. (BRASÍLIA, 2008).

Poder calorífico: é a característica química que indica a capacidade potencial de um determinado material desprender uma certa quantidade de calor quando este é submetido à queima (ALVEZ E LUZ, 2017). Na Tabela 2 observa-se valores de poder calorífico de lodos de origens distintas.

Lodo	Poder Calorífico (MJ/kg)
Esgoto	19,61 ± 0,4
Têxtil	18,49 ± 0,4
Frigorífico	17,06 ± 0,6
Galvanoplastia	25,67 ± 0,6

Tabela 2: Comparação de poder calorífico de lodos de diferentes origens.

Fonte: Adaptado de PASQUINI, 2014.

De acordo com Borges, Sellin e Medeiros (2008), a energia liberada em um processo de combustão normalmente é determinada pelo poder calorífico, definido como a quantidade de calor desprendido pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível.

2.4.2 Teor de Cinzas

Outra análise importante quanto ao potencial energético da biomassa é a determinação do teor de cinzas, que são constituídas por todo o material que não queima, assim gerando resíduos do processo de combustão. Portanto, teores de cinzas altos colaboram para a redução da eficiência do processo, já que não participam da combustão e são contabilizadas na massa do combustível submetido ao processo de queima.

Segundo Brasília (2008) o teor de cinzas pode ser calculado pela equação a seguir:

$$T_{cinzas} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

T_{cinzas} é o teor de cinzas;

m_1 é a massa inicial da amostra;

m_2 é a massa final da amostra.

O valor do poder calorífico diminui com o aumento da porcentagem de cinza, uma vez que favorece a liberação total pela combustão e catalisador pode estar presente favorecendo a decomposição térmica. As cinzas têm o uso benéfico no setor de construção para fabricação de tijolos e cimentos, o que torna este resíduo uma matéria renovável para produtos comerciais (PASQUINI, 2014).

2.4.3 Teor de Carbono e de Voláteis

O carbono fixo é responsável pela manutenção e estabilidade da queima do lodo (BATISTELLA, 2015).

O teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 900°C num forno mufla por 7 minutos. Após a extração dos voláteis, fica como resíduo o carbono fixo e

as cinzas. O teor de voláteis é então determinado pela expressão a seguir. Necessariamente, o teor de voláteis é expresso em base seca (BARRETO, 2008).

$$T_V = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

T_V é o teor de voláteis;

m_3 é a massa inicial;

m_4 é a massa final.

O alto conteúdo de massa de voláteis do lodo aeróbio indica a sua facilidade de ignição, a velocidade de queima dos sólidos e o maior comprimento de chama (BATISTELLA, 2015).

2.4.4 Secagem

Define-se como a umidade de um sólido na base úmida (W_w) como o quociente entre massas de água nele contidas (M_a) e a massa de sólido úmido ($M_a + M_d$) (Deivid, 2002).

$$W_w = \left(\frac{M_a}{M_a + M_d} \right) \times 100 \quad (3)$$

Barreto (2008) explica que a velocidade de secagem depende da temperatura, da umidade relativa e do fluxo de ar, do tempo de exposição a estas condições, do teor de água inicial e final e das características do material a secar. A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos:

Período 1: o tempo para a secagem entrar em regime permanente. No começo, a biomassa é geralmente mais fria do que ar, a pressão parcial de vapor de água na sua superfície é pequena e, por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também são pequenas. O calor chegando à alta taxa acarreta na elevação da temperatura da biomassa, vaporizando a água que migra para a superfície, provocando o aumento de pressão parcial do vapor de água e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a energia que entra na

biomassa por transferência de calor seja igualada à energia que sai da biomassa pela perda de massa (vapor de água). A duração deste período é muito pequena quando comparada ao período total de secagem.

Período 2: consiste no período de velocidade de secagem constante. Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro da biomassa é grande. A água evapora e sai do interior da biomassa pelos seus poros. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura da biomassa. A temperatura da biomassa, por sua vez, é também constante. Este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície da biomassa seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação na superfície.

Período 3: consiste no período de velocidade de secagem decrescente. Inicia quando o fluxo para a superfície é inferior à taxa de evaporação da água da superfície. A velocidade de secagem diminui.

A secagem térmica promove a redução da umidade através da evaporação da água e a destruição dos organismos patogênicos. Apenas a água é removida, os sólidos totais são mantidos praticamente inalterados (DAVID,2002).

O processo de secagem remove a água contida na biomassa promovendo a sua evaporação por transferência de calor, diminuindo o teor de umidade contido na biomassa. Ar é utilizado para transferir o calor da fonte quente para a biomassa úmida. O calor é transferido do ar para a biomassa por diferença de temperatura. O calor transferido para a biomassa é utilizado para vaporizar a água e a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície da biomassa determina uma transferência de água para o ar. Além disso, com os resultados que são obtidos com este ensaio, é possível determinar a velocidade de secagem (V_{secagem}), que pode ser definida como a redução de pontos percentuais do teor de umidade (ω) por unidade de tempo (BRASÍLIA, 2008).

2.4.5 pH e Acidez volátil

A acidez de pode ser definida como sua capacidade de reagir quantitativamente com uma base forte até um valor definido de pH, devido à presença de ácidos fortes (ácidos minerais: clorídrico, sulfúrico, nítrico, por exemplo), ácidos fracos e sais que apresentam caráter ácido (ALVEZ E LUZ, 2017).

O potencial hidrogeniônico (pH) por sua vez indica o teor de alcalinidade ou acidez dos resíduos, em uma escala que varia geralmente entre 0 e 14 (ALVEZ E LUZ, 2017). Neste estudo, as avaliações de pH foram realizadas no lodo bruto e na umidade volátil do mesmo, com o emprego de fitas de pH.

A acidez volátil, por sua vez, baseia-se na separação dos ácidos voláteis efetuada através de arraste do vapor da água e retificação dos vapores. Na titulação do destilado com solução de hidróxido de sódio, o indicador empregado é fenolftaleína (BRASIL, 1986).

2.4.6 Teste de chama

No processo de combustão, as chamas são formadas por uma reação de auto propagação exotérmica, que usualmente apresenta uma zona de reação luminosa associada a ela. Os tipos de chama existentes são dependentes das limitações físicas do material combustível com o oxidante. A chama amarela é característica da combustão incompleta, devido à presença de átomos de carbono incandescente. Na combustão em altas temperaturas e baixas concentrações de oxigênio forma-se a fuligem (CROMPTON, 1989 *apud* BATISTELLA, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir deste capítulo serão descritos reagentes, materiais, equipamentos e métodos empregados para a avaliação da viabilidade do lodo para sua posterior combustão.

A Figura 7 apresenta a sequência de etapas da parte experimental desenvolvida neste trabalho

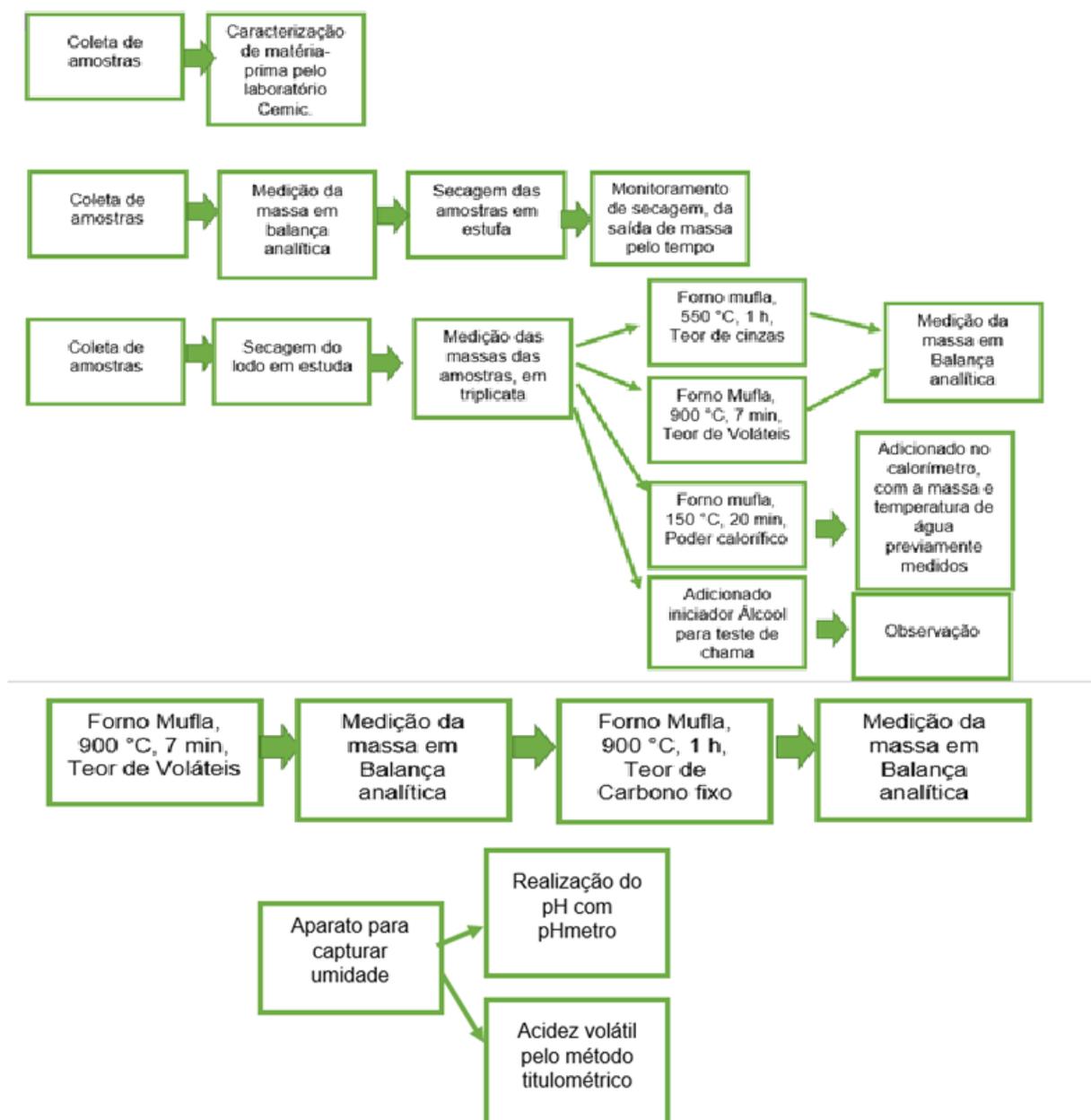


Figura 7: Fluxograma representativo das etapas da parte experimental.

Fonte: Autora.

3.1 MATERIAIS

Para a avaliação dos teores de cinzas, carbono e voláteis foi utilizada um forno tipo mufla modelo 24010 (Jung, Brasil) com possibilidade de temperatura máxima de 1200 °C. Para os ensaios de secagem foi utilizada uma estufa modelo SI5OBA (Biopar, Brasil).

As pesagens de amostras e reagentes foram realizadas em uma balança analítica modelo AY220 (Shimadzu, Japão). Para as medidas calorimétricas, foi utilizado um calorímetro de 200 mL (Cidepe, Brasil) equipado com termômetro comum de mercúrio.

Para o controle de pH foi utilizado indicador universal de pH tipo fita (Eststabchen; Alemanha) e para as avaliações de temperatura foi empregado um termômetro infravermelho modelo TD-965 (Icel, Brasil).

O acondicionamento de amostras e soluções de referência foi feito utilizando-se vidrarias comuns de laboratório, todas em borossilicato. Para a transferência de soluções foi utilizada uma micropipeta volumétrica (Peguepet, Brasil) equipada com ponteiros em polipropileno com capacidade de volume de (100 a 1000 µL). Todos os materiais utilizados foram devidamente lavados, descontaminados com solução de ácido nítrico 5% e secos antes de serem utilizados.

3.2 AMOSTRAS

A coleta das amostras lodo da indústria de laticínios foi realizada com base no que instrui a Norma Técnica para amostragem de resíduos sólidos ABNT NBR 10007/2004. Ao todo foram coletadas 3 amostras com massas aproximadas de 600 g.

As amostras foram armazenadas em um refrigerador (ELETROLUX, SUÉCIA) com temperatura controlada abaixo de 4 °C durante 3 dias para a posterior realização de acidez e alcalinidade das mesmas.

A coleta das amostras foi realizada em triplicata com auxílio de um dos funcionários da ETE da indústria, sendo armazenadas em recipientes de polipropileno previamente limpos e descontaminados (Figura 8). As amostras são de lodo proveniente do efluente que já foi submetido a um pré-tratamento, que envolveu lagoa anaeróbia, processo de flotação e por último separado mecanicamente por densidade.



Figura 8: Aspecto inicial do lodo.
Fonte: O autor

3.3 AVALIAÇÕES DO LODO

Neste tópico serão descritos os procedimentos empregados para a avaliação da viabilidade do uso das amostras de lodo como combustível para a geração de energia em caldeiras da indústria de laticínios.

3.3.1 Secagem

Para a avaliação das melhores condições de secagem das amostras de lodo, utilizando-se como referência o estudo de Lazzari (2015), foram as temperaturas de 90 °C, 100 °C e 105 °C em estufa. Inicialmente as replicatas continham massas de amostras relativamente elevadas (aproximadamente 100 g) acondicionadas em béqueres de vidro em triplicatas, mas para maior celeridade nas avaliações, a massa das triplicatas foi reduzida para aproximadamente 5 g, acondicionadas em placas de Petry.

A avaliação do teor de umidade (ω_{bu}) foi realizada pelo método gravimétrico adaptado de Lazzari (2015), onde aproximadamente 5,0000 g de amostra de biomassa (lodo) em triplicata foram colocados em estufa previamente aquecida a 105°C e permaneceu até que a massa da amostra permanecesse constante. O teor de umidade da biomassa é calculado com base na Equação 3. (BRASÍLIA, 2008).

As massas das replicatas eram medidas em balança analítica (Figura 9) a cada uma hora, sendo finalizadas as avaliações quando da estabilização das massas das amostras.



Figura 9: Medição da massa do lodo na balança.
Fonte: O autor.

Podemos definir a velocidade de secagem com a Equação 4 a seguir (BRASÍLIA, 2008):

$$V_{secagem} = \frac{\omega_{inicial} - \omega_{final}}{t} \quad (4)$$

Onde:

$\omega_{inicial}$ é o teor de umidade inicial;

ω_{final} é o teor de umidade final;

t é o tempo de secagem.

Para garantir a total retirada de umidade da amostra para prosseguimento do ensaio de poder calorífico foi realizada secagem complementar. As amostras foram colocadas em estufa a 105 °C até massa constante por um período de 12 a 24 horas antes das análises, para eliminar qualquer umidade reincorporado no período de armazenamento.

Para caracterizar o lodo pode-se usar a relação entre o teor de sólidos e de umidade, e a concentração de sólidos secos. De acordo com von Sperling (2014) a umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo (no manuseio e na disposição final). Os sólidos secos são equivalentes a Sólidos Totais (ST), no caso dos lodos, os quais são referentes às amostras que passaram pela estufa a 105° C. A concentração de sólidos secos exclui o peso da água presente no lodo.

3.3.2 Avaliações de pH e acidez volátil

Para determinação da acidez volátil foi elaborado um aparato (Figura 10a) para a vaporização de replicatas contendo aproximadamente 100,0000 g de lodo bruto dentro de béquer de 250 mL. A umidade vaporizada até a secura, mediante aquecimento com bico de Bunsen, foi condensada para outro béquer (Figura 10b). Esta solução obtida a partir do lodo foi então titulada com solução previamente padronizada de hidróxido de sódio 0,1 mol.L⁻¹.

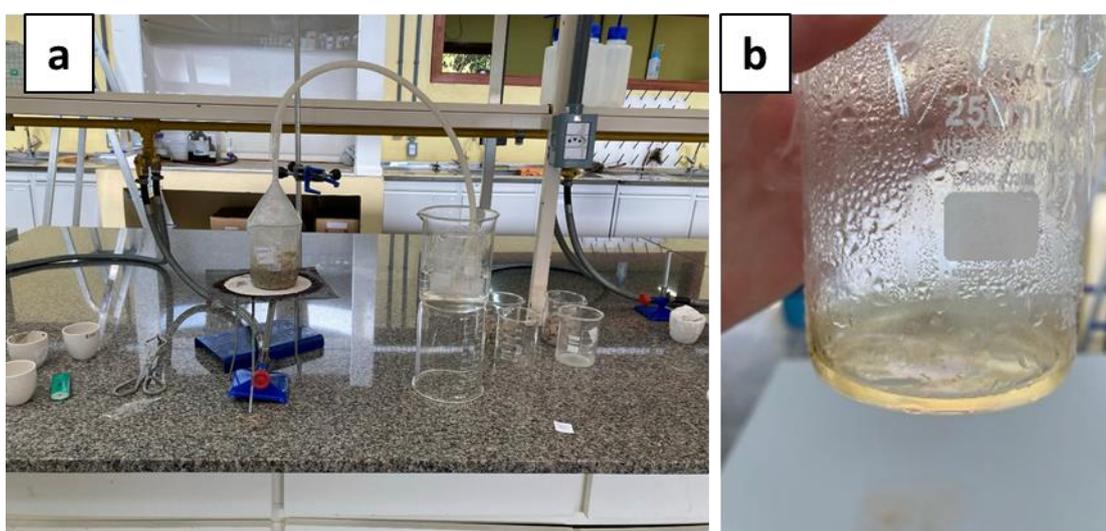


Figura 10: Em a) Sistema montado para captação da água livre do lodo para realização da acidez volátil e em b) Recipiente da coleta da umidade do lodo.

Fonte: Autora.

3.3.3 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado através de gravimetria por volatilização, assumindo que a perda de massa nas condições avaliadas se deve à água presente no lodo estudado.

Para determinar a umidade das amostras foi usado o método da gravimetria, realizado segundo a NBR 10664 de 1989 para amostras de resíduos sólidos provenientes de estações de tratamento. Esse método consiste na medida da massa antes e depois de seco.

O teor de umidade foi medido juntamente com a taxa de secagem do lodo, medindo-se a massa aproximada de 5,0000g em triplicata em placas de petry e

realizada a secagem em uma estufa em 105°C. Anotando-se a massa posterior a secagem e diminuindo o valor da massa da placa de Petry, adaptado de Deivid (2002).

3.3.4 Poder calorífico

O método foi adaptado de Brasília (2008), o poder calorífico é determinado em base seca e é uma propriedade da biomassa. O ensaio consistiu em pesar 10 g do lodo seco triturado e queimar na presença de oxigênio num ambiente fechado e mergulhado numa massa de água que possui sua temperatura monitorada (calorímetro). A quantidade de calor liberada pela combustão da amostra é absorvida pela água, a qual tem sua temperatura elevada. Quando a temperatura da água estabiliza, a quantidade de calor absorvida é calculada. Assumindo que a quantidade de calor absorvido pela água é igual ao calor de reação, e dividindo esse valor pela massa da amostra, obtém-se o poder calorífico do combustível.

A quantidade de calor desprendida não pode ser medida diretamente, contudo este calor provoca um aquecimento em um certo sistema conhecido (recipiente calorimétrico) e fornece uma diferença de temperatura na água nele contida. Dessa forma, na bomba calorimétrica, o lodo seco (combustível) queimado, então obtém-se essa variação de temperatura.

3.3.5 Teor de cinzas

Tal como Lazzari (2018), pesou-se com exatidão, em cápsula de porcelana aproximadamente 5,0000 g de amostra. Anotou-se o peso do cadinho vazio e o peso da amostra. Após o registro das massas, levou-se a cápsula com a amostra ao forno mufla em temperatura 550 °C durante 1 hora.

Após o tratamento térmico, tirou-se as cápsulas de porcelana do forno mufla, deixou-se esfriar e mediu-se a massa.

3.3.6 Teor de voláteis e Teor de carbono fixo

Para a medição do teor de voláteis, pesou-se com exatidão a massa de aproximadamente 5,0000 g de lodo e a massa de três cápsulas de porcelana previamente identificadas. As amostras foram submetidas a aquecimento a uma temperatura de 900 °C, durante 7 minutos, o método adaptado de Tchobanoglous (2016). Após o tratamento térmico, deixou-se esfriar e mediu-se a massa total final,

deste valor, descontando o valor da cápsula de porcelana e a massa anterior ao tratamento térmico.

Para o teor de carbono total, em triplicata, pesou-se com exatidão a massa de aproximadamente 5,0000 g de lodo bruto, transferido as amostras para capsulas de porcelana devidamente secas e com massas aferidas. O referido teor foi obtido após submeter as amostras a um aquecimento em forno tipo mufla a 900°C durante uma hora, tal como Tchobanoglous (2016).

3.3.7 Teste de chama

Para a análise do teste de chama do lodo depois de seco, foi realizada um teste simples, para determinar a real capacidade de queima do lodo. Colocou-se o lodo após seco (dos testes de gravimetria) em uma placa de Petry e usou-se como iniciador da combustão álcool etílico 92°GL, desta forma a combustão foi iniciada com o auxílio de um isqueiro, foi observado o tamanho da chama, o tempo de chama e se a combustão permaneceria no lodo após o término da combustão do álcool.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios propostos para a avaliação da viabilidade do uso do lodo como alternativa para combustão em caldeiras de uma indústria.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LODO

Segundo testes realizados em abril deste ano (2021), o lodo da estação de tratamento é resíduo de classe II – não-inertes: Esses resíduos são aqueles que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos, ou Classe III – Inertes (ALVEZ e LUZ, 2017).

Composição química: determina os teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, cálcio, fósforo, potássio, resíduo mineral solúvel, resíduo mineral total, gorduras entre outras substâncias químicas (ALVEZ E LUZ, 2017).,

Para a realização deste estudo, partiu-se do conhecimento prévio da composição química do resíduo de lodo gerado na indústria, foram realizadas análises da composição química e microbiológica semestralmente seguindo a legislação brasileira. O Quadro 2 mostra o resultado da composição de metais pesados da última avaliação, feita em abril deste ano, No Quadro 3 são apresentados mais alguns parâmetros físico-químicos realizados no mesmo período.

Parâmetros	Unidade	Resultado	Incerteza	LQ
Arsênio	mg As/Kg	0,8	0,001	0,4
Bário	mg Ba/Kg	13,5	0,177	0,2
Cádmio	mg Cd/Kg	<0,1	0,00004	0,1
Cálcio	mg Ca/Kg	7934	96,001	2
Chumbo	mg Pb/Kg	9,75	0,07	0,4
Cobre	mg Cu/Kg	18,4	1,784	0,6
Fósforo	mg P/Kg	15165	306,339	0,7
Magnésio	mg Mg/Kg	836	69,491	2
Manganês	mg Mn/Kg	18,8	0,446	0,2
Merúrio	mg Hg/Kg	<0,02	0,000006	0,02
Molibdênio	mg Mo/Kg	0,7	0,01	0,2
Níquel	mg Ni/Kg	4,89	0,223	0,2
Potássio	mg K/Kg	7450	237,656	2
Selênio	mg Se/Kg	<0,8	0,008	0,8
Sódio	mg Na/Kg	1607	177,1	12
Zinco	mg Zn/Kg	58	1,0796	0,6

Quadro 2: Análises realizadas com o lodo da empresa avaliada
Fonte: Cemic (2021).

Parâmetros	Unidade	Resultado	LQ	Referência do método analítico	Data da realização do teste
Boro	mg B/Kg	1,67	0,39	EPA MÉTODO 200.7/2001, revisão 5.0 - Janeiro/2001 e EPA 3050 B, revisão 2 - Dezembro/1996	23/04/2021
Carbono Orgânico Total	%	39,3	0,02	Gravimétrico	19/04/2021
Coliformes Termotolerantes	NMP/g de MS	>1600	-	EPA 625/R - 92/013	19/04/2021
Cromo Hexavalente (Cr VI)	mg Cr VI/Kg	<0,031	0,031	EPA 3060A/1996	27/04/2021
Cromo Trivalente (Cr III)	mg Cr III/Kg	16,7	0,001	SMWW, 22ª Edição, Método 3500 Cr B	27/04/2021
Densidade	g/mL	0,963	0,001	Gravimétrico	13/04/2021
Enxofre	mg S/ Kg	3621	11,1	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001	23/04/2021
Nitrogênio Total	mg/Kg	44865	5	SMWW, 22ª Edição, Método 4500 Digestão: N org B/ Destilação: NH3 B/ Titulação: NH3 C	28/04/2021
Ovos Viáveis de Helmintos	ovo/g ST	<1,0	0,25	USEPA - EPA 625/R - 92/013.2003	19/04/2021
pH Solução 1:1	-	5	0,02	SMWW, 23ª Edição, Método: 4500H+ B/ ABNT NBR 10.004, 2004	03/05/2021
Poder de Neutralização	%CaCO3	4,69	0	Titulométrico	19/04/2021
Umidade	%	84,3	0,0001	Gravimétrico	15/04/2021

Quadro 3: Análises realizadas com o lodo da empresa avaliada
Fonte: Cemic (2021).

Onde:

e_{pm} - %

LQ - Limite de Quantificação.

4.2 SECAGEM

A seguir, na Figura 11, são apresentados os resultados obtidos para os testes de secagem realizados nas três diferentes temperaturas, 90, 100 e 105 °C.

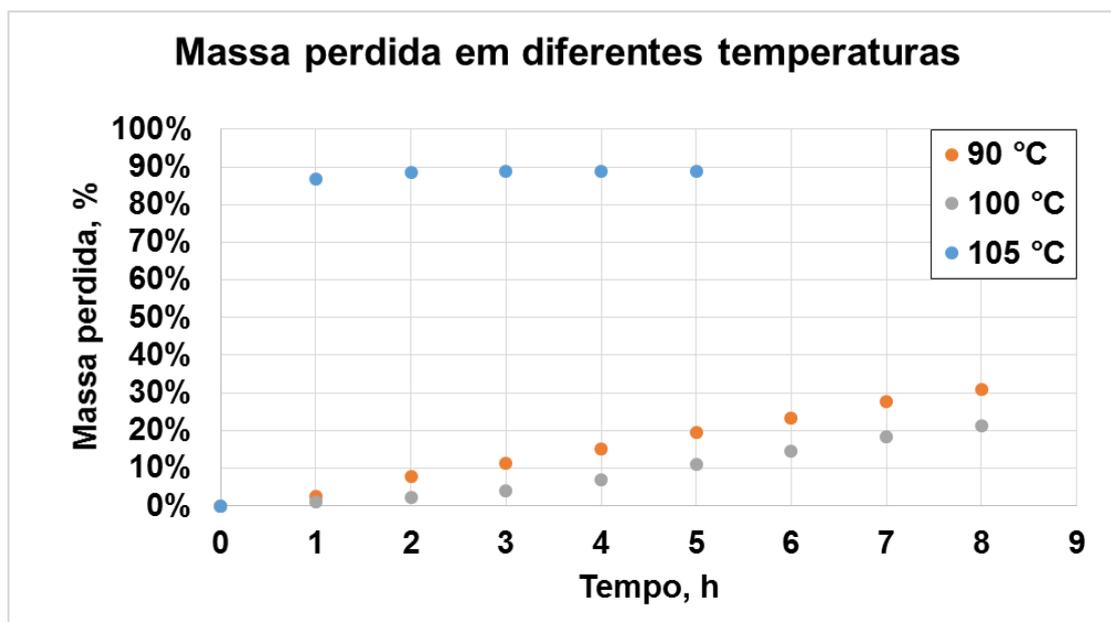


Figura 11: Comparação de perda de massa durante secagem em estufa nas temperaturas de (--) 90 °C, (--) 100 °C e (--) 105 °C

Fonte: Autora

Com base nos resultados apresentados na Figura 7, é possível observar que a perda de umidade foi significativamente maior quando do emprego de uma temperatura de 105 °C para a secagem do lodo. Conforme pode ser visualizado, a partir de 1 h de secagem do lodo bruto nesta temperatura praticamente não ocorre mais variação de massa do lodo seco, indicando que a partir de 2 horas já é seguro considerar que a umidade do lodo já foi removida. Resultado similar foi obtido por David (2002), na secagem de lodo em escala industrial de lodo de esgoto da cidade de Barueri, onde o teor de umidade do lodo concentrado na ETE foi de aproximadamente 85% a 90%, conseqüentemente o teor de sólidos da amostra é de 10% a 15%, o teor de sólidos aumentou com a mesma curva de secagem do lodo estudado.

Na Figura 12, são apresentados os aspectos do lodo após 8 h em estufa sob aquecimento nas três condições de temperatura avaliadas.

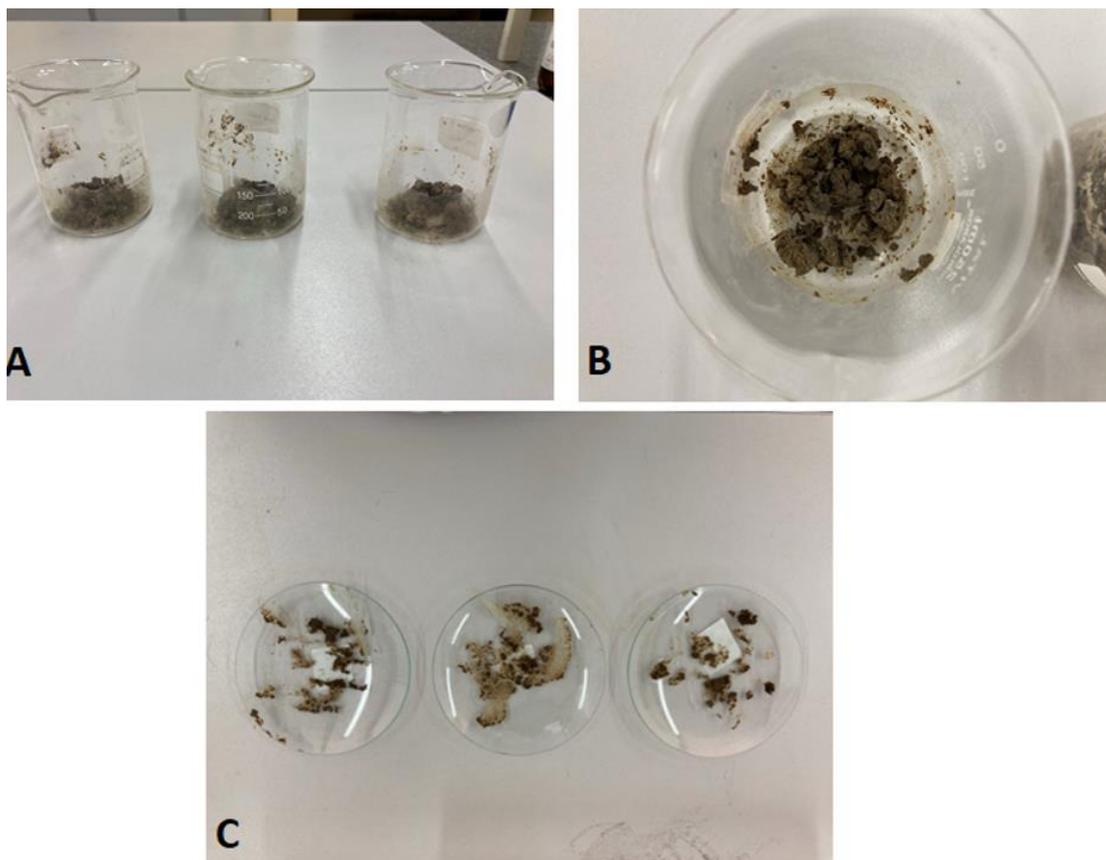


Figura 12: Aspecto físico do lodo após secagem em estufa em diferentes temperaturas, em a) 90 °C; em b) 100 °C e em c) 105 °C.

Fonte: Autora.

4.3 TEOR DE UMIDADE

A partir da fixação da melhor condição de secagem obtida para o lodo bruto em 105 °C por 2 horas, procedeu-se mais um ensaio gravimétrico nestas condições. Nesse ensaio, pesou-se com exatidão para cada replicata aproximadamente 10,0000 g de lodo bruto e o mesmo foi submetido a aquecimento para volatilização completa da umidade. Ao final do ensaio, foi possível obter um teor de umidade $87,17 \pm 2,87\%$, que é concordante com outros estudos em lodo bruto, tal como o trabalho de David (2002).

Segundo Mânica (2015), o teor de umidade é inversamente proporcional ao poder calorífico da biomassa, ou seja, quanto maior a quantidade de água presente no material, menor será a quantidade de energia liberada em sua queima, em razão de que a primeira etapa da combustão consiste na evaporação e eliminação da água presente no combustível, e para que isso ocorra de forma apropriada é requerido uma determinada quantidade de energia (BRAND, 2010).

Conforme o que a teoria propõe os valores de umidade do lodo concentrado são relativamente altos, isso implica em uma maior energia de secagem do lodo, além de influenciar na caldeira, segundo Pellegrini (2002), um dos fatores de suma importância que influencia diretamente o poder calorífico dos materiais é o teor de umidade. Durante a queima de um combustível com alto teor de umidade, parte da água é evaporada, fazendo com que parte da energia liberada na combustão seja utilizada nessa evaporação. Portanto, quanto maior a umidade, menor será a quantidade de energia fornecida pelo combustível.

O teor de umidade é compatível com a teoria, maior parte de lodos de esgoto possui umidade em torno de 85% (VON SPERLING, 2001).

4.4 AVALIAÇÕES DE pH E ACIDEZ VOLÁTIL

Como mencionado, com o emprego de fitas de pH, esse parâmetro foi medido tanto com imersão direta no lodo bruto, quanto no líquido condensado após volatilização das amostras em aparato apresentado na Figura 9. Nesse sentido, o pH apresentado em ambos os casos foi de 4, o que caracteriza um lodo originalmente ácido, evidenciando a necessidade de secagem do mesmo.

Com o emprego de uma solução previamente padronizada de hidróxido de sódio 1 mol L^{-1} , procedeu-se a titulação de alíquotas de 10 mL da solução volatilizada do lodo bruto, com o uso de fenolftaleína como indicador. A partir disso, verificou-se que a acidez média da solução volatilizada apresenta concentração de $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, ou 8 g/L. Resultados relativamente parecidos também foram obtidos por Demaceno (2018) e Restrepo (2019) em seus estudos sobre lodo de frigoríficos.

O pH ácido juntamente com a acidez volátil ácida podem ocasionar na corrosão da caldeira. Corrosão é a deterioração do metal por ação química ou eletroquímica provocada pelo meio onde está inserido. As corrosões nos sistemas de vapor são eletroquímicas e podem se desenvolver em meios ácido, neutro ou básico, sendo meio ácido aerado o mais prejudicial, bastante perigosa pois pode afetar de forma significativa até mesmo tubulações novas, fragilizando o material em local específico e causando acidentes e paradas para manutenção ou reposição de peças (FRAGA E SANTOS, 2017).

4.5 PODER CALORÍFICO

Foram registrados todos os valores de massa e temperatura da água e do lodo para a realização da capacidade calorífica do lodo (Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6). Os ensaios foram realizados em um calorímetro.

Massa em gramas		Temperatura, °C		
		Água		
água	lodo	Temperatura Inicial	Temperatura final	Varição de temperatura
100,1432	14,0566	21,5	32,0	11,5
100,5275	15,8267	21,5	28,0	6,5
99,447	23,9416	21,0	33,0	12,0

Quadro 4: Capacidade calorífica do lodo.

Fonte: Autora

Calor/energia liberada (Cal)	Capacidade calorífica			
	Cal/g	Kcal/Kg	KJ/Kg	MJ/Kg
$Q = m.C.\Delta T$				
1051,5036	74805	74,805	312,68	0,3127
653,42875	41286	41,286	172,58	0,1726
1193,364	49845	49,845	208,35	0,2084

Quadro 5: Valores de capacidade calorífica

Fonte: Autora

Com base nos resultados obtidos, é possível observar que o lodo possui capacidade calorífica bastante baixa em comparação com outros trabalhos analisados. Segundo Von Sperling e Fernandes (2001), o poder calorífico do lodo digerido anaeróbio tem em média um valor de 12,8 MJ/Kg, enquanto Silva (2012) traz o valor de 16,2 MJ/Kg. O poder calorífico da madeira, por sua vez, é semelhante ao lodo em diversos casos, no estudo de Neiva (2018) o poder calorífico do cavaco de eucalipto é de 16,46 MJ/kg.

Pode-se citar como erro o fato da queima do lodo não ter sido efetuada no interior do calorímetro, como mencionado nos outros estudos comparados.

4.6 TEOR DE CINZAS

Como mencionado no item 3.3.5, o teor de cinzas elevado influi na redução da eficiência do processo. Para a determinação deste parâmetro, pesou-se com exatidão aproximadamente 5,0000 g de lodo bruto e submeteu-se a um aquecimento de 550 °C, durante 1 h. No quadro 7 podem ser observados os resultados individuais de cada uma das replicatas.

Teor de cinzas	550°C		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa cápsula de porcelana	49,8758	49,9467	49,6513
Massa lodo seco	10,3586	10,006	10,8858
Massa final	2,4824	2,4801	2,794
Porcentagem	23,9646%	24,7861%	25,6665%
Média	24,8057%		

Quadro 7: Teor de cinzas

Fonte: Autora

Com base nos resultados apresentados acima, a porcentagem média do teor de cinzas é de aproximadamente 24,8%. Esse resultado é comparável com Deivid (2002) em que o teor de cinzas geradas foi em torno de 28%, o resultado do teor de sólidos foi menor do que o comparável, o que é um bom resultado pois quanto menor o teor de cinzas, maior a massa combustível do lodo, ainda segundo David 2002, melhorando o desempenho do sólido na combustão. Na Figura 13 é possível visualizar o aspecto do teor de cinzas após o procedimento.

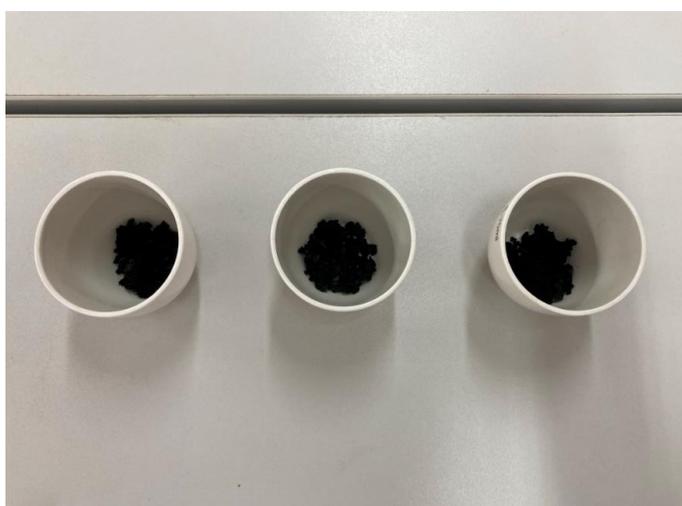


Figura 13: Aspecto do lodo após 550°C por 1h.

Fonte: Autora.

4.7 TEOR DE CARBONO FIXO E TEOR DE VOLÁTEIS

O teor de voláteis, com procedimento já citado no item 3.3.6, foi determinado a partir da fração de massa do lodo que volatilizou durante o aquecimento a 900°C por 7 minutos. Após esse procedimento o teor médio de voláteis no lodo foi de 82% \pm 3,2556%. Esse resultado desenvolve um papel importante na ignição do combustível e nas primeiras etapas da combustão, pois após a volatilização dos componentes químicos eles se misturam com o oxigênio do ar promovendo as reações de combustão, o teor comum de voláteis descrito na literatura é de aproximadamente 62% segundo o estudo de Manica (2015), demonstrando um teor alto de voláteis comparados ao da literatura, em que o teor de voláteis do lodo de esgoto doméstico é de aproximadamente 62%, e segundo o estudo de Lazzari (2018), que determinou o teor de voláteis do lodo de uma ETE com esgoto urbano, onde os valores de voláteis obtidos foram de aproximadamente 60%.

Como mencionado no mesmo item 3.3.6, segundo Batistela (2015), o carbono fixo é responsável pela manutenção e estabilidade da queima do lodo. Desse modo, aproximadamente 5,0000 g de lodo bruto foram submetidos a um aquecimento de 900°C durante uma hora, tal como Tchobanoglous (2016).

Como resultado obteve-se um teor médio de carbono total de 0,3505% \pm 0,0023%. Esse valor é comparável ao observado por Mânica (2015) no teor de carbono fixo do lodo de esgoto proveniente da lavagem de carros (onde o lodo tem maior porcentagem de umidade), os teores de carbono fixo de lodos provenientes de indústrias onde o teor de sólidos dos lodos é maior (entre 50% a 60%), os teores de carbono são maiores ainda no estudo de Mânica (2015). Os valores de teor de cinzas e material volátil e representa a duração da queima da biomassa, quanto maior o teor de carbono fixo mais demorada é a queima resultando em um maior tempo de residência no equipamento (BRAND, 2010). O resultado obtido no estudo, também, comparado ao trabalho de Lazzari (2018) foi extremamente baixo, onde a ETE estudada por Lazzari (2018), com teores aproximados de umidade, foi de aproximadamente 14% para lodos na saída do reator anaeróbio.

Na figura 14 é possível visualizar o aspecto do lodo após o tratamento térmico a 900°C durante uma hora para a determinação de carbono total.

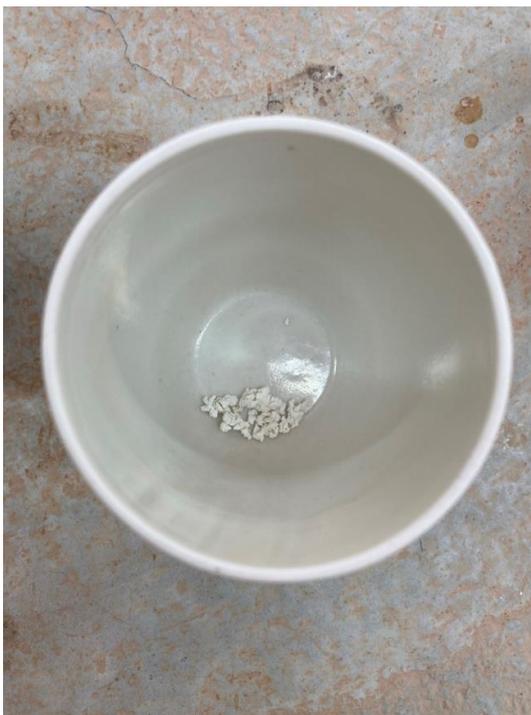


Figura 14: Amostra final no teor de carbono total
Fonte: O autor

4.8 TESTE DE CHAMA

Após ser devidamente seco, o lodo foi analisado em relação à sua capacidade de gerar chama. Adaptado do que propõe Almeida (2010), o teste de chama foi realizado com o auxílio de um isqueiro e algumas gotas de etanol 92 °GL comercial. Quando se deu o fim da chama proveniente do álcool, a chama continuou por mais alguns minutos, tal como se pode observar na Figura 15.

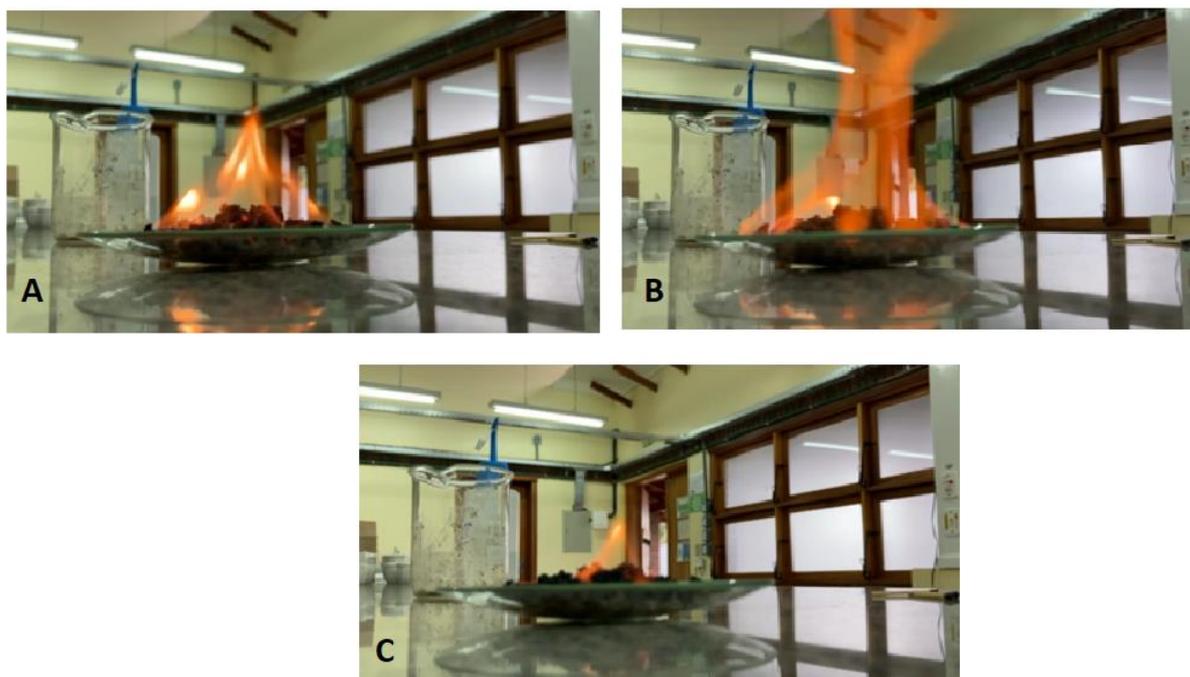


Figura 15: Imagem do teste de chama no lodo seco ao longo do tempo: em a) momento inicial; em b) após 3,5 minutos e em c) após 7 minutos.

Fonte: Autora

Na Figura 16, é possível observar o resíduo de cinzas provenientes da combustão do lodo. Isso permite observar que algumas partes do lodo não chegaram a queimar completamente (partes mais claras).



Figura 16: Aparência do lodo após a queima.

Fonte: Autora

Esse ensaio demonstrou que é possível a utilização do lodo para o fim desejado, a queima do lodo é indispensável para a caldeira. ...

A cor da chama depende da quantidade de carbono e oxigênio encontrado no meio, pois quando ocorre combustão completa a coloração da chama é azulada, ou seja, existe oxigênio suficiente para que ocorra a combustão completa, e quando a cor da chama é amarelada, portanto, pode-se afirmar que não existe oxigênio suficiente para haver a combustão completa. As chamas da Figura 15 apresentaram coloração laranja, tendendo para o amarelo intenso, o que também comparando com as cores do espectro visível, possuem maior energia (calor) e conseqüentemente resultou em uma chama mais quente (ALMEIDA, 2010).

4.9 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para facilitar a identificação do tempo de retorno de investimento inicial, valor gasto na aquisição de um secador rotativo, que viabilizaria a secagem em larga escala do lodo na indústria, foi adotado o método do payback não descontado, o qual não considera a taxa juros, sendo um meio simples e de fácil compreensão para análise de investimentos.

A indústria envolvida neste estudo produz em torno de 8 toneladas de lodo por dia, e em média é gasto aproximadamente quarenta mil reais (R\$ 40.000,00) mensais com o transporte do lodo úmido da empresa até um aterro sanitário.

Dessa forma, dividindo-se o custo de implantação de um secador rotativo (aproximadamente R\$ 1.700.000,00) pelo custo mensal de transporte supramencionado, o tempo necessário para que o secador adquirido se torne superavitário é de 43 meses (3 anos e 5 meses), sem considerar o balanço de energia envolvido entre perdas para a secagem e ganhos com o lodo como auxiliar na combustão em caldeiras. Assim sendo, é possível inferir que após 3 anos e meio, o equipamento trará um benefício mensal ao menos nos próximos dez anos de vida útil estimado para o secador orçado neste estudo.

Além da economia do transporte do lodo até o aterro sanitário que a instalação do secador de lodos pode ocasionar, pode-se considerar os diversos benefícios ambientais relacionados a não disposição do resíduo em aterro sanitário, evitando resíduos gerados indesejado, extremamente poluentes ao solo e ar, sem citar no que

se diz respeito ao desperdício energético não aproveitado na caldeira da indústria, retirando, mesmo que pouco, a utilização de madeira.

É importante ressaltar neste ponto que não foram avaliadas a energia gasta com o equipamento e não as futuras instalações que deverão ser realizadas na caldeira para o uso do lodo para impedir a deterioração por conta da acidez.

Portanto não é possível dizer se o projeto é viável economicamente mas há uma possibilidade da viabilidade econômica da implantação deste método, pois ainda são necessárias buscar informações como quantidade de energia gasta pelo equipamento, necessidade de adaptação de outros equipamentos para emissão atmosférica do gás na caldeira, custo da manutenção dos equipamentos entre outras questões.

5 CONCLUSÕES

Acredita-se que o estudo mostrou que a reutilização do lodo da estação de tratamento da indústria é viável para utilização de biomassa na caldeira. Apesar do investimento do procedimento parecer relativamente elevado, a médio prazo pode ser um investimento indispensável, tanto para os custos da geração e manejo deste resíduo, quanto para a conservação ambiental.

A respeito da viabilidade da instalação do secador rotativo de lodo no pátio fabril da unidade, obteve-se um retorno positivo do investimento, sendo a instalação recomendada em outras unidades com condição de geração e tratamento de efluentes semelhantes, porém não se pode afirmar que o secador é viável economicamente por faltarem cálculos relacionados a equipamentos que não foram considerados.

Para a secagem do lodo o tempo estimado provavelmente será maior utilizando as melhores condições avaliadas, tendo em vista que a escala de massa de lodo será bem maior. Porém, ainda assim, acredita-se que o emprego de 105 °C para a secagem é um bom indicativo de secagens mais rápidas do que em temperaturas menores.

Convém salientar que assim como a maioria de lodos de efluentes industriais, o lodo estudado apresentou elevado teor de umidade (superior a 85%), o que pode implicar em ignição fraca, redução da temperatura de combustão e interferência na qualidade da combustão, caso o lodo não seja seco com eficiência. O limite para a maioria das biomassas combustíveis é próximo a 65% de umidade (massa de água por massa de combustível úmido). Acima desse ponto, energia insuficiente é liberada pela combustão para satisfazer a evaporação e a produção de calor.

Sendo assim, no que se diz respeito ao emprego do lodo como fonte de energia térmica a partir da combustão, ele mostrou-se pouco eficiente, resultado esse já esperado desde a obtenção de seu baixo poder calorífico, favorecendo, assim, a produção de vapor, aliado a uma baixa redução no consumo do combustível principal, visto que a capacidade calorífica comparada com a da madeira, biomassa já utilizada na caldeira da indústria, é bastante superior. Por outro lado, observou-se que quanto maior a porcentagem de lodo misturado à lenha, maior é a ocorrência de problemas relacionados à fusão das cinzas e corrosão, afetando a estrutura da caldeira.

A acidez volátil do lodo, junto com a medição do pH era esperado, possui teor ácido, mas consideravelmente não poluente, além de que, foram vistos estudo que

provam que o lodo é menos corrosivo que a própria madeira. Para iniciar a queima do lodo na caldeira será preciso alterar o projeto, aumentando os custos do projeto.

O estudo mostrou que a reutilização do lodo da estação de tratamento da indústria é viável para utilização de biomassa na caldeira. Apesar dos baixos valores de poder calorífico e carbono fixo, o lodo acaba não atrapalhando na caldeira, mas resolve o problema de volume, transporte e disposição final.

Além da viabilidade econômica é fundamental pensar na melhoria para o meio ambiente, deixando de aproveitar energia procedente do resíduo que, atualmente, é apenas descartada com alto custo.

Para a realização de trabalhos futuros pode-se estudar a mudança de secador para um com menor valor agregado, como os leitos de secagem, a alternativa não foi viável de primeira pois o lodo bombeado da lagoa anaeróbia não é estabilizado suficiente para a saída do odor e existem casa muito próximas ao local da estação de tratamento de esgotos, portanto, deveria, primeiramente, ser estudada a melhor estabilização na saída da lagoa anaeróbia. Outras alternativas que poderiam ser estudadas futuramente é o emprego deste lodo na agricultura ou na incorporação do processamento cerâmico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ester Pires de. **Avaliação de diferentes combustíveis na reação de combustão para preparação de titânia visando o desenvolvimento de membranas assimétricas**. 2010. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BATISTA, Lucilene Ferreira. **Lodos Gerados nas Estações de Tratamento de Esgoto do Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. 2015. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - Df, 2015.

BORGES, Fabricio. Caracterização e avaliação de lodos de efluente sanitário e industrial para geração de biomassa na geração de energia. **Ciência e Engenharia**, [s. l.], v. 17, n. 1/2, p. 27-33, dez. 2008.

BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Portaria nº 76 de 26 de novembro de 1986. Dispõe sobre os métodos analíticos de bebidas e vinagre. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 28 nov. 1986. Seção 1, pt. 2.

BRASÍLIA. Eduardo José Fagundes Barreto. Ministério de Minas e Energia. **Combustão e Gaseificação da Biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ideorama Design e Comunicação Ltda., 2008. 194 p.

CHERNICHARO, C.A.L. Anaerobic Reactors. Capítulo 2 In.: Principles of anaerobic digestion. IWA Publishing, London, New York, p. 5-23, 2007.

CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2., 2011, São Paulo. **Caracterização do lodo proveniente do tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético**. Londrina - Pr: Ibeas - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2011.

DAVID, Airton Checoni. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

Fernandes, F.; Lopes, D.D.; Andreoli, C. V.; Silva, S. M. C. P. (2001). "Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE", In: Lodo e esgotos: tratamento e disposição final – princípios do tratamento biológico de águas residuárias, vol.06. DESA – UFMG (eds), SANEPAR. Belo Horizonte, MG, 308-309.

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.12, p. 116-140, 2008.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A.V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P.F.F. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. In.: Fundamentos do tratamento anaeróbio. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, RJ. ABES, Cap. 2, p. 29-51, 1999.

KARLSSON, S.; ÅMAND, L-E.; LISKE, J., Reducing high-temperature corrosion on high-alloyed stainless steel superheaters by co-combustion of municipal sewage sludge in a fluidised bed boiler. *Fuel*, v. 139, p. 482-493, 2015.

LAZZARI, Juanna. **Análise do Potencial Energético de Lodos Obtidos no Tratamento de Esgoto**. 2018. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - Es, 2018.

LEITE, Luan de Souza. Estudo da Cinética e da difusividade efetiva na secagem do lodo de esgoto. *Aidis*, Universidade Estadual Paulista, v. 11, n. 2, p. 251-265, 6 ago. 2018.

MÂNICA, Alana Natali. **Determinação do poder calorífico do lodo de esgoto doméstico e industrial a partir da análise imediata**. 2015. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó - Sc, 2015.

MENEGHINI, Cristiano *et al.* Análise de viabilidade da queima de lodo de frigorífico em uma caldeira a lenha. *Unoesc & Ciência: ACET*, Joaçaba Sc, v. 1, n. 1, p. 7-14, dez. 2015.

NEIVA, P. S.. Capacidade térmica e poder calorífico da biomassa de eucalipto. In: ENCONTRO DE PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS, 2., 2018, Uberaba. **Capacidade térmica e poder calorífico da biomassa de eucalipto**. Uberaba: Uniube, 2018. p. 1-8.

NIRENBERG LP, FERREIRA OM. Tratamento de águas residuárias de indústria de laticínios: eficiência e análise de modelos matemáticos do projeto da Nestlé. Goiânia: Universidade Católica de Goiás; 2005

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, p. 973-982, 2006.

OLIVEIRA, Nicole Santos. **Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água**. 2010. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Naturais, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2010.

PASQUINI, Nilton Cesar. Uso Potencial como Fonte de Energia de Lodo Proveniente de Esgoto Doméstico e Industrial. *Revista Ciências Exatas e Naturais: RECEN*, Paraná, v. 16, n. 1, p. 35-57, jun. 2014.

PINTRO, Daniela A. B. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 6., 2015, Porto Alegre Rs. **Avaliação técnica e econômica da co combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor**. Porto Alegre Rs: Ibeas – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2015. p. 1-7.

RESTREPO, Juan Camilo Pires Salcedo. **Codigestão anaeróbia de lodo de flotador do abate de frangos e caldo de cana de açúcar**. 2019. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Paraná, 2019.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S.A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 2262-2289, 2011.

SANTOS, Enock Jabes do Nascimento. **A importância do tratamento e cuidados com a água da caldeira**. 2017. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido - Ufersa, Mossoró - Rn, 2017.

SILVA, D. J. DA. Resíduos na indústria de laticínios. *Série de Gestão Ambiental*. Viçosa, 2011. Disponível em:

SOLANI, Rodrigo D. *et al.* A gestão de resíduos sólidos urbanos como estratégia de sustentabilidade. **Espacios**, Universidade de Ribeirão Preto, v. 40, n. 3, p. 9-21, 21 jan. 2019.

TCHOBANOGLIOUS, George. **Tratamento de Efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: Techbooks, 2016. 2012 p.

VIRMOND, E. Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia (dissertação de mestrado). Departamento de Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. 137 p.

VAN HAANDEL, Adrianus. Potencial de geração de energia a partir do lodo de sistemas de tratamento de esgoto. **Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica.**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 125-142, fev. 2009.

VAN HAANDEL E SOBRINHO, (2006). Produção, composição e constituição de esgoto. In: *Biossólidos – Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento*. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417p.

WERLE, S.; WILK, R.K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy*, v.35, p. 1914-1919, 2010.

