
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

LILIAN ANDRÉIA DA ROSA

**SECAGEM TÉRMICA DE LODOS DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS**

Porto Alegre

Dezembro 2014

LILIAN ANDRÉIA DA ROSA

**SECAGEM TÉRMICA DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ESGOTOS DOMÉSTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dieter Wartchow

Porto Alegre

Dezembro 2014

LILIAN ANDRÉIA DA ROSA

SECAGEM TÉRMICA DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ESGOTOS DOMÉSTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **10/12/2014** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Dieter Wartchow – Departamento de Obras
Hidráulicas (DOH) - IPH

.....
Eng^a Ambiental Bianca Stangler

.....
Eng^a Ambiental Camila Mattiuzi – Mestranda no Instituto de
Pesquisas Hidráulicas - IPH

Conceito:.....

Dedico este trabalho a meus pais, Artemio e Claudete,
que desde criança me incentivaram para o
desenvolvimento desta etapa, e mostraram apoio
incondicional durante toda esta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFRGS 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 Prof. Dieter Wartchow, orientador deste trabalho, pelo auxílio prestado para o desenvolvimento deste, demonstrando sempre apoio, dedicação e empenho para que os objetivos traçados pudessem ser alcançados.

Agradeço a todos os professores da UFRGS que ofertaram seus conhecimentos ao longo destes anos, transferindo sabedoria, experiências e valores que serão dignamente defendidos por mim daqui pra frente.

Agradeço ao apoio de toda a minha família pela ajuda e compreensão disponibilizados durante este período. Ao concluir esta etapa não estarei concluindo 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 a Deus por acreditar mais em mim do que eu mesma.

A persistência é o menor caminho do
êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

ROSA, L. A. DA Secagem Térmica de Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos 2014. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Faculdade de Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho busca analisar a viabilidade técnica da aplicação do processo de secagem térmica no tratamento de lodos oriundos de Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos - ETEs. Costa (1995) apud Borges et al. (2008) descreve o tratamento dos lodos de ETE como um problema de âmbito mundial, pois, com o aumento da coleta e tratamento dos esgotos, o volume gerado de lodo cresce a cada dia ocasionando problemas para seu tratamento e disposição final. O lodo é composto por cerca de 95 – 98% de água, segundo Sperling et al. (2001), assim, com a redução do volume de água presente no lodo haverá uma redução significativa de volume e massa a serem dispostos. Além disso, Sperling et al. (2001) menciona que o tratamento do lodo atinge cerca de 20 a 60% do custo total de operação da estação. Dessa forma a busca por novas alternativas vem sendo desenvolvida com o intuito de minimizar tais impactos e encontrar medidas cabíveis de implantação e solução do presente problema. A secagem térmica desponta como uma das mais promissoras técnicas de tratamento destes lodos, pois segundo David (2002) é possível reduzir a quantidade de água presente no lodo para uma faixa de 5 a 10%, alcançando concentrações de sólidos totais muito elevadas e apresentando como resíduo final um lodo estabilizado e higiênico.

Palavras-chave: lodo; secagem térmica; estação de tratamento de esgoto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxogramas convencionais de tratamentos de esgotos	22
Figura 2: Tipologia do material granular – “pellets” – oriundo do processo de secagem térmica.....	34
Figura 3: Fluxograma de secagem térmica por tambor rotativo da empresa Albrecht.....	35
Figura 4: Esquemático da variação da taxa de secagem.....	37
Figura 5: Secador tipo rotativo desenvolvido pela empresa Albrecht.....	40
Figura 6: Esquemático do processo de secagem direta ou convectiva.....	40
Figura 7: Esquemático do processo de secagem indireta ou condutiva.....	42
Figura 8: Fluxograma da metodologia de trabalho adotada.....	45
Figura 9: Matriz de inter-relação dos fatores de escolha do tratamento de lodo com o processo de secagem térmica.....	50
Figura 10: Localização da ETE Serraria.....	51
Figura 11: Vista aérea da ETE Serraria.....	52
Figura 12: Bombas para bombeamento do lodo da caixa de armazenamento para o tratamento.....	53
Figura 13: Condicionamento ETE Serraria.....	54
Figura 14: Adição de cal para remoção de fósforo na ETE Serraria.....	54
Figura 15: Centrífugas ETE Serraria.....	55
Figura 16: Fluxograma de implantação do processo de secagem térmica na ETE Serraria.....	56
Figura 17: Matriz de inter-relação dos fatores de escolha do tratamento do lodo e o processo de secagem térmica.....	59
Figura 18: Memorial de cálculo antes da implantação da secagem térmica.....	61
Figura 19: Memorial de cálculo pós a implantação da secagem térmica.....	62
Figura 20: Quadro resumo dos resultados encontrados para a ETE Serraria.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Volume de lodo gerado de acordo com o tratamento de esgotos.....	21
Tabela 2: Relação positiva ou negativa de cada fator para com a secagem térmica.....	58

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1. Descrição do problema.....	12
1.2. Justificativa.....	13
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo Geral.....	14
1.3.2. Objetivos Específicos.....	14
2. Revisão Bibliográfica	15
2.1. Problemática do lodo de ETE.....	15
2.2. Processos geradores de lodo em ETEs.....	18
2.3. Processamento do lodo de ETE.....	23
2.3.1. Adensamento.....	23
2.3.2. Estabilização.....	24
2.3.3. Condicionamento.....	25
2.3.4. Desaguamento.....	26
2.3.5. Higienização.....	27
2.3.6. Disposição Final.....	29
2.4. Secagem térmica.....	32
2.5. Processo de secagem térmica.....	33
2.5.1. Secadores diretos ou convectivos.....	39
2.5.2. Secadores indiretos ou condutivos.....	40
2.5.3. Secadores mistos.....	42
2.5.4. Secadores por radiação.....	42
3. Metodologia	44
3.1. Determinação dos fatores.....	45
3.1.1. Concentração final de sólidos totais.....	46
3.1.2. Custo de implantação e operação.....	47
3.1.3. Número de etapas do processo de tratamento do lodo.....	47
3.1.4. Custo de transporte.....	48
3.1.5. Facilidade de disposição final do resíduo.....	48
3.2. Desenvolvimento da matriz.....	49
3.3. Estudo de caso ETE Serraria / Porto Alegre.....	50
4. Análise dos resultados	57
4.1 Matriz de inter-relação.....	57

4.2 Estudo de caso ETE Serraria / Porto Alegre.....	60
5. Conclusões e recomendações.....	64
5.1. Conclusões.....	64
5.2. Recomendações.....	65
6. Referências Bibliográficas.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O tratamento dos lodos gerados no tratamento de esgotos tem se tornado um problema cada vez mais pertinente na área ambiental, devido aos grandes volumes gerados e a dificuldade de destinação final. Dessa maneira, a solução mais usual é a destinação para aterros sanitários, que é uma solução que não poderá perdurar por muito tempo, visto o esgotamento dos aterros e a dificuldade de encontrar áreas para novas implantações. Além disso, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul (PERS-RS) está definindo metas que incluem a disposição ambientalmente adequada dos Resíduos de Saneamento (lodo de Estações de Tratamento de Água – ETA, lodo de Estações de Tratamento de Esgotos – ETE e dragagem de canais pluviais).

Com o aumento da cobertura de coleta e tratamento de esgotos, este volume de lodo também aumentará e segundo Lee e Santos (2011) apenas as soluções tradicionais não serão suficientes para o seu tratamento e disposição final, descrevendo um cenário crítico onde será necessário o desenvolvimento e aplicação de tecnologias mais avançadas e com melhor eficácia na redução do volume e massa dos resíduos finais dos tratamentos de lodos de esgotos.

Andreoli et al. (2001) menciona que a disposição do lodo apresenta mais um inconveniente, a presença de microrganismos patogênicos, pois concentra a maioria dos organismos presentes no esgoto afluente a ETE. Assim, faz-se necessária uma etapa de higienização do lodo para que não ocorram problemas de contaminação da população, gerando danos a saúde pública.

1.2 JUSTIFICATIVA

A secagem térmica surge como uma nova técnica que diminui consideravelmente o volume do lodo e já embute o tratamento de patógenos, tornando o resíduo final menos agressivo a saúde humana, possibilitando sua aplicação em outras técnicas, como a utilização em solo agrícola.

A técnica consiste em, através da aplicação de calor, possibilitar a redução do percentual de umidade contida no lodo. O lodo afluente é composto em cerca de 95 - 98% de água (variando de acordo com o tratamento pré-empregado), segundo Sperling et al. (2001). Com a redução da umidade tem-se uma redução de volume quase de mesma proporção, visto que não é possível remover totalmente a umidade, restando cerca de 5 - 10%, segundo David (2002). E ainda com o aquecimento, os organismos patógenos são eliminados.

Por isso, a secagem térmica desponta como uma das melhores alternativas para o tratamento dos lodos de esgoto, diminuindo consideravelmente o seu volume e apresentando como produto final um lodo com características mais estáveis e higiênicas, o que viabiliza seu uso tanto na agricultura quanto como combustível, até mesmo como fonte de calor para o próprio processo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

- Analisar através de dados secundários a viabilidade técnica do uso de secagem térmica no tratamento de lodos de esgotos domésticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar fatores fundamentais para o tratamento de lodos de esgotos domésticos.
- Verificar se a secagem térmica se enquadra nos fatores acima citados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o objetivo de trazer uma pesquisa realizada junto à literatura acerca do tema trabalhado, secagem térmica de lodos de esgotos domésticos. Versará inicialmente sobre os problemas encontrados no descarte e disposição final dos lodos, dirigindo-se posteriormente para sua geração, processamento e caracterização, para uma compreensão sobre o produto que está sendo estudado. Em seguida teremos um detalhamento do processo de secagem térmica.

2.1 PROBLEMÁTICA DO LODO

A disposição final dos resíduos sólidos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes industriais e sanitários (lodos) tem sido debatida com frequência devido o esgotamento dos aterros sanitários, que está entre as opções de destinações finais mais usuais para tais resíduos, e o constante aumento do volume gerado, advindo do avanço quantitativo dos tratamentos de esgotos.

Costa (1995) apud Borges et al. (2008) destaca que a disposição final de lodos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes industriais e sanitários desponta como um problema de abrangência mundial. Assim, Borowski et al. (2002) apud Borges et al. (2008) sugere que utilizar o resíduo final do tratamento de lodo como matéria-prima alternativa em alguns processos pode representar uma solução econômica e ambientalmente viável.

Lee e Santos (2011) reforçam que o gerenciamento do lodo é um problema atual e de preocupação mundial, devido ao grande volume gerado de matéria por dia.

Afirmam ainda que o volume gerado de lodo aumentará de tal maneira, que somente os usos tradicionais de destinação final do lodo serão inviáveis econômica e ambientalmente.

Os resíduos de saneamento são os resíduos gerados nas atividades de saneamento básico, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos. O assunto sobre a administração e gerenciamento corretos desses resíduos é tão importante ambiental, econômica e socialmente, que está presente na Agenda 21 dos países, estabelecida após a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente (CNUMAD), em 1992 no Rio de Janeiro (ECO-92) (LEE e SANTOS, 2011).

Segundo Sperling et al. (2001) o gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é muito complexo e representa um alto custo, que, se mal executado, pode vir a comprometer os benefícios sanitários e ambientais aguardados destes sistemas.

A sociedade e as agências ambientais têm aplicado exigências crescentes por padrões de qualidade ambiental melhores, e isso tem se refletido nos gestores públicos e privados dos serviços de saneamento (SPERLING et al., 2001). Por isso, atualmente, em vários estados brasileiros, os órgãos ambientais já estão exigindo a definição técnica da disposição final do lodo nos processos de licenciamento das Estações de Tratamento de Esgotos - ETE's (PINHEIRO, 2012).

Segundo a legislação de muitos países, incluindo a brasileira, a responsabilidade pelos danos que podem ser causados pelo destino inadequado e irresponsável do lodo de ETE é sempre dos geradores do resíduo, que podem vir a ser enquadrados na lei de crimes ambientais (ANDREOLI et al., 2001).

O termo “lodo” é utilizado para se referir aos subprodutos sólidos do tratamento de esgotos, segundo Sperling et al. (2001). Contudo tal autor sugere também denominá-lo biossólido, com base no tratamento adotado que consiste em processos

biológicos. Parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, pertencendo à biomassa microbiana, denominada também de lodo biológico ou secundário, que é composto principalmente de sólidos biológicos, o que justifica esta denominação. Porém no presente trabalho adotaremos o termo lodo para designar tais subprodutos.

O lodo de esgoto tipicamente apresenta 95 - 98% de água. 70 a 80% dos sólidos contidos no lodo são matéria orgânica, incluindo óleos e graxas. Podem também ser encontradas quantidades razoáveis de contaminantes, refletindo as características do esgoto afluente a ETE (SORME, 2002 apud SANTOS et al., 2012). Ocorrendo a redução da quantidade de água do lodo, tem-se uma redução concomitante do volume deste, o que representa um fator positivo para sua disposição final.

Sperling et al. (2001) afirma que o lodo representa apenas de 1% a 2% do volume do esgoto tratado, contudo seu custo abrange geralmente entre 20% e 60% do total gasto com a operação de uma ETE. Além do impacto econômico do tratamento do lodo, a sua disposição final é uma operação bastante complexa, que, por muitas vezes, ultrapassa os limites da ETE.

Santos et al. (2012) menciona a necessidade de caracterizar o lodo efluente de ETE's, para que seja possível a sua caracterização, cadastro e classificação, sendo possível assim escolher a solução mais coerente para sua disposição final. Pois as características do lodo são diretamente influenciadas pela origem do esgoto, carregando traços dos processos e substâncias formadoras e, quando doméstico, características intrínsecas ao modo de vida da população.

Além disso, Pinheiro (2012) ressalta que cada tecnologia de tratamento irá gerar lodos com características e volumes distintos, sendo necessário considerar tal informação no momento de escolha do tratamento que será adotado.

Para Sanin et al. (2010) a única generalização que pode ser feita acerca de lodos é que eles são diferentes e justifica que se todos os lodos fossem os mesmos, não haveria necessidade de sofisticados métodos de caracterização e análise, ou o desenvolvimento de métodos para a concepção de operações de manuseio e descarte de lodo.

Dessa forma, a quantidade e as características dos lodos produzidos são definidas pela qualidade dos esgotos e pela opção de tratamento de esgotos adotada. Os mecanismos de gestão desses resíduos devem ser previstos já no período de concepção do sistema, evitando assim, transtornos e impactos ambientais negativos vinculados à falta de planejamento e de estratégia para disposição ou reutilização desses resíduos (ANDREOLI et al., 2001).

2.2 PROCESSOS GERADORES DE LODO EM ETEs

O lodo, na maior parte das etapas do seu manuseio, é constituído de cerca de 95 - 98% de água, segundo Sperling et al. (2001), sendo designado como fase sólida apenas para sua distinção do fluxo do líquido que está sendo tratado.

Os subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos, em geral, são material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico, este último se houver etapa físico-química (SPERLING et al., 2001).

Pinheiro (2012) define o material gradeado como aquele formado por todos os sólidos orgânicos e inorgânicos com dimensões superiores ao espaçamento livre entre as grades, que ficam retidos nestas e são removidos mecânica ou manualmente.

Ainda segundo Pinheiro (2012) a areia compreende os sólidos inorgânicos mais pesados, e é removida nos desarenadores.

A espuma é formada por materiais flutuantes que são raspados da superfície dos decantadores e da superfície de câmaras de gás de reatores anaeróbios e possuem densidade menor que a água, como óleos, graxas, papel, algodão, cabelo, resíduos de alimentos, etc (PINHEIRO, 2012).

Sanin et al. (2010) menciona que, muitas vezes, a espuma é recirculada para o início do tratamento. Porém a espuma pode conter uma alta concentração de sólidos que também será recirculada, e dependendo da tipologia desses sólidos e da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) associada a eles, esta operação de recirculação poderá acarretar sérios problemas de operação.

O lodo primário é composto pelos sólidos removidos no decantador primário por sedimentação. Podem exalar um forte odor caso o lodo fique retido muito tempo e em temperatura elevada no interior dos decantadores, devido ao início de atividade anaeróbia, que é percebida nestas condições (PINHEIRO, 2012). Nos sistemas de tratamento primário não ocorre nenhum esforço para a remoção de materiais que demandam oxigênio, a DBO que é removida dar-se-á como resultado de remoção de sólidos (SANIN et al., 2010).

Para Sanin et al. (2010) o lodo primário apresenta três características que tornam o seu tratamento um pouco mais difícil: composição variável, alta concentração de microrganismos patogênicos e alta porcentagem de água.

Pinheiro (2012) menciona que o lodo secundário ou biológico é proveniente das unidades secundárias (tratamento biológico), e é formado pela biomassa gerada à custa do alimento fornecido pelo esgoto afluente. Esta biomassa cresce continuamente durante o tratamento biológico, devido à oferta constante de alimento. Sperling et al. (2001) ressalva que caso a biomassa não seja removida, ela tende a se acumular no sistema, podendo sair no efluente final, deteriorando sua qualidade.

Para Andreoli et al. (2001) o lodo secundário é então a matéria-prima dos tratamentos biológicos e o seu excesso passa a ser considerado resíduo. O momento em que o lodo deixa de ser matéria-prima e passa a ser resíduo varia de acordo com a tecnologia do sistema de tratamento empregada e sua organização operacional.

O lodo primário e o lodo secundário podem ser enviados para tratamento juntos, sendo o lodo resultante desta mistura denominado lodo misto (SPERLING et al., 2001).

Já o lodo químico é resultante da precipitação química com sais metálicos ou com cal. Este subproduto só será gerado caso haja etapa físico-química e seu tratamento apresenta dificuldades como o aumento do volume de lodo removido e a redução da capacidade de digestão (PINHEIRO, 2012).

Em todos os casos, é necessário o descarte do lodo, porém não é necessária a remoção contínua, como ocorre nos casos de lodos ativados, em todos os sistemas de tratamento (SPERLING et al., 2001). Ainda segundo Sperling et al. (2001), lagoas facultativas, por exemplo, podem armazenar o lodo por todo o seu horizonte de operação. Enquanto reatores anaeróbios, por sua vez, permitem um descarte eventual. O lodo descartado do sistema de tratamento pode ser denominado de lodo excedente.

Sperling et al. (2001) menciona também que o período de armazenamento do lodo tem grande influência nas suas características, em vista que lodos removidos em intervalos maiores, como semanas, meses ou anos, costumam ser já digeridos e mais densos.

Como visto anteriormente, cada tecnologia gera lodo com distintas características e principalmente em quantidades variadas (PINHEIRO, 2012). E em virtude da ampla gama de processos de tratamento utilizados em nosso meio, encontramos

diversas origens dos subprodutos, acarretando diferentes características no lodo a ser tratado (SPERLING et al., 2001).

Dessa maneira, é preciso considerar o volume de lodo gerado por cada tipo de tratamento de esgoto na tomada de decisão da tecnologia que será adotada em uma nova ETE. A Tabela 1 apresenta uma associação de uma estimativa do volume de lodo gerado para alguns tipos de tratamento. Pinheiro (2012) define que o lodo líquido a ser tratado é aquele removido diretamente do processo de tratamento de esgoto, que ainda será encaminhado ao tratamento da fase sólida, já o lodo desidratado a ser disposto é resultado de todo o processo de tratamento de lodo, já digerido e seco e que deverá então ser encaminhado à disposição final, ambientalmente adequada.

Tabela 1 – Volume de lodo gerado de acordo com o tratamento de esgotos

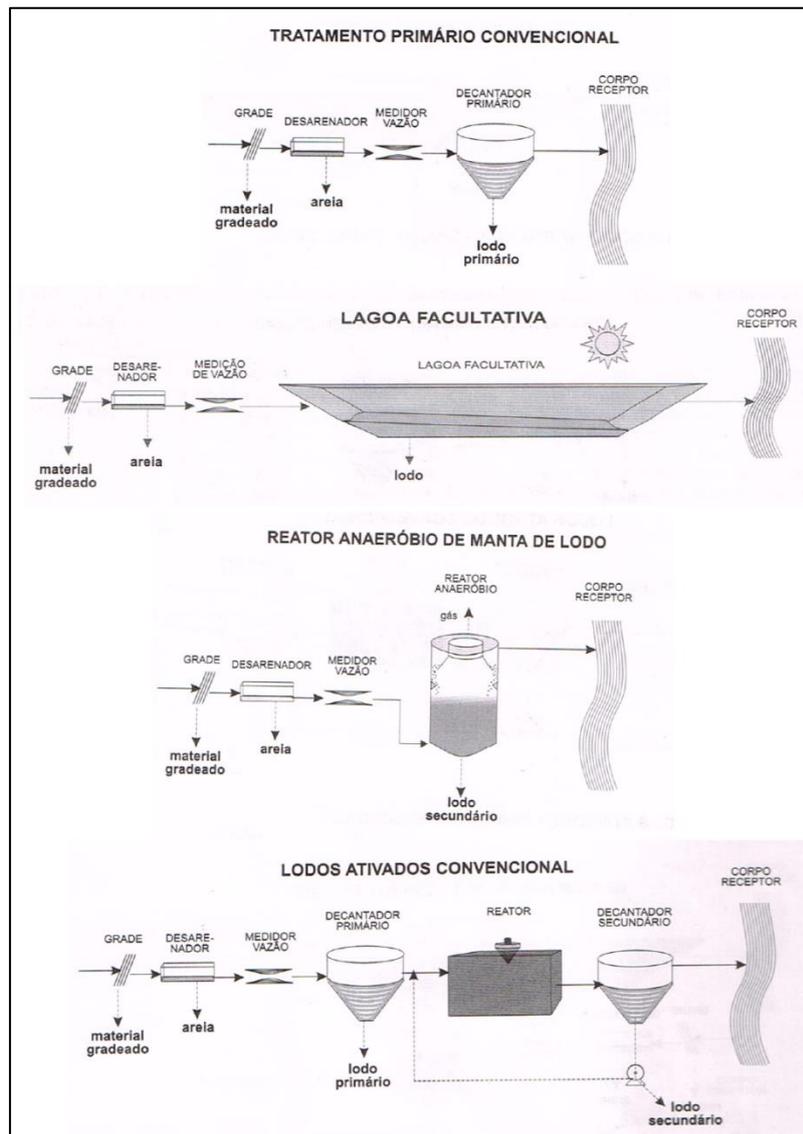
Sistema	Volume de Lodo	
	Lodo líquido a ser tratado (L/hab.ano)	Lodo desidratado a ser disposto (L/hab.ano)
Tratamento primário convencional	330 - 730	15 - 40
Lagoa facultativa	35 - 90	15 - 30
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	55 - 160	20 - 60
Lagoa aerada facultativa	30 - 220	7 - 30
Reator UASB	70 - 220	10 - 35
Lodo ativado convencional	1100 - 3000	35 - 90
Filtro biológico percolador de baixa carga	360 - 1100	35 - 80
Filtro biológico percolador de alta carga	500 - 1900	35 - 80
Biofiltro aerado submerso	1100 - 3000	35 - 90

Fonte: Von Sperling (1999) apud Pinheiro (2012)

A partir na análise da Tabela 1 percebe-se que as lagoas facultativas geram a menor quantidade de lodo, enquanto o tratamento por meio de lodo ativado gera a maior quantidade de lodo a ser tratado (SPERLING et al., 2001).

A Figura 1 apresenta alguns dos fluxogramas mais convencionais de tratamentos de esgotos, para as diferentes metodologias, de forma a esclarecer a sistemática de geração dos lodos.

Figura 1 – Fluxogramas convencionais de tratamentos de esgotos



Fonte: Adaptado de Sperling et al., 2001

Além dos fluxogramas apresentados, há uma gama de diversificações que incluem inclusive a combinação de diferentes metodologias e estas combinações despontam como a principal tendência para o tratamento de esgotos (SPERLING et al., 2001).

2.3 PROCESSAMENTO DO LODO DE ETE

As principais etapas do gerenciamento tradicional do lodo, segundo Sperling et al. (2001), são:

- Adensamento: para remoção de umidade;
- Estabilização: para remoção de matéria orgânica;
- Condicionamento: preparação para a desidratação;
- Desaguamento: para remoção de umidade;
- Higienização: para remoção de organismos patogênicos;
- Disposição final: descarte dos subprodutos.

O processo de secagem térmica atua unindo algumas destas etapas, resultando em uma diminuição do número destas. O desaguamento e a higienização ocorrem simultaneamente, e a etapa de condicionamento pode-se fazer desnecessária. Também está em desenvolvimento técnicas de secagem térmica que permitirão a entrada do lodo bruto, unindo todo o tratamento do lodo em apenas uma etapa (SPERLING et al., 2001).

2.3.1 Adensamento

O adensamento consiste em um processo físico para concentração de sólidos no lodo, buscando reduzir sua umidade, e por consequência, seu volume (SPERLING et al., 2001). Para Pinheiro (2012) o adensamento também pode ser denominado de espessamento e busca a redução do volume do lodo para facilitar seu manuseio, processamento e destino final.

Segundo Andreoli et al. (2001) o adensamento é mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros biológicos percoladores, sendo de suma

importância para o dimensionamento e para a operação dos digestores e para o manuseio do lodo, em vista que o comportamento do lodo varia com o teor de sólidos.

Os principais processos utilizados para o adensamento do lodo são: adensador por gravidade, adensador por flotação, adensador por centrifugação e adensador de esteiras (PINHEIRO, 2012).

2.3.2 Estabilização

Para Sperling et al. (2001) a estabilização busca atenuar o inconveniente de maus odores nas etapas posteriores do tratamento do lodo. Esta redução é possível através da remoção da matéria orgânica biodegradável presente no lodo. Já para Andreoli et al. (2001), além da redução de maus odores, o processo de estabilização do lodo prevê também a redução de patógenos. Contudo, a importância destes fatores está associada as demais etapas de destinação final do lodo, precisando ser definida de forma articulada com seu uso pós-tratamento (ANDREOLI et al., 2001).

Ainda para Andreoli et al. (2001), quanto mais o lodo se assemelhar à matéria orgânica “fresca”, maior será seu potencial de putrefação e produção de maus odores. Maior também será, a quantidade de microrganismos patogênicos, devido a grande quantidade desses microrganismos presente nos esgotos domésticos. À medida que este lodo passa por processos de biotransformação, alguns de seus componentes orgânicos, com maior propensão a biodegradação, são transformados, e o lodo passa a ser considerado estabilizado, apresentando odor menos ofensivo e menor concentração de patógenos.

Sperling et al. (2001) divide os processos de estabilização em 3 categorias:

- Estabilização biológica: promove a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica através da utilização de bactérias específicas;
- Estabilização química: a estabilização ocorre por meio da oxidação química da matéria orgânica;
- Estabilização térmica: ocorre através da aplicação de calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados.

2.3.3 Condicionamento

O condicionamento é um processo no qual a adição de produtos químicos visa aumentar a aptidão do lodo para o desaguamento e melhorar a captura de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo (SPERLING et al., 2001). Andreoli et al. (2001) sugere que, além da adição de produtos químicos, o condicionamento também poderá ser realizado através de tratamento térmico.

Segundo Andreoli et al. (2001) este processo busca modificar o tamanho e a distribuição das partículas, as cargas de superfície e a interação das partículas no lodo. Ainda para este autor o principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas, através da envoltura das partículas pequenas em agregados maiores, pois a presença de partículas finas e colóides fazem com que o lodo apresente reduzida aptidão ao desaguamento e acabam por gerar uma demanda maior de produtos químicos no processo de condicionamento.

Essa envoltura de partículas finas em agregados maiores se dá através da neutralização ou desestabilização das forças químicas ou físicas atuantes nas partículas finas e no material particulado em suspensão, imersos em meio líquido, isso permite que as

partículas pequenas se unam para formar agregados maiores (HAUG et al., 1992, apud MIKI, 1998, apud DAVID, 2002).

Sperling et al. (2001) menciona que lodos ativados ou lodos mistos apresentam dificuldades para atingir uma concentração de sólidos totais superior a 4% ou 6% sem a utilização de condicionadores.

Os principais coagulantes utilizados são sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos (SPERLING et al., 2001).

2.3.4 Desaguamento

O objetivo do desaguamento ou desidratação é remover a água e reduzir ainda mais o volume, gerando um lodo com comportamento mais próximo ao de um sólido. Esta etapa pode ser realizada por métodos naturais ou mecânicos e tem impacto importante nos custos de transporte e destino final, além de influenciar no manuseio do lodo, de acordo com a umidade final deste após essa etapa (SPERLING et al., 2001).

As principais razões para se realizar o desaguamento, segundo Sperling et al. (2001) são:

- Redução do custo de transporte do resíduo final até o local de destinação final;
- Melhores condições de manuseio do lodo, devido a maior facilidade de transporte do lodo desaguado;
- Aumento do poder calorífico do lodo, por meio da diminuição do teor de umidade, visando um processo de incineração;
- Redução do volume para posterior disposição em aterros sanitários ou uso agrícola;

- Redução da produção de lixiviados, quando disposto em aterros sanitários.

Para Andreoli et al. (2001) a escolha do processo de desaguamento a ser aplicado dependerá do tipo de lodo e da área disponível. Não havendo restrições quanto à área, e tratando-se de ETEs de pequeno porte, processos naturais, como leitos de secagem, são sugeridos como uma boa alternativa. Já para ETEs de médio e grande porte, situadas em áreas urbanizadas e com pouca área disponível, os processos de desaguamento mecânico são alternativas mais cabíveis.

Os processos de desaguamento mais usuais no Brasil são os leitos de secagem, as lagoas de lodos, as centrífugas, as prensas desaguadoras e os filtros-prensa (ANDREOLI et al., 2001).

2.3.5 Higienização

A higienização ou desinfecção do lodo não é uma etapa obrigatória, pois dependerá da destinação final adotada para o lodo, como usos agrícolas. A higienização busca a eliminação dos microrganismos patogênicos presentes no lodo (SPERLING et al., 2001).

O lodo de esgoto doméstico concentra a maioria dos organismos presentes no esgoto afluente a ETE, podendo apresentar-se como uma ameaça a saúde pública. Estes microrganismos são oriundos principalmente do material fecal contido no esgoto, que carrega as características sanitárias da população produtora, traduzindo desta forma o perfil de saúde desta população (ANDREOLI et al., 2001).

Para Andreoli et al. (2001), a higienização do lodo envolve processos que podem ser físicos, químicos ou biológicos, buscando sempre a redução de patógenos. Os

processos que mais se destacam são a digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, radiação beta e gama, pasteurização, tratamento térmico e caleação.

Pode-se tratar como alternativas mais econômicas os processos de caleação, compostagem e tratamento térmico com fonte de energia alternativa, segundo Andreoli et al. (2001). Ainda para este, tais processos tem como base utilizar três fatores que apresentam a capacidade de higienizar o lodo, são eles: pH, temperatura e radiação solar.

A caleação utiliza o princípio de aumento do pH, pois os microrganismos patogênicos quando expostos a níveis extremos de pH tendem a ser destruídos. Contudo este método de higienização acarreta o aumento do volume e do peso correspondente que serão dispostos, além de ser necessária uma posterior correção de pH caso o destino final seja o uso agrícola (ANDREOLI et al., 2001).

O processo de higienização através da compostagem faz uso do aumento da temperatura ocasionado pela própria atividade microbiológica para eliminação dos patógenos. Este processo é bastante difundido, mas também não há redução significativa do volume a ser descartado (ANDREOLI et al., 2001).

Para Andreoli et al. (2001) o método mais flexível no que tange aplicação e que surge como solução para uma melhor estabilização e desinfecção do lodo é o tratamento térmico através da secagem térmica, pois utiliza-se do princípio de elevação da temperatura, que responde com a eliminação dos microrganismos patogênicos, além de reduzir o volume através da perda de água. Outra vantagem deste método pode ser percebida quando a disposição final do resíduo for a agricultura, em vista que não há o inconveniente de correção de pH. O processo de secagem térmica, objeto de análise deste trabalho, será mais amplamente discutido no item 2.4.

2.3.6 Disposição Final

A escolha da disposição final do lodo de esgoto é uma tarefa normalmente complexa, porque envolve aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais que vão além da área da estação. O custo investido nesta etapa da destinação do lodo de ETE é bastante elevado, logo este deve ser inserido no planejamento e projeto de uma ETE desde sua concepção, sendo gerido de forma vinculada com a qualidade do esgoto a ser tratado, o tipo de tratamento a ser adotado e o processamento do lodo (SPERLING et al., 2001).

Em muitos países, segundo Sperling et al. (2001) a prática de disposição em aterros sanitários já não é considerada uma prática sustentável, pois representa a cada dia, custos maiores em função do aumento das distâncias de transporte e restrições ambientais. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos só podem ser dispostos em aterros os rejeitos (resíduos que não apresentam possibilidade de tratamento e recuperação).

Sperling et al. (2001) sugere então a reciclagem como o processo que apresenta maior perspectiva de evolução, por tratar-se de uma alternativa econômica e ambientalmente adequada. Dentro dessa visão, o uso agrícola surge como uma boa alternativa, desde que utilizado com orientação técnica, de forma a garantir a segurança sanitária e ambiental e também os ganhos do produtor rural.

Para Andreoli et al. (2001) a reciclagem de lodos de ETEs a partir do uso na agricultura é uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável, pois o material orgânico presente no resíduo do tratamento de lodos é uma excelente fonte de nutrientes e aumentam a resistência do solo à erosão.

Esta alternativa é guiada pela Resolução CONAMA nº 375 de 2006, que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.

Contudo, tal resolução apresenta-se bastante restritiva, permitindo a aplicação da técnica apenas em culturas onde a parte comestível não entre em contato direto com o solo e descreve um programa de monitoramento constante e intenso. Tais restrições ocorrem devido ao potencial de contaminação associado ao lodo de esgoto.

Quando o lodo de ETE for direcionado para uso agrícola, cabe ressaltar que além da legislação e dos critérios de proteção ambiental, precisam ser analisados os atributos dos solos quanto ao seu uso agrícola. Para este fim, a visão deve ser mais abrangente do que um simples descarte, pois é necessário conhecimento do meio físico no espaço geográfico, inserindo a disposição do lodo no contexto socioeconômico do local (ANDREOLI et al., 2001).

Outro processo que, segundo Sperling et al. (2001), apresentou grande crescimento foi a secagem mecânica, que pode fazer uso de polímeros para uma remoção da umidade mais eficaz. E outro processo que surge como tendência é a secagem térmica e a peletização do lodo que visa a melhoria da qualidade dos biossólidos.

Sanin et al. (2010) destaca que a secagem térmica é um processo diferente da incineração, pois, segundo o autor, o produto final da secagem térmica apresenta elevado teor de sólidos voláteis, enquanto a incineração envolve a completa oxidação dos voláteis e o produto final é um resíduo inerte. Além deste fator a incineração trabalha com temperaturas mais elevadas que o processo de secagem térmica, que apenas precisa atingir uma temperatura para evaporação da água.

Sperling et al. (2001) diz que dentro de uma visão sustentável do processo, a eliminação final do lodo através de processos como incineração, uso de landfarming e disposição em aterros sanitários deve ser empregada somente quando sua valorização é impossível, pelo fato de o lodo conter contaminantes ou por não haver outra forma de uso possível próxima a ETE.

Não há regras fixas para a escolha do método de disposição final dos lodos, para tanto é necessário um estudo criterioso de cada caso, para que a alternativa escolhida seja compatível com as demais variantes do processo de tratamento e apresente um bom rendimento operacional e econômico (SPERLING et al., 2001). Para uma avaliação específica de cada caso, o autor supracitado sugere quatro critérios a serem ponderados durante a escolha da melhor alternativa:

- Desempenho operacional;
- Flexibilidade;
- Custos;
- Impacto ambiental.

Desempenho operacional: para Sperling et al. (2001) além do bom funcionamento, deve ser observada a simplicidade técnica e operacional de cada alternativa. Tecnologias inovadoras ou readequadas a condição local devem ser avaliadas nos seus pontos críticos.

Flexibilidade: a flexibilização para disposição final do lodo deve ocorrer quanto a sua quantidade e qualidade. Há opções que não possibilitam tais flexibilizações, como o uso na agricultura, que restringe qualitativamente o lodo (SPERLING et al., 2001).

Custos: para análise dos custos, Sperling et al. (2001), sugere que estes devem ser divididos em custos de processamento do lodo, transporte e disposição final. E cada um destes divididos em custos de investimento e custos operacionais. O objetivo deve ser agrupar os custos conforme sua natureza, para deixar clara a comparação entre diferentes métodos.

Impacto ambiental: deve-se analisar os impactos positivos e os negativos, visando através de procedimentos operacionais minimizar os impactos negativos (SPERLING et al., 2001).

2.4 SECAGEM TÉRMICA

A secagem térmica desponta atualmente como alternativa para obtenção de lodo de ETE com reduzido teor de umidade, sendo sugerido por Sperling et al. (2001) como uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução da umidade presentes nas tortas de lodo provenientes do desaguamento deste.

Sanin et al. (2010) também menciona que a secagem térmica está em uma crescente, pois perante as demais alternativas para disposição e tratamento de lodo, a secagem térmica apresenta maior potencial de crescimento.

Devido às pressões ambientais acerca deste tema, a pesquisa e desenvolvimento de novos equipamentos de secagem térmica têm ressurgido, pois as tecnologias antigas careciam de uma melhora no balanço energético, embora ainda fossem efetivas. O desenvolvimento desta tecnologia aplicada no tratamento de lodos tem despertado então o interesse no mercado para que seja possível a sua secagem ainda no estágio de lodo bruto, eliminando os demais estágios de tratamento (SPERLING et al., 2001).

A etapa de estabilização biológica e higienização podem ser excluídas do tratamento, em vista que o processo de secagem térmica elimina os patógenos e estabiliza o lodo através da aplicação de calor, gerando um lodo ainda mais estável e higiênico, como afirma Sanin et al. (2010). Segundo Sperling et al. (2001) isso é assimilado como uma redução significativa do custo de implantação, além da obtenção de um produto final com maior teor de matéria orgânica e poder calorífico, o que agrega valor a este, favorecendo o uso agrícola e seu uso como combustível.

Lee e Santos (2011) afirma que o lodo seco pode então ser utilizado como biomassa devido ao seu poder calorífico, sendo este similar ao da madeira. Sugere ainda

que as cinzas residuais do processo de queima do lodo podem ser incorporadas em materiais cerâmicos e blocos de concreto, reciclando toda a matéria. O autor menciona ainda que o lodo seco pode ser queimado em consórcio com outras biomassas, como cascas de arroz e serragem, melhorando o poder calorífico do combustível e associando o uso de diferentes resíduos.

Quanto ao emprego do lodo na agricultura, Lee e Santos (2011) menciona como maior dificuldade o emprego de um controle qualitativo extremamente rigoroso, descrito pela Resolução CONAMA nº 375 de 2006, onde há o controle de parâmetros como a ausência de substâncias químicas tóxicas e patógenos. Tal dificuldade é minimizada quando aplicado o processo de secagem térmica ao tratamento do lodo, pois este apresentar-se-á como um produto mais estabilizado e higiênico.

Através da secagem térmica do lodo a massa e o volume são muito reduzidos, e o tratamento do lodo torna-se muito mais fácil, reduzindo significativamente também os custos de transporte. Contudo, a secagem térmica não é isenta de problemas, trata-se de uma alternativa com custo elevado e que pode apresentar problemas com relação a produção de odores e poeiras. Além disso, se faz necessária uma pré-seleção do equipamento secador vinculada ao lodo que será tratado, o que nem sempre é simples (SANIN et al., 2010).

2.5 PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA

Pinheiro (2012) diz que a secagem térmica consiste na aplicação de calor ao lodo visando a evaporação da umidade presente e, por consequência, o aumento da concentração de sólidos totais.

David (2002) define a secagem térmica como um processo de melhoria da qualidade dos lodos que gera como produto final biossólidos Classe A, que podem ser aplicados ao uso agrícola sem grandes restrições.

Para Sperling et al. (2001) o processo de secagem térmica é bastante flexível, podendo ser conduzido para a formação de “pellets” que poderão ser aplicados na agricultura, como material combustível, ou disposto em aterro sanitário, caso não haja alternativa de uso. A Figura 2 mostra a tipologia do material granular – “pellets” – oriundos do processo de secagem térmica.

Figura 2 – Tipologia do material granular – “pellets” – oriundo do processo de secagem térmica

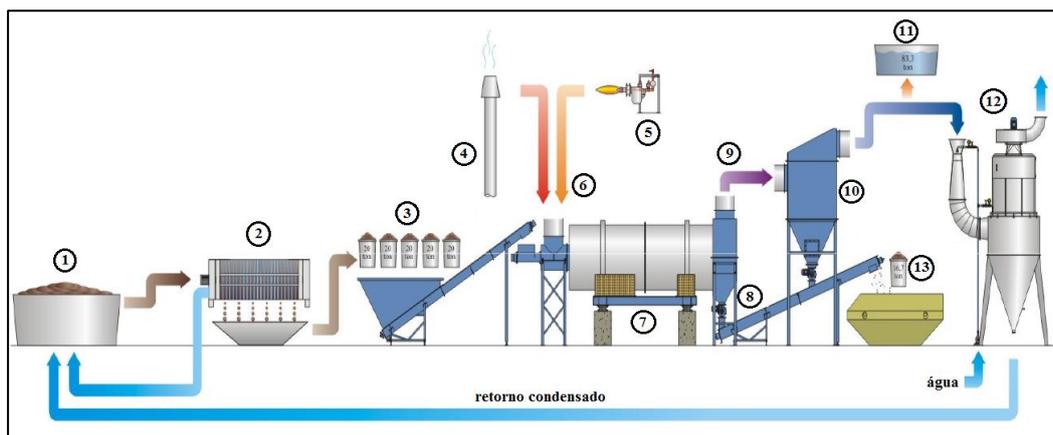


Fonte: De Sena (2007)

David (2002) define como principal objetivo da secagem térmica a redução do teor de umidade presente no lodo, sugerindo que a secagem térmica pode atingir concentrações de sólidos totais da ordem de 90 a 95%, o que reduz significativamente a massa final dos lodos gerados. Outro objetivo definido pelo autor é a eliminação dos organismos patogênicos através da aplicação de calor.

Na Figura 3 é possível verificar um fluxograma de um processo de secagem térmica desenvolvido pela empresa Albrecht.

Figura 3 – Fluxograma de secagem térmica por tambor rotativo da empresa Albrecht



Fonte: Adaptado de Ferreira (2009) - Albrecht

A seguir há a indicação de cada etapa do processo de tratamento do lodo de ETE representado na Figura 3:

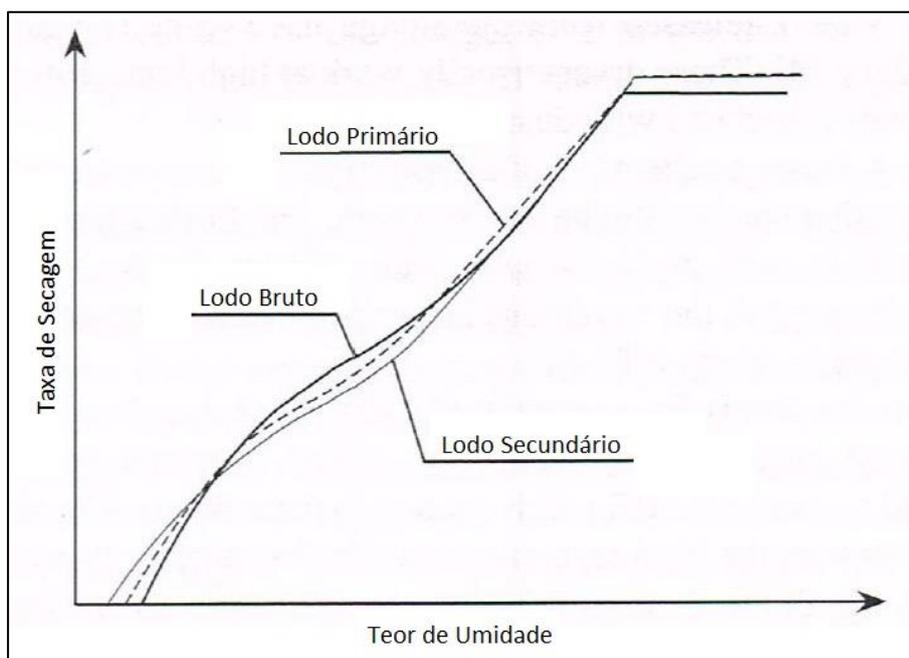
- 1 – Estação de tratamento de esgotos – ETE;
- 2 – Desaguamento: centrífuga, filtro prensa, leito de secagem, etc;
- 3 – Alimentação do secador térmico: lodo com concentração de sólidos totais na ordem 15 – 25%;
- 4 – Fonte de energia alternativa: biogás, biomassa, etc;
- 5 – Queimador;
- 6 – Geração de energia;
- 7 – Secador rotativo;
- 8 – Saída material granulado;
- 9 – Saída de gases, vapor d'água e particulados;
- 10 – Multiciclone: remoção de finos;

- 11 – Água removida;
- 12 – Lavador de gases;
- 13 – Material granulado seco: concentração de sólidos totais na faixa de 90 – 95% para disposição final.

Sanin et al. (2010) explica que o processo de secagem ocorre devido a transferência de massa e calor entre o lodo e o ar, através de movimentos da umidade da área mais concentrada para a área de menor concentração, sendo a difusão a força motriz deste movimento. Contudo esta transferência de umidade não é constante até o final da secagem, a taxa de secagem pode variar de acordo com o tipo de lodo e de secador.

De maneira abrangente a taxa de secagem permanece constante em uma primeira etapa, etapa esta que representa a remoção da água livre presente no lodo. Numa segunda etapa temos uma taxa decrescente de secagem, que representa a água intersticial sendo removida. Em uma terceira etapa a secagem também ocorre por uma taxa decrescente, a qual representa a eliminação da água vicinal ou água de superfície, que é a camada de moléculas de água ligadas a superfície das partículas sólidas por ligações de hidrogênio. Finalmente, a taxa passa para zero, representando que toda a água que poderia ser removida a tal temperatura já foi evaporada, permanecendo no lodo apenas a água quimicamente ligada. Um esquema destas fases de variação da taxa de secagem pode ser visualizado na Figura 4 (SANIN et al., 2010).

Figura 4 – Esquemático da variação da taxa de secagem



Fonte: Adaptado de Sanin et al., 2010

Segundo Sanin et al. (2010) os custos de implantação variam de acordo com o sistema a ser adotado e como este sistema será integrado com o restante da planta de tratamento. Já os custos de operação são influenciados diretamente pelos custos com o combustível para aquecimento e a exigência de concentração de sólidos final.

A geração de calor é obtida pela queima de algum combustível, como gás natural, biogás, óleo combustível, entre outros, conforme mencionado por David (2002). O autor menciona ainda que a energia necessária para o aquecimento irá variar em torno de fatores como a umidade inicial e final do lodo, equipamento adotado, eficiência do equipamento, o aproveitamento ou recuperação da energia oriunda de outro processo dentro da ETE, etc.

David (2002) faz uma generalização quanto a energia necessária para evaporar a água contida no lodo, com base nas informações de fabricantes de secadores. O autor sugere que para cada kg de água evaporada a energia necessária é da ordem de 800 a 1000 kcal.

O custo de operação irá girar então, em torno da alternativa energética que será adotada, variando de acordo com o preço do combustível, consumo mensal e eficiência do equipamento (DAVID, 2002).

Quanto ao controle de emissões, David (2002) diz que duas medidas de controle importantes devem ser adotadas, a coleta de materiais particulados e a eliminação de odores. Os materiais particulados constituem o principal poluente dos sistemas de secagem, o que acarreta tal importância para sua coleta. Já os odores causam um mal-estar na população circundante para com a ETE, resultando em um desconforto que pode ser evitado. Tecnologias como multiciclones, para separação de finos, e lavadores de gases podem solucionar tais inconvenientes.

Há três formas de secagem térmica segundo Pinheiro (2012), descritas a seguir:

- Por convecção: quando há o contato direto do lodo com os mecanismos de transferência de calor, como gases aquecidos, podendo ser chamado também como secagem direta;
- Por condução: o lodo não entra em contato direto com o fluido aquecido, podendo ocorrer através de placas de troca térmica, e conhecido também como secagem indireta;
- Por radiação: utiliza energia radiante como fonte de calor.

Já para Sperling et al. (2001) a divisão ocorre em apenas dois grandes grupos, os de secagem direta e indireta. Contudo, em todos os sistemas são necessários equipamentos de confinamento e tratamento dos vapores e poeira liberados dos secadores, evitando a emissão destes contaminantes na atmosfera. Sanin et al. (2010) menciona ainda secadores mistos, onde a secagem ocorre tanto por convecção quanto por condução.

2.5.1 Secadores diretos ou convectivos

Nos secadores diretos há passagem de ar quente sobre o lodo, funcionando normalmente a temperaturas elevadas (SANIN et al., 2010). Este meio gasoso que proporcionará a secagem do lodo deve ser insaturado, para que a umidade contida na parte sólida possa ser transferida para a fase gasosa (DAVID, 2002).

David (2002) menciona que a vantagem dos secadores diretos é que a taxa de troca de calor é mais elevada, devido ao contato direto do meio de secagem com o lodo, possibilitando a secagem do lodo à concentração de sólidos maiores que 80%. David (2002) explica ainda que para atingir taxas maiores de transferência de calor, seria preciso um cuidado para evitar a aderência das partículas umas às outras, função esta que pode ser obtida através do reciclo da fração mais fina do lodo seco para a entrada do sistema de secagem.

A principal desvantagem citada por Frost (1990) apud David (2002) é a geração de grande quantidade de gases com odores, que provém do uso de gases e ar como meio de secagem. E o tratamento destes não é de simples manejo, podendo originar problemas de operação, além de um custo adicional para o tratamento dos odores.

Tais secadores podem ser dos tipos flash, tambor, rotativo, spray, leito fluidizado, entre outros, conforme citado por Sanin et al. (2010). Os secadores flash estão entre os mais usados o qual consiste no bombeamento do lodo úmido para uma coluna de ar quente, onde o vapor de água será expelido. Já os secadores rotativos são compostos por uma casca cilíndrica rotativa, ligeiramente inclinada com um rolamento. O lodo e o meio de secagem movem-se para a extremidade de descarga, enquanto a rotação do tambor propicia a mistura destes (SANIN et al., 2010). A Figura 5 mostra um secador rotativo desenvolvido pela empresa Albrecht.

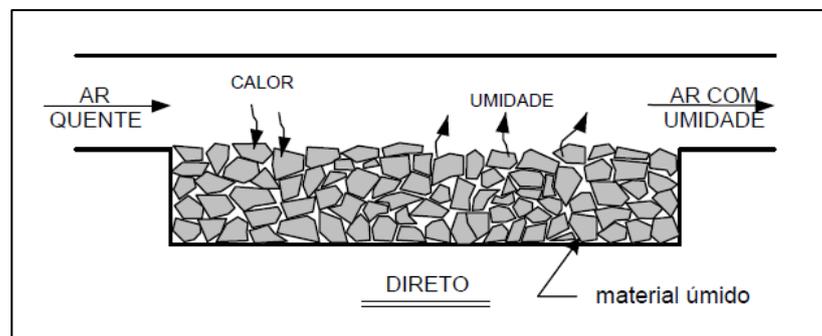
Figura 5 – Secador tipo rotativo desenvolvido pela empresa Albrecht



Fonte: Ferreira (2009) - Albrecht

Na Figura 6 é apresentado um esquemático do processo de secagem direta.

Figura 6 – Esquemático do processo de secagem direta ou convectiva



Fonte: David, 2002

2.5.2 Secadores indiretos ou condutivos

Segundo David (2002), nos secadores indiretos o lodo não entra em contato com o meio de secagem, sendo estes separados por uma parede metálica. Sanin et al. (2010) explica que neste tipo de secadores a transferência de calor ocorre por condução, o que propicia que a água evaporada não se misture com o fluido de aquecimento.

O meio de transferência de calor geralmente é vapor saturado ou óleo térmico, sua temperatura deve ser superior à do lodo úmido para que a transferência de calor possa ocorrer através da parede metálica (DAVID, 2002).

David (2002) descreve que o vapor formado a partir da evaporação da umidade presente no lodo fica acima da camada de lodo e em contato com este. Para que a umidade do lodo passe para a corrente de ar, um escoamento de ar de arraste é aplicado, levando o vapor para fora do secador. Além deste objetivo, o escoamento deste ar de arraste também inibe a condensação de vapor dentro do secador.

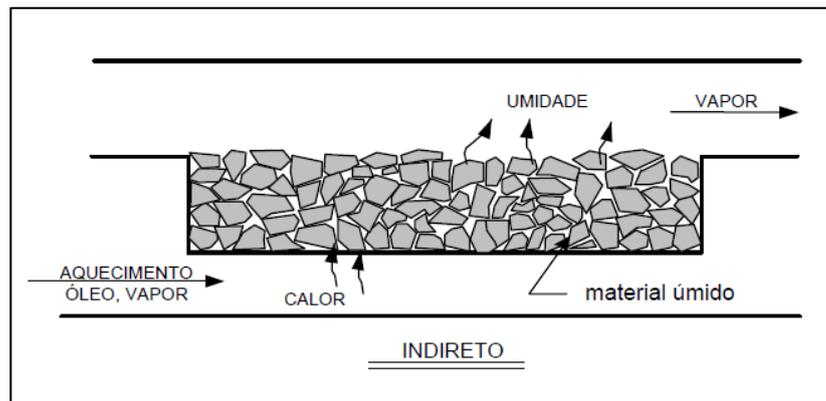
O lodo permanece em contato com a superfície metálica quente e, para evitar que o lodo seco fique aderido a superfície e para que a taxa de transferência de calor seja efetiva para todo o sistema, precisa ser revolvido através de agitação do lodo ou raspagem da superfície metálica, segundo David (2002).

Sanin et al. (2010) menciona como secadores indiretos os secadores à remo, secadores de disco, entre outros. Nos secadores à remo o lodo é alimentado na parte dianteira através de uma tampa superior, o secador deve ser colocado em um pequeno declive, para que o lodo mova-se através da gravidade. Este secador é dotado de pás, que tem a função de transferir o calor para o lodo e propiciar sua mistura. O lodo seco é direcionado para a unidade de descarga, saindo do secador pela parte inferior.

Para Sanin et al. (2010) a vantagem deste tipo de secador é a pouca produção de poeiras e problemas mínimos de poluição do ar. Contudo, como desvantagem o autor cita a baixa eficiência e tempos de secagem maiores quando comparados com secadores diretos.

A Figura 7 ilustra o processo de secagem indireta ou condutiva.

Figura 7 – Esquemático do processo de secagem indireta ou condutiva



Fonte: David, 2002

2.5.3 Secadores mistos

Estes secadores utilizam uma combinação de transferência de calor por condução e por convecção, segundo Sanin et al. (2010). O autor exemplifica o caso dos secadores de leito fluidizado onde o calor é fornecido tanto através da injeção de ar quente à fluidificação quanto pelo aquecimento das superfícies, o que acaba por fornecer o calor necessário para secagem, possibilitando chegar a teores de sólidos de 95%, o que deixa esta técnica muito atraente quanto a eficiência de secagem.

2.5.4 Secadores por radiação

Os secadores por radiação fazem uso de elementos de aquecimento de alta temperatura que não entram em contato direto com o lodo. Estes elementos de aquecimento podem ser lâmpadas infravermelhas, resistências elétricas ou refratários incandescentes aquecidos a gás, que irão transferir a energia radiante para o lodo úmido (SANIN et al., 2010).

Segundo David (2002) estes secadores apresentam forma retangular, orientados horizontalmente, e o mecanismo de transporte é constituído por uma esteira, onde uma fina camada de lodo é depositada e transportada pelo interior do secador. Durante o trajeto, o lodo recebe o calor oriundo de uma fonte de radiação. Não há o contato direto do meio de secagem com o lodo, entretanto é necessária uma corrente de ar para o arraste da umidade evaporada.

Sanin et al. (2010) comenta que estes secadores raramente são usados para a secagem de lodos, pois apresentam alto custo operacional.

3 METODOLOGIA

A metodologia de trabalho adotada baseou-se inicialmente em uma busca na literatura sobre o tema abordado, contextualizando o cenário atual da problemática do lodo e visando obter dados sobre o quão a secagem térmica deste resíduo poderia ser praticável e, além disso, ser tratada como uma alternativa cabível de implantação num cenário próximo. Isso se desenvolveu pesquisando tanto pontos positivos quanto negativos da secagem térmica, para que fosse possível pesar a viabilidade da técnica.

Para trabalhar com este acervo teórico, buscou-se um método de análise que fugisse da avaliação pessoal e adotasse uma medida imparcial, passível de aplicação para qualquer outro método, possibilitando comparações entre estes.

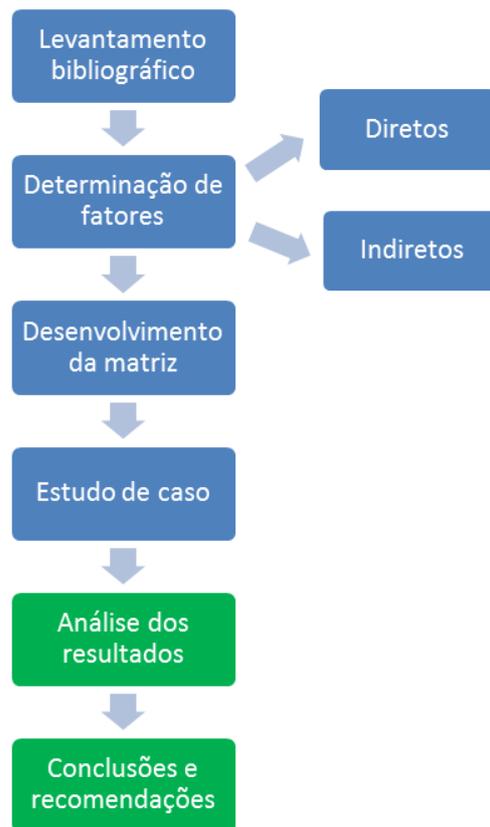
Este método de análise consistiu em determinar os fatores de maior relevância no tratamento e disposição final de lodos de esgotos domésticos, com base na literatura disponível, e avaliar se a secagem térmica se enquadraria dentro destes fatores.

Para desenvolver isto, foi criada uma matriz que inter-relaciona os fatores selecionados com a secagem térmica de maneira positiva ou negativa. Dessa forma, através do somatório da matriz, o saldo seria positivo ou negativo, indicando a viabilidade ou não da aplicação da técnica, respectivamente.

Além disso, também foi desenvolvido um estudo de caso para a ETE Serraria, unidade do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), localizada em Porto Alegre, onde foram estimados os resultados da implantação do sistema de secagem térmica de lodos da ETE.

A Figura 8 apresenta o fluxograma da metodologia de trabalho adotada.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia de trabalho adotada



No decorrer do capítulo, a metodologia de trabalho acima descrita será desenvolvida de forma explícita.

3.1 DETERMINAÇÃO DOS FATORES

Com base na literatura revisada, foram percebidos fatores que se destacavam como grandes influentes do processo de tratamento de lodos de ETEs. Tais fatores acabavam por ser frequentemente mencionados e alinhavados com quaisquer outras questões acerca do tema. Então estes foram considerados fatores de influência direta, e são definidos como essenciais para o sucesso da aplicação de qualquer técnica de tratamento e disposição final de lodos de esgotos domésticos.

Além destes, ocorreram fatores que maximizavam os pontos positivos do tratamento, minimizavam problemas recorrentes e agregavam valor ao produto final. Estes fatores foram definidos como fatores de influência indireta.

Contudo, o valor atribuído a estes fatores, tanto diretos, quanto indiretos, serão de mesma magnitude, em vista que todos acabam influenciando o tratamento e no caso de escolha da técnica, todos estes fatores devem ser ajustados para que o desempenho do processo seja o mais eficiente possível. Serão assim designados então, apenas para distinção de fatores fundamentais e fatores de melhorias do processo.

Os fatores de influência direta são:

- Concentração final de sólidos totais;
- Custo de implantação e operação.

E os fatores de influência indireta são:

- Número de etapas do processo de tratamento do lodo;
- Custo de transporte;
- Facilidade de disposição final do resíduo.

3.1.1 Concentração final de sólidos totais

O fator concentração final de sólidos totais apresenta grande importância dentro da escolha de um processo de tratamento de lodos de esgoto, em vista que quanto maior a concentração de sólidos, menor será o volume final de resíduo do tratamento.

Minimizar o volume de resíduo final é o grande objetivo do tratamento, pois diminui o custo com transporte deste e sua disposição final. Logo processos que atinjam concentrações de sólidos altas ganham destaque.

3.1.2 Custo de implantação e operação

O custo do processo de tratamento também influi diretamente na escolha do método, assim como em qualquer outra área de atuação. A viabilidade econômica é parte integrante de qualquer escolha de processo.

Dessa maneira, por mais que o processo seja extremamente eficiente no tratamento de lodos, se o seu custo de implantação e operação não estiverem dentro da realidade econômica dos responsáveis pela ETE, este processo será descartado.

No processo de secagem térmica o termo mais influente é custo operacional que está vinculado ao gasto energético que a técnica demanda. O processo necessita de uma fonte energética constante para aquecimento do meio secante, o que pode acarretar um custo elevado com combustível.

3.1.3 Número de etapas do processo de tratamento do lodo

Quanto mais etapas contiver o processo de tratamento de lodo, mais dispendioso e caro este será. Tão logo, existindo processos que unam etapas, diminuindo este número de etapas final, haverá uma economia de tempo e dinheiro, que trará benefícios para o gerenciamento da ETE.

Contudo, deve ocorrer um rigor quanto à eliminação de etapas, este procedimento deve ser ajustado para verificar a viabilidade que o processo apresentado tem de unir etapas em um único procedimento, para que não ocorram problemas de operação no decorrer do tratamento.

3.1.4 Custo de transporte

O custo com transporte está vinculado com outros dois fatores: o custo de operação da ETE e a concentração final de sólidos totais. É tratado a parte, pois representa um grande percentual dentro dos custos totais da destinação do lodo.

Este fator é composto pela somatória de dois parâmetros: o volume a ser transportado e a distância a ser percorrida. Quanto maior o volume e a distância de transporte maior o custo deste. Assim, já na etapa de escolha do processo de tratamento do lodo deve-se observar o volume de resíduo que será gerado após o tratamento e qual o destino final deste.

Também é importante a análise do uso ou reciclagem do lodo de ETE após o tratamento, possibilitando a inserção deste resíduo numa área próxima ao local, verificando as alternativas que a comunidade do entorno da ETE possibilita para este resíduo, evitando assim grandes deslocamentos.

3.1.5 Facilidade de disposição final do resíduo

Outro ponto de influência considerável na escolha do tratamento do lodo de ETE é a sua destinação final após o mesmo. Tal escolha dependerá diretamente das etapas anteriores do processo. De acordo com as características do lodo após tratamento será possível a escolha da próxima etapa de destinação final.

Na escolha do destino final do lodo de ETE deve-se primeiramente buscar alternativas como uso ou reciclagem, deixando a disposição em aterro sanitário como última opção, em vista do esgotamento destes locais e o custo associado a esta prática, observando-se a ordem de prioridade estabelecida pela Lei 12.305 (2010) que institui a

Política Nacional de Resíduos Sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final adequada dos rejeitos. Por isso, lodos com características higiênicas e em quantidade menores apresentam uma maior facilidade de inserção nos métodos de uso e reciclagem, o que é um ponto positivo na escolha no processo.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ

Pensou-se na matriz de forma a inter-relacionar os fatores descritos anteriormente com o processo de secagem térmica. Dessa forma, pode-se verificar se a secagem térmica se relacionaria positivamente ou negativamente com os fatores de escolha do tratamento de lodos.

Para que isso fosse possível, os fatores foram dispostos em linhas em uma primeira coluna. Na segunda coluna relacionou-se os fatores de forma positiva com a secagem térmica. E na terceira coluna relacionou-se a secagem térmica de forma negativa com os fatores.

Na base da matriz foi adicionado um somatório das colunas positivas e negativas, onde foi obtido o parecer positivo ou negativo do processo de secagem térmica para com os fatores determinantes de escolha do tratamento de lodos.

Assim, preencheu-se a matriz analisando cada um dos fatores e determinando se a relação era positiva ou negativa. Caso positiva, atribui-se um valor unitário na linha deste fator na segunda coluna. Já negativa, atribui-se um valor unitário negativo na linha do fator em questão na terceira coluna. A atribuição positiva ou negativa aos fatores se deu com base na literatura pesquisada no capítulo 2 deste trabalho.

Na Figura 9 é apresentada a matriz, ainda sem preenchimento.

Figura 9 – Matriz de inter-relação dos fatores de escolha do tratamento de lodo com o processo de secagem térmica

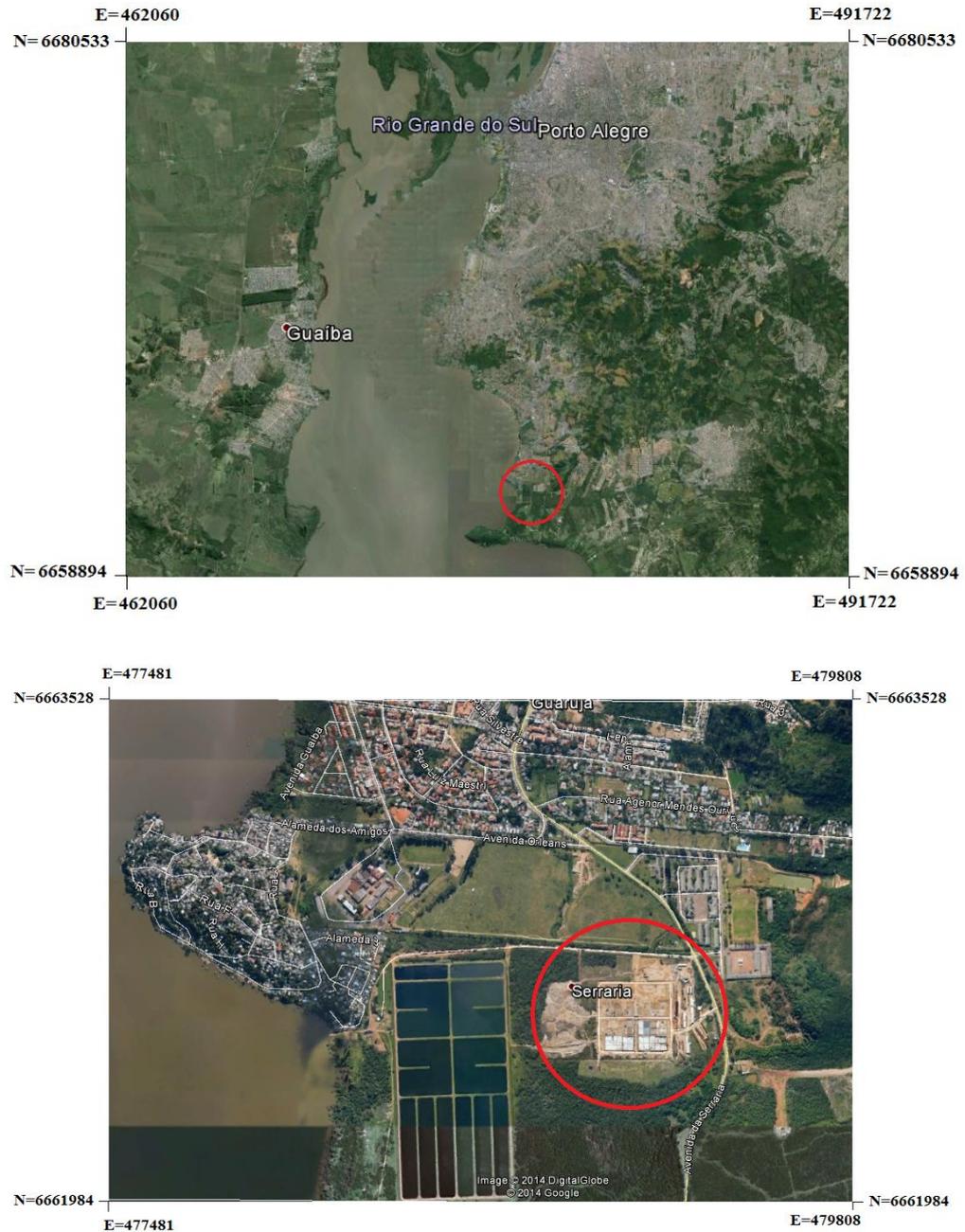
		Parâmetro	Secagem Térmica	
			Positivo	Negativo
Influência direta		Concentração final de sólidos		
		Custo de implantação e operação		
Influência indireta		Nº de etapas do processo de tratamento do lodo		
		Custo de transporte		
		Facilidade de disposição final do residuo		
SALDO =				

3.3 ESTUDO DE CASO ETE SERRARIA

A ETE Serraria está localizada no bairro Serraria, situado na zona sul do município de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul. Foi construída através dos fundos do Programa Integrado Sócio-Ambiental - PISA e entrou em operação no ano de 2014. A ETE tem capacidade para tratar 80% dos esgotos gerados no município de Porto Alegre, e uma vazão máxima afluyente de 4.115 m³/s, segundo as informações fornecidas pelos operadores da ETE.

Na Figura 10 é possível ver a localização da ETE, circulada em vermelho.

Figura 10 – Localização da ETE Serraria



Fonte: Google Earth, 2014

Para estimar os resultados de uma implantação do processo de secagem térmica para os lodos da ETE Serraria foi realizada uma visita técnica ao local no dia 12 de novembro de 2014, na qual os técnicos repassaram dados e informações dos sistemas de tratamento adotados na ETE.

A ETE Serraria conta com tratamento preliminar composto de gradeamento grosseiro, gradeamento fino e desarenador. Para tratamento secundário a ETE conta com reatores UASB (tratamento anaeróbio). No local é adotado também tratamento terciário, para remoção de nitrogênio, através de unitanques. A ETE conta ainda com queimadores de gás, para a queima do metano produzido no reator UASB e biofiltros para eliminação de odores. Na Figura 11 é apresentada uma vista aérea da estação.

Figura 11 – Vista aérea da ETE Serraria



Fonte: Blog Porto Imagem – Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2014

O excesso de lodo do reator UASB é direcionado para as caixas de lodo para armazenamento, de onde é bombeado para o processo de tratamento de lodo. Na Figura 12 é possível ver as bombas responsáveis por esta etapa, tratam-se de bombas especiais para bombeamento de semi-sólidos.

Figura 12 – Bombas para bombeamento do lodo da caixa de armazenamento para o tratamento



Para tratamento do lodo a ETE conta com uma etapa de condicionamento que visa melhorar as propriedades do lodo para o desaguamento, no local é adotado como coagulante polímeros. Na figura 13 é possível verificar esta etapa do tratamento.

Figura 13 – Condicionamento ETE Serraria



A ETE conta também com uma etapa de adição de cal ao lodo, com o objetivo de remoção de fósforo. Esta etapa pode ser visualizada na Figura 14.

Figura 14 – Adição de cal para remoção de fósforo na ETE Serraria



A desidratação do lodo na ETE Serraria é realizada através de centrífugas rotativas, que atingem uma concentração de sólidos totais na faixa de 20 a 25%. As centrífugas podem ser visualizadas na Figura 15.

Figura 15 – Centrífugas ETE Serraria

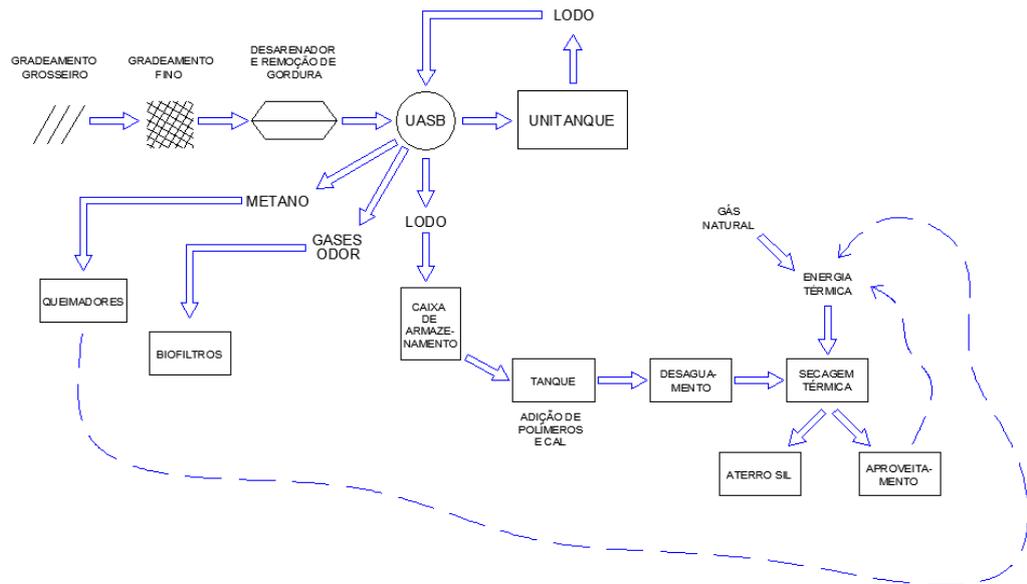


Após a desidratação, o lodo é direcionado para o aterro sanitário da Sil Soluções Ambientais localizado no município de Minas do Leão, a cerca de 106 km da ETE Serraria.

Contudo a etapa de tratamento de lodo ainda não está em funcionamento na ETE Serraria, os equipamentos do tratamento ainda passam por ajustes de projeto. Enquanto isso, o lodo vem sendo armazenado nas caixas de lodo, e quando cheias, o lodo é recirculado para o tratamento. Essa medida pode ser adotada na ETE porque a tecnologia de tratamento por reatores UASB está entre as técnicas que produzem menor volume de lodo.

Considerando a implantação do sistema de secagem térmica na ETE Serraria obtemos o fluxograma apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma de implantação do processo de secagem térmica na ETE Serraria



Com a visita a ETE Serraria no dia 12 de novembro de 2014, foi possível ter uma visão abrangente da problemática dos lodos e de todo o funcionamento do tratamento de esgotos domésticos adotados no local. E através dos dados fornecidos e pesquisa na literatura acerca do assunto, foi possível fazer uma estimativa para a aplicação do processo de secagem térmica no local.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação das técnicas de determinação dos fatores de influência na decisão da escolha do tratamento de lodos e ordenação destes fatores em uma matriz de inter-relação e também a aplicação do processo de secagem térmica no estudo de caso da ETE Serraria / Porto Alegre, descritas no capítulo 3.

4.1 MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO

Para cada fator de decisão foi atribuída uma relação positiva ou negativa com o processo de secagem térmica. A justificativa para atribuição positiva ou negativa de cada fator está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação positiva ou negativa de cada fator para com a secagem térmica

Fator	Relação Positiva	Relação Negativa	Justificativa
Concentração final de sólidos	X		A concentração final de sólidos obtida no processo de secagem térmica é muito superior a obtida em processos de desidratações tradicionais, podendo alcançar concentrações de sólidos de 90 a 95%.
Custo de implantação e operação		X	O custo de implantação e operação do processo é considerado caro. O principal fator que eleva o custo de operação é o gasto associado ao consumo energético para aquecimento do meio secante do processo.
Nº de etapas do processo de tratamento do lodo	X		Com a adoção da secagem térmica etapas como a higienização podem ser descartadas, em vista que o processo de secagem térmica tem a propriedade de eliminação dos microrganismos patogênicos devido as altas temperaturas aplicadas no processo.
Custo de transporte	X		O custo de transporte fica muito reduzido, em virtude do mínimo volume de resíduo final produzido pela secagem térmica, conquistado pela eliminação da porcentagem de água do lodo.
Facilidade de disposição final do resíduo	X		Com um resíduo final estabilizado, higiênico e com elevada concentração de sólidos, as possibilidades de reuso e reciclagem deste material são magnificadas. O reuso em solo agrícola também é uma alternativa muito viável, em vista que o processo de secagem térmica não destrói a matéria orgânica presente no lodo, mantendo as propriedades fertilizantes do material.

Fonte: Adaptado de Sperling et al. (2001), Andreoli et al. (2001), Sanin et al. (2010), David (2002) e Pinheiro (2012)

Após a atribuição de valores foi obtida a matriz que pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 – Matriz de inter-relação dos fatores de escolha do tratamento do lodo e o processo de secagem térmica

		Secagem Térmica	
		Positivo	Negativo
Parâmetro			
Influência direta	Concentração final de sólidos	1	
	Custo de implantação e operação		-1
Influência indireta	Nº de etapas do processo de tratamento do lodo	1	
	Custo de transporte	1	
	Facilidade de disposição final do resíduo	1	
SALDO =		3	

Como pode ser visualizado na Figura 16, o saldo da matriz de inter-relação é de 3 pontos positivos. Dessa maneira, o parecer obtido da matriz é positivo, atribuindo viabilidade ao processo de secagem térmica para tratamento de lodos de ETE. No segmento técnico a secagem térmica apresenta fortemente evidência positiva. Já no segmento econômico aparece a negatividade do processo. Contudo a positividade se sobressai, o que caracteriza a utilização da secagem térmica para lodos de esgotos domésticos como viável.

Para uma melhor análise da negatividade relacionada ao custo de operação e implantação se faz necessário um detalhamento de todos os custos atrelados a estas etapas, para uma possível identificação de pontos dispendiosos, possibilitando o aprimoramento do processo ou o uso de materiais e combustíveis com custos mais acessíveis.

4.2 ESTUDO DE CASO ETE SERRARIA

A estimativa para a ETE Serraria foi feita com base na vazão média da estação, que é de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$, informação obtida através da visita técnica realizada. Segundo Sperling et al. (2001) o lodo corresponde a cerca de 1% a 2% do volume de esgoto tratado. Considerou-se para a estimativa que o lodo representa 1,5% do volume de esgoto tratado, obtendo uma vazão de lodo de $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sorme (2002) apud Santos et al. (2012) menciona que o lodo é composto por cerca de 98% de água e 2% de sólidos. Através do processo de centrifugação já adotado na ETE é possível elevar a concentração de sólidos totais para uma faixa de 20% a 25%. Para a estimativa foi adotada uma concentração de sólidos totais de 22,5% após a centrifugação.

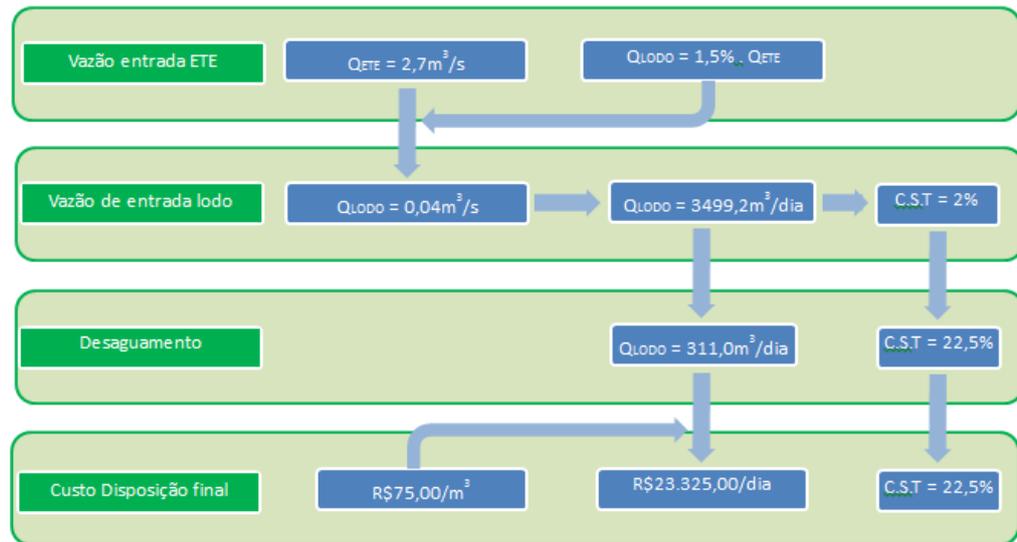
A secagem térmica pode atingir concentração de sólidos de cerca de 90% a 95% segundo David (2002). Foi definido como objetivo final da estimativa obter uma concentração de sólidos de 92,5%.

Para calcular o gasto energético para evaporar este volume de água, utilizou-se como base o trabalho de David (2002). Considerou-se como fonte de energia para a secagem térmica o gás natural, que segundo David (2002) apresenta poder calorífico de $9.400 \text{ kcal}/\text{m}^3$ e cujo o custo é de cerca de R\$ $0,50/\text{m}^3$. Adotou-se também que o equipamento de secagem térmica apresenta eficiência térmica de evaporação de 1 Kg de água com 900 kcal, também sugerido por David (2002).

Para dispor o resíduo final no aterro sanitário da Sil, em Minas do Leão, o valor para descarte é de cerca de R\$ $75,00/\text{ton}$, conforme informado pelo próprio aterro. Como o peso do material sólido do lodo é desconhecido e variável, adotou-se o peso da água para fins de cálculo, sendo 1 tonelada correspondente a 1 m^3 .

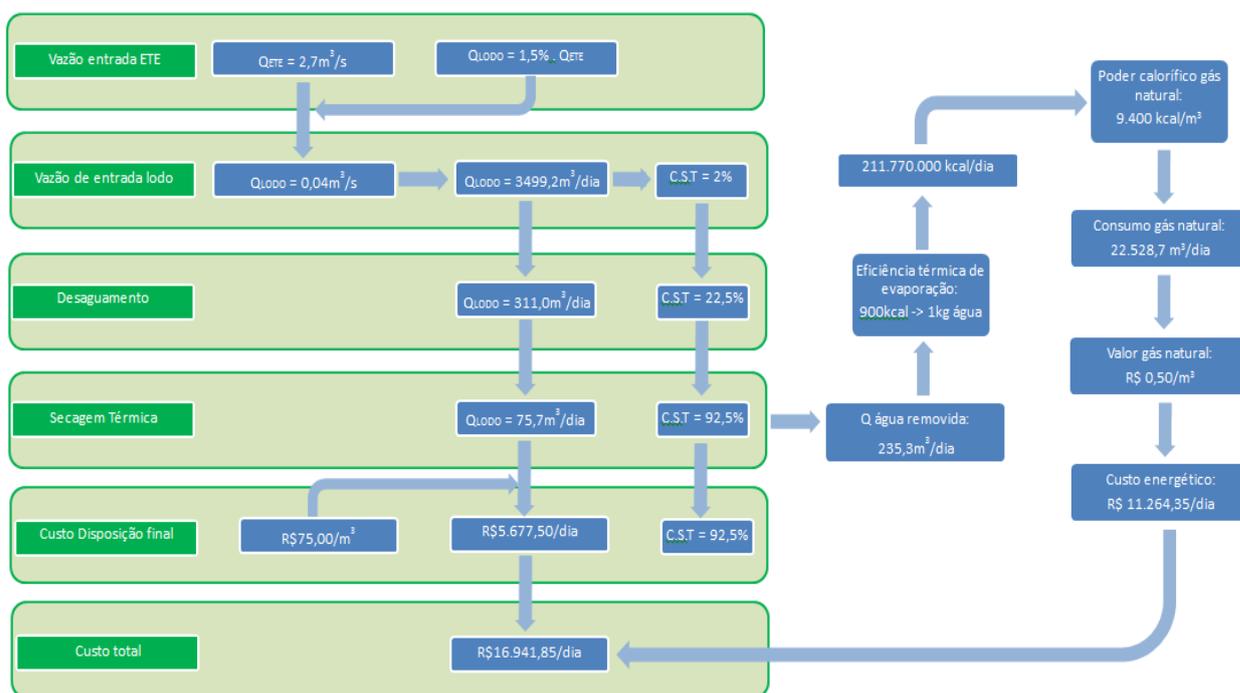
Feitas as considerações anteriormente, a Figura 18 apresenta o memorial de cálculo para a ETE Serraria antes da implantação do processo de secagem térmica, sendo a Concentração de Sólidos Totais abreviada como C.S.T.

Figura 18 – Memorial de cálculo antes da implantação da secagem térmica



Já a Figura 19 apresenta o memorial de cálculo com a implantação do processo de secagem.

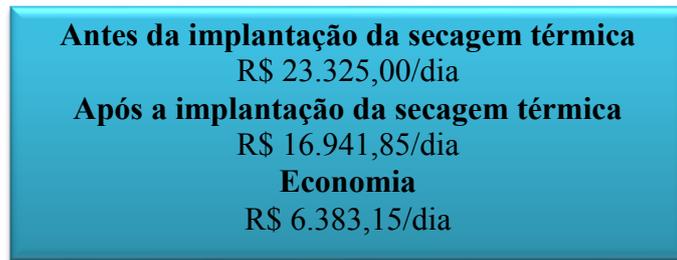
Figura 19 – Memorial de cálculo pós a implantação da secagem térmica



Os custos estimados não contemplam a etapa de transporte, mão-de-obra e de implantação do processo, por isso, apesar da adição do custo energético, a implantação do processo de secagem térmica resultou ainda em uma economia de cerca de R\$ 6.380,00/dia.

Lee e Santos (2011) sugerem que o lodo seco apresenta poder calorífico semelhante ao da madeira, o que com a formação de “pellets” poderia ser uma alternativa viável para seu uso como fonte energética no processo, diminuindo o custo com gás natural. Além disso, também seria possível aproveitar o poder calorífico do gás metano produzido nos reatores UASB. A Figura 20 mostra um resumo dos resultados obtidos.

Figura 20 – Quadro resumo dos resultados encontrados para a ETE Serraria



Antes da implantação da secagem térmica
R\$ 23.325,00/dia
Após a implantação da secagem térmica
R\$ 16.941,85/dia
Economia
R\$ 6.383,15/dia

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Através da pesquisa bibliográfica foi possível abordar a temática do tratamento de lodos oriundos de ETEs e associá-lo ao processo de secagem térmica, atingindo definições claras e posicionamentos positivos quanto ao emprego da técnica.

Com o levantamento bibliográfico foi possível então a determinação dos fatores fundamentais para o tratamento de lodos de esgotos domésticos, sendo estes subdivididos em fatores de influência direta e influência indireta, viabilizando uma análise impessoal do tratamento.

Os parâmetros determinados se mostraram adequados e coerentes, confirmando o apresentado pela literatura e possibilitando o desenvolvimento da matriz de inter-relação.

Através do desenvolvimento da matriz os fatores determinados puderem ser dispostos de maneira a se inter-relacionar positivamente ou negativamente com o processo de secagem térmica. Ao solucionar a matriz, através da soma dos pontos positivos e negativos, verificou-se se o processo de secagem térmica se enquadraria dentro dos fatores fundamentais do tratamento de lodos.

Obteve-se como o resultado da matriz foi de 3 pontos positivos, assim pode-se concluir que a aplicação do processo de secagem térmica para o tratamento de lodos de esgotos domésticos é viável.

Os fatores do segmento técnico do tratamento mostraram forte evidência positiva, pois a técnica possibilita uma grande redução de volume que não pode ser alcançada com o tratamento convencional, além da redução do número de etapas do tratamento, unificando etapas como a higienização e desaguamento, e a abertura de um

leque de opções para disposição final do resíduo, em vista que este está mais estabilizado e higiênico.

A negatividade do processo aparece ao tratarmos do segmento econômico, que abrange tanto a implantação quanto a operação do processo de secagem. O investimento para implantação da técnica é relativamente alto quando comparado ao tratamento convencional, contudo, diante de empecilhos como a falta de área para implantação do sistema convencional o investimento inicial é justificado. O custo operacional é influenciado principalmente pelo consumo energético elevado necessário para o aquecimento do meio secante, porém a análise de fontes de energia alternativa pode advir a contribuir para redução deste custo.

Fontes como a utilização do biogás gerado durante o tratamento anaeróbio, quando este se aplica, ou a utilização do resíduo granular do próprio processo de secagem térmica na forma de “pellets” são alternativas que se bem estudadas e desenvolvidas podem ajudar na minimização deste ponto negativo.

Conclui-se então que a aplicação do processo de secagem térmica para tratamento do lodo oriundo de estações de tratamento de esgotos domésticos é viável tecnicamente. Restando apenas como negatividade ao processo o seu custo elevado de implantação e operação. Assim a secagem térmica impõe-se como técnica viável e com forte capacidade de expansão.

5.2 RECOMENDAÇÕES

A pesquisa bibliográfica foi possível, contudo ainda há pouca diversidade de material, sendo necessária a abordagem de diferentes aspectos do processo para que este possa ser aprimorado.

A realização de uma análise econômica aprofundada do processo, levando em conta todos os custos envolvidos (implantação, operação, transporte e disposição final) é muito importante, pois abordaria a negatividade associada a secagem térmica, demonstrando o quanto isto é capaz de influenciar na escolha da tecnologia de tratamento.

Recomenda-se também um estudo aprofundado acerca das alternativas energéticas para o processo de secagem térmica para que seja possível diminuir a negatividade do processo. A viabilidade do uso do resíduo granular do próprio processo de secagem deve ser amplamente trabalhada, pois apresenta-se como uma possibilidade de formação de um ciclo praticamente fechado, deixando o processo ainda mais atraente e expansível.

Também recomenda-se o desenvolvimento de projetos em escala piloto para que ajustes finos possam ser analisados e documentados, além de adequar o processo para o nosso clima e cenário local.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

Blog Porto Imagem. **Socioambiental: Inaugurada a maior obra de saneamento da história de Porto Alegre**. Disponível em: <<http://portoimagem.wordpress.com/2014/04/11/socioambiental-inaugurada-a-maior-obra-de-saneamento-da-historia-de-porto-alegre/>>, consultado em 19 de novembro de 2014 às 23:03h

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. **Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia**. Programa de Mestrado em Engenharia de Processos – UNIVILLE. Joinville: Ciência & Engenharia, 2008.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA n° 357 de 2006**. Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>, consultado em 19 de novembro de 2014 às 20:22h.

Brasil. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei n° 12.305 de 2 de Agosto de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>, consultado em 17 de dezembro de 2014 às 22:03h.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

DE SENA, H. C. **Secagem térmica de lodo: ETE São Miguel**. Apresentação SABESP. São Paulo: SABESP, 2007.

FERREIRA, L. F. **Apresentação secadores térmicos Albrecht**. Apresentação de divulgação da empresa. Joinville, 2009.

GOOGLE. **Google Earth API**. 2013

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. J. **Caracterização de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético**. Londrina: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011.

PINHEIRO, A. V. **Alternativas para destinação final do lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

SANIN, F. D.; CLARKSON, W. W.; VESILIND, P. A. **Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges**. 1. ed. United States of America, 2010.

SANTOS, H. M.; ARRUDA, A. F.; TAVARES, M. G. O.; MOREIRA, R. C. **Caracterização de lodo e efluente de ETE e água de rio a partir de avaliação química e ecotoxicológica.** Goiânia: Instituto de Química – Universidade Federal de Goiás, 2012.

Site Sil Soluções Ambientais. Disponível em: <<http://www.nova.art.br/sil/principal/>>, consultado em 19 de novembro de 2014 às 23:15h.

SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.