

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
ENGENHARIA AMBIENTAL

PATRICIA DE BARROS ROSA  
PATRICIA SCHROEDER

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA IMPLANTAÇÃO DA SECAGEM TÉRMICA NOS CUSTOS COM  
DISPOSIÇÃO EM ATERROS SANITÁRIOS DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DE UMA METRÓPOLE**

RIO DE JANEIRO  
2009

PATRICIA DE BARROS ROSA  
PATRICIA SCHROEDER

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA IMPLANTAÇÃO DA SECAGEM TÉRMICA NOS CUSTOS COM  
DISPOSIÇÃO EM ATERROS SANITÁRIOS DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DE UMA METRÓPOLE**

Projeto de final de curso submetido ao corpo docente da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Engenharia Ambiental.

Orientador: Professor ISAAC VOLSCHAN JUNIOR, D.Sc.

RIO DE JANEIRO  
2009

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA IMPLANTAÇÃO DA SECAGEM TÉRMICA NOS CUSTOS COM  
DISPOSIÇÃO EM ATERROS SANITÁRIOS DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DE UMA METRÓPOLE

Patricia de Barros Rosa

Patricia Schroeder

PROJETO DE FINAL DE CURSO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DA ESCOLA POLITÉCNICA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

Aprovada por:

---

Prof. Isaac Volschan Junior, D.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof<sup>a</sup>. Iene Christie Figueiredo, D.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Álvaro Luiz Gonçalves Cantanhede, M.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
OUTUBRO DE 2009

*A nossa família.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela graça que nos sustenta;

À família, pelo amor que nos acolhe;

Aos amigos, pela companhia que nos encoraja;

Ao nosso orientador, pela experiência que nos ensina;

À UFRJ, pela parceria que nos fez engenheiras ambientais.

*Immer werden wir so bleiben  
jung und frei, schön wir beide  
stehen auf der guten Seite  
Jahr für Jahr  
immer werden wir so bleiben  
lachen über schlechte Zeiten  
deine Schmerzen sind auch meine  
Jahr für Jahr  
(Juli)*

## RESUMO

Perante o crescimento da população atendida por esgotamento sanitário e do conseqüente aumento da geração de lodo pelas estações de tratamento de esgotos, as companhias de saneamento das grandes cidades se encontram diante de um desafio: reduzir a quantidade de lodo, visando à otimização do seu destino final.

O objetivo deste trabalho é avaliar técnica e economicamente o impacto da inclusão da secagem térmica nas etapas do gerenciamento do lodo gerado em uma região metropolitana. Buscam-se também alternativas à disposição em aterros sanitários, haja vista que a disponibilidade de área é cada vez menor e o custo cada vez mais elevado. Ainda dá-se uso ao biogás produzido na etapa de estabilização anaeróbia do lodo, que normalmente é liberado diretamente na atmosfera.

Os resultados aqui obtidos mostram que, no longo prazo, a implantação da secagem térmica é uma opção relevante, apesar de seu alto custo de investimento. Além disso, a manutenção da prática atual, disposição em aterros de lodo com baixo teor de sólidos (em torno de 30%), se torna bastante onerosa, pois, devido à maior quantidade de lodo, os custos de disposição e transporte são elevados.

Uma boa alternativa técnica e econômica é atribuir ao lodo uso produtivo, como o co-processamento em cimenteiras, o uso agrícola, entre outros.

Palavras-chave: *secagem térmica, lodo, transporte, aterro sanitário, biogás, destinação final.*

## ABSTRACT

Due to the increasing population assisted by sewage treatment and hence an increase in the generation of sludge by sewage treatment plants, the sanitation companies are facing a challenge: reducing the amount of sludge in order to optimize the final destination.

The aim of this study is to evaluate the technical and economic impact of the inclusion of thermal drying in the management of the sludge generated in a metropolitan area. In addition, it intended to seek alternatives to disposal in landfills, due to the shrinking availability of free areas and the rising costs. It still works to use the biogas produced in the stage of anaerobic stabilization of sludge, which currently is released directly into the atmosphere.

The results show that in long term the deployment of heat drying is a relevant option, despite its high investment cost. The maintenance of the current practice, mechanical dewatering and disposal of the sludge with low solids (about 30%) in landfills, is very expensive. Due to a greater amount of sludge, the costs of disposal and transportation are high.

A good technical and economical alternative is to assign a productive use to the sludge, such as co-processing in cement kilns, agricultural use, among others.

*Keywords: thermal drying, sludge, transportation, landfill, biogas, final destination.*

## LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

<b>Figura 1:</b> Etapas do gerenciamento do lodo .....	7
<b>Figura 2:</b> Esquema de funcionamento do processo de secagem térmica.....	10
<b>Figura 3:</b> Esquema de incinerador de leito fluidizado com lavagem e resfriamento de gases.....	17
<b>Figura 4:</b> Detalhes do aterro exclusivo para disposição do lodo de uma região metropolitana .....	18
<b>Figura 5:</b> Sistema de lodo ativado convencional.....	23
<b>Figura 6:</b> Localização das ETE's e dos aterros sanitários da RMS (sem escala)l .....	23
<b>Figura 7:</b> Balanço de massa-volume para os cenários A1 e A2 .....	36
<b>Figura 8:</b> Balanço de massa-volume para os cenários B1, B2 e B3.....	37
<b>Figura 9:</b> Balanço energético para o cenário A2.....	38
<b>Figura 10:</b> Balanço energético para os cenários com secagem térmica .....	39
<b>Figura 11:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Alfa para o cenário A1 .....	45
<b>Figura 12:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário A1 .....	45
<b>Figura 13:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário A1 .....	46
<b>Figura 14:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Delta para o cenário A1 .....	46
<b>Figura 15:</b> Produção diária de biogás nos digestores da ETE Alfa .....	47
<b>Figura 16:</b> Produção diária de biogás nos digestores da ETE Beta .....	48
<b>Figura 17:</b> Produção diária de biogás nos digestores da ETE Gama.....	48
<b>Figura 18:</b> Produção diária de biogás nos digestores da ETE Delta .....	48
<b>Figura 19:</b> Balanço energético diário da ETE Alfa para o cenário A2.....	51
<b>Figura 20:</b> Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário A2 .....	51
<b>Figura 21:</b> Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário A2.....	51
<b>Figura 22:</b> Balanço energético diário da ETE Delta para o cenário A2 .....	52
<b>Figura 23:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário B1.....	54
<b>Figura 24:</b> Balanço diário de massa-volume para a ETE Gama para o cenário B1 .....	54
<b>Figura 25:</b> Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B1 .....	56
<b>Figura 26:</b> Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B1 .....	56
<b>Figura 27:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário B2.....	59
<b>Figura 28:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário B2 .....	59
<b>Figura 29:</b> Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B2 .....	61
<b>Figura 30:</b> Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B2.....	61
<b>Figura 31:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário B3.....	64
<b>Figura 32:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário B3 .....	64
<b>Figura 33:</b> Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B3 .....	66
<b>Figura 34:</b> Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B3.....	66
<b>Figura 35:</b> Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário C1 .....	68
<b>Gráfico 1:</b> Custos com transporte e disposição em aterros sanitários e custos anuais totais .....	71
<b>Grafico 2:</b> Custo total de projeto por cenário em valor presente .....	72

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Origem e descrição dos principais subprodutos gerados no tratamento de esgotos .....	5
<b>Tabela 2:</b> Características e quantidade de lodo produzido em sistemas de tratamento de esgotos.....	6
<b>Tabela 3:</b> Classificação do lodo destinado ao uso agrícola segundo a resolução CONAMA 375/06....	6
<b>Tabela 4:</b> Concentrações máximas permitidas de metais pesados no lodo destinado ao uso agrícola segundo a resolução CONAMA 375/06 .....	7
<b>Tabela 5:</b> Principais características dos tipos de secadores térmicos .....	11
<b>Tabela 6:</b> Processos e tecnologias de recuperação de materiais .....	15
<b>Tabela 7:</b> Composição típica das cinzas .....	15
<b>Tabela 8:</b> Principais aspectos ambientais para escolha de áreas de aterros sanitários.....	19
<b>Tabela 9:</b> Tendências do gerenciamento do lodo nos EUA e na Europa (↑ crescente ↓decrecente)	22
<b>Tabela 10:</b> Caracterização das ETE's da RMS .....	26
<b>Tabela 11:</b> Quantidades diárias de resíduos sólidos produzidos nas ETE's do sistema principal em 2008.....	27
<b>Tabela 12:</b> Produção diária atual de lodo de descarte incluindo aditivos e perdas com o efluente final .....	28
<b>Tabela 13:</b> Razões entre as vazões de esgoto ocorridas após as ampliações e em 2008 .....	29
<b>Tabela 14:</b> Produções diárias de lodo projetadas para as ampliações em 2018 e 2030 em t/d.....	29
<b>Tabela 15:</b> Localização dos secadores térmicos e proveniência do lodo processado .....	31
<b>Tabela 16:</b> Cenários de gerenciamento do lodo das ETE's da RMS .....	32
<b>Tabela 17:</b> Caracterização dos digestores anaeróbios .....	33
<b>Tabela 18:</b> Dados diários de entrada para digestão anaeróbia e secagem térmica.....	33
<b>Tabela 19:</b> Parâmetros adotados para o cálculo do balanço energético .....	34
<b>Tabela 20:</b> Salários mensais dos funcionários da equipe de O&M e supervisão do processo de secagem térmica .....	43
<b>Tabela 21:</b> Custos unitários dos insumos da secagem térmica .....	43
<b>Tabela 22:</b> Distâncias médias entre ETE's e entre ETE's e aterros sanitários .....	44
<b>Tabela 23:</b> Custo de capital + custos anuais totais do cenário A1 (em R\$).....	46
<b>Tabela 24:</b> Custo total de projeto em valor presente do cenário A1 (em R\$) .....	46
<b>Tabela 25:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Alfa para o cenário A2 .....	49
<b>Tabela 26:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário A2 .....	49
<b>Tabela 27:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário A2.....	50
<b>Tabela 28:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Delta para o cenário A2 .....	50
<b>Tabela 29:</b> Custos de capital + custos anuais totais do cenário A2 (em R\$).....	52
<b>Tabela 30:</b> Custo total de projeto em valor presente do cenário A2 (em R\$) .....	52
<b>Tabela 31:</b> Massas diárias de mistura e de água evaporada para o cenário B1 .....	53
<b>Tabela 32:</b> Número de secadores térmicos por ETE para o cenário B1 .....	53
<b>Tabela 33:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B1 .....	55

<b>Tabela 34:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B1 .....	55
<b>Tabela 35:</b> Custos de capital + custos anuais totais do cenário B1 (em R\$).....	57
<b>Tabela 36:</b> Custo total de projeto em valor presente do cenário B1 (em R\$) .....	57
<b>Tabela 37:</b> Massas diárias de mistura e de água evaporada para o cenário B2 .....	58
<b>Tabela 38:</b> Número de secadores térmicos por ETE para o cenário B2.....	59
<b>Tabela 39:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B2 .....	60
<b>Tabela 40:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B2.....	60
<b>Tabela 41:</b> Custos de capital + custos anuais totais do cenário B2 (em R\$).....	62
<b>Tabela 42:</b> Custo total de projeto em valor presente do cenário B2 (em R\$) .....	62
<b>Tabela 43:</b> Massas diárias de mistura e de água evaporada para o cenário B3 .....	63
<b>Tabela 44:</b> Número de secadores térmicos por ETE para o cenário B3.....	64
<b>Tabela 45:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B3 .....	65
<b>Tabela 46:</b> Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B3.....	65
<b>Tabela 47:</b> Custos de capital + custos anuais totais do cenário B3 (em R\$).....	67
<b>Tabela 48:</b> Custo total de projeto em valor presente do cenário B3 (em R\$) .....	67
<b>Tabela 49:</b> Custos de capital + custos anuais totais do cenário C1 (em R\$).....	69
<b>Tabela 50:</b> Custo total de projeto em valor presente do cenário C1 (em R\$).....	69
<b>Tabela 51:</b> Custos de capital + custos anuais totais por cenário (em R\$) .....	70
<b>Tabela 52:</b> Custos anuais totais por cenário e por tonelada úmida processada (em R\$) .....	70
<b>Tabela 53:</b> Custo total de projeto em valor presente por cenário (em R\$) .....	72

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>3.1 Geração de lodo nas estações de tratamento de esgoto</b> .....	4
<b>3.2 Tratamento do lodo</b> .....	7
3.2.1 <i>Adensamento do lodo</i> .....	7
3.2.2 <i>Condicionamento</i> .....	8
3.2.3 <i>Desaguamento de lodos</i> .....	8
3.2.4 <i>Estabilização</i> .....	8
3.2.5 <i>Higienização</i> .....	9
<b>3.3 Fundamentos da secagem térmica</b> .....	9
<b>3.4 Destino final do lodo</b> .....	11
3.4.1 <i>Disposição oceânica</i> .....	12
3.4.2 <i>Uso agrícola, uso florestal e produção de compostos e fertilizantes</i> .....	13
3.4.3 <i>Recuperação de áreas degradadas</i> .....	14
3.4.4 <i>Reuso industrial</i> .....	14
3.4.5 <i>Recuperação de materiais</i> .....	15
<b>3.5 Fundamentos da incineração</b> .....	15
3.5.1 <i>Incinerador de câmaras múltiplas</i> .....	16
3.5.2 <i>Incinerador de leito fluidizado</i> .....	17
3.5.3 <i>Influência do tipo de lodo na eficiência da incineração</i> .....	17
<b>3.6 Considerações sobre disposição em aterros sanitários</b> .....	18
3.6.1 <i>Aterros exclusivos</i> .....	18
3.6.2 <i>Co-disposição com resíduos sólidos</i> .....	19
3.6.3 <i>Seleção de áreas e consideração dos impactos ambientais</i> .....	19
3.6.4 <i>Elementos básicos de projeto</i> .....	20
<b>3.7 Considerações sobre geração de biogás</b> .....	20
<b>3.8 Tendências do gerenciamento do lodo no Brasil, nos EUA e na Europa</b> .....	21
<b>4. GERENCIAMENTO DO LODO NA REGIÃO METROPOLIANA DE SCHÖNESTADT</b> .....	23
<b>4.1 Caracterização das ETE's principais e do tratamento do lodo</b> .....	24
4.1.1 <i>ETE Alfa</i> .....	24
4.1.2 <i>ETE Beta</i> .....	24
4.1.3 <i>ETE Gama</i> .....	25
4.1.4 <i>ETE Delta</i> .....	25
4.1.5 <i>ETE Épsilon</i> .....	25
<b>4.2 Caracterização quantitativa do lodo</b> .....	26
<b>4.3 Caracterização qualitativa do lodo</b> .....	27

4.4	<b>Descrição do cenário atual do gerenciamento do lodo gerado nas ETE's</b>	27
4.5	<b>Estimativa de produção futura de lodo na RMS</b>	28
5.	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	30
5.1	<b>Considerações iniciais</b>	30
5.2	<b>Definição dos cenários</b>	31
5.3	<b>Caracterização dos equipamentos</b>	32
5.3.1	<i>Digestores anaeróbios</i>	32
5.3.2	<i>Secadores térmicos</i>	33
5.4	<b>Dados de entrada</b>	33
5.5	<b>Definição de parâmetros e constantes</b>	34
5.6	<b>Considerações sobre a secagem térmica</b>	34
5.6.1	<i>Cálculo da massa específica do lodo</i>	34
5.6.2	<i>Equação de mistura</i>	35
5.6.3	<i>Cálculo da quantidade de água evaporada diariamente</i>	35
5.7	<b>Balanços de massa-volume e energia</b>	36
5.7.1	<i>Balanços de massa-volume</i>	36
5.7.2	<i>Balanços energéticos</i>	38
5.8	<b>Cálculos para o balanço energético</b>	39
5.8.1	<i>Produção de biogás</i>	39
5.8.2	<i>Demanda energética do digestor anaeróbio</i>	40
5.8.3	<i>Geração de energia pela turbina a gás</i>	41
5.9	<b>Considerações sobre cálculo dos custos e das receitas</b>	42
5.9.1	<i>Custos de capital</i>	42
5.9.2	<i>Custos com pessoal</i>	43
5.9.3	<i>Custos de operação e manutenção</i>	43
5.9.4	<i>Custos com insumos</i>	43
5.9.5	<i>Custos de depreciação</i>	43
5.9.6	<i>Custos de transporte</i>	43
5.9.7	<i>Custos com disposição em aterros sanitários</i>	44
5.9.8	<i>Receitas geradas com a venda de eletricidade</i>	44
5.9.9	<i>Cálculo do valor presente do custo total de projeto</i>	44
6.	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	45
6.1	<b>Cenário A1</b>	45
6.1.1	<i>Balanços de massa-volume</i>	45
6.1.2	<i>Custos totais</i>	46
6.2	<b>Cenário A2</b>	47
6.2.1	<i>Balanços de massa-volume</i>	47
6.2.2	<i>Balanços energéticos</i>	47
6.2.3	<i>Custos totais</i>	52
6.3	<b>Cenário B1</b>	52

6.3.1	<i>Cálculo da massa específica do lodo</i> .....	53
6.3.2	<i>Cálculo das massas de mistura e de água evaporada</i> .....	53
6.3.3	<i>Cálculo do número de secadores térmicos</i> .....	53
6.3.4	<i>Balanços de massa-volume</i> .....	53
6.3.5	<i>Balanços energéticos</i> .....	54
6.3.6	<i>Custos totais</i> .....	56
<b>6.4</b>	<b>Cenário B2</b> .....	<b>58</b>
6.4.1	<i>Cálculo da massa específica do lodo</i> .....	58
6.4.2	<i>Cálculo das massas de mistura e de água evaporada</i> .....	58
6.4.3	<i>Cálculo do número de secadores térmicos</i> .....	58
6.4.4	<i>Balanços de massa-volume</i> .....	59
6.4.5	<i>Balanços energéticos</i> .....	60
6.4.6	<i>Custos totais</i> .....	61
<b>6.5</b>	<b>Cenário B3</b> .....	<b>63</b>
6.5.1	<i>Cálculo da massa específica do lodo</i> .....	63
6.5.2	<i>Cálculo das massas de mistura e de água evaporada</i> .....	63
6.5.3	<i>Cálculo do número de secadores térmicos</i> .....	63
6.5.4	<i>Balanços de massa-volume</i> .....	64
6.5.5	<i>Balanços energéticos</i> .....	65
6.5.6	<i>Custos totais</i> .....	66
<b>6.6</b>	<b>Cenário C1</b> .....	<b>68</b>
6.6.1	<i>Custos totais</i> .....	68
<b>7.</b>	<b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b>70</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>73</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados do Atlas de Saneamento, publicado pelo IBGE em 2004, o Brasil tem 40% de sua população atendida por redes de esgotamento sanitário. Do volume total de esgoto coletado, menos da metade é destinado a tratamento, sendo o restante mais comumente despejado *in natura* nos corpos d'água receptores.

Diante da tendência mundial de aumento das restrições de cunho ambiental e da necessidade de melhoria da qualidade de vida da população, a perspectiva é de que esse atendimento se expanda nacionalmente. Dessa forma, estima-se que a quantidade de esgotos sanitários a ser tratada vai sofrer incrementos, por meio da expansão das redes de coleta e da construção de novas estações de tratamento de esgotos (ETE's).

No tratamento de esgotos, existem duas fases: a líquida e a sólida. A primeira corresponde ao afluente líquido a ser tratado, cujas concentrações de sólidos grosseiros, suspensos e dissolvidos, de organismos patogênicos, de nutrientes e de outros constituintes diminuem ao longo dos processos de tratamento, até que se atinjam os requisitos de qualidade para lançamento nos corpos receptores.

Já a fase sólida corresponde aos subprodutos sólidos decorrentes de cada etapa do sistema de tratamento da fase anterior. Apresenta elevada concentração de sólidos de diferentes tamanhos e densidades. Embora toda esta fase deva receber tratamento específico e ter destinação final adequada, por constituir riscos à saúde da população e à qualidade ambiental, é o lodo que recebe maior atenção por ser aquele que se apresenta em maiores quantidades nas ETE's.

Estima-se que, no Brasil, a quantidade de lodo a ser tratada seja de 90 a 350 mil toneladas por dia e a quantidade a ser disposta seja de 9 a 13 mil toneladas por dia (SPERLING e ANDREOLI, 2001). Diante dessa realidade, torna-se evidente a necessidade de promoção de gerenciamento do lodo adequado, devendo este ser considerado desde o momento de concepção de nova ETE.

A Região Metropolitana de Schönestadt (RMS), objeto de estudo deste trabalho, é uma região hipotética que apresenta características similares às de grandes centros urbanos, como São Paulo, Rio de Janeiro, Cidade do México, entre outros. Nela existem cinco estações principais de tratamento de esgotos operadas pela Companhia Estadual de Saneamento Ambiental: Alfa, Beta, Gama, Delta e Épsilon. A produção total de lodo em 2008 foi de 107.605 toneladas em base úmida.

Considerando a massa total de lodo gerado nas estações principais da RMS, percebe-se a magnitude da problemática do gerenciamento do lodo enfrentada pelas grandes cidades. No Brasil, o tratamento da fase sólida consiste usualmente de adensamento, digestão anaeróbia, desaguamento e produção de tortas para disposição em aterros sanitários.

Entretanto, com a redução da vida útil dos aterros em operação e da disponibilidade de áreas livres para receber o lodo, torna-se imperativo buscar alternativas ao gerenciamento do lodo atualmente realizado no país. Entre elas incluem-se as melhorias no tratamento do lodo, de forma a reduzir volumetricamente a quantidade a ser disposta nos aterros, e as novas opções de destinação final.

Diante disso, este trabalho procurou analisar o impacto da inclusão da secagem térmica nas etapas de gerenciamento do lodo. Atualmente, esse processo tem se mostrado como tecnologia bem-sucedida na redução do volume do lodo, através da maximização da remoção por evaporação da água presente no lodo. A essa redução volumétrica, estão associados menores demandas por área nos aterros sanitários e, também, menores custos com transporte e disposição final.

Além disso, buscou-se uma alternativa à disposição final em aterros. Avaliou-se, então, o uso do lodo como fertilizante em áreas de cultivo de eucaliptos, por ser esta uma atividade em crescente desenvolvimento nas regiões correspondentes a antigas cafeiculturas no país. Nesse caso, o lodo passa a ter um uso benéfico e um valor agregado, contribuindo para a redução da quantidade destinada à disposição nos aterros e para o desenvolvimento agrícola.

Considerou-se, ainda, o aproveitamento do biogás gerado nos digestores anaeróbios para o próprio processo de digestão, para a secagem térmica e para a geração de energia elétrica.

Por fim, através da comparação entre diferentes cenários de gerenciamento de lodo para a região metropolitana, foi possível analisar técnica e economicamente os impactos da inclusão da secagem térmica nas etapas de tratamento do lodo, do aproveitamento do biogás nos processos da própria ETE e na geração de eletricidade, e do uso do lodo na agricultura. Tabelas comparativas serviram como auxílio para a discussão dos resultados obtidos.

A decisão pela melhor opção, entretanto, é resultado de estudos que consideram tanto o lado técnico-econômico, como as características locais e as questões ambientais e legais. Portanto, trata-se de uma atividade complexa, mas de extrema importância, principalmente em função da importância da promoção da qualidade de vida e ambiental. Diante disso, espera-se, com este trabalho, contribuir para a melhoria do gerenciamento do lodo nas grandes cidades brasileiras.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar técnica e economicamente o impacto da inclusão da secagem térmica nas etapas do gerenciamento do lodo gerado em uma região metropolitana. Busca-se, ainda, considerar uma opção alternativa à disposição em aterros sanitários e as vantagens do uso do biogás gerado nos digestores durante a etapa de estabilização anaeróbia do lodo.

Para tanto, o trabalho foi dividido em cinco etapas:

- (i) Levantamento do estado atual do gerenciamento do lodo no Brasil e no mundo;
- (ii) Caracterização do gerenciamento do lodo na região metropolitana hipotética de Schönestadt;
- (iii) Definição de diferentes cenários de gerenciamento do lodo para a RMS;
- (iv) Apresentação e discussão dos resultados;
- (v) Conclusões e recomendações.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conceitualmente, o termo *lodo* tem sido empregado para designar todos os subprodutos sólidos provenientes dos tratamentos primário, secundário e químico dos esgotos.

Nos processos de tratamento biológico, gera-se o lodo secundário, composto por biomassa microbiana, formada a partir da matéria orgânica absorvida e convertida e de microrganismos. Quando esta biomassa apresenta características químicas e biológicas compatíveis com alguma utilização produtiva, ela passa a ser denominada *bio sólido*. Em outras palavras, há diferenciação entre o lodo secundário a ser utilizado produtivamente na agricultura, por exemplo, e aquele a ser disposto improdutivamente em aterros ou incinerado (VON SPERLING, 2005).

No presente trabalho, os termos *lodo* e *bio sólido* serão utilizados conforme a conceituação acima.

#### 3.1 Geração de lodo nas estações de tratamento de esgoto

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água. A fração restante, 0,1%, é composta por microrganismos e sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, que justificam a necessidade de tratamento dos esgotos.

Neste tratamento, existem duas fases: líquida e sólida. A primeira corresponde ao fluxo líquido que está sendo tratado. Já a fase sólida designa os resíduos sólidos provenientes dos processos de tratamento da fase anterior. Em geral, os subprodutos sólidos gerados são: material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (ver Tabela 1).

O material gradeado e a areia são gerados no tratamento preliminar, gradeamento e desarenadores, respectivamente, presentes em todos os sistemas de tratamento de esgotos. A espuma, ou material flutuante, porém, varia de processo para processo, podendo ocorrer ou não sistematicamente (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001).

Quanto ao lodo, sua geração está relacionada com o sistema de tratamento utilizado para a fase líquida. O lodo primário é gerado nos decantadores primários e é composto de sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. Já o lodo secundário corresponde à biomassa microbiana produzida a partir da degradação da matéria orgânica do esgoto afluente nas etapas biológicas, constituintes do tratamento secundário. Ainda, quando existe processo físico-químico de precipitação primário ou de polimento do efluente secundário, forma-se o lodo químico. O lodo constitui, portanto, a maior parcela dos sólidos gerados nas ETE's, sendo, por isso, o objeto de estudo deste trabalho.

**Tabela 1:** Origem e descrição dos principais subprodutos gerados no tratamento de esgotos

Subproduto sólido	Origem	Descrição
Sólidos grosseiros	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grade</li> </ul>	No gradeamento, são removidos os sólidos orgânicos e inorgânicos com dimensões superiores ao espaço livre entre as grades.
Areia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarenador</li> </ul>	Removida em decantadores de baixo tempo de detenção hidráulica, a areia compreende sólidos inorgânicos mais densos, que sedimentam com velocidades relativamente elevadas.
Escuma	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarenador</li> <li>Decantador primário</li> <li>Decantador secundário</li> <li>Lagoa de estabilização</li> <li>Reator anaeróbio</li> </ul>	A escuma removida nos decantadores primários consiste de materiais flutuantes raspados da superfície, contendo graxa, óleos, gordura animal, sabões, resíduos de comida, cabelo, papel, algodão, pontas de cigarro e afins. Nos reatores biológicos há produção de escuma contendo bactérias.
Lodo primário	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tanque séptico</li> <li>Decantador primário</li> </ul>	Os sólidos removidos por sedimentação nos decantadores primários compõem o lodo primário. Nos tanques sépticos também é gerado lodo primário, que chega a sofrer digestão anaeróbia, em condições controladas.
Lodo biológico aeróbio (não estabilizado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lodos ativados (convencional)</li> <li>Reatores aeróbios com biofilmes (alta carga)</li> </ul>	O lodo secundário é constituído pela biomassa de microrganismos aeróbios gerada na remoção da matéria orgânica dos esgotos. Neste caso, esses sólidos não estão digeridos, sendo necessária uma etapa posterior de estabilização.
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lodos ativados (aeração prolongada)</li> <li>Reatores aeróbios com biofilmes (baixa carga)</li> </ul>	Composto pela biomassa de microrganismos aeróbios gerada na remoção da matéria orgânica dos esgotos, este lodo secundário já está estabilizado, pois o tempo de detenção é maior.
Lodo biológico anaeróbio (estabilizado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lagoas de estabilização</li> <li>Reatores anaeróbios</li> </ul>	Em condições anaeróbias, a biomassa anaeróbia cresce e se multiplica à custa da matéria orgânica. Normalmente, a biomassa fica retida por maior tempo, propiciando a estabilização.
Lodo químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decantador primário com precipitação química</li> <li>Sistemas com precipitação química de fósforo</li> </ul>	Este lodo é usualmente resultante da precipitação química com sais metálicos ou cal. Somente existente nas estações que empregam processos físico-químicos.

Fonte: adaptado de VON SPERLING e GONÇALVES (2001)

A quantidade de lodo produzida também está relacionada aos processos utilizados no tratamento. Aqueles caracterizados por maior tempo de detenção do lodo no sistema, como as lagoas de estabilização, produzem-no em menor quantidade, uma vez que ele sofre digestão e adensamento, reduzindo consideravelmente seu volume. No caso do sistema de lodos ativados, por exemplo, o tempo de permanência do lodo é baixo, dando pouca chance para a digestão no próprio tanque de aeração (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001). Logo, o volume produzido é mais elevado.

Pode-se expressar a produção de lodo em termos *per capita* e em termos de DQO aplicada. Na Tabela 2, são mostradas as características e a quantidade de lodo produzido em sistemas de tratamento de esgotos diferentes, com base em suas eficiências típicas de remoção de sólidos suspensos. Para o cálculo da massa de lodo, assumiu-se 0,1 kgDQO/hab.dia e 0,06 kgSS/hab.dia.

Os valores para as unidades com longo tempo de detenção do lodo já incluem a digestão e o adensamento, que ocorrem na própria unidade, reduzindo a massa e o volume do lodo gerado.

**Tabela 2:** Características e quantidade de lodo produzido em sistemas de tratamento de esgotos

Sistema	Características do lodo produzido e dirigido à etapa de tratamento			
	kgSS / kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d)	Volume de lodo (L/hab.d)
<b>Tratamento primário (convencional)</b>	<b>0,35 - 0,45</b>	<b>2 - 6</b>	<b>35 - 45</b>	<b>0,6 - 2,2</b>
<b>Tratamento primário (tanque séptico)</b>	<b>0,20 - 0,30</b>	<b>3 - 6</b>	<b>20 - 30</b>	<b>0,3 - 1,0</b>
<b>Lagoa facultativa</b>	<b>0,12 - 0,32</b>	<b>5 - 15</b>	<b>12 - 32</b>	<b>0,1 - 0,25</b>
<b>Lagoa anaeróbia – Lagoa facultativa</b>	<b>0,26 - 0,55</b>	-	<b>26 - 55</b>	<b>0,15 - 0,45</b>
Lagoa anaeróbia	0,20 - 0,45	15 - 20	20 - 45	0,1 - 0,3
Lagoa facultativa	0,06 - 0,10	7 - 12	6 - 10	0,05 - 0,15
<b>Lagoa aerada facultativa</b>	<b>0,08 - 0,13</b>	<b>6 - 10</b>	<b>8 - 13</b>	<b>0,08 - 0,22</b>
<b>LA<sup>1</sup> mistura completa – Lagoa sedimentação</b>	<b>0,11 - 0,13</b>	<b>5 - 8</b>	<b>11 - 13</b>	<b>0,15 - 0,25</b>
<b>Tanque séptico + filtro anaeróbio</b>	<b>0,27 - 0,39</b>	<b>1,4 - 5,4</b>	<b>27 - 39</b>	<b>0,5 - 2,8</b>
Tanque séptico	0,20 - 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Filtro anaeróbio	0,07 - 0,09	0,5 - 4,0	7 - 9	0,2 - 1,8
<b>Lodos ativados convencional</b>	<b>0,60 - 0,80</b>	<b>1 - 2</b>	<b>60 - 80</b>	<b>3,1 - 8,2</b>
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	2,5 - 6,0
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	0,6 - 2,2
<b>Lodos ativados – aeração prolongada</b>	<b>0,50 - 0,55</b>	<b>0,8 - 1,2</b>	<b>50 - 55</b>	<b>3,3 - 5,6</b>
<b>Filtro biológico de alta carga</b>	<b>0,55 - 0,75</b>	<b>1,5 - 4,0</b>	<b>55 - 75</b>	<b>1,4 - 5,2</b>
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,20 - 0,30	1 - 2,5	20 - 30	0,8 - 3,0
<b>Biofiltro aerado submerso</b>	<b>0,60 - 0,80</b>	<b>1 - 2</b>	<b>60 - 80</b>	<b>3,1 - 8,2</b>
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
<b>Reator UASB</b>	<b>0,12 - 0,18</b>	<b>3 - 6</b>	<b>12 - 18</b>	<b>0,2 - 0,6</b>
<b>UASB + pós-tratamento aeróbio<sup>2</sup></b>	<b>0,20 - 0,32</b>	<b>3 - 4</b>	<b>20 - 32</b>	<b>0,5 - 1,1</b>
Lodo anaeróbio (UASB)	0,12 - 0,18	3 - 4	12 - 18	0,3 - 0,6
Lodo aeróbio (lodos ativados)	0,08 - 0,14	3 - 4	8 - 14	0,2 - 0,5

Fonte: adaptado de VON SPERLING e GONÇALVES (2001)

Observações: <sup>(1)</sup> LA = lagoa aerada

<sup>(2)</sup> Pós-tratamento aeróbio: lodos ativados, biofiltro aerado submerso, filtro biológico

No que se refere à qualidade do lodo, existe atualmente, em âmbito federal, apenas a resolução CONAMA 375/06, que define critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETE's e seus produtos derivados. A legislação prevê duas classes para o lodo a ser usado na agricultura: A e B, segundo a concentração de patógenos (ver Tabela 3).

**Tabela 3:** Classificação do lodo destinado ao uso agrícola segundo a resolução CONAMA 375/06

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 <sup>3</sup> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <10 <sup>5</sup> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável

UFF: Unidade Formadora de Foco

UFP: Unidade Formadora de Placa

Além disso, a mesma resolução estabelece requisitos mínimos de qualidade do lodo destinado a uso na agricultura, através da definição de concentrações máximas permitidas de metais pesados, conforme mostrado na Tabela 4 seguinte.

**Tabela 4:** Concentrações máximas permitidas de metais pesados no lodo destinado ao uso agrícola segundo a resolução CONAMA 375/06

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

### 3.2 Tratamento do lodo

O número de estações de tratamento de esgotos vem crescendo consideravelmente no país devido à maior conscientização da população para os problemas ambientais, ao maior controle ambiental e ao adensamento populacional. Inerente a esse aumento, está uma maior produção de lodo, gerando, então, problemas com a destinação final deste. Diante disso, buscam-se estratégias para reduzir o volume de lodo (MIKI *et al.*, 2006).

Entre as etapas do gerenciamento do lodo das ETE's, consideram-se, neste trabalho, as fases de adensamento, condicionamento, desaguamento, estabilização e higienização dos lodos, ilustradas na Figura 1. Mais detalhadamente, serão abordadas, ainda, a secagem térmica, a incineração, o uso agrícola e a co-incineração em cimenteiras como opções tecnológicas promissoras para melhoria das fases do gerenciamento do lodo.



**Figura 1:** Etapas do gerenciamento do lodo

#### 3.2.1 Adensamento do lodo

O adensamento consiste em aumentar a concentração de sólidos no lodo, removendo parte do volume de água por meios físicos (CHAGAS, 2000; MIKI *et al.*, 2006).

Como o lodo proveniente das ETE's convencionais ainda apresenta grande quantidade de água em sua composição, o adensamento e todas as formas de redução do teor de água se tornam bastante interessantes. Tais processos reduzem consideravelmente o volume de lodo direcionado a processos posteriores, melhorando sua eficiência. Além disso, tem-se economia no transporte, o manuseio é normalmente facilitado e o espaço requerido para a disposição final é reduzido.

Os processos de adensamento mais comuns são: por gravidade, por flotação, por centrífugas, de esteiras e de tambor rotativo (MIKI *et al.*, 2006).

### 3.2.2 Condicionamento

O condicionamento do lodo pode ser feito por processos químicos ou físicos. O objetivo é formar agregados de partículas, de modo a facilitar a separação das fases líquido-sólida do lodo. O processo consiste basicamente na desestabilização das partículas e posterior floculação.

Fatores físicos, químicos e biológicos afetam o condicionamento. Entre os fatores químicos, citam-se o pH, a concentração dos sólidos e a carga superficial; entre os físicos, a distribuição e o tamanho das partículas e o grau de mistura; e entre os biológicos, a fonte e a natureza dos sólidos. Alguns desses processos também desinfetam e alteram os odores (MIKI *et al.*, 2006).

Trata-se de um processo que, normalmente, antecede o desaguamento, pois, com os flocos já formados, a captura de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo é melhorada. Segundo a *Water Pollution Federation* (1988), *apud* MIKI *et al.* (2006), o condicionamento químico seguido do desaguamento pode ajudar a diminuir a umidade do lodo de 90 a 99% para 65 a 80%, dependendo da natureza dos sólidos tratados.

Para VON SPERLING (2005), os principais processos utilizados são o condicionamento químico e o condicionamento térmico.

### 3.2.3 Desaguamento de lodos

O desaguamento é um processo físico e tem como fundamento a redução do teor de água presente no lodo. Os métodos mais utilizados são os filtros-prensa, as centrífugas, os leitos de secagem e as lagoas de secagem. A área disponível e o tipo do lodo são as variáveis determinantes do método a ser utilizado.

Segundo MALTA (2001), a capacidade de desaguamento varia com o tipo de lodo e está diretamente relacionada com o tipo de sólido e a forma com que a água está ligada às partículas do lodo. O desaguamento traz benefícios devido à redução de umidade, pois aumenta o poder calorífico, tornando-se um processo interessante como antecessor à incineração. Caso o destino final seja um aterro sanitário, se ganha com a redução da produção de chorume, dado o mesmo grau de estabilização do lodo.

### 3.2.4 Estabilização

Os objetivos da estabilização do lodo são: diminuir a presença de patógenos, eliminar os maus odores e inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação (MIKI *et al.*, 2006). Em outras palavras, busca-se a redução de sólidos voláteis, diminuindo a produção de odores e, assim, a atração a insetos e animais vetores de doenças.

Para tanto, são utilizados processos químicos, físicos e biológicos, como a digestão anaeróbia, a digestão aeróbia, a estabilização com cal e a compostagem.

### 3.2.5 Higienização

Como todo resíduo de origem animal, o lodo contém microrganismos patogênicos. A higienização do lodo se torna bastante interessante quando a disposição final do lodo é para uso agrícola, pois alguns microrganismos podem interferir na qualidade da produção. Segundo VON SPERLING (2005), os métodos mais utilizados para higienização são a compostagem, a digestão aeróbia autotérmica, a calagem, a pasteurização e a secagem térmica.

## 3.3 Fundamentos da secagem térmica

O processo de secagem térmica consiste em aquecer o lodo em um local compacto e completamente fechado, com o objetivo de secá-lo e higienizá-lo, de modo que nenhum odor seja liberado para a atmosfera. A umidade evaporada é condensada e retornada ao início da ETE para tratamento (GONÇALVES *et al.*; 2001).

O aquecimento é suficiente para que ocorra a evaporação da água, sem que a matéria orgânica presente no lodo seja destruída (MIKI *et al.*, 2006). Entretanto, a temperatura elevada é capaz de eliminar microrganismos patogênicos, aferindo ao lodo, então, qualidade tipo classe A, de acordo com a resolução CONAMA 375/06.

Para que o processo de secagem térmica seja economicamente viável, o lodo precisa ter uma concentração de sólidos entre 15 e 30% antes de ser tratado termicamente (GONÇALVES *et al.*; 2001).

Segundo GONÇALVES *et al.* (2001), os principais benefícios da secagem térmica do lodo são:

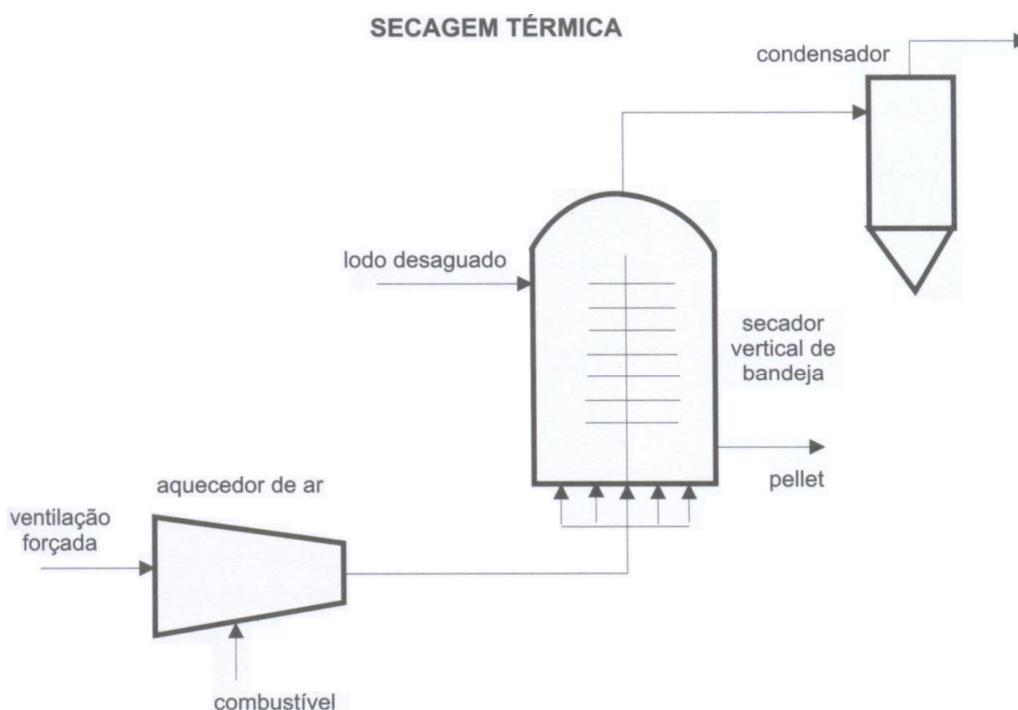
- Redução significativa no volume do lodo;
- Redução no custo de transporte e estocagem (quando for o caso);
- Produto estabilizado facilmente estocado, manuseado e transportado;
- Produto final praticamente livre de patógenos;
- Preservação das propriedades agrícolas do lodo;
- Não há necessidade de equipamento especial para uso na agricultura;
- Produto pode ser incinerado ou disposto em aterro sanitário;
- Produto pode ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista.

Outra vantagem é a possibilidade de uso do lodo seco como material combustível para incineradores de resíduos ou de fornos da indústria cimenteira devido ao alto poder calorífico.

Segundo LUDUVICE e FERNANDES (2001), os principais inconvenientes dos processos de secagem térmica são: produção de efluente líquido; liberação de gases para a atmosfera; risco de liberação de odores e de geração de ruídos.

A base do custo do sistema operacional de secagem térmica é o consumo de combustível. Trata-se de processo bastante oneroso e a busca de alternativas de energias é importante para a redução desse custo. A revenda dos *pellets* para a agricultura, por exemplo, pode contribuir para a sustentação financeira do sistema. Entretanto, até o momento, nenhum programa de manejo e revenda de lodo implantado na Europa ou América do Norte foi capaz de produzir um excedente positivo para a ETE. O custo do processamento do lodo deve ser coberto pela tarifa de água e esgotos (GONÇALVES *et al.*; 2001).

Há preocupação com a segurança operacional dos equipamentos de secagem térmica, pois caso haja presença de oxigênio e as partículas combustíveis do lodo alcancem temperaturas próximas a 130°C, pode ocorrer auto-ignição, havendo risco de explosões e incêndios. Para evitar tal situação, os equipamentos são projetados para evitar a presença de oxigênio e elevadas temperaturas nas câmaras de secagem. A fabricação deve atender as normas técnicas de segurança vigentes no país, além de levar em consideração as recomendações das normas técnicas internacionais.



**Figura 2:** Esquema de funcionamento do processo de secagem térmica  
(Fonte: LUDUVICE e FERNANDES, 2001)

Os tipos de secadores térmicos mais comuns para secagem de lodo são: secadores rotativos, por dispersão de ar – rápidos (*flash dryers*) ou de pulverização (*spray dryers*), leito fluidizado, túnel, esteira e soleiras múltiplas. A Tabela 5 resume as principais características desses tipos.

**Tabela 5:** Principais características dos tipos de secadores térmicos

<b>Tecnologia</b>	<b>Tipo</b>	<b>Característica</b>
Rotativo	Direto ou Indireto	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tipo mais empregado;</li> <li>· Maior aplicabilidade e funcionamento comprovado;</li> <li>· Aspectos operacionais: tempo de contato: 20 a 60 min; temperatura do lodo: 100 a 150 °C; granulometria do lodo: 1,0 a 6,0 mm; teor de sólidos: entre 65 e 95%;</li> <li>· Fluxo de ar quente em corrente, contracorrente ou cruzado em relação ao escoamento do lodo: em corrente, a eficiência é maior, devido ao rápido aquecimento do lodo junto à entrada do secador, sendo menores a evaporação junto a saída, a produção de odor e a perda de energia com descarga de lodo aquecido.</li> </ul>
	Direto	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aletas internas movem o lodo para a extremidade interna do cilindro rotativo de secagem. Durante o tempo de percurso, há a exposição direta do lodo ao calor disponível no ambiente interno do cilindro rotativo de secagem.</li> </ul>
	Indireto	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Em um cilindro interno, concêntrico a outro cilindro externo, aletas movem o lodo para a extremidade. O ar quente é veiculado através do cilindro externo e o aquecimento do lodo ocorre indiretamente, através do aquecimento da superfície metálica do cilindro rotativo de secagem.</li> </ul>
Dispersão de ar	<i>Flash ou Spray</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Secagem direta;</li> <li>· Aspectos operacionais: tempo de contato imediato; temperatura do lodo: 100 °C; granulometria do lodo: &lt; 6,0 mm; teor de sólidos: entre 90 e 95%</li> <li>· Maior demanda energética e complexidade operacional;</li> <li>· Produção excessiva de particulados finos</li> </ul>
	<i>Flash Dryer</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tipo mais empregado. Um moinho em alta velocidade pulveriza e expõe todo o lodo ao ar quente. O afluente é uma mistura de lodo desidratado e lodo seco (teor de sólidos de 50%).</li> </ul>
	<i>Spray Dryer</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tipo pouco empregado. O lodo úmido é aspergido desde o topo de uma torre de secagem e ao encontro de corrente ascensional de ar quente.</li> </ul>
Leito fluidizado		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Secagem direta por meio de leito fluidizado de grânulos de lodo;</li> <li>· Carreamento dos sólidos secos após alcance de temperatura de 100 °C;</li> <li>· Teor de sólidos de até 95%;</li> <li>· Maior demanda energética e maior complexidade operacional;</li> <li>· Produção excessiva de particulados finos.</li> </ul>
Túnel		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Secagem direta;</li> <li>· Extrusão do lodo afluente segundo forma cilíndrica com diâmetro de 3,0 mm</li> <li>· Aspectos operacionais: tempo de contato de 60 minutos; temperatura do lodo: 80 °C; teor de sólidos: &gt; 55%;</li> <li>· Reduzida opção de fabricantes.</li> </ul>
Esteira		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Processo contínuo de passagem de ar quente através de um leito permeável, constituído por uma ou mais esteiras transportadoras horizontais.</li> </ul>
Soleiras Múltiplas		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Secagem direta;</li> <li>· No equipamento vertical cilíndrico, o lodo é introduzido pela parte superior; mediante ação de pás rotativas, é descolado e transferido verticalmente entre as bandejas fixas de secagem indireta, até a parte inferior, de onde é retirado;</li> <li>· Parte do lodo seco é misturada ao lodo úmido para a formação de novos grânulos.</li> </ul>

Fonte: METCALF & EDDY (1991)

### 3.4 Destino final do lodo

A decisão da melhor opção de destino final do lodo gerado em uma estação de tratamento de esgotos deve considerar aspectos técnicos, ambientais, econômicos e legais. Quantidade e qualidade do lodo produzido; tecnologias disponíveis; legislação pertinente; custos de investimento, operação, manutenção e transporte e impactos ambientais associados são exemplos de aspectos a serem considerados nos estudos de avaliação.

Segundo JORDÃO e PESSÔA (2005); GWRC (2008), entre as possíveis soluções para o destino final do lodo, citam-se:

1. Disposição em aterros sanitários ou exclusivos;
2. Incineração;
3. Lançamento no oceano;
4. Uso agrícola
5. Uso florestal;
6. Produção de composto ou fertilizante;
7. Recuperação de áreas degradadas;
8. Incorporação à fabricação de cimento e produtos cerâmicos;
9. Recuperação de materiais (agregado leve, fósforo, nitrogênio, ácidos voláteis, biopesticidas e biopolímeros).

Existem ainda tecnologias estabelecidas de conversão do lodo em gás e óleos combustíveis. Estas têm como objetivo principal a geração de energia, mas também transformam o lodo em cinzas. Alemanha, Japão e França são países que atualmente fazem uso dessas tecnologias de conversão (GWRC, 2008). Quanto às também difundidas tecnologias de geração de biogás, são feitas observações separadas no item 3.7 deste capítulo.

Para diferentes soluções, exigem-se características físicas, químicas e biológicas distintas do lodo, sendo exigido maior ou menor grau de qualidade deste em função da opção de destinação final. O pH e as concentrações de compostos orgânicos, nutrientes, metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e organismos patogênicos são características resultantes do pré-condicionamento do lodo que devem ser observadas no planejamento de seu destino final (JORDÃO e PESSÔA, 2005).

Analisando as destinações finais atualmente disponíveis, pode-se associar a elas a existência de benefícios. Nos casos de disposição em aterros sanitários ou exclusivos, incineração e lançamento oceânico, não existem vantagens de reuso ou de produção de material reutilizável. Entretanto, o lodo admite utilizações produtivas. Os usos agrícola, florestal e para recuperação de áreas degradadas, a produção de composto, o reuso industrial e a recuperação de materiais caracterizam a possibilidade de uso produtivo do lodo.

A seguir serão abordados resumidamente os principais destinos finais do lodo, considerando suas características, a situação atual das tecnologias e os impactos ambientais associados.

#### *3.4.1 Disposição oceânica*

Trata-se da disposição do lodo no mar, após pré-condicionamento, através de emissários oceânicos ou navios lameiros. Este método foi amplamente utilizado pelos países desenvolvidos. Questionado, porém, quanto às dificuldades de predição dos fluxos de contaminantes e aos impactos ambientais causados, foi proibido em 1991 nos Estados Unidos, pelo Ocean Dumping Ban Act (EPA, 1988).

### 3.4.2 *Uso agrícola, uso florestal e produção de compostos e fertilizantes*

O lodo destinado a esses usos recebe o nome de bioossólido, pois é resultante de processos biológicos de tratamento e tem agregado um valor de uso produtivo.

Do ponto de vista agrônomo, os bioossólidos são constituídos de quantidades significativas de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal (ANDREOLI *et al*, 2001). Entretanto, os controles quanto ao lodo gerado, às taxas de agregação ao solo e aos componentes químicos e biológicos são rígidos. Neste caso, deve-se verificar a qualidade físico-química e biológica do lodo, sua adequação ao uso pretendido, as taxas de aplicação e as exigências da legislação e dos órgãos ambientais (JORDÃO e PESSÔA, 2005).

Para que o bioossólido seja atrativo aos hortifruticultores, é necessário que o custo e a qualidade do produto oferecido sejam compatíveis com os dos condicionantes de solo e fertilizantes já existentes no mercado. A análise da qualidade do lodo gerado é fundamental, principalmente com relação à presença de metais pesados e agentes patogênicos.

Nas culturas de alimentos ingeridos crus, não se deve usar lodo não digerido, devido a riscos de contaminação por organismos patogênicos. Para uso em áreas de reflorestamento, onde não haja riscos de contaminação pela cadeia alimentar, pressupõem-se os mesmos procedimentos de verificação da qualidade do lodo, porém consideram-se outras taxas de aplicação e preocupações com relação à contaminação de águas subterrâneas (JORDÃO e PESSÔA, 2005).

Em termos de legislação pertinente ao assunto, em vigor no âmbito nacional, existe atualmente apenas a resolução CONAMA 375/2006. Essa resolução 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.

Em 1999, a CETESB, divulgou a Portaria 4.230, sob o nome "Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação", sendo a primeira legislação referente ao assunto a entrar efetivamente em vigor no Brasil.

A lei nº 3.581/2005 estabelece princípios, normas e procedimentos para a expedição, distribuição e uso de bioossólido no Distrito Federal, visando ao controle da poluição, da contaminação e à minimização de seus impactos ambientais. Existe, ainda, a resolução nº 03/2006 do Conselho do Meio Ambiente do Distrito Federal, que disciplina o uso do lodo de esgoto no Distrito Federal. Esta aborda também em seu escopo a destinação dos bioossólidos para usos agrícolas.

No Paraná, a resolução da Secretaria Estadual de Meio Ambiente SEMA 01/2007 dispõe sobre assuntos referentes às estações de tratamento de esgotos. Para o restante do país, não foram encontradas portarias, normas ou resoluções estaduais elaboradas sobre a temática.

### 3.4.3 Recuperação de áreas degradadas

Em solos que sofreram profundas alterações físicas e químicas, tais como áreas de mineração a céu aberto, barragens, áreas de empréstimo e acostamentos de rodovias, pode-se utilizar o lodo de ETE's, a fim de recuperá-los. Devido a suas propriedades físico-químicas e biológicas, o lodo possibilita a recuperação das características necessárias para o desenvolvimento da vegetação (ROCHA e SHIROTA, 1999).

Neste caso a taxa de aplicação do lodo no solo pode ser maior que nos casos de uso agrícola ou florestal, dadas as características do local, da natureza geológica e da topografia. Deve-se observar a possível poluição de corpos d'água e do lençol subterrâneo, bem como outros componentes ambientais. É importante estudar também o manejo adequado da disposição do lodo, relevando aspectos de custos e benefícios (JORDÃO e PESSÔA, 2005).

### 3.4.4 Reuso industrial

A utilização de lodos de estações de tratamento de esgotos como matéria-prima na indústria cerâmica é uma prática que tem sido adotada em países como Alemanha, Espanha e Japão. Apresenta uma série de vantagens em relação a outros tipos de uso, pois as operações inerentes à indústria cerâmica (fornos operando a altas temperaturas) fazem com que os riscos sanitários sejam reduzidos ao máximo (LEITE *et al.*, 2006).

Entre as principais vantagens do reuso do lodo na indústria cerâmica, destacam-se: destinação ambientalmente segura; aumento da vida útil das jazidas de argila; redução dos custos de recomposição de áreas com vegetação nativa; menor gasto de energia, transporte e fabricação e menor utilização dos recursos naturais. Dessa forma, o uso de lodo na indústria cerâmica pode ser uma solução economicamente viável para aqueles lodos que não apresentam tratamento sanitário adequado para outros tipos de aplicação (LEITE *et al.*, 2006).

A indústria de cimento também representa importante papel no gerenciamento do lodo das ETE's. Nas cimenteiras, o lodo não somente é queimado, como também propicia a recuperação de material e energia. Devido a sua composição, os constituintes minerais não combustíveis do lodo se enquadram bem na matriz de matérias-primas necessárias à produção de cimento. Ainda, quanto ao potencial de aquecimento, a matéria orgânica combustível presente no lodo substitui parte da energia requerida para o processo de combustão nos fornos.

Além disso, na indústria de cimento, o lodo desidratado úmido também pode ser usado como redutor da emissão atmosférica de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), formados durante o processo de combustão nos fornos. O princípio básico é a reação química que ocorre em contato com amônia, na qual o lodo desidratado atua como reagente de redução, alterando a forma NO<sub>x</sub> para a forma de nitrogênio gasoso N<sub>2</sub>, um gás inerte e não poluente (CHAO e IESS, 2004).

### 3.4.5 Recuperação de materiais

As tecnologias de recuperação de materiais visam à recuperação de material agregado leve para construção civil, fósforo, nitrogênio, ácidos voláteis, biopesticidas, biopolímeros. No caso destes últimos quatro, as tecnologias estão ainda em estágio incipiente de desenvolvimento. A Tabela 6 abaixo mostra os processos e as tecnologias atualmente consolidadas de recuperação de materiais.

**Tabela 6:** Processos e tecnologias de recuperação de materiais

Finalidade	Processo	Exemplos de tecnologias
Recuperação de fósforo	Processos químicos	KREPO, Seaborne, SEPHOS
	Processos de cristalização	Crystalactor®, Phostrip
Produção de agregado leve	Solidificação térmica	GlassPack®
	Incineração	Portland cement
Recuperação de nitrogênio	Processo químico	Tecnologia ARP
Recuperação de ácidos voláteis	Processo microbiológico	Fermentação
	Processo hidrotérmico	Oxidação em via úmida

Fonte: GWRC (2008)

### 3.5 Fundamentos da incineração

O objetivo da incineração é a redução do volume do lodo através da conversão dos sólidos fixos em cinzas e dos sólidos voláteis em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e SO<sub>2</sub>, a temperaturas da ordem de 800 a 1.100°C. Maiores serão a redução volumétrica e a transformação do lodo em cinzas, quanto maior for a temperatura. Segundo LUDUVICE e FERNANDES (2001), o volume de cinzas residuais é normalmente inferior a 4% do volume do lodo desaguado que alimenta o incinerador. A Tabela 7 abaixo mostra a composição típica da cinza.

**Tabela 7:** Composição típica das cinzas

Componente	Composição (em peso seco)
SiO <sub>2</sub>	55%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,4%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,9%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,8%
CaO	5,4%
Cu	650 mg/kg
Zn	450 mg/kg
Ni	100 mg/kg
Cd	11 mg/kg

Fonte: LUDUVICE e FERNANDES (2001)

Devido à sofisticação do processo e aos altos custos de implantação e operação, o uso de incineradores está restrito às grandes áreas metropolitanas com elevada concentração industrial. Além disso, os equipamentos são normalmente construídos para atender populações superiores a 500.000 habitantes, têm capacidade de processamento superior a 1,0 t/h e estão preparados para receber lodo de várias unidades de tratamento (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

A incineração do lodo implica na destruição das substâncias orgânicas através da combustão, obtida na presença de excesso de oxigênio. Para garantir a combustão completa da matéria orgânica, é preciso que haja injeção de ar comprimido no incinerador. A quantidade necessária de ar depende das características do lodo e do tipo de incinerador utilizado. Quanto às fontes combustíveis, é o próprio poder calorífico dos sólidos voláteis que alimenta o processo. Entretanto, em função do balanço energético, biogás e gás natural devem ser usados como fontes adicionais de combustível.

No processo, são também destruídos organismos patogênicos e degradados compostos orgânicos tóxicos. Entretanto, formam-se, ainda, compostos resultantes da combustão incompleta, tais como dioxinas e furanos, que devem ser controlados. Metais pesados não são degradados, de forma que as cinzas, ao final do processo, apresentam elevadas concentrações deles (EPA, 1999).

Além disso, existem ressalvas quanto às emissões atmosféricas. Os poluentes liberados podem ser gasosos ou sólidos. Entre os primeiros estão os óxidos de nitrogênio, o monóxido de carbono, as dioxinas, os furanos, os gases ácidos (dióxido de enxofre, ácido clorídrico e ácido fluorídrico) e os compostos orgânicos voláteis (tolueno e solventes clorados). Os poluentes sólidos, por sua vez, consistem de matéria particulada fina composta de metais e sólidos suspensos particulados condensáveis à temperatura ambiente. A concentração de metais nos sólidos suspensos está diretamente vinculada à qualidade do lodo incinerado (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

Diante disso, deve haver tratamento posterior dos gases e do material particulado antes do lançamento na atmosfera. Ciclones, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos e filtros podem ser usados. Em todo caso, os padrões vigentes de emissão atmosférica devem ser atendidos.

Os tipos de incinerados mais comumente usados são: câmaras múltiplas e leito fluidizado. Este último tem reconhecidamente apresentado menores problemas relacionados às emissões atmosféricas, pois a tecnologia mais avançada resulta em combustão mais uniforme do lodo (EPA, 1999).

### *3.5.1 Incinerador de câmaras múltiplas*

Este incinerador é subdividido em três zonas de combustão distintas. A unidade é vertical e cilíndrica e o fluxo do lodo é descendente. Na primeira zona, ocorre remoção final da umidade do lodo; na intermediária, se dá a combustão propriamente dita; a terceira, mais inferior, é a zona de resfriamento (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

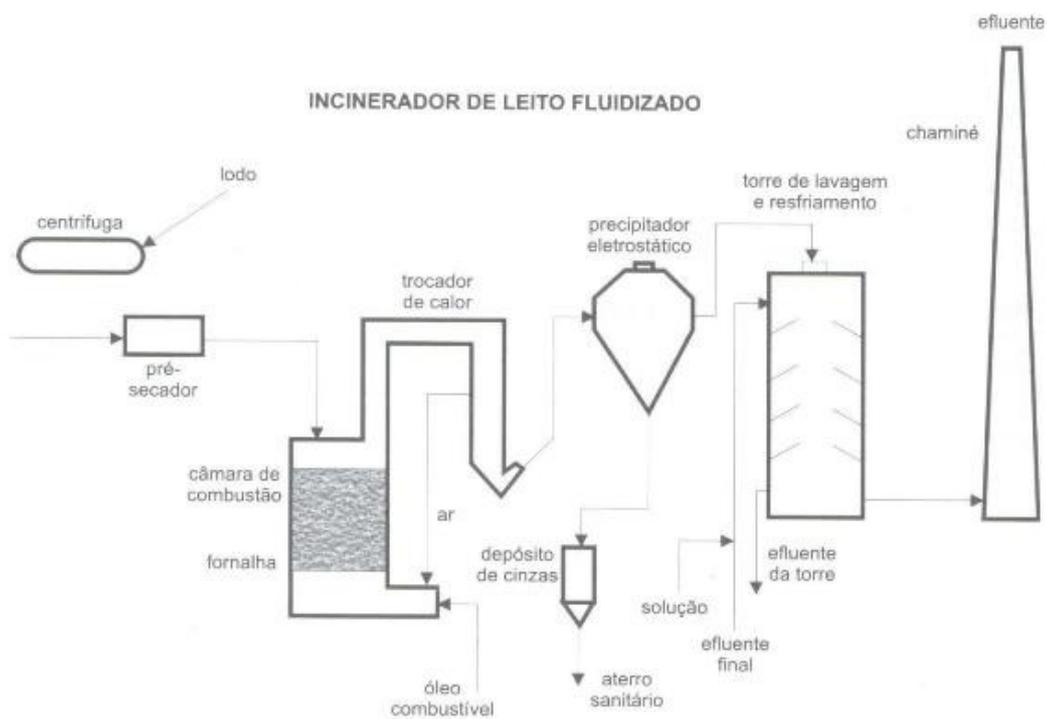
As maiores temperaturas ocorrem na segunda câmara, na qual também são adicionados combustíveis auxiliares, se necessário, para aumentar a temperatura e propiciar a combustão. Ar pré-aquecido entra na câmara inferior, sendo mais aquecido na zona intermediária e resfriando, em seguida, na zona superior, na medida em que o ar aquece o lodo para remoção da umidade. Há também ingestão de ar resfriado na zona de maior combustão para evitar superaquecimento (METCALF & EDDY, 1991).

Tecnicamente, o lodo deve apresentar pelo menos 15% de teor de sólidos, devido às limitações de capacidade máxima de evaporação dos incineradores. Combustível adicional é usualmente necessário quando o teor de sólidos está entre 15 e 30% (METCALF & EDDY, 1991). Para alimentação com lodos com 35% de sólidos, ocorre combustão autógena (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

### 3.5.2 Incinerador de leito fluidizado

O incinerador de leito fluidizado consiste de vaso cilíndrico vertical de câmara única com paredes refratárias. O leito fluidizado de areia, em contato com o lodo desaguado, retém as partículas orgânicas até a completa combustão das mesmas (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

A injeção ascendente de ar mantém em suspensão uma mistura de lodo e material inerte, no caso, areia, permitindo que a queima com o ar de combustão, à temperatura média de 850°C, ocorra em ambiente homogeneizado sujeito à intensa movimentação de partículas.



**Figura 3:** Esquema de incinerador de leito fluidizado com lavagem e resfriamento de gases (Fonte: LUDUVICE e FERNANDES, 2001)

### 3.5.3 Influência do tipo de lodo na eficiência da incineração

O tipo de lodo influencia na eficiência do processo de incineração. Devido à maior concentração de sólidos voláteis, o lodo derivado dos processos de tratamento primário dos esgotos se aplica melhor à incineração que aquele proveniente do tratamento secundário. Este é mais difícil de ser incinerado, pois apresenta baixa concentração de sólidos voláteis e elevado conteúdo de água. De qualquer forma, é fundamental que haja processos de desaguamento anteriores à incineração (EPA, 1999).

### 3.6 Considerações sobre disposição em aterros sanitários

Quando se opta pela disposição do lodo em aterros não se pretende recuperar nutrientes ou utilizar o lodo para finalidade benéfica. O lodo disposto passa por processos de biodegradação anaeróbica, gerando vários subprodutos, como o metano. Consideram-se duas formas de disposição em aterros: aterros sanitários exclusivos e co-disposição com resíduos sólidos urbanos.

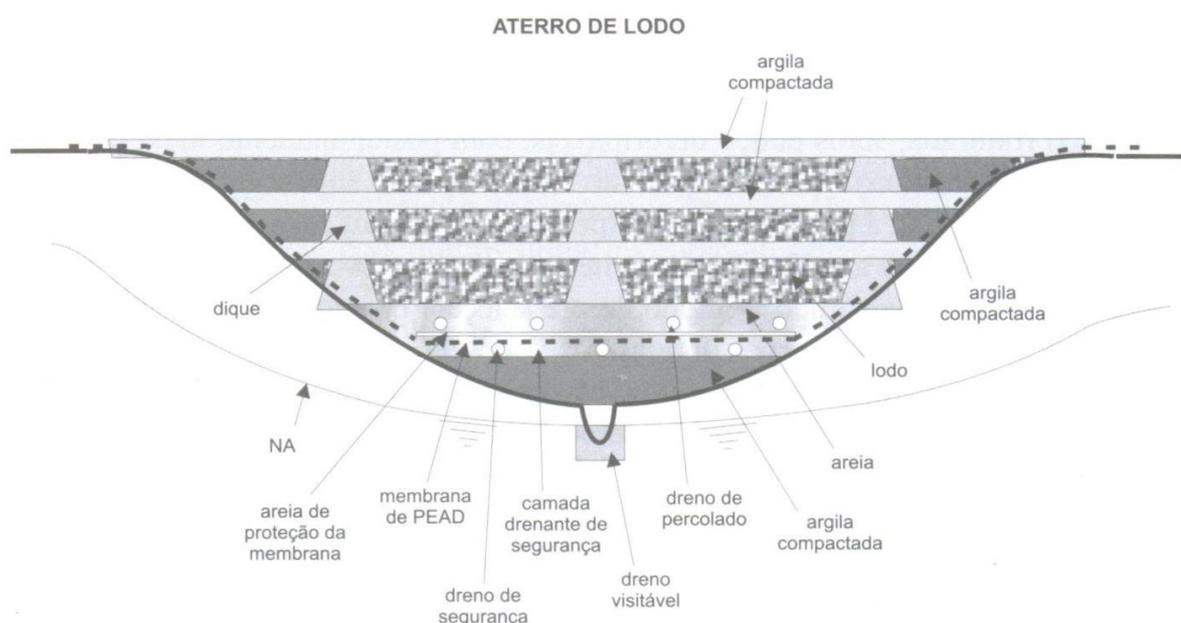
#### 3.6.1 Aterros exclusivos

Os aterros sanitários exclusivos são adequados às características do lodo que receberá, sendo, então, uma forma correta do ponto de vista ambiental. O ideal é que o lodo apresente teor de sólidos maior que 30%, ou que tenha sido seco termicamente.

As formas mais simples de concepção de um aterro exclusivo são os sistemas de trincheiras estreitas e de trincheiras largas. Nas fendas estreitas, entre 1 e 3 m, o lodo não precisa ter teor de sólidos maior que 30%, porque a massa se acomoda suportando as laterais das valas. A recuperação do lodo é alcançada apenas pela drenagem superficial do solo. Este sistema é recomendado para pequenos volumes.

No caso da utilização de fendas largas, entre 3 e 15 m, é necessário que o lodo apresente teor de sólidos totais maior que 40%. Neste sistema existe a necessidade de utilizar equipamentos nas valas e, por isso, a estrutura deve suportar a movimentação dos veículos pesados (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

A Figura 4 abaixo ilustra um aterro exclusivo para disposição do lodo de uma região metropolitana.



**Figura 4:** Detalhes do aterro exclusivo para disposição do lodo de uma região metropolitana (Fonte: LUDUVICE e FERNANDES, 2001)

### 3.6.2 Co-disposição com resíduos sólidos

Para ser co-disposto em aterros sanitários, o lodo não deve possuir características que lhe confirmem periculosidade e é desejável que sua umidade seja previamente reduzida por algum processo de desidratação (em torno de 20% de sólidos totais). Caso contrário pode ocorrer lixiviação muito alta, ocasionando instabilidade nas paredes do aterro (BRINGHENTI *et al.*, 2007).

Acredita-se que o resíduo sólido urbano absorva o excesso de umidade do lodo, reduzindo assim a migração de percolado, e que esta alternativa seja mais econômica que aterros específicos para cada um destes resíduos. Entretanto, caso o lodo não esteja devidamente estabilizado, pode-se ter problemas de odores indesejáveis bem piores do que os dos resíduos (BRINGHENTI *et al.*, 2007).

A proporção lodo/resíduos urbanos deve ser definida em função das características dos dois resíduos e das características do aterro. Segundo MALINA (1993), citada por LUDUVICE e FERNANDES (2001), comparando ao aterro exclusivo, a quantidade de lodo por hectare é baixa, variando de 180 a 1600 t/ha em base seca.

### 3.6.3 Seleção de áreas e consideração dos impactos ambientais

Antes de se escolher a área para a implantação de um aterro, devem ser feitos os devidos estudos de impactos ambientais, pois existem muitos impactos associados a sua criação. A Tabela 8 resume as características a serem avaliadas na escolha de áreas de aterros sanitários.

**Tabela 8:** Principais aspectos ambientais para escolha de áreas de aterros sanitários

Aspecto considerado	Características a serem avaliadas
Águas superficiais e subterrâneas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geologia e hidrologia do local</li><li>• Localização de corpos d'água superficiais</li><li>• Localização da área na bacia hidrográfica e uso dos recursos hídricos</li><li>• Climatologia local</li></ul>
Ar	<ul style="list-style-type: none"><li>• Climatologia local</li><li>• Incidência de ventos</li><li>• Distância e áreas de transição até os locais habitados</li></ul>
Solo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Características dos solos</li><li>• Flora e fauna do local</li><li>• Geologia e hidrologia do local</li></ul>
Meio antrópico	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alteração da paisagem</li><li>• Alterações estéticas</li><li>• Distâncias de zonas habitadas</li><li>• Ventos dominantes</li><li>• Variação do valor da terra</li><li>• Legislação local</li></ul>

Fonte: GÓMEZ (1998), citado por LUDUVICE e FERNANDES (2001)

Segundo LUDUVICE e FERNANDES (2001), as principais vantagens da disposição em aterros são: baixo custo; flexibilidade, pois recebe quantidades variáveis de lodo; absorção do excedente de demandas de outras formas de destino final; operação independente de fatores externos. Quanto às principais desvantagens, LARA *et al.* (2001) citam: necessidade de grandes áreas próximas a centros urbanos; características especiais de solo; isolamento ambiental; produção de gases e percolado; dificuldade de reintegração da área após desativação.

#### 3.6.4 Elementos básicos de projeto

Segundo LUDUVICE e FERNANDES (2001), em um projeto de aterro sanitário exclusivo, devem ser considerados fatores como:

- Capacidade do aterro, que deve ser calculada com base no volume de lodo a ser disposto durante um determinado período de tempo (entre 15 e 20 anos);
- Impermeabilização do leito do aterro, para impedir a infiltração de percolados e, conseqüentemente, a contaminação de águas subterrâneas;
- Drenagem de águas pluviais, para que se evitem cargas de líquidos percolados no aterro;
- Drenagem de percolados, de forma a evitar a contaminação de águas subterrâneas;
- Drenagem de gases, tais como CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, de forma a evitar a deterioração da qualidade do ar;
- Tratamento de percolados, pois apresentam alta carga orgânica e outros poluentes;
- Construção de edificações de apoio;
- Monitoramento do aterro durante sua vida útil e anos depois de seu encerramento, porque a produção de percolados e gases só se encerra em torno de 20 anos depois da desativação;
- Encerramento do aterro, com liberação da área para outras finalidades.

#### 3.7 Considerações sobre geração de biogás

As tecnologias de geração de biogás são aquelas que têm por objetivo principal maximizar a produção de metano na etapa de estabilização do lodo, independentemente do destino final que se pretende dar a ele. O gás gerado pode ser usado para aproveitamento na própria ETE como fonte combustível nos processos de tratamento, reduzindo a demanda de gás natural, ou para geração de energia elétrica (GWRC, 2008).

Com tal objetivo, utilizam-se os processos de hidrólise térmica ou de destruição celular, em unidades anteriores à digestão anaeróbia. Pode-se empregar, ainda, a digestão anaeróbia termofílica ou a digestão em vários estágios.

A hidrólise térmica e a destruição celular têm como princípio a criação de condições favoráveis para a solubilização dos sólidos presentes no lodo, acelerando a liberação do material orgânico nele contido para degradação anaeróbia e conseqüente geração de biogás.

A digestão termofílica, por sua vez, se caracteriza pela faixa de temperatura entre 50-60°C. Nessa faixa, desenvolvem-se as bactérias termofílicas. Com relação ao processo mesofílico, a digestão termofílica apresenta vantagens, tais como menor tempo de detenção do lodo, maior destruição de patogênicos, melhores características de desidratação, maior redução de sólidos voláteis e, conseqüentemente, maior produção de biogás. Entre as desvantagens, estão maior consumo de energia para aquecimento, maior concentração de amônia, maior produção de odores (GWRC, 2008).

Já na digestão anaeróbia em vários estágios, ocorre primeiramente a digestão termofílica, à temperatura de 65°C. Em seguida, passa-se a um segundo estágio, no qual se dá a digestão mesofílica, a 37°C. O tempo de detenção é da ordem de 2,5 dias para a primeira parte do processo, acrescido de 10 dias no digestor mesofílico. Nesse processo, o lodo é também higienizado, o que é uma vantagem em relação à digestão unicamente mesofílica. O consumo de biogás é da ordem de 0,09 kWh/hab.dia, enquanto a produção de gás é de 0,13 kWh/hab.dia (NEDER, 2005). Na digestão anaeróbia em dois estágios, há significativo aumento da produção de biogás, com o aumento da destruição dos sólidos voláteis (GWRC, 2008).

Adotados processos que maximizam a geração de biogás nos processos anaeróbios de estabilização do lodo, é necessário ainda avaliar a melhor opção de destino final para o lodo. Ou seja, as tecnologias de geração de biogás não são uma forma de disposição final, mas sim uma maximização da eficiência dos processos anaeróbios de produção de metano. Dessa forma, após essas etapas, o lodo deve ter destinação final adequadamente definida, de acordo com suas características físicas, químicas e biológicas.

### **3.8 Tendências do gerenciamento do lodo no Brasil, nos EUA e na Europa**

Nos países desenvolvidos, a produção de lodo tem sofrido incrementos, devido à expansão das redes coletoras e dos sistemas de tratamento de esgotos. Ao mesmo tempo, as exigências quanto à qualidade do lodo estão se tornando cada vez maiores, em função dos potenciais impactos ambientais. Dessa forma, têm-se buscado sistemas de gerenciamento do lodo mais eficazes, principalmente devido à expectativa de aumento dos custos de disposição final.

Observa-se atualmente maior interesse em sistemas de secagem térmica, na peletização do lodo e em outros processos mais avançados que visam a melhoria da qualidade dos biossólidos, como a compostagem, a estabilização alcalina e os sistemas patenteados de produção de insumos a partir do lodo (FERNANDES *et al.*, 2001).

A disposição em aterros tem sido vista como prática não-sustentável em muitos países. A ela ainda estão associados custos crescentes em função das maiores distâncias e do atendimento às restrições ambientais. Diante disso, a reciclagem do lodo tem sido estimulada por políticas públicas, pois se trata de uma opção mais econômica e ambientalmente mais adequada. A aplicação agrícola, o reuso industrial e a recuperação de materiais são exemplos de reciclagem do lodo.

Por sua vez, a incineração tem sofrido restrições nos Estados Unidos, embora se tenha verificado um aumento da eficácia e da economia de energia nos processos. Na Europa, entretanto, percebe-se uma tendência de crescimento de uso dessa opção tecnológica (FERNANDES *et al.*, 2001). A Tabela 9 mostra as tendências do gerenciamento de biossólidos nos Estados Unidos e na Europa.

**Tabela 9:** Tendências do gerenciamento do lodo nos EUA e na Europa (↑ crescente ↓ decrescente)

Processos	EUA	Europa
Produção de lodo	↑	↑
Processos mais eficazes de secagem	↑	↑
Processos mais avançados de beneficiamento e higienização	↑	↑
Reciclagem de esgoto	↑	↑
Disposição em aterros	↓	↓
Incineração	↓	↑
Disposição oceânica	Banida	↓
Exigências legais	↑	↑
Níveis de metais no biossólido	↓	↓
Eficiência energética e recuperação de energia	↑	↑
Terceirização na gestão de biossólidos	↑	↑
Custos da gestão de biossólidos	↑	↑
Exigências da sociedade em relação às condições ambientais	↑	↑
Exigência dos agricultores em relação à qualidade dos biossólidos	↑	↑

Fonte: FERNANDES *et al.* (2001)

No Brasil, o gerenciamento do lodo tem sido bastante negligenciado. Por vezes, no momento da concepção da estação de tratamento de esgotos, o sistema de tratamento e disposição final do lodo não é adequadamente detalhado. Dessa forma, a gestão tem sido realizada sem planejamento e, muitas vezes, de forma emergencial pelas operadoras. Por este motivo, opções inadequadas de disposição final têm sido utilizadas, não sendo incomum o lançamento do lodo nos corpos receptores, de forma a comprometer os benefícios dos investimentos realizados nos sistemas de coleta e tratamento de esgotos (FERNANDES *et al.*, 2001).

A legislação brasileira tem passado por importantes ajustes no tocante aos critérios adotados para o uso do lodo de ETE's em áreas agrícolas, objetivando a melhoria da qualidade do solo, a disposição final adequada do lodo gerado e a minimização de riscos à saúde humana e ambiental. As diretrizes foram estabelecidas pela resolução CONAMA 375/2006 e definem as seguintes metodologias para redução de contaminantes: digestão anaeróbia, digestão aeróbia, compostagem, estabilização química e secagem, seguida de incorporação no solo, além de procedimentos para o controle de agentes patogênicos para enquadramento do lodo como classes A e B (ANDREOLI *et al.*, 2007).

Em termos de investimentos públicos no setor de saneamento ambiental, o PROSAB surge como importante mecanismo de fomento com o objetivo de apoiar o desenvolvimento de pesquisas e o aperfeiçoamento de tecnologias nas áreas de águas de abastecimento, águas residuárias e resíduos sólidos (ANDREOLI *et al.*, 2007). No caso específico do gerenciamento do lodo, a Rede 4/Lodo do PROSAB contempla e incentiva a continuidade dos estudos iniciados recentemente no Brasil sobre o assunto e permite sua ampliação.

#### 4. GERENCIAMENTO DO LODO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SCHÖNESTADT

Passa-se, neste capítulo, à caracterização do saneamento ambiental da cidade hipotética de Schönestadt, cujas características populacionais se assemelham às de grandes metrópoles, tais como São Paulo, Rio de Janeiro, Cidade do México, entre outras.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2008, publicado pela Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (CESA), 80% da população do estado é atendida por rede coletora de esgotos sanitários. Do volume total coletado, 73% é destinado a tratamento. A Região Metropolitana de Schönestadt (RMS) é formada por Schönestadt e mais 36 municípios, que ocupam 8.000 km<sup>2</sup> do território do estado. Em 2008, a população da região era de 20.012.512 habitantes (46% do total estadual), constituindo, portanto, a maior demanda por serviços de saneamento.

Na RMS, o sistema principal de esgotos conta com cinco grandes estações de tratamento de esgotos operadas pela CESA: Alfa, Beta, Gama, Delta e Épsilon. Em todas elas, o processo de tratamento é de lodo ativado convencional, com grau de eficiência de 90% de remoção de carga orgânica medida em DBO. A Figura 5 abaixo esquematiza o processo de lodo ativado convencional, utilizado nas ETE's do sistema principal da RMS.



**Figura 5:** Sistema de lodo ativado convencional  
(Fonte: VON SPERLING, 2005)

O processo de tratamento dos esgotos sanitários é constituído de duas fases: líquida e sólida. As unidades da primeira são: estação elevatória final; grades médias mecanizadas; caixas de areia; decantadores primários; tanque de aeração; decantadores secundários. Já as da fase sólida, em geral, englobam adensamento por gravidade; adensamento por flotação; digestão anaeróbia; condicionamento químico dos lodos; desidratação mecânica.

Finalmente, os sistemas de apoio incluem edifício dos compressores; gasômetro e queimadores; edifício das caldeiras; sistema de água de utilidades; sistema elétrico; sistema de supervisão e controle e sistema de controle de odores.

## 4.1 Caracterização das ETE's principais e do tratamento do lodo

### 4.1.1 ETE Alfa

A ETE Alfa foi inaugurada em julho de 1998. Atende atualmente uma população equivalente de 1,4 milhões de habitantes. A vazão média de projeto é de 3.000 L/s e a vazão atual<sup>1</sup> é de 1.600 L/s.

Nesta estação, o lodo gerado é submetido às seguintes etapas de tratamento e condicionamento: adensamento gravimétrico do lodo primário; adensamento por flotação do lodo secundário; digestão anaeróbia em dois estágios dos lodos primário e secundário adensados; desaguamento mecanizado dos lodos digeridos com filtros-prensa de placas e aplicação de cloreto férrico e cal.

O desempenho dos adensadores tem se mostrado insatisfatório. O adensador por gravidade eleva o teor de sólidos de 2,5% para apenas 3,0%. No adensamento por flotação, o lodo adensado apresenta teor de sólidos inferior a 2,5%, com captura de sólidos no subnadante inferior a 85%.

Os digestores também apresentam desempenho muito abaixo do esperado. O desaguamento do lodo, por sua vez, tem apresentado elevado desempenho, com produção de tortas com 35% de teor de sólidos. Destacam-se, porém, as altas dosagens de cloreto férrico e de cal, empregadas no condicionamento químico.

### 4.1.2 ETE Beta

A ETE Beta começou a operar em abril de 1988 e é a maior dentre as estações de Schönestadt, atendendo atualmente uma população equivalente de 4,4 milhões de habitantes. Sua vazão média de projeto é de 9.500 L/s e sua vazão atual é de 8.380 L/s.

Nesta ETE, o tratamento do lodo se dá através dos seguintes processos: adensamento gravimétrico do lodo primário; adensamento por flotação do lodo secundário, complementado com adensamento mecanizado através de centrífugas e aplicação de polímeros; digestão anaeróbia em dois estágios dos lodos primário e secundário adensados; desaguamento mecanizado do lodo digerido com filtros-prensa de placas e aplicação de cloreto férrico e polímero, complementado com centrífugas.

Em termos de teor final de sólidos, os processos de adensamento têm apresentado resultados satisfatórios. Entretanto, na digestão anaeróbia, foram identificadas deficiências operacionais, as quais resultam em eficiência de apenas 30% de destruição de sólidos voláteis.

Com relação ao desaguamento, as condições de desidratação são consideradas razoáveis, com produção de tortas com 25% de teor de sólidos.

---

<sup>1</sup> Valor referente ao ano de 2008. A observação é válida para todas as ETE's aqui descritas.

#### 4.1.3 ETE Gama

A ETE Gama iniciou suas atividades em agosto de 1998. Atende uma população equivalente de 720 mil habitantes. A vazão média de projeto é de 1.500 L/s e a vazão atual é de 750 L/s.

Nesta estação, o lodo passa pelas seguintes etapas de tratamento e condicionamento: adensamento gravimétrico dos lodos primário e secundário; digestão anaeróbia em dois estágios dos lodos primário e secundário adensados; desaguamento mecanizado dos lodos digeridos em filtros-prensa de placas e aplicação de cloreto férrico e polímero.

Os adensadores têm apresentando desempenho muito baixo. Assim como a digestão anaeróbia, que apresenta eficiência de apenas 15% na destruição dos sólidos voláteis. O desaguamento do lodo, entretanto, apresenta bom desempenho, produzindo tortas com teor de sólidos de 30%.

#### 4.1.4 ETE Delta

A ETE Delta começou a operar em outubro de 1982. Atende atualmente uma população equivalente de 720 mil habitantes. A vazão média de projeto é de 1.500 L/s, enquanto a vazão atual é de 740 L/s.

Nesta estação, os lodos primário e secundário são submetidos à digestão anaeróbia em dois estágios após adensamento no poço de armazenamento de lodo do decantador primário. Em seguida, ocorre a etapa de desaguamento mecanizado dos lodos digeridos através de filtros-prensa de placas e aplicação de cloreto férrico e cal hidratada.

Com relação ao desempenho das unidades, a digestão anaeróbia tem se mostrado eficiente e estável, com destruição de sólidos voláteis entre 40 e 50% e boa produção de biogás. Quanto ao desaguamento do lodo, o processo também tem se mostrado eficiente, com produção de tortas com teor médio de sólidos de 38%.

#### 4.1.5 ETE Épsilon

A ETE Épsilon foi inaugurada em março de 1998, com vazão média de projeto de 2.500 L/s. Opera hoje com vazão de 2.100 L/s, atendendo uma população equivalente de 1,2 milhões de habitantes.

Nesta estação, o tratamento da fase sólida é constituído apenas por adensamento por flotação; condicionamento químico e desidratação mecânica através de filtros-prensa de placas.

Quanto ao desempenho das unidades, destaca-se o bom desempenho do adensador por flotação, resultando em lodo com teor de sólidos superior a 4,5%. No condicionamento químico, por sua vez, os resultados satisfatórios só são alcançados à custa de elevadas dosagens de cal e cloreto férrico. Já o desaguamento do lodo tem sido considerado adequado, com geração de tortas com teor de sólidos superior a 30%, embora esse valor seja resultante da grande quantidade de produtos químicos aplicados ao lodo.

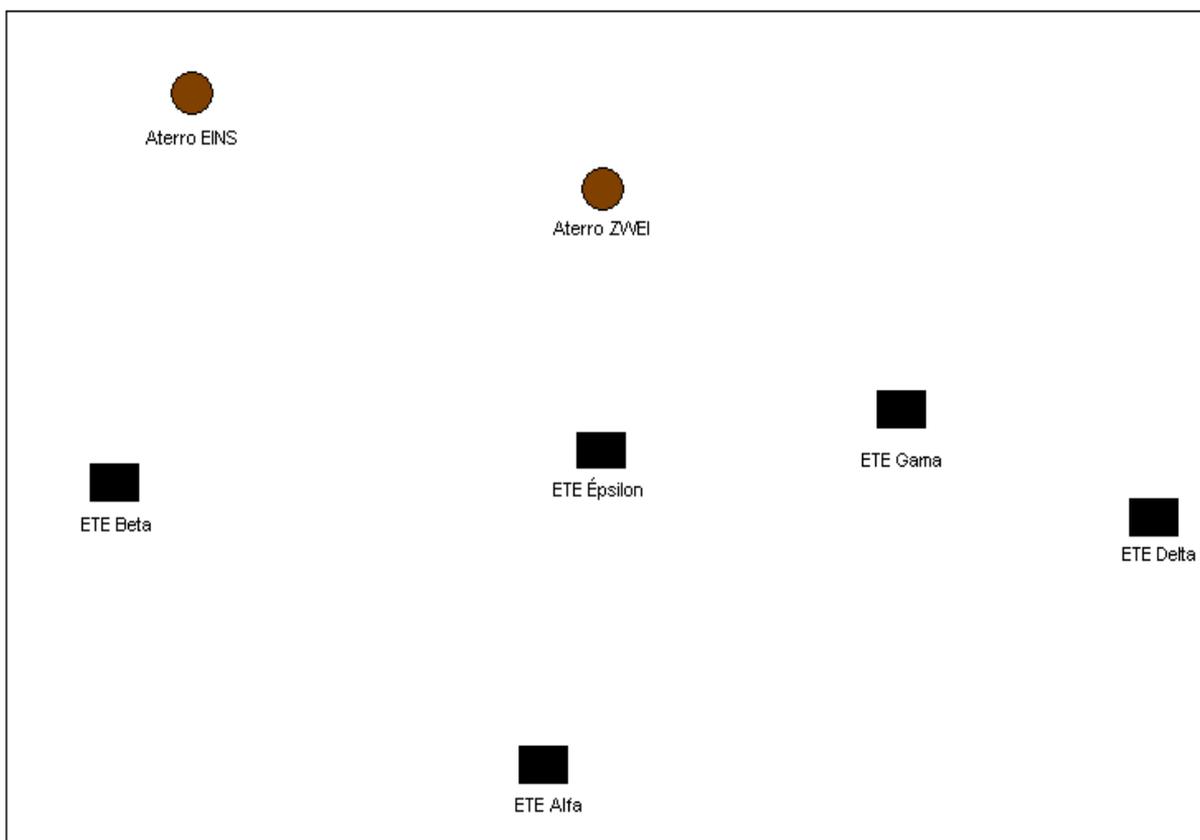
A Tabela 10 é um quadro-resumo das características principais de cada estação.

**Tabela 10:** Caracterização das ETE's da RMS

ETE	Início da operação	Vazão de esgoto tratado (L/s)	População equivalente (milhões de hab.)	Teor de sólidos das tortas de lodo (%)
Alfa	Julho/98	1.600	1,4	35
Beta	Abril/88	8.380	4,4	25
Gama	Agosto/98	750	0,72	30
Delta	Outubro/82	740	0,72	38
Épsilon	Março/98	2.100	1,2	30

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

A Figura 6 esquematiza a localização das ETE's e dos aterros sanitários da RMS.



**Figura 6:** Localização das ETE's e dos aterros sanitários da RMS (sem escala)

#### 4.2 Caracterização quantitativa do lodo

A Tabela 11 seguinte mostra as quantidades de resíduos sólidos produzidas em 2008 no tratamento da fase líquida de cada uma das ETE's da RMS. Os sólidos grosseiros removidos no gradeamento são identificados como gradeado; a areia é o resíduo removido nos desarenadores; e o lodo inclui os resíduos gerados nas etapas de tratamento primário e secundário biológico.

**Tabela 11:** Quantidades diárias de resíduos sólidos produzidos nas ETE's do sistema principal em 2008

ETE	Vazão de esgoto tratado (m <sup>3</sup> /s)	Quantidades de resíduos (t/dia) Base úmida			Taxas de produção (kg/m <sup>3</sup> de esgoto tratado)		
		Gradeado	Areia	Lodo	Gradeado	Areia	Lodo
Alfa	1,60	0,4	0,36	85	0,0029	0,0026	0,6149
Beta	8,38	3,9	18,7	110	0,0054	0,0258	0,1519
Gama	0,75	0,4	0,46	35	0,0062	0,0071	0,5401
Delta	0,74	0,1	2,20	48	0,0016	0,0344	0,7508
Épsilon	2,10	2,9	1,10	61	0,0160	0,0061	0,3362

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

### 4.3 Caracterização qualitativa do lodo

Embora os sistemas de tratamento da RMS sejam destinados a esgotos predominantemente sanitários, há também contribuições de efluente de instalações industriais, principalmente às ETE's Alfa, Beta e Delta. Dessa forma, os lodos nelas gerados são caracterizados por presença significativa de metais pesados. É fundamental conhecer tais concentrações no momento de concepção do sistema de gerenciamento do lodo, pois podem inviabilizar determinada opção de destinação final.

Em 2008, foram feitas análises quanto à presença de microrganismos patogênicos nos lodos das cinco ETE's. As concentrações de bactérias dos grupos coliformes totais e fecais caracterizaram todos eles como de classe B, segundo a resolução CONAMA 375/05. Dessa forma, não é possível o uso agrícola irrestrito do lodo somente desidratado.

### 4.4 Descrição do cenário atual do gerenciamento do lodo gerado nas ETE's

O cenário atual do gerenciamento do lodo das estações de tratamento do sistema principal de esgotos da RMS se caracteriza pela total dependência da co-disposição com resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. Além disso, o baixo desempenho dos processos de tratamento e condicionamento do lodo contribui para sua pequena redução volumétrica, o que resulta em maior demanda de espaço nos aterros.

Atualmente o lodo gerado nas ETE's da RMS é disposto em dois aterros sanitários. Os lodos provenientes das estações Alfa, Gama, Delta e Épsilon são dispostos no Aterro Zwei. Já o lodo da ETE Beta é encaminhado para o Aterro Eins. Como o Aterro Eins é de grande porte e jovem (em operação desde 2004), ele se constitui na solução atualmente mais confortável para a CESA Schönestadt. A expectativa de vida útil de ambos os aterros é de 15 a 20 anos para recebimento do lodo gerado nas ETE's da RMS. Entretanto, diante das dificuldades de implantação de novos aterros por questões ambientais e de indisponibilidade de áreas livres, é preciso revisar a opção atual de destino final do lodo da região metropolitana.

No que diz respeito aos aspectos técnicos e operacionais, destaca-se o baixo teor de sólidos que a maior parte do lodo gerado apresenta. O recomendável é que o valor seja da ordem de 40%. Porém, a ETE Beta, que contribui com aproximadamente metade do lodo disposto, produz lodo com 25% de teor de sólidos. Em relação às outras estações, o valor observado entre 30 e 38% somente é atingido devido às elevadas concentrações de cal aplicadas, o que resulta em aumento de massa e volume do lodo destinado aos aterros.

Futuramente, as etapas de tratamento e condicionamento do lodo serão completamente desativadas na ETE Épsilon. O lodo passará a ser enviado à ETE Beta em estado bruto e terá, dessa forma, as mesmas características pós-condicionamento do lodo desta estação.

Por fim, diante de questões destacadas anteriormente, como a vida útil dos aterros existentes, o aumento dos volumes de esgotos tratados, o arrefecimento das condicionantes ambientais e a evolução tecnológica, a disposição em aterros deve ser considerada como a única solução apenas no curto prazo. É necessário que sejam levantadas outras opções de destino final para os lodos gerados que sejam viáveis técnica, econômica e ambientalmente.

#### 4.5 Estimativa de produção futura de lodo na RMS

A Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt forneceu as estimativas de produção de lodo para descarte, incluindo perdas e aditivos, para desenvolvimento deste trabalho.

A Tabela 12 mostra a produção atual de lodo para descarte (ano base 2008), incluindo os aditivos e as perdas com o efluente final de cada ETE estudada. Considerou-se um teor médio de sólidos de 30% e uma concentração de 30mg SST/L no efluente final.

**Tabela 12:** Produção diária atual de lodo de descarte incluindo aditivos e perdas com o efluente final

ETE	Lodo (t/d)	TS (%)	Produção de descarte (t ST/d)	Vazão de esgotos (L/s)	SST no efluente (mg/L)	Perda com efluente (t SST/d)	Produção de descarte + perdas (t ST/d)
Alfa	85	30%	25,5	1600	30	4,1	29,6
Beta	110	30%	33,0	8380	30	21,7	54,7
Gama	35	30%	10,5	750	30	1,9	12,4
Delta	48	30%	14,4	740	30	1,9	16,3
Épsilon	75	30%	22,50	2100	30	5,4	27,9

ST = Sólidos Totais; SST = Sólidos Suspensos Totais

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

O Plano Diretor de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Schönestadt, elaborado em 2008, prevê duas grandes séries de ampliações em quatro de suas estações de tratamento esgotos, as quais são: Alfa, Beta, Gama e Delta. As primeiras obras deverão ser concluídas em 2018. Em 2030, será finalizada a segunda série de ampliações.

A Tabela 13 apresenta as razões entre as vazões médias projetadas para os anos 2018 e 2030, após ampliações, e as atuais. A ETE Épsilon não passará por ampliações e suas etapas de gerenciamento do lodo serão desativadas até 2015, quando este, em estado bruto, será transferido para a ETE Beta.

**Tabela 13:** Razões entre as vazões de esgoto ocorridas após as ampliações e em 2008

ETE	Vazão 2008 (L/s)	Vazão 2018 (L/s)	Vazão 2030 (L/s)	Q <sub>2018</sub> /Q <sub>2008</sub>	Q <sub>2030</sub> /Q <sub>2008</sub>
Alfa	1.600	3.200	3.520	2,0	2,2
Beta	8.380	22.626	23.464	2,7	2,8
Gama	750	3.750	4.500	5,0	6,0
Delta	740	3.700	4.440	5,0	6,0
Épsilon	2.100	-	-	-	-

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

Com base na produção atual de lodo de descarte, incluindo aditivos e perdas com o efluente final, e nas razões acima apresentadas, estimou-se a produção futura de lodo de cada ETE para os anos 2018 e 2030. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 14 abaixo.

**Tabela 14:** Produções diárias de lodo projetadas para as ampliações em 2018 e 2030 em t/d

ETE	Q <sub>2018</sub> /Q <sub>2008</sub>	Q <sub>2030</sub> /Q <sub>2008</sub>	Produção 2008 (t/d)	Produção projetada 2018 (t/d)	Produção projetada 2030 (t/d)
Alfa	2,0	2,2	29,6	59,3	65,2
Beta*	2,7	2,8	54,7	175,7	181,2
Gama	5,0	6,0	12,4	62,2	74,7
Delta	5,0	6,0	16,3	81,6	97,9
<b>TOTAL</b>			<b>113,1</b>	<b>378,8</b>	<b>419,0</b>

\*Recebe o lodo da ETE Épsilon

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

As projeções de produção de lodo de descarte para a região metropolitana de Schönestadt caracterizam cidades de grande porte. Pela dimensão dos valores, percebe-se a necessidade de promover um gerenciamento adequado do lodo, de modo a garantir os benefícios resultantes dos investimentos feitos no setor de saneamento ambiental das cidades.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo como objetivo principal deste trabalho a avaliação do impacto da implantação da secagem térmica nos custos de disposição em aterros sanitários do lodo proveniente de ETE's, foram desenvolvidos diferentes cenários para o gerenciamento do lodo na RMS.

Inicialmente, analisou-se o procedimento atual empreendido pela companhia de saneamento de Schönestadt e as conseqüências de sua manutenção ao longo dos próximos vinte anos. Em seguida, passou-se à análise das conseqüências da implantação da secagem térmica distintamente, de modo a atingir diferentes teores de sólidos, a fim de identificar o melhor cenário técnico-econômico. Por fim, foi avaliado como opção alternativa à disposição em aterros sanitários o uso em culturas de eucalipto.

Além das soluções expostas acima, considerou-se também a opção de aproveitamento do biogás gerado nos digestores da etapa de estabilização anaeróbia do lodo. Esta opção, entretanto, não exclui a necessidade de destinação final adequada do lodo.

### 5.1 Considerações iniciais

O estudo da viabilidade técnico-econômica das soluções tecnológicas aqui propostas se baseou nos dados de produção de lodo de descarte estimados para os anos 2018 e 2030, quando as etapas de gerenciamento do lodo da ETE Épsilon estarão desativadas. Dessa forma, considera-se que as ETE's Alfa, Beta, Gama e Delta apresentam etapas de gerenciamento do lodo. As etapas, por sua vez, incluem adensamento por gravidade e flotação, condicionamento físico-químico, estabilização anaeróbia, desidratação mecânica do lodo e destinação final.

Com relação à secagem térmica, a escolha da localização dos secadores térmicos se deu em função das taxas de produção de lodo e da disponibilidade de área. Desse modo, ficou evidente, de acordo com suas elevadas taxas de produção (ver capítulo 4), a viabilidade da instalação dos equipamentos na ETE Beta. Esta estação processará o próprio lodo e o lodo bruto da ETE Épsilon.

No tocante às demais estações, a ETE Alfa é a que apresenta a menor produção de lodo, tendo sido, portanto, descartada para receber as instalações da secagem térmica. Definiu-se, então, como localização, a ETE Gama, pois, embora não apresente maior taxa de produção que a ETE Delta, esta última não tem disponibilidade de área. Os secadores térmicos da ETE Gama processarão o próprio lodo e os lodos desidratados das ETE's Alfa e Delta.

A Tabela 15 resume a localização dos secadores térmicos, bem como a proveniência dos lodos processados nesses equipamentos.

**Tabela 15:** Localização dos secadores térmicos e proveniência do lodo processado

Localização dos secadores térmicos	Lodos processados nos secadores térmicos
Beta	Beta e Épsilon
Gama	Gama, Alfa e Delta

Como opção alternativa à disposição em aterros sanitários, considerou-se o uso produtivo do lodo em culturas de eucalipto para produção de papel e celulose por se tratar de uma atividade agrícola em crescente desenvolvimento nas antigas fazendas cafeeicultoras do Brasil.

Quanto ao aproveitamento de biogás, não se propôs aqui qualquer modificação física nas etapas de digestão anaeróbia mesofílica, realizada nas estações da RMS. O que se pretendeu foi dar duas opções de uso para o biogás, atualmente, liberado diretamente para a atmosfera: produção de eletricidade e utilização nos processos subsequentes do gerenciamento do lodo das ETE's.

O aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica se deu somente no caso em que não se considerou a secagem térmica. Nos demais casos, o biogás foi utilizado somente para os processos de digestão anaeróbia e secagem térmica, sendo o eventual excedente, então, liberado para atmosfera. Tal decisão se deu em função dos elevados custos de capital das turbinas a gás, considerando que o principal objetivo das estações de tratamento de esgotos é tratar os efluentes sanitários, e não gerar energia elétrica.

## 5.2 Definição dos cenários

Foram definidos seis cenários, divididos da seguinte forma:

- Procedimento atual: compreende os cenários A1 e A2. Para este grupo, a base dos cenários é o procedimento atualmente empreendido pela CESA, ou seja, desidratação mecânica do lodo até um teor de sólidos de 30%, seguida de transporte e disposição nos aterros sanitários Eins e Zwei. O cenário A1 é este cenário base. Já o cenário A2 inclui o aproveitamento do biogás gerado no processo de estabilização anaeróbia para produção de eletricidade nas quatro estações de tratamento.
- Secagem térmica: compreende os cenários B1, B2 e B3. Os cenários deste grupo têm como base a secagem térmica do lodo, previamente desidratado, nas ETE's Beta e Gama, seguida de transporte e disposição final nos aterros Eins e Zwei. A diferença entre eles está no teor final de sólidos do lodo. Para os cenários B1, B2 e B3, os teores finais de sólidos são, respectivamente, 50%, 75% e 90%. A partir deles, é possível calcular a quantidade correspondente de secadores térmicos e, conseqüentemente, os custos totais para cada cenário. Inclui-se em todos eles, o aproveitamento do biogás gerado nos digestores das ETE's Beta e Gama para uso nos processos de digestão anaeróbia e secagem térmica.

- Opção alternativa à disposição em aterros: compreende o cenário C1. Neste caso, o lodo passa pela secagem térmica, nas ETE's Beta e Gama, até um teor de sólidos de 90%, sendo, em seguida, transportado até a área agrícola. O lodo não é, portanto, disposto em aterros sanitários. Aqui, também há aproveitamento do biogás gerado nos digestores das ETE's Beta e Gama para os processos de digestão anaeróbia e secagem térmica.

A Tabela 16 seguinte é um quadro-resumo dos cenários expostos acima.

**Tabela 16:** Cenários de gerenciamento do lodo das ETE's da RMS

<b>Cenário</b>	<b>Caracterização do cenário</b>
A1	Procedimento atual <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desidratação mecânica a 30%</li> <li>• Transporte</li> <li>• Disposição nos aterros Eins e Zwei</li> </ul>
A2	Procedimento atual + aproveitamento energético <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desidratação mecânica a 30%</li> <li>• Aproveitamento do biogás dos digestores para geração de eletricidade</li> <li>• Transporte</li> <li>• Disposição nos aterros Eins e Zwei</li> </ul>
B1	Secagem térmica <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desidratação mecânica a 30%</li> <li>• Secagem térmica a 50% (secadores térmicos em Beta e Gama)</li> <li>• Aproveitamento do biogás dos digestores de Beta e Gama para uso nos secadores</li> <li>• Transporte</li> <li>• Disposição nos aterros Eins e Zwei</li> </ul>
B2	Secagem térmica <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desidratação mecânica a 30%</li> <li>• Secagem térmica a 75% (secadores térmicos em Beta e Gama)</li> <li>• Aproveitamento do biogás dos digestores de Beta e Gama para uso nos secadores</li> <li>• Transporte</li> <li>• Disposição nos aterros Eins e Zwei</li> </ul>
B3	Secagem térmica <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desidratação mecânica a 30%</li> <li>• Secagem térmica a 90% (secadores térmicos em Beta e Gama)</li> <li>• Aproveitamento do biogás dos digestores de Beta e Gama para uso nos secadores</li> <li>• Transporte</li> <li>• Disposição nos aterros Eins e Zwei</li> </ul>
C1	Alternativa à disposição em aterros sanitários <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desidratação mecânica a 30%</li> <li>• Secagem térmica a 90% (secadores térmicos em Beta e Gama)</li> <li>• Aproveitamento do biogás dos digestores de Beta e Gama para uso nos secadores</li> <li>• Transporte</li> <li>• Uso em área agrícola</li> </ul>

### 5.3 Caracterização dos equipamentos

Neste item são caracterizados os digestores anaeróbios e os secadores térmicos, com base nas características dos equipamentos atualmente disponíveis no mercado brasileiro.

#### 5.3.1 Digestores anaeróbios

Nas quatro estações de tratamento, o processo de estabilização do lodo se dá através da digestão anaeróbia mesofílica, caracterizada pela temperatura de 35 °C.

Os digestores têm formato cilíndrico e apresentam diferentes dimensões para cada ETE, conforme indicado na Tabela 17 abaixo.

**Tabela 17:** Caracterização dos digestores anaeróbios

ETE	Número de digestores	Altura (m)	Diâmetro (m)	Área das paredes (m <sup>2</sup> )	Volume útil (m <sup>3</sup> )
Alfa	03	12,0	33,0	2.099	8.211
Beta	13	10,0	33,0	1.892	6.842
Gama	07	14,0	33,0	2.307	9.579
Delta	14	12,0	33,0	2.099	8.211

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

### 5.3.2 Secadores térmicos

Os secadores térmicos avaliados no presente trabalho são do tipo leito fluidizado e têm capacidade de evaporação de 8.100 kg de água por hora, secando o lodo a um teor de sólidos mínimo de 90%. O sistema de secagem térmica inclui os ciclones, equipamentos para tratamento dos gases emitidos.

Como fontes energéticas para o processo, têm-se o gás natural, o biogás dos digestores anaeróbios de lodo e a energia elétrica. O cálculo dos volumes demandados de gás natural e biogás foi feito com base no balanço energético dos processos de cada ETE.

Além disso, a quantidade necessária de secadores térmicos é função da quantidade de água a ser evaporada. Diante disso, para cada cenário, será calculado, também, o número de aparelhos necessários, a partir do teor final de sólidos desejado.

## 5.4 Dados de entrada

Para rodagem dos cenários, considerou-se que as estimativas de entrada nos digestores anaeróbios e de produção de lodo de descarte para o ano de 2018 representam o valor médio a ser adotado durante todo o tempo de projeto. Em outras palavras, esses valores foram dados como invariáveis no tempo. Exclusivamente para o cálculo do número de digestores, considerou-se a produção estimada para o ano de 2030. A Tabela 18 apresenta os dados de entrada, adotados neste trabalho.

**Tabela 18:** Dados diários de entrada para digestão anaeróbia e secagem térmica

ETE	Entrada do digestor		SV/ST	SV destruídos (kg SVT/d)	Lodo desidratado 2018 (kg ST/d)	Lodo desidratado 2030 (kg ST/d)	Volume (m <sup>3</sup> /d)
	kg ST/d	kg SVT/d					
Alfa	148.250	111.187	0,75	55.594	59.300	65.200	181,35
Beta	439.250	351.400	0,80	175.700	175.700	181.200	537,31
Gama	155.500	116.625	0,75	58.313	62.200	74.700	190,21
Delta	204.000	153.000	0,75	76.500	81.600	97.900	249,54

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

## 5.5 Definição de parâmetros e constantes

A Tabela 19 mostra os parâmetros adotados para o cálculo do balanço energético de todas as ETE's.

**Tabela 19:** Parâmetros adotados para o cálculo do balanço energético

Parâmetros	Valor adotado	Faixa usual	Unidade
TS lodo bruto	3	3-8 <sup>b</sup>	%
TS lodo desidratado	30	25-40 <sup>a</sup>	%
TS lodo seco	90	90-95 <sup>d</sup>	%
Massa específica lodo bruto	1.009	1005-1010 <sup>b</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Massa específica lodo desidratado	1.090	-	kg/m <sup>3</sup>
Massa específica lodo seco	1.270	-	kg/m <sup>3</sup>
Temperatura do lodo bruto	25 <sup>d</sup>		°C
Temperatura do lodo desidratado	20 <sup>d</sup>		°C
Temperatura do lodo seco	110 <sup>d</sup>		°C
Remoção de SV	50 <sup>d</sup>	40-55 <sup>a</sup>	%
Produção de gás	1,10	0,8-1,1 <sup>a</sup>	m <sup>3</sup> /kg SV destruídos
Poder calorífico do biogás (70% CH <sub>4</sub> )	20,93 <sup>d</sup>	22,5-25,0 <sup>b</sup>	MJ/m <sup>3</sup> biogás
Poder calorífico do biogás (70% CH <sub>4</sub> )	5.000 <sup>d</sup>	5.370-5.970 <sup>b</sup>	kcal/m <sup>3</sup> biogás
Poder calorífico do biogás (70% CH <sub>4</sub> )	5,86 <sup>d</sup>	6,25-10 <sup>a</sup>	kW/m <sup>3</sup> biogás
Poder calorífico do lodo digerido	13,0	8,0-15,0 <sup>a</sup>	MJ/kg ST lodo digerido
Poder calorífico do lodo digerido	5.500	5.500 <sup>b</sup>	kcal/kg SV lodo digerido
Calor específico da água	4,2 <sup>a</sup>	-	J/g. °C
Massa específica da água	1.000	-	kg/m <sup>3</sup>
Calor latente de evaporação da água	560	-	cal/g
Calor específico do lodo seco	0,40 <sup>d</sup>	-	Mcal/t. °C
Coefficiente de transferência de calor	3,0	2-5 <sup>a</sup>	J/s.m <sup>2</sup> . °C
Eficiência da CHP: calor	55	-	%
Eficiência da CHP: eletricidade	35	-	%
Rendimento da turbina a gás	28 <sup>d</sup>	-	%
Rendimento do secador térmico	65 <sup>d</sup>	-	%
Poder calorífico inferior do gás natural	9.060 <sup>d</sup>	-	kcal/Nm <sup>3</sup>
Poder calorífico inferior do biogás	5.000 <sup>d</sup>	-	kcal/Nm <sup>3</sup>
Poder calorífico inferior do lodo	5.500 <sup>b</sup>	-	kcal/kg SSV
Consumo de eletricidade no secador térmico	653 <sup>e</sup>	-	kWh/t H <sub>2</sub> O

<sup>a</sup> ANDREOLI et al. (2001); <sup>b</sup> JORDÃO e PESSOA (1995); <sup>c</sup> METCALF & EDDY (2003); <sup>d</sup> Projeto Tietê/SABESP (2002); <sup>e</sup> ANDRITZ, informação técnica concedida mediante solicitação

## 5.6 Considerações sobre a secagem térmica

### 5.6.1 Cálculo da massa específica do lodo

A massa específica do lodo ( $\rho$ ) varia em função de seu teor de sólidos de acordo com a equação 1:

$$\rho = TS\rho_{100\%} + (1 - TS)\rho_{0\%} \quad (1)$$

Com  $\rho$  = Massa específica do lodo (kg/m<sup>3</sup>)

TS = Teor de sólidos do lodo (%)

$\rho_{100\%}$  = Massa específica do lodo com TS = 100% (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{0\%}$  = Massa específica do lodo com TS = 0% (kg/m<sup>3</sup>)

### 5.6.2 Equação de mistura

Como os secadores térmicos atualmente mais usados pelas companhias brasileiras de saneamento secam o lodo no mínimo a um teor de sólidos de 90%, foi preciso definir uma equação de mistura entre uma parcela de lodo seco a 90% e outra de lodo apenas desidratado a 30%, a fim de alcançar os teores de sólidos desejados (50, 75 e 90%, para os cenários B1, B2 e B3, respectivamente).

Diante disso, definiu-se a seguinte equação de mistura:

$$M_{ds} = \frac{M \cdot TS_s}{TS_d} \left( \frac{TS_m - TS_d}{TS_s - TS_d} \right) \quad (2)$$

Com  $M$  = Massa seca total de lodo desidratado (kg)

$M_{ds}$  = Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica (kg)

$TS_s$  = Teor de sólidos do lodo seco (%)

$TS_m$  = Teor de sólidos do lodo misturado (%)

$TS_d$  = Teor de sólidos do lodo desidratado (%)

### 5.6.3 Cálculo da quantidade de água evaporada diariamente

A quantidade de água evaporada é útil para a determinação do número de secadores térmicos necessários, uma vez que a capacidade do equipamento é dada em quilogramas de água evaporada por hora. Diante disso, definiu-se a equação 3 para a massa de água evaporada ( $M_{ae}$ ):

$$M_{ae} = M_d - M_m \quad (3)$$

Com  $M_{ae}$  = Massa de água evaporada (kg)

$M_d$  = Massa de lodo desidratado (kg)

$M_m$  = Massa de lodo misturado (kg)

As massas de lodo desidratado ( $M_d$ ) e misturado ( $M_m$ ) são calculadas pelas equações 4 e 5:

$$M_d = \frac{M}{TS_d} \quad (4)$$

$$M_m = \frac{M}{TS_m} \quad (5)$$

Com  $M$  = Massa seca total de lodo desidratado (kg)

$TS_d$  = Teor de sólidos do lodo desidratado (%)

$TS_m$  = Teor de sólidos do lodo misturado (%)

#### 5.6.4 Cálculo da quantidade de secadores térmicos

A quantidade de secadores térmicos (n) é determinada a partir da massa de água evaporada referente à produção estimada de lodo para o ano 2030, através da equação 6:

$$n = \frac{M_{ae}}{C} \quad (6)$$

Com n = Número de secadores térmicos

C = Capacidade do secador térmico (kg/h)

#### 5.6.5 Cálculo do consumo de água potável demandada

O consumo de água potável (C<sub>a</sub>) nos secadores térmicos se dá pela equação 7 abaixo.

$$C_a = \frac{M_{ae} \cdot c_a}{1000} \quad (7)$$

Com C<sub>a</sub> = Consumo de água potável (m<sup>3</sup>)

c<sub>a</sub> = Consumo específico de água potável (m<sup>3</sup>/tH<sub>2</sub>O)

### 5.7 Balanços de massa-volume e energia

Para cada ETE, foram desenvolvidos os balanços de massa-volume e energia diários para os processos. Lembra-se que a ETE Beta processa seu próprio lodo e o lodo bruto da ETE Épsilon; enquanto a ETE Gama processa o lodo próprio bruto e os lodos desidratados das ETE's Alfa e Delta. Em outras palavras, no balanço de massa-volume da ETE Gama, haverá acréscimo das massas de lodo desidratado das ETE's Alfa e Delta para o processo de secagem térmica.

#### 5.7.1 Balanços de massa-volume

A Figura 7 esquematiza o balanço de massa-volume para os cenários A1 e A2 em que o lodo, após a digestão anaeróbia, é diretamente destinado aos aterros sanitários.

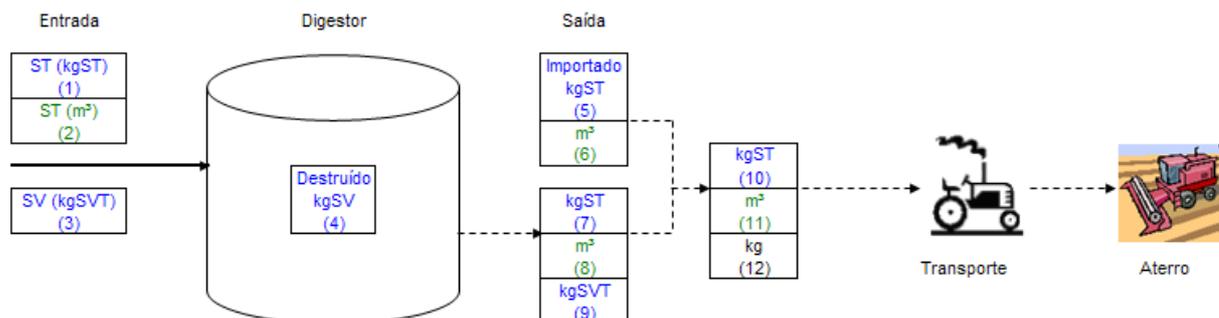
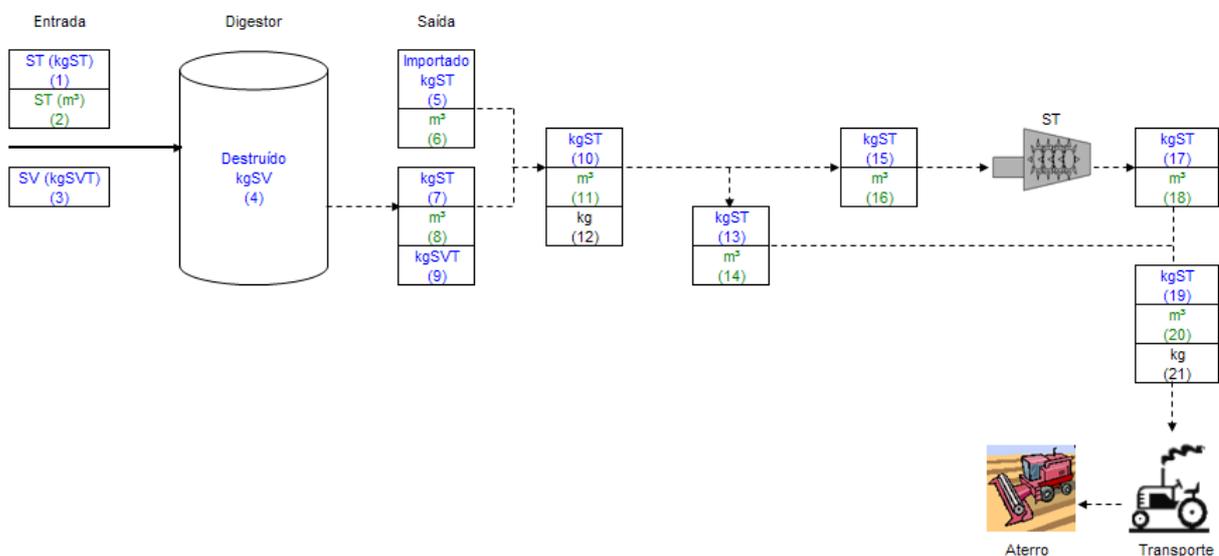


Figura 7: Balanço de massa-volume para os cenários A1 e A2

As células numeradas correspondem a:

- (1) Sólidos totais pré-digestão anaeróbia em kg ST;
- (2) Sólidos totais pré-digestão anaeróbia em m<sup>3</sup>;
- (3) Sólidos voláteis totais pré-digestão anaeróbia em kg SVT;
- (4) Sólidos voláteis destruídos na digestão anaeróbia em kg SV;
- (5) Sólidos totais digeridos provenientes de outras ETE's em kg ST;
- (6) Sólidos totais digeridos provenientes de outras ETE's em kg m<sup>3</sup>;
- (7) Sólidos totais pós-digestão anaeróbia em kg ST;
- (8) Sólidos totais pós-digestão anaeróbia em m<sup>3</sup>;
- (9) Sólidos voláteis totais pós-digestão anaeróbia em kg SVT;
- (10) Sólidos totais para disposição em aterro sanitário em kg ST;
- (11) Sólidos totais para disposição em aterro sanitário em m<sup>3</sup>;
- (12) Massa de lodo para disposição em aterro sanitário em kg.

A Figura 8, por sua vez, esquematiza o balanço de massa-volume dos cenários B1, B2 e B3 para as ETE's em que há secagem térmica (Beta e Gama). Para as outras ETE's, o balanço de massa-volume se assemelha ao representado na Figura 6, com a diferença de que o destino final do lodo não é o aterro, mas a ETE que o recebe para o processo de secagem térmica.



**Figura 8:** Balanço de massa-volume para os cenários B1, B2 e B3

Os itens de (1) a (9) são idênticos aos da Figura 6. Os seguintes representam:

- (10) Sólidos totais pré-secagem térmica em kg ST;
- (11) Sólidos totais pré-secagem térmica em m<sup>3</sup>;
- (12) Massa de lodo pré-secagem térmica em kg;
- (13) Sólidos totais a TS 30% para mistura em kg ST;
- (14) Sólidos totais a TS 30% para mistura em m<sup>3</sup>;
- (15) Sólidos totais a TS 30% para secagem térmica em kg ST;

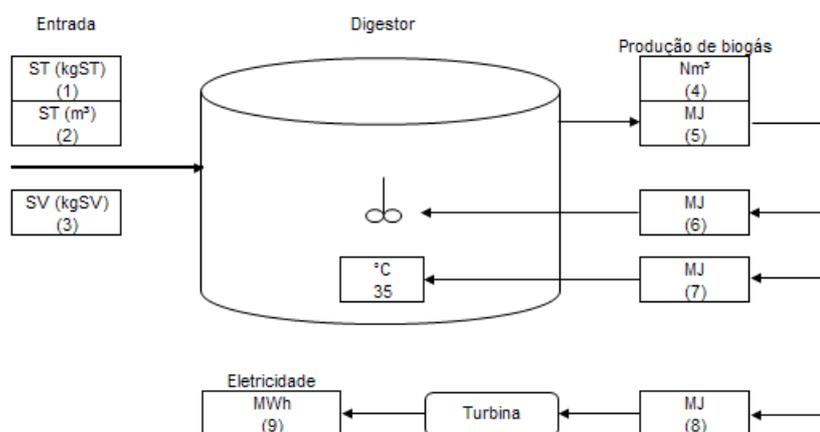
- (16) Sólidos totais a TS 30% para secagem térmica em m<sup>3</sup> ST;
- (17) Sólidos totais pós-secagem térmica em kg ST;
- (18) Sólidos totais pós-secagem térmica em m<sup>3</sup>;
- (19) Sólidos secos totais para transporte e disposição em aterros em kg ST;
- (20) Sólidos secos totais para transporte e disposição em aterros em m<sup>3</sup>;
- (21) Massa de lodo para transporte e disposição em aterros em kg.

Para o cenário C1, no qual também ocorre secagem térmica a 90% nas ETE's Beta e Gama, o balanço de massa-volume se assemelha ao representando na Figura 8. A única diferença é a destinação final. No caso, o destino final é o uso em culturas de eucalipto.

### 5.7.2 Balanços energéticos

Os balanços de energia consideram as demandas e as produções energéticas para as ETE's em que há aproveitamento do biogás dos digestores anaeróbios.

A Figura 9 ilustra o balanço energético para o cenário A2, em que há aproveitamento do biogás gerado nos digestores anaeróbios de todas as ETE's. Cada estação de tratamento apresenta um balanço energético estruturado dessa forma.



**Figura 9:** Balanço energético para o cenário A2

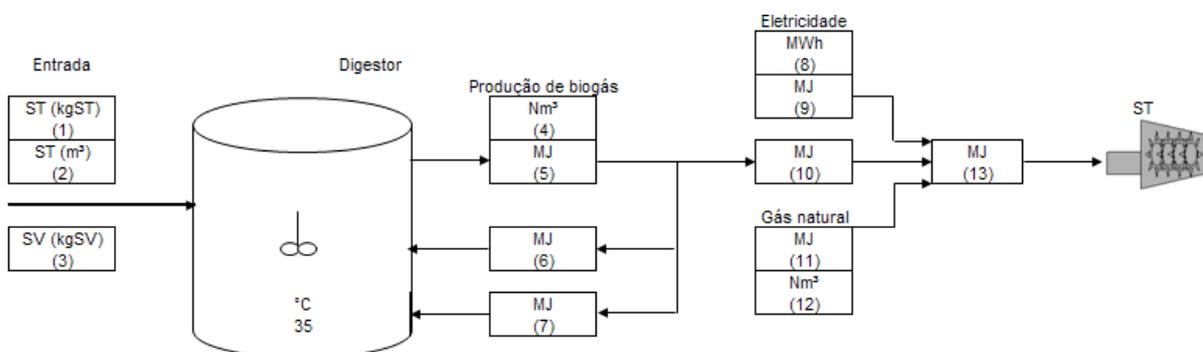
As células numeradas correspondem:

- (1) Sólidos totais pré-digestão anaeróbia em kg ST;
- (2) Sólidos totais pré-digestão anaeróbia em m<sup>3</sup>;
- (3) Sólidos voláteis totais pré-digestão anaeróbia em kg SVT;
- (4) Biogás produzido em Nm<sup>3</sup>;
- (5) Biogás produzido em MJ;
- (6) Biogás aproveitado para mistura do lodo em MJ;
- (7) Biogás aproveitado para aquecimento do lodo em MJ;
- (8) Biogás restante para aproveitamento na geração de eletricidade em MJ;
- (9) Quantidade de energia elétrica gerada pela turbina em MWh.

Para os cenários B1, B2, B3 e C1, o balanço energético é o mesmo, consideradas as diferenças de demanda e produção. Neles, o biogás é aproveitado no próprio processo de digestão anaeróbia e na secagem térmica, quando há produção suficiente. Fontes adicionais de energia, no caso, de gás natural e eletricidade, também estão contempladas no balanço. Em nenhum dos cenários, porém, há turbinas para geração de eletricidade, mesmo quando há sobra de biogás após a secagem térmica.

A Figura 10 ilustra o balanço energético para os cenários com secagem térmica B1, B2, B3 e C1.

Lembra-se que os secadores térmicos estão localizados somente nas ETE's Beta e Gama, ou seja, o balanço energético representado na Figura 10 corresponde aos processos dessas duas estações de tratamento. As demais ETE's não têm aproveitamento de biogás dos digestores. Portanto, não há balanço desenvolvido para elas individualmente. Considera-se, neste caso, que o biogás gerado nos digestores é simplesmente liberado na atmosfera.



**Figura 10:** Balanço energético para os cenários com secagem térmica

As células de (1) a (7) são idênticas às da Figura 9. As demais células numeradas correspondem a:

- (8) Quantidade demandada de energia elétrica em MWh;
- (9) Quantidade demandada de energia elétrica em MJ;
- (10) Biogás restante para aproveitamento na secagem térmica em MJ;
- (11) Quantidade demandada de gás natural em MJ;
- (12) Quantidade demandada de gás natural em Nm<sup>3</sup>;
- (13) Quantidade total de energia demandada pela secagem térmica em MJ.

## 5.8 Cálculos para o balanço energético

Neste item são apresentados os cálculos feitos para determinar o balanço energético das ETE's.

### 5.8.1 Produção de biogás

A quantidade, em m<sup>3</sup>, de biogás produzido nos digestores anaeróbios é dada pelo produto entre a massa de sólidos voláteis destruídos e a taxa de produção de biogás por quilograma de sólidos voláteis destruídos, adotada como 1,1 m<sup>3</sup>/kg SV<sub>destruído</sub>.

Para o cálculo do poder calorífico do biogás, basta multiplicar a quantidade produzida pelo poder calorífico do biogás. Após a digestão anaeróbia, o lodo digerido apresenta um poder calorífico  $\epsilon$ , em MJ, que será utilizado para geração de eletricidade ou para o processo de secagem térmica.

### 5.8.2 Demanda energética do digestor anaeróbio

No processo de digestão anaeróbia, parte da energia demandada é direcionada para aquecimento do lodo, parte é usada para bombeamento e mistura do mesmo.

A demanda energética para aquecimento ( $E_a$ ) é função do tipo de digestão, da massa de lodo afluente, da geometria do equipamento e da temperatura externa. A digestão anaeróbia mesofílica é caracterizada por uma temperatura interna do digestor de 35°C. A geometria e a temperatura externa interferem nas perdas de energia pelas paredes do equipamento. Assim, esta demanda diária de energia é dada pela equação 8:

$$E_a = 1000 \cdot (M_a \cdot c \cdot \Delta T_{dl} + \delta) \cdot n_d \quad (8)$$

Com  $E_a$  = Demanda diária de energia para aquecimento do lodo (MJ)

$M_a$  = Massa de lodo afluente ao digestor (kg)

$c$  = Calor específico da água (kJ/kg. °C)

$\Delta T_{dl}$  = Diferença de temperatura entre o digestor e o lodo (°C)

$\delta$  = Perda diária de energia (kJ)

$n_d$  = Número de digestores

A perda diária de energia ( $\delta$ ) pelas paredes do digestor anaeróbio é dada por:

$$\delta = u \cdot A \cdot \Delta T_{ie} \cdot 86,4 \quad (9)$$

Com  $\delta$  = Perda diária de energia (kJ)

$u$  = Coeficiente de transferência de calor (J/s.m<sup>2</sup>. °C)

$A$  = Área das paredes do digestor anaeróbio (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{ie}$  = Diferença de temperatura entre o digestor e o ambiente externo (°C)

Já a demanda energética diária para bombeamento e mistura do lodo ( $E_{bm}$ ) depende do volume de lodo afluente e do volume útil do digestor. É dada pela equação 10 abaixo.

$$E_{bm} = (V_a \cdot E_b + V_u \cdot E_m) \cdot n_d \quad (10)$$

Com  $E_{bm}$  = Energia diária requerida para bombeamento e mistura do lodo (MJ)

$V_a$  = Volume de lodo afluente (m<sup>3</sup>)

$E_b$  = Energia requerida para bombeamento do lodo (MJ/m<sup>3</sup> lodo)

$V_u$  = Volume útil do digestor (m<sup>3</sup>)

$E_m$  = Energia requerida para mistura do lodo (MJ/m<sup>3</sup> digestor)

Para calcular a demanda energética diária total do digestor anaeróbio ( $E_d$ ), as eficiências de geração de eletricidade e de calor devem ser consideradas. Assim, a demanda total se dá pela equação 11.

$$E_d = E_{bm} \cdot \eta_e + E_a \cdot \eta_c \quad (11)$$

Com  $E_d$  = Demanda energética total do digestor anaeróbio (MJ)  
 $\eta_e$  = Eficiência para geração de eletricidade  
 $\eta_c$  = Eficiência para geração de calor

### 5.8.3 Geração de energia pela turbina a gás

A geração diária de energia pela turbina a gás se dá somente depois que a demanda energética da digestão anaeróbia é suprida pelo biogás gerado neste mesmo processo. Considerando a eficiência da turbina  $\eta_t$ , é possível calcular a eletricidade ( $E_t$ ) gerada diariamente através da equação 12.

$$E_t = \frac{(\varepsilon - E_d) \cdot \eta_t \cdot 0,28}{1000} \quad (12)$$

Com  $E_t$  = Eletricidade gerada (MWh)  
 $\varepsilon$  = Poder calorífico do biogás (MJ)  
 $E_d$  = Demanda energética total do digestor anaeróbio (MJ)  
 $\eta_t$  = Eficiência da turbina a gás

### 5.8.4 Demanda energética do secador térmico

O consumo energético do secador térmico se divide em demanda por eletricidade e por gás natural, sendo que este pode ser substituído pelo biogás gerado nos digestores. A demanda por energia elétrica ( $E_e$ ) é dada por:

$$E_e = \frac{M_{ae} \cdot e_e}{280} \quad (13)$$

Com  $E_e$  = Demanda de energia elétrica (MJ)  
 $M_{ae}$  = Massa de água evaporada (kg)  
 $e_e$  = Consumo específico de energia elétrica (kWh/t)

O calor total ( $E_s$ ) requerido por um secador térmico é dado pela equação 14.

$$E_s = \frac{M_{ds} \cdot c_s \cdot \Delta T_{sd} + M_{ae} \cdot L_v}{\eta_{st}} \quad (14)$$

Com  $E_s$  = Calor total requerido pelo secador térmico (kcal)  
 $M_{ds}$  = Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica (kg)  
 $c_s$  = Calor específico do lodo seco (Mcal/t. °C)  
 $\Delta T_{sd}$  = Diferença de temperatura entre lodo seco e lodo desidratado (°C)  
 $L_e$  = Calor latente de vaporização da água (cal/g)  
 $\eta_{st}$  = Eficiência do secador térmico

Para determinar a quantidade de biogás necessária ( $V_{bst}$ ) para suprir integralmente a demanda energética do secador térmico, utiliza-se a equação 15.

$$V_{bst} = \frac{E_s}{c_{ib}} \quad (15)$$

Com  $V_{bst}$  = Volume de biogás requerido pelo secador térmico ( $Nm^3$ )  
 $c_{ib}$  = Poder calorífico inferior do biogás ( $kcal/Nm^3$ )

A fim de calcular o déficit de biogás no processo de secagem térmica, utiliza-se a equação 16.

$$D_{bst} = \frac{(\varepsilon - E_d) \cdot 238,9}{c_{ib}} - V_{bst} \quad (16)$$

Com  $D_{bst}$  = Déficit de biogás para o secador térmico ( $Nm^3$ )  
 $\varepsilon$  = Poder calorífico do biogás gerado nos digestores (MJ)  
 $E_d$  = Demanda energética total do digestor (MJ)  
 $c_{ib}$  = Poder calorífico inferior do biogás ( $kcal/Nm^3$ )  
 $V_{bst}$  = Volume de biogás requerido pelo secador térmico ( $Nm^3$ )

A equação 17 dá a quantidade de gás natural necessária após o uso do biogás. Obviamente, o gás natural será usado somente no caso de o biogás não suprir totalmente a demanda de calor do secador térmico.

$$V_{gst} = \frac{D_{bst} \cdot c_{ib}}{c_{ig}} \quad (17)$$

Com  $V_{gst}$  = Volume de gás natural requerido pelo o secador térmico ( $Nm^3$ )  
 $D_{bst}$  = Déficit de biogás para o secador térmico ( $Nm^3$ )  
 $c_{ig}$  = Poder calorífico inferior do gás natural ( $kcal/Nm^3$ )

## 5.9 Considerações sobre cálculo dos custos e das receitas

Neste item são abordados os parâmetros para o cálculo dos custos de capital, pessoal, operação, manutenção, insumos, depreciação, transporte e disposição em aterros. Todos esses custos foram estimados para os secadores térmicos. Para as turbinas, porém, foram considerados apenas os custos de capital e as receitas com a venda da energia elétrica produzida.

### 5.9.1 Custos de capital

De acordo com os dados obtidos no mercado, no ano de 2009, os custos de capital para as turbinas e os secadores térmicos são, respectivamente, R\$ 2.000.000,00/MW e R\$ 15.000.000,00 por secador. Para as turbinas, os custos dependem da potência de geração de eletricidade.

### 5.9.2 Custos com pessoal

Para o cálculo dos custos com pessoal, consideraram-se o décimo terceiro salário, os encargos sociais de 90% do salário por mês e a jornada de trabalho de quarenta horas semanais. Os salários mensais da equipe responsável pelo processo de secagem térmica são apresentados na Tabela 20. Considera-se aqui que o número de funcionários independe da quantidade de equipamentos.

**Tabela 20:** Salários mensais dos funcionários da equipe de O&M e supervisão do processo de secagem térmica

Qtd.	Função	Salário	Carga horária		
			h/sem	d/sem	h/d
01	Engenheiro (Supervisor)	R\$ 5.400,00	40	5	8
01	Oficial de manutenção geral	R\$ 1.100,00	40	5	8
01	Oficial de sistemas de saneamento	R\$ 1.500,00	40	5	8
01	Oficial eletricitista de manutenção	R\$ 1.500,00	40	5	8
01	Oficial mecânico de manutenção	R\$ 1.500,00	40	5	8

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

### 5.9.3 Custos de operação e manutenção

Segundo o fabricante dos secadores térmicos, os custos com operação e manutenção correspondem, respectivamente, a 2 e 10% do custo de capital referente às partes eletromecânicas da unidade, o qual representa 47,5% do custo de aquisição da unidade.

### 5.9.4 Custos com insumos

Os insumos do processo de secagem térmica incluem gás natural, energia elétrica e água potável. A Tabela 21 apresenta os custos unitários por insumo em R\$, para o ano de 2009.

**Tabela 21:** Custos unitários dos insumos da secagem térmica

Insumos	Unidade	Custo unitário
Gás natural	Nm <sup>3</sup> /d	R\$ 1,20
Energia elétrica	MWh/d	R\$ 200,00
Água potável	m <sup>3</sup> /d	R\$ 0,80

Fonte: ANDRITZ, informação técnica concedida mediante solicitação (2009)

### 5.9.5 Custos de depreciação

O custo de depreciação é calculado a partir do valor de compra e da vida útil do equipamento. Dessa forma, como um secador térmico custa R\$ 15.000.000,00 e deverá ser pago em 15 anos, tendo, então, um custo de depreciação, dado pela razão entre esses dois valores, igual a R\$ 1.000.000,00 por ano. Como o tempo de projeto e a vida útil são de 20 anos, a partir do décimo sexto ano, esta depreciação será utilizada para a compra de novos secadores, quando este atingir a sua vida útil.

### 5.9.6 Custos de transporte

O custo de transporte é função da distância e da massa úmida do lodo a ser transportado. O custo médio de transporte foi estimado em R\$ 0,57/km.t<sub>úmida</sub>, de acordo com dados fornecidos pela Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt.

Foram considerados no cálculo dos custos com transporte, os deslocamentos entre as estações e das estações até os aterros. A Tabela 22 apresenta as distâncias médias consideradas.

**Tabela 22:** Distâncias médias entre ETE's e entre ETE's e aterros sanitários

Partida	Chegada	Distância (km)
Beta	Eins	35,7
Gama	Zwei	31,9
Delta	Gama	19,7
Delta	Alfa	58,4
Delta	Zwei	51,2
Alfa	Gama	35,8
Alfa	Zwei	31,7
Alfa	Beta	39,6
Delta	Beta	75,9
Gama	Beta	51,4

Fonte: Companhia Estadual de Saneamento Ambiental de Schönestadt (2009)

#### 5.9.7 Custos com disposição em aterros sanitários

De acordo com os valores fornecidos pelas empresas operadoras dos aterros sanitários Eins e Zwei, os custos de disposição foram de R\$ 80 e R\$120 por tonelada úmida, respectivamente, conforme valores atuais de mercado. Lembra-se que o aterro Eins recebe o lodo da ETE Beta; enquanto ao aterro Zwei são destinados os lodos das ETE's Alfa, Gama e Delta.

#### 5.9.8 Receitas geradas com a venda de eletricidade

No cenário A1, a energia elétrica gerada a partir do biogás dos digestores anaeróbios tem valor econômico e pode ser vendida no mercado. O valor médio de venda é de R\$ 30,00 por MWh, conforme dados obtidos para julho de 2009 junto à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.

#### 5.9.9 Cálculo do valor presente do custo total de projeto

O valor presente do custo total de projeto é dado pela equação 18. Considera-se o tempo de projeto de 20 anos e a taxa anual de desconto igual a 12%.

$$C = A \frac{(1+i)^t - 1}{i(1+i)^t} \quad (18)$$

Com C = Custo total de projeto em valor presente (R\$)

A = Custo total anual (R\$)

i = Taxa de desconto anual

t = Tempo de projeto (anos)

O tempo de 20 anos é considerado de 2010 a 2030 (ano da última ampliação). A taxa anual de desconto de 12% é a praticada atualmente no Brasil.

## 6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Considerando as produções estimadas de lodo de descarte para o ano 2018 e os parâmetros adotados (ver capítulos 4 e 5, respectivamente), os cenários foram rodados e, neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos para cada um deles.

### 6.1 Cenário A1

O cenário A1 é caracterizado pela desidratação mecânica do lodo a um teor de sólidos de 30%, seguida de transporte até os aterros sanitários Eins e Zwei, onde se dá a disposição final. Não há aproveitamento do biogás dos digestores. Neste caso, é de interesse o balanço de massa-volume das estações de tratamento, bem como os custos associados de transporte e disposição em aterros.

Lembra-se que o aterro sanitário Eins recebe o lodo da ETE Beta, enquanto as demais estações dispõem seus lodos no aterro Zwei.

#### 6.1.1 Balanços de massa-volume

Abaixo são apresentados os balanços diários de massa-volume para cada ETE. As Figuras 11, 12, 13 e 14 correspondem, respectivamente, aos balanços das ETE's Alfa, Beta, Gama e Delta.

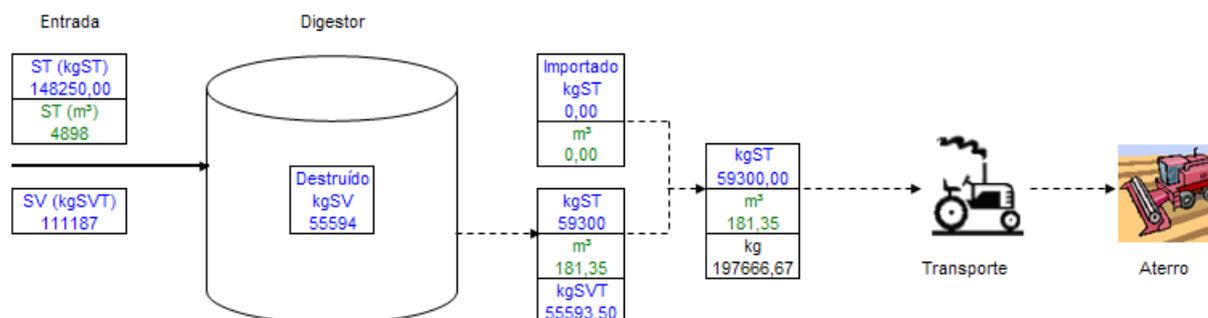


Figura 11: Balanço diário de massa-volume da ETE Alfa para o cenário A1

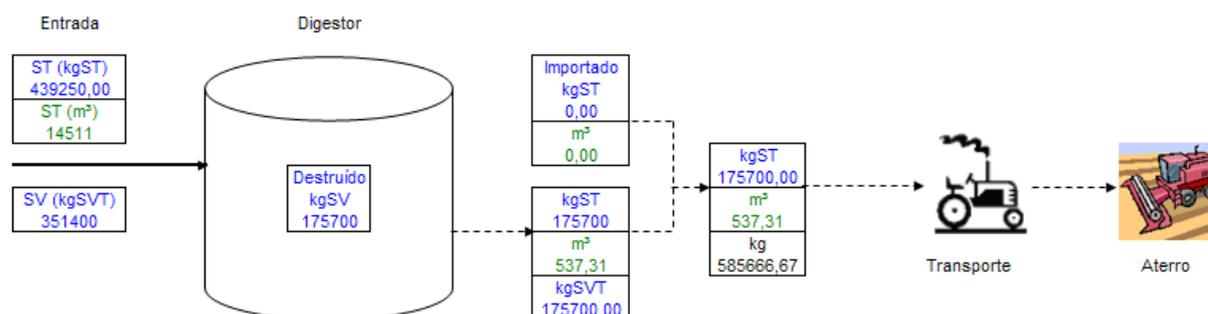
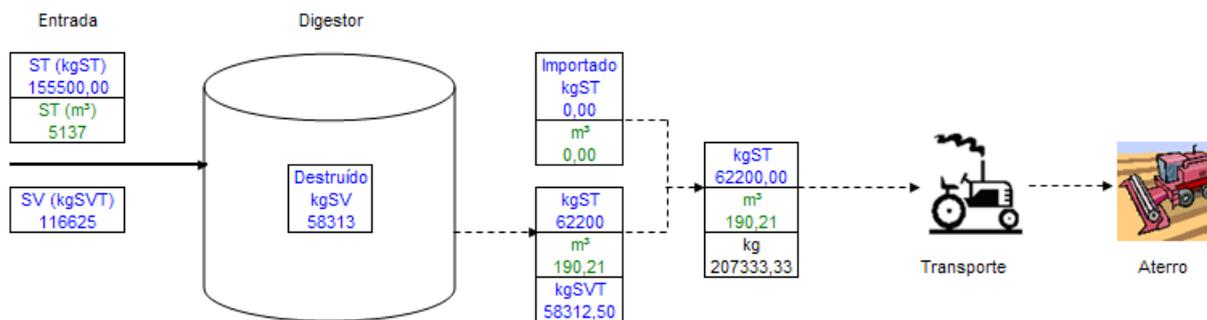
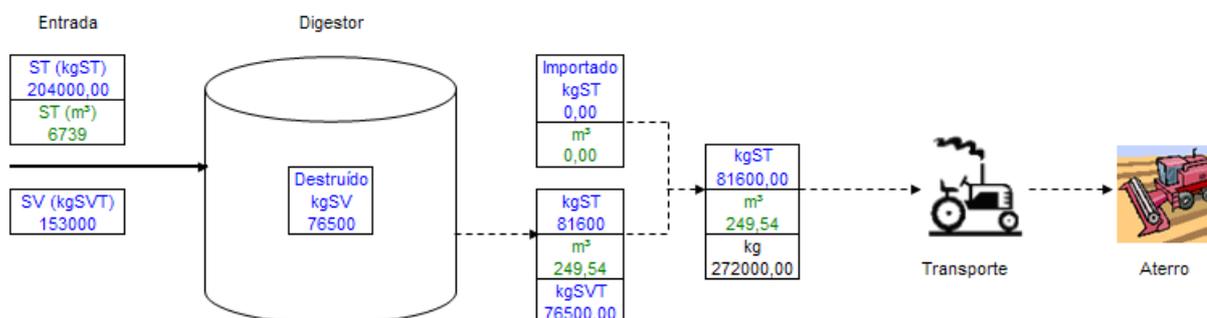


Figura 12: Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário A1



**Figura 13:** Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário A1



**Figura 14:** Balanço diário de massa-volume da ETE Delta para o cenário A1

### 6.1.2 Custos totais

A Tabela 23 apresenta os custos de capital e os custos anuais de pessoal, operação (op.), manutenção (manut.), insumos, depreciação (depr.), transporte e aterro sanitário por estação de tratamento para o cenário A1. Como se trata do cenário-base para comparação, apenas os custos de transporte e aterro sanitário são considerados, dado que os demais já são conhecidos e comuns a todos os cenários, sendo, então, considerados como referencial nulo.

**Tabela 23:** Custo de capital + custos anuais totais do cenário A1 (em R\$)

ETE	Capital	Pessoal	Op.	Manut.	Insumos	Depr.	Transporte	Aterro sanitário	Subtotal
Alfa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.292.951,03	8.539.200,00	9.832.151,03
Beta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4.314.277,74	16.867.200,00	21.181.477,74
Gama	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.364.737,70	8.956.800,00	10.321.537,70
Delta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2.873.612,75	11.750.400,00	14.624.012,75
<b>TOTAL</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>9.845.579,23</b>	<b>46.113.600,00</b>	<b>55.959.179,23</b>

A Tabela 24 apresenta o custo total de projeto em valor presente, dado o tempo de projeto de 20 anos e a taxa de desconto de 12%.

**Tabela 24:** Custo total de projeto em valor presente do cenário A1 (em R\$)

Capital	Operação e Manutenção					Transporte	Aterro sanitário	TOTAL
	Pessoal	Op.	Manut.	Insumos	Depr.			
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	73.540.999,01	344.442.935,51	<b>417.983.934,52</b>



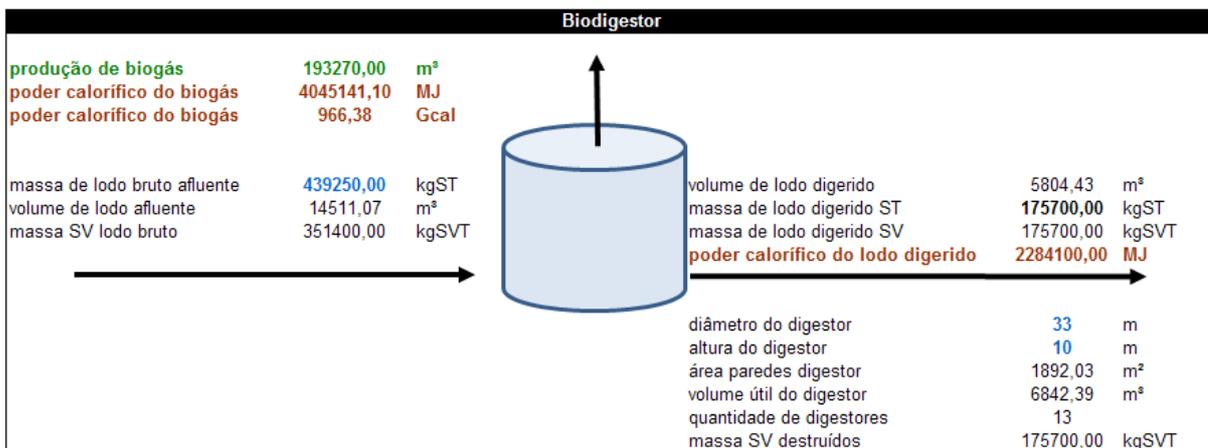


Figura 16: Produção diária de biogás nos digestores da ETE Beta

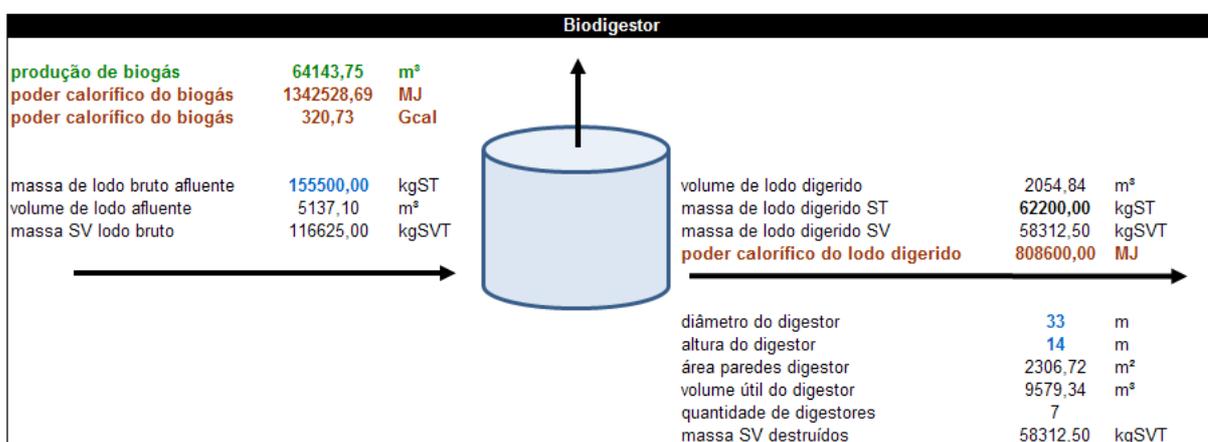


Figura 17: Produção diária de biogás nos digestores da ETE Gama

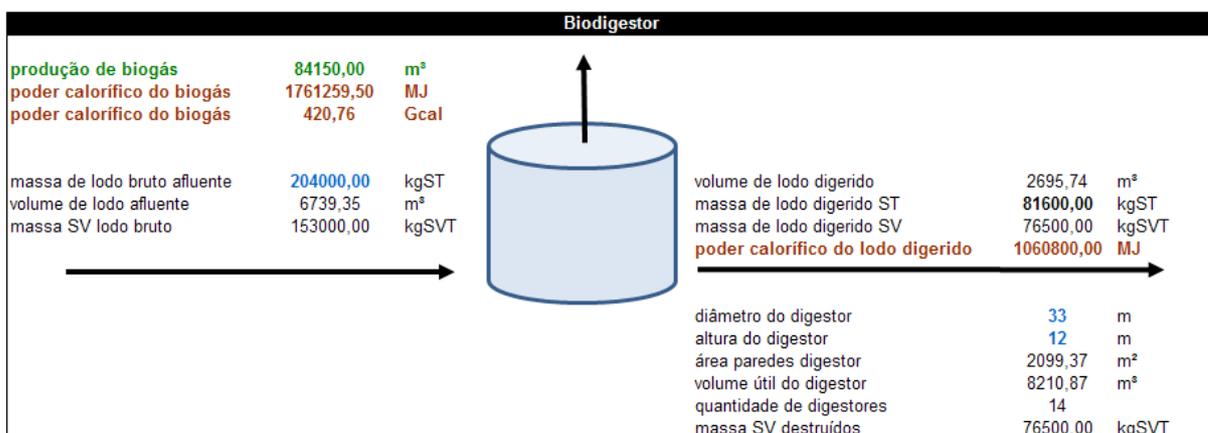


Figura 18: Produção diária de biogás nos digestores da ETE Delta

Nas Tabelas 25, 26, 27 e 28, são apresentados os resultados dos cálculos feitos para determinar os balanços energéticos diários das ETE's Alfa, Beta, Gama e Delta, respectivamente.

**Tabela 25:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Alfa para o cenário A2

<b>Calor: aquecimento</b>		
Temperatura do ar	15	°C
Temperatura do digestor	35	°C
Temperatura do lodo bruto	25	°C
Temperatura externa	25	°C
Perda de calor paredes digestor (Eq. 9)	16.324,73	MJ
<b>Demanda diária de energia para aquecimento (Eq. 8)</b>	<b>35.004,23</b>	<b>MJ</b>
<b>Eletricidade: bombeamento e mistura</b>		
Energia requerida para bombeamento lodo	1,8	MJ/m <sup>3</sup> lodo
Energia requerida para mistura lodo	0,3	MJ/m <sup>3</sup> digestor
<b>Demanda diária de energia pra bombeamento e mistura (Eq. 10)</b>	<b>16.205,44</b>	<b>MJ</b>
<b>Saldo da digestão</b>		
<b>Demanda diária para calor</b>	<b>63.644,06</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária para eletricidade</b>	<b>46.301,25</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária total de energia (Eq. 11)</b>	<b>109.945,32</b>	<b>MJ</b>
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>1.169.983,83</b>	<b>MJ</b>
<b>Turbina a gás</b>		
Quantidade biogás disponível	55.901,83	Nm <sup>3</sup>
<b>Biogás excedente</b>	<b>1.169.983,83</b>	<b>MJ</b>
<b>Potência gerada (Eq. 12)</b>	<b>91,73</b>	<b>MWh</b>
<b>Potência instalada</b>	<b>3,82</b>	<b>MW</b>

**Tabela 26:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário A2

<b>Calor: aquecimento</b>		
Temperatura do ar	15	°C
Temperatura do digestor	35	°C
Temperatura do lodo bruto	25	°C
Temperatura externa	25	°C
Perda de calor paredes digestor (Eq. 9)	63.753,80	MJ
<b>Demanda diária de energia para aquecimento (Eq. 8)</b>	<b>303.584,30</b>	<b>MJ</b>
<b>Eletricidade: bombeamento e mistura</b>		
Energia requerida para bombeamento lodo	1,8	MJ/m <sup>3</sup> lodo
Energia requerida para mistura lodo	0,3	MJ/m <sup>3</sup> digestor
<b>Demanda diária de energia pra bombeamento e mistura (Eq. 10)</b>	<b>52.805,24</b>	<b>MJ</b>
<b>Saldo da digestão</b>		
<b>Demanda diária para calor</b>	<b>551.971,45</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária para eletricidade</b>	<b>150.872,11</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária total de energia (Eq. 11)</b>	<b>702.843,55</b>	<b>MJ</b>
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>3.342.297,55</b>	<b>MJ</b>
<b>Turbina a gás</b>		
Quantidade biogás disponível	159.694,98	Nm <sup>3</sup>
<b>Biogás excedente</b>	<b>3.342.297,55</b>	<b>MJ</b>
<b>Potência gerada (Eq. 12)</b>	<b>262,04</b>	<b>MWh</b>
<b>Potência instalada</b>	<b>10,92</b>	<b>MW</b>

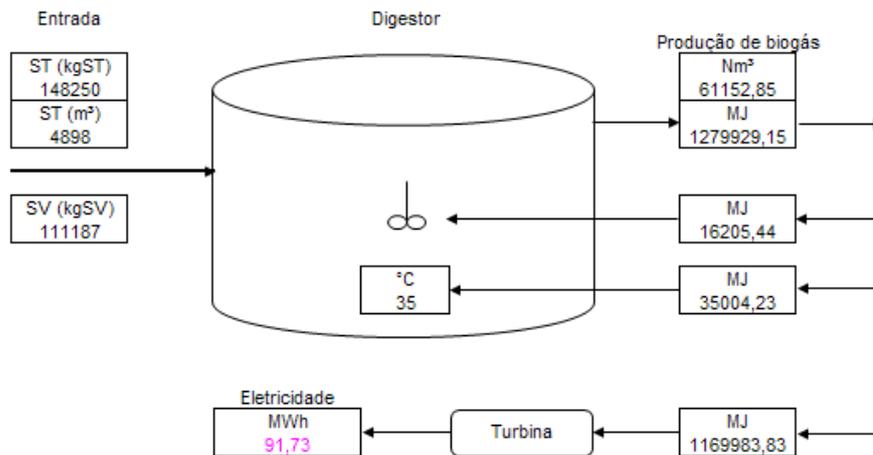
**Tabela 27:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário A2

<b>Calor: aquecimento</b>		
Temperatura do ar	15	°C
Temperatura do digestor	35	°C
Temperatura do lodo bruto	25	°C
Temperatura externa	25	°C
Perda de calor paredes digestor (Eq. 9)	41.853,12	MJ
<b>Demanda diária de energia para aquecimento (Eq. 8)</b>	<b>87.570,12</b>	<b>MJ</b>
<b>Eletricidade: bombeamento e mistura</b>		
Energia requerida para bombeamento lodo	1,8	MJ/m <sup>3</sup> lodo
Energia requerida para mistura lodo	0,3	MJ/m <sup>3</sup> digestor
<b>Demanda diária de energia pra bombeamento e mistura (Eq. 10)</b>	<b>29.363,40</b>	<b>MJ</b>
<b>Saldo da digestão</b>		
<b>Demanda diária para calor</b>	<b>159.218,41</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária para eletricidade</b>	<b>83.895,43</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária total de energia (Eq. 11)</b>	<b>243.113,84</b>	<b>MJ</b>
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
<b>Turbina a gás</b>		
Quantidade biogás disponível	52.530,04	Nm <sup>3</sup>
<b>Biogás excedente</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
<b>Potência gerada (Eq. 12)</b>	<b>86,19</b>	<b>MWh</b>
<b>Potência instalada</b>	<b>3,59</b>	<b>MW</b>

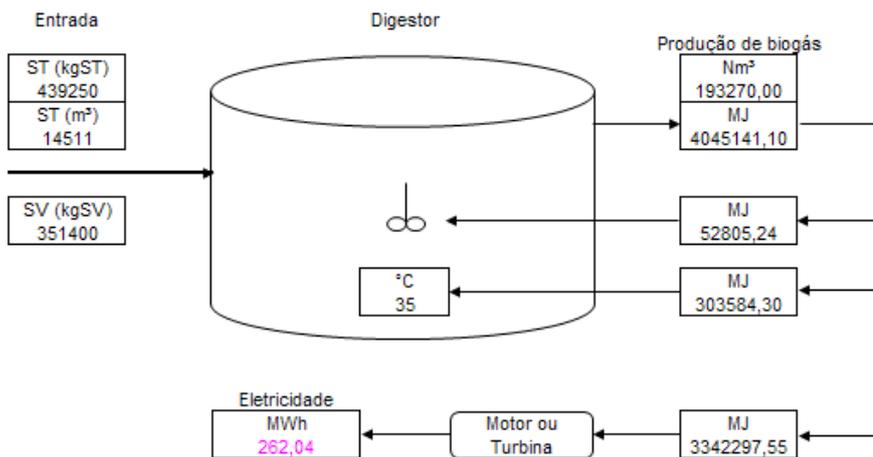
**Tabela 28:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Delta para o cenário A2

<b>Calor: aquecimento</b>		
Temperatura do ar	15	°C
Temperatura do digestor	35	°C
Temperatura do lodo bruto	25	°C
Temperatura externa	25	°C
Perda de calor paredes digestor (Eq. 9)	76.182,09	MJ
<b>Demanda diária de energia para aquecimento (Eq. 8)</b>	<b>196.134,09</b>	<b>MJ</b>
<b>Eletricidade: bombeamento e mistura</b>		
Energia requerida para bombeamento lodo	1,8	MJ/m <sup>3</sup> lodo
Energia requerida para mistura lodo	0,3	MJ/m <sup>3</sup> digestor
<b>Demanda diária de energia pra bombeamento e mistura (Eq. 10)</b>	<b>46.616,46</b>	<b>MJ</b>
<b>Saldo da digestão</b>		
<b>Demanda diária para calor</b>	<b>356.607,44</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária para eletricidade</b>	<b>133.189,89</b>	<b>MJ</b>
<b>Demanda diária total de energia (Eq. 11)</b>	<b>489.797,33</b>	<b>MJ</b>
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>1.271.462,17</b>	<b>MJ</b>
<b>Turbina a gás</b>		
Quantidade biogás disponível	60.750,46	Nm <sup>3</sup>
<b>Biogás excedente</b>	<b>1.271.462,17</b>	<b>MJ</b>
<b>Potência gerada (Eq. 12)</b>	<b>99,68</b>	<b>MWh</b>
<b>Potência instalada</b>	<b>4,15</b>	<b>MW</b>

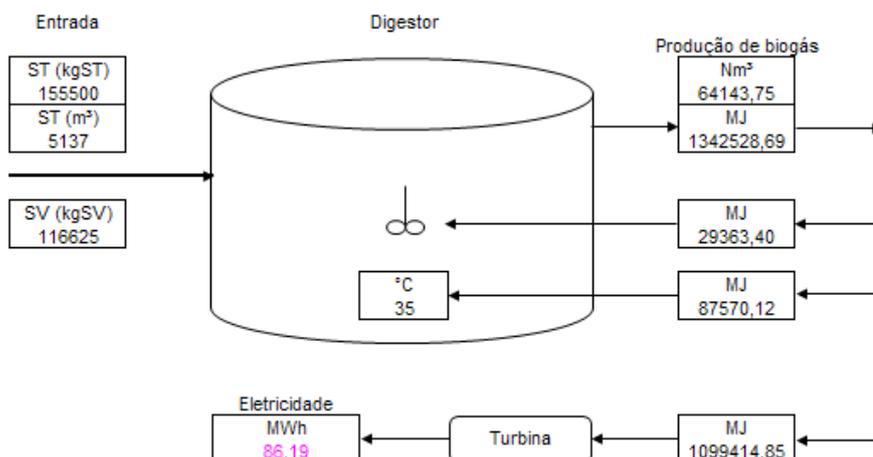
As Figuras 19, 20, 21 e 22 esquematizam, respectivamente, os balanços energéticos diários das ETE's Alfa, Beta, Gama e Delta para o cenário A2.



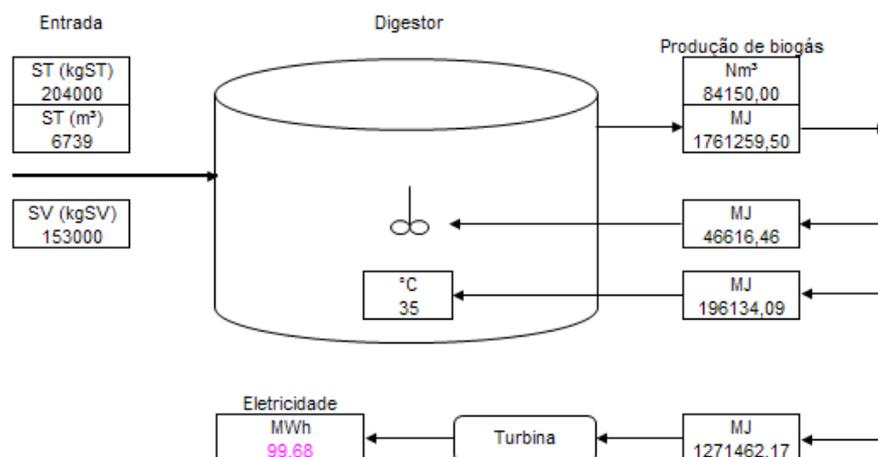
**Figura 19:** Balanço energético diário da ETE Alfa para o cenário A2



**Figura 20:** Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário A2



**Figura 21:** Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário A2



**Figura 22:** Balanço energético diário da ETE Delta para o cenário A2

### 6.2.3 Custos totais

A Tabela 29 mostra os custos de capital e os custos anuais de pessoal (P), operação (O), manutenção (M), insumos (I), depreciação (D), transporte e disposição em aterro sanitário para o cenário A2. São computadas ainda as receitas com a venda da energia elétrica produzida a partir do biogás.

**Tabela 29:** Custos de capital + custos anuais totais do cenário A2 (em R\$)

ETE	Capital	P	O	M	I	D	Transporte	Aterro sanitário	Eletricidade	Subtotal
Alfa	7.643.894,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.292.951,03	8.539.200,00	-990.648,71	16.485.396,71
Beta	21.836.343,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4.314.277,74	16.867.200,00	-2.829.990,18	40.187.831,54
Gama	7.182.843,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.364.737,70	8.956.800,00	-930.896,54	16.573.484,82
Delta	8.306.886,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2.873.612,75	11.750.400,00	-1.076.572,45	21.854.326,48
<b>TOTAL</b>	<b>44.969.968,20</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>9.845.579,23</b>	<b>46.113.600,00</b>	<b>-5.828.107,88</b>	<b>95.101.039,55</b>

A Tabela 30 seguinte apresenta o custo total de projeto em valor presente.

**Tabela 30:** Custo total de projeto em valor presente do cenário A2 (em R\$)

Capital	Operação e Manutenção					Transporte	Aterro sanitário	Eletricidade	TOTAL
	P	O	M	I	D				
44.969.968,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	73.540.999,01	344.442.935,51	-43.532.723,24	<b>419.421.179,49</b>

### 6.3 Cenário B1

O cenário B1 é caracterizado pela produção de lodo com teor de sólidos de 50% a partir da secagem térmica realizada nas ETE's Beta e Gama. O lodo é, em seguida, transportado até os aterros sanitários Eins e Zwei, onde é disposto. O aterro Eins recebe o lodo da ETE Beta, enquanto os lodos processados na ETE Gama são direcionados ao aterro Zwei. Este cenário considera ainda o aproveitamento do biogás dos digestores nos processos de digestão anaeróbia e secagem térmica. São apresentados, aqui, os resultados obtidos para as ETE's Beta e Gama.

### 6.3.1 Cálculo da massa específica do lodo

A partir da equação 1, calculou-se a massa específica do lodo com teor de sólidos de 50%. O valor encontrado foi 1.150 kg/m<sup>3</sup>.

### 6.3.2 Cálculo das massas de mistura e de água evaporada

Usando as equações 2, 3, 4 e 5, foi possível calcular, para as ETE's Beta e Gama, as massas diárias desidratadas para secagem térmica e para mistura pós-secagem térmica; a massa final do lodo misturado e a massa de água evaporada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 31.

**Tabela 31:** Massas diárias de mistura e de água evaporada para o cenário B1

ETE	Ano 2018			Ano 2030		
Beta	M =	175.700,0	kg/d	M =	181.200,0	kg/d
	M <sub>d</sub> =	585.666,7	kg/d	M <sub>d</sub> =	604.000,0	kg/d
	M <sub>ds</sub> =	105.420,0	kg ST/d	M <sub>ds</sub> =	108.720,0	kg ST/d
	M <sub>d<sub>m</sub></sub> =	70.280,0	kg ST/d	M <sub>d<sub>m</sub></sub> =	72.480,0	kg ST/d
	M <sub>m</sub> =	351.400,0	kg/d	M <sub>m</sub> =	362.400,0	kg/d
	M <sub>ae</sub> =	234.266,7	kg H <sub>2</sub> O/d	M <sub>ae</sub> =	241.600,0	kg H <sub>2</sub> O/d
Gama	M =	203.100,0	kg/d	M =	237.800,0	kg/d
	M <sub>d</sub> =	677.000,0	kg/d	M <sub>d</sub> =	792.666,7	kg/d
	M <sub>ds</sub> =	121.860,0	kg ST/d	M <sub>ds</sub> =	142.680,0	kg ST/d
	M <sub>d<sub>m</sub></sub> =	81.240,0	kg ST/d	M <sub>d<sub>m</sub></sub> =	95.120,0	kg ST/d
	M <sub>m</sub> =	406.200,0	kg/d	M <sub>m</sub> =	475.600,0	kg/d
	M <sub>ae</sub> =	270.800,0	kg H <sub>2</sub> O/d	M <sub>ae</sub> =	317.066,7	kg H <sub>2</sub> O/d

Com M = Massa seca total de lodo desidratado (kg ST)

M<sub>d</sub> = Massa de lodo desidratado (kg)

M<sub>ds</sub> = Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica (kg ST)

M<sub>d<sub>m</sub></sub> = Massa seca de lodo desidratado para mistura (kg ST)

M<sub>m</sub> = Massa de lodo misturado (kg)

M<sub>ae</sub> = Massa de água evaporada (kg H<sub>2</sub>O)

### 6.3.3 Cálculo do número de secadores térmicos

O número de secadores térmicos foi determinado a partir da massa de água evaporada referente às produções de lodo de descarte do ano 2030 e da capacidade térmica do secador térmico. A Tabela 32 mostra os resultados obtidos para cada ETE, considerando a capacidade de 8.100 kgH<sub>2</sub>O/h.

**Tabela 32:** Número de secadores térmicos por ETE para o cenário B1

ETE	TS	M <sub>ae</sub> (kg/d)	M <sub>ae</sub> (kg/h)	n
Beta	50%	241.600	10.067	01
Gama	50%	317.067	13.211	02

### 6.3.4 Balanços de massa-volume

Os balanços diários de massa-volume das ETE's Alfa e Delta são semelhantes aos apresentados para o cenário A1. A única diferença é o destino final, que, neste caso, é a ETE Gama, que processa termicamente os lodos desidratados das outras duas estações.

As Figuras 23 e 24 esquematizam os balanços diários de massa-volume das ETE's Beta e Gama para o cenário B1.

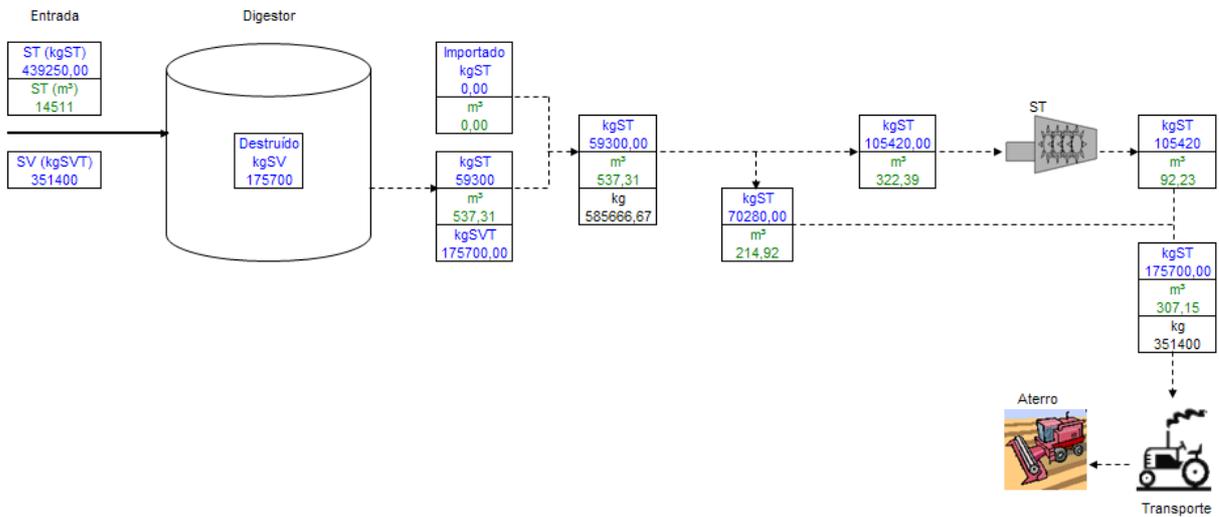


Figura 23: Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário B1

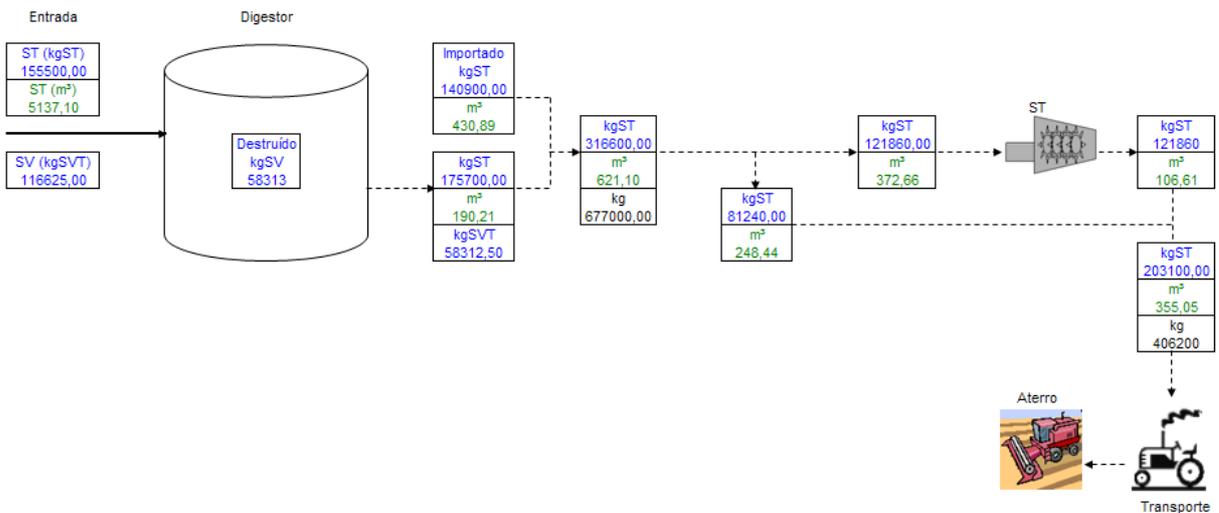


Figura 24: Balanço diário de massa-volume para a ETE Gama para o cenário B1

### 6.3.5 Balanços energéticos

Os balanços energéticos do cenário B1 incluem a secagem térmica. Após utilização do biogás gerado nos digestores no próprio processo de digestão anaeróbia, se há excedente, os secadores térmicos também são abastecidos com ele, em lugar do gás natural. Dessa forma, o balanço de energia contempla todas as fontes energéticas para o processo de secagem térmica, incluindo o gás natural e a eletricidade.

Se após a secagem térmica, ainda há excedente de biogás, este é simplesmente liberado na atmosfera, ou seja, não há aproveitamento para geração de eletricidade.

Como não há aproveitamento energético do biogás gerado nas estações Alfa e Delta, não foram feitos os balanços para elas. Nas Tabelas 33 e 34 são apresentados os resultados dos cálculos para o balanço energético das ETE's Beta e Gama, dado o saldo já calculado da digestão anaeróbia.

**Tabela 33:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B1

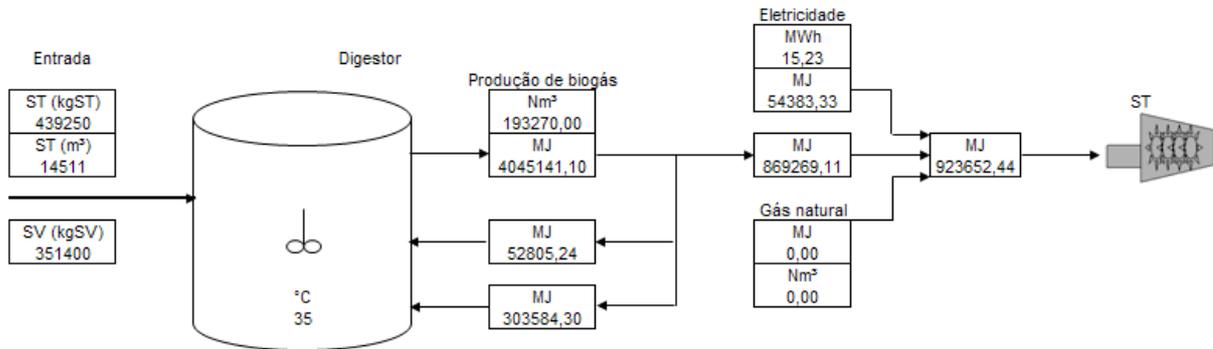
<b>Secador Térmico</b>		
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>3.342.297,55</b>	<b>MJ</b>
Massa seca de lodo desidratado	175.700,00	kg ST
Massa seca de lodo importada de outras ETE's	0,00	kg ST
<b>Massa seca de lodo total</b>	<b>175.700,00</b>	<b>kg ST</b>
Massa seca de lodo desidratado para mistura	70.280,00	kg ST
Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica	105.420,00	kg ST
Massa de água evaporada	234.266,67	kg H <sub>2</sub> O
<b>Consumo de energia elétrica (Eq. 13)</b>	<b>54.383,33</b>	<b>MJ</b>
<b>Consumo de água potável (Eq. 7)</b>	<b>9,37</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Calor total requerido (Eq. 14)</b>	<b>869.269,11</b>	<b>MJ</b>
<b>Biogás requerido (Eq. 15)</b>	<b>41.533,68</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Biogás produzido (pós-digestão)</b>	<b>159.694,98</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>SALDO DA SECAGEM TÉRMICA (produzido - requerido)</b>	<b>-118.161,30</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Déficit de Biogás (Eq. 16)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor requerido pelo déficit</b>	<b>0,00</b>	<b>MJ</b>
<b>Quantidade de gás natural necessária (Eq. 17)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás utilizada</b>	<b>41.533,68</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás excedente</b>	<b>118.161,30</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor de biogás utilizado</b>	<b>869.269,11</b>	<b>MJ</b>
<b>Calor de biogás excedente</b>	<b>2.473.028,44</b>	<b>MJ</b>

**Tabela 34:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B1

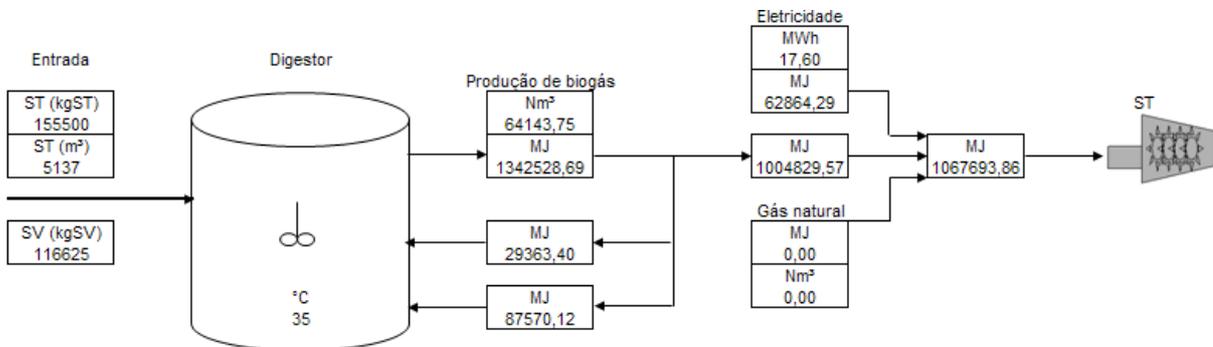
<b>Secador Térmico</b>		
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
Massa seca de lodo desidratado	62.200,00	kg ST
Massa seca de lodo importada de outras ETE's	140.900,00	kg ST
<b>Massa seca de lodo total</b>	<b>203.100,00</b>	<b>kg ST</b>
Massa seca de lodo desidratado para mistura	81.240,00	kg ST
Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica	121.860,00	kg ST
Massa de água evaporada	270.800,00	kg H <sub>2</sub> O
<b>Consumo de energia elétrica (Eq. 13)</b>	<b>62.864,29</b>	<b>MJ</b>
<b>Consumo de água potável (Eq. 7)</b>	<b>10,83</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Calor total requerido (Eq. 14)</b>	<b>1.004.829,57</b>	<b>MJ</b>
<b>Biogás requerido (Eq. 15)</b>	<b>48.010,76</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Biogás produzido (pós-digestão)</b>	<b>52.530,04</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>SALDO DA SECAGEM TÉRMICA (produzido - requerido)</b>	<b>-4.519,28</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Déficit de Biogás (Eq. 16)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor requerido pelo déficit</b>	<b>0,00</b>	<b>MJ</b>
<b>Quantidade de gás natural necessária (Eq. 17)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás utilizada</b>	<b>48.010,76</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás excedente</b>	<b>4.519,28</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor de biogás utilizado</b>	<b>1.004.829,57</b>	<b>MJ</b>
<b>Calor de biogás excedente</b>	<b>94.585,27</b>	<b>MJ</b>

Os valores negativos do saldo energético da secagem térmica indicam que a quantidade diária de biogás excedente do processo de digestão anaeróbia é superior à quantidade demandada diariamente pelos secadores térmicos e, conseqüentemente, a demanda por gás natural é nula.

As Figuras 25 e 26 seguintes esquematizam o balanço energético diário das ETE's Beta e Gama.



**Figura 25:** Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B1



**Figura 26:** Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B1

### 6.3.6 Custos totais

A Tabela 35 mostra os custos de capital e os custos anuais de pessoal, operação, manutenção, insumos, depreciação, transporte e disposição em aterro sanitário das ETE's Beta e Gama para o cenário B1. Aqui se incluem os custos associados ao processo de secagem térmica, de modo que não são mais nulos os custos de capital e de O&M.

A Tabela 36, por sua vez, apresenta o custo total de projeto em valor presente. Lembra-se, aqui, que os custos de transporte incluem os custos de transporte do lodo desidratado das ETE's Alfa e Delta até a ETE Gama, de onde parte todo o lodo seco a 50% de teor de sólidos até o aterro sanitário Zwei.

**Tabela 35:** Custos de capital + custos anuais totais do cenário B1 (em R\$)

ETE	Capital	Pessoal	Operação	Manutenção	Insumos	Depreciação	Transporte	Aterro Sanitário	Subtotal
Beta	15.000.000,00	271.700,00	142.500,00	712.500,00	1.099.066,75	1.000.000,00	2.588.566,64	10.120.320,00	30.934.653,40
Gama	30.000.000,00	271.700,00	285.000,00	1.425.000,00	1.270.463,62	2.000.000,00	5.239.590,51	17.547.840,00	58.039.594,13
<b>TOTAL</b>	<b>45.000.000,00</b>	<b>543.400,00</b>	<b>427.500,00</b>	<b>2.137.500,00</b>	<b>2.369.530,37</b>	<b>3.000.000,00</b>	<b>7.828.157,15</b>	<b>27.668.160,00</b>	<b>88.974.247,52</b>

**Tabela 36:** Custo total de projeto em valor presente do cenário B1 (em R\$)

Capital	Operação e Manutenção					Transporte	Aterro sanitário	TOTAL
	Pessoal	Operação	Manutenção	Insumos	Depreciação			
45.000.000,00	4.058.895,67	3.193.187,15	15.965.935,75	17.699.073,50	22.408.330,87	58.471.978,53	206.665.761,31	<b>373.463.162,78</b>

## 6.4 Cenário B2

O cenário B2 é caracterizado pela produção de lodo com teor de sólidos de 75% a partir da secagem térmica realizada nas ETE's Beta e Gama. O lodo é, em seguida, transportado até os aterros sanitários Eins e Zwei, onde é disposto. O aterro Eins recebe o lodo da ETE Beta, enquanto os lodos processados na ETE Gama são direcionados ao aterro Zwei. Este cenário considera ainda o aproveitamento do biogás dos digestores nos processos de digestão anaeróbia e secagem térmica.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para as ETE's Beta e Gama, de forma semelhante ao cenário B1.

### 6.4.1 Cálculo da massa específica do lodo

A massa específica do lodo com teor de sólidos de 75% foi estimada em 1.225 kg/m<sup>3</sup>.

### 6.4.2 Cálculo das massas de mistura e de água evaporada

As massas diárias desidratadas para secagem térmica e para mistura pós-secagem térmica, a massa final do lodo misturado e a massa de água evaporada obtidas são apresentadas na Tabela 37.

**Tabela 37:** Massas diárias de mistura e de água evaporada para o cenário B2

ETE	Ano 2018			Ano 2030		
Beta	M =	175.700,0	kg/d	M =	181.200,0	kg/d
	M <sub>d</sub> =	585.666,7	kg/d	M <sub>d</sub> =	604.000,0	kg/d
	M <sub>ds</sub> =	158.130,0	kg ST/d	M <sub>ds</sub> =	163.080,0	kg ST/d
	M <sub>dm</sub> =	17570,0	kg ST/d	M <sub>dm</sub> =	18.120,0	kg ST/d
	M <sub>m</sub> =	234.266,7	kg/d	M <sub>m</sub> =	241.600,0	kg/d
	M <sub>ae</sub> =	351.400,0	kg H <sub>2</sub> O/d	M <sub>ae</sub> =	362.400,0	kg H <sub>2</sub> O/d
Gama	M =	203.100,0	kg/d	M =	237.800,0	kg/d
	M <sub>d</sub> =	677.000,0	kg/d	M <sub>d</sub> =	792.666,7	kg/d
	M <sub>ds</sub> =	182.790,0	kg ST/d	M <sub>ds</sub> =	214.020,0	kg ST/d
	M <sub>dm</sub> =	20.310,0	kg ST/d	M <sub>dm</sub> =	23.780,0	kg ST/d
	M <sub>m</sub> =	270.800,0	kg/d	M <sub>m</sub> =	317.066,7	kg/d
	M <sub>ae</sub> =	406.200,0	kg H <sub>2</sub> O/d	M <sub>ae</sub> =	475.600,0	kg H <sub>2</sub> O/d

Com M = Massa seca total de lodo desidratado (kg ST)

M<sub>d</sub> = Massa de lodo desidratado (kg)

M<sub>ds</sub> = Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica (kg ST)

M<sub>dm</sub> = Massa seca de lodo desidratado para mistura (kg ST)

M<sub>m</sub> = Massa de lodo misturado (kg)

M<sub>ae</sub> = Massa de água evaporada (kg H<sub>2</sub>O)

### 6.4.3 Cálculo do número de secadores térmicos

O número de secadores térmicos foi determinado a partir da massa de água evaporada referente às produções de lodo de descarte do ano 2030 e da capacidade térmica do secador térmico. A Tabela 38 apresenta os resultados obtidos para cada ETE, considerando a capacidade de 8.100 kgH<sub>2</sub>O/h.

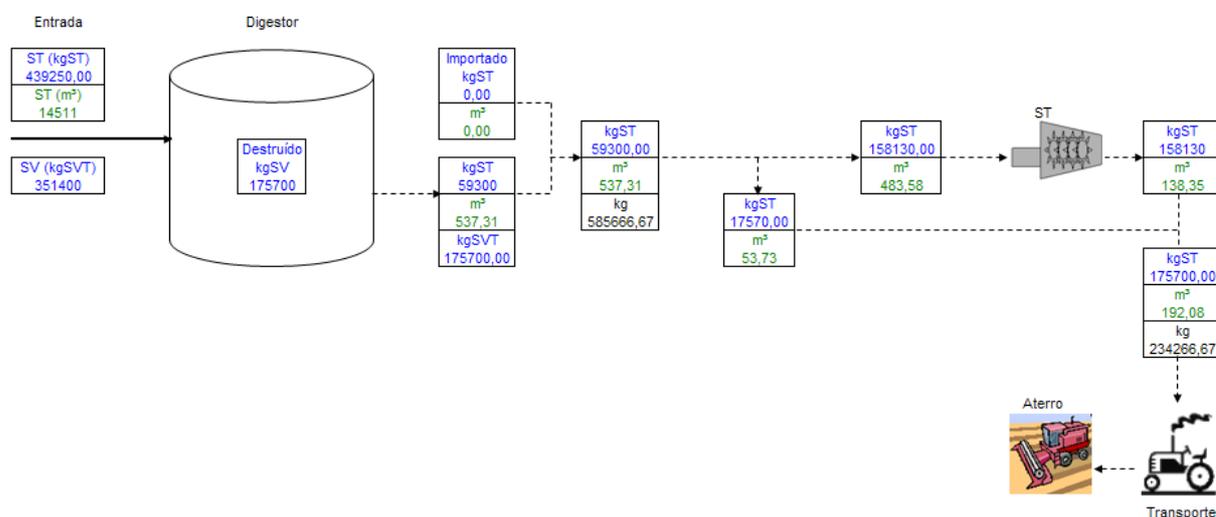
**Tabela 38:** Número de secadores térmicos por ETE para o cenário B2

ETE	TS	M <sub>ae</sub> (kg/d)	M <sub>ae</sub> (kg/h)	n
Beta	75%	362.400	15.100	02
Gama	75%	475.600	19.817	02

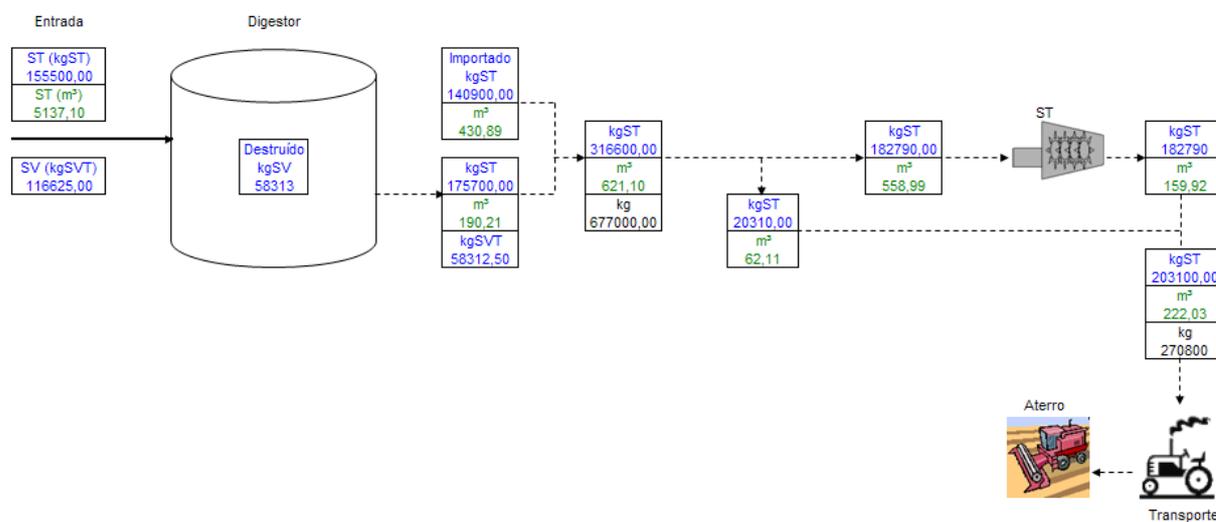
#### 6.4.4 Balanços de massa-volume

Assim como no cenário B1, aqui os balanços diários de massa-volume das ETE's Alfa e Delta são semelhantes aos apresentados para o cenário A1. A única diferença é o destino final, que, neste caso, também é a ETE Gama, que processa termicamente os lodos desidratados das outras duas estações.

As Figuras 27 e 28 esquematizam os balanços diários de massa-volume das ETE's Beta e Gama para o cenário B2.



**Figura 27:** Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário B2



**Figura 28:** Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário B2

#### 6.4.5 Balanços energéticos

Após a utilização do biogás gerado nos digestores no próprio processo de digestão anaeróbia, se há excedente, os secadores térmicos também são abastecidos com ele, em lugar do gás natural. Mas não há aproveitamento do biogás excedente após a secagem térmica para geração de eletricidade.

As Tabelas 39 e 40 apresentam os resultados dos cálculos para o balanço energético das ETE's Beta e Gama, dado o saldo já calculado da digestão anaeróbia.

**Tabela 39:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B2

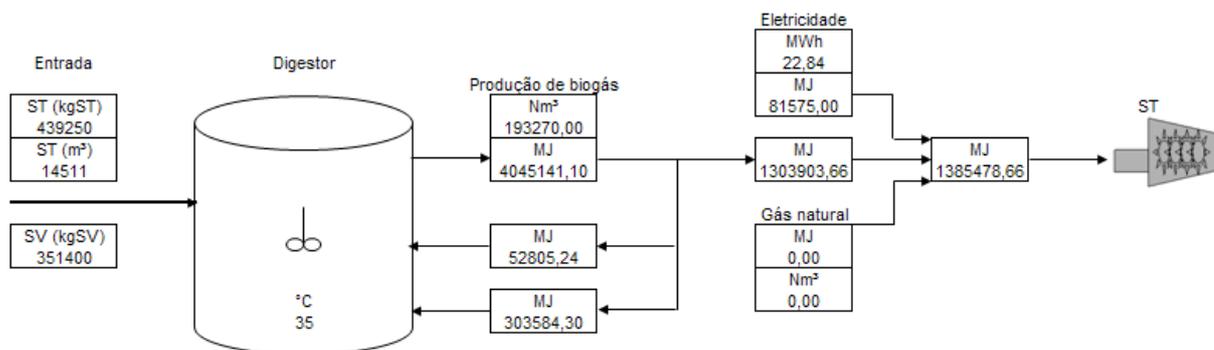
<b>Secador Térmico</b>		
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>3.342.297,55</b>	<b>MJ</b>
Massa seca de lodo desidratado	175.700,00	kg ST
Massa seca de lodo importada de outras ETE's	0,00	kg ST
<b>Massa seca de lodo total</b>	<b>175.700,00</b>	<b>kg ST</b>
Massa seca de lodo desidratado para mistura	17.570,00	kg ST
Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica	158.130,00	kg ST
Massa de água evaporada	351.400,00	kg H <sub>2</sub> O
<b>Consumo de energia elétrica (Eq. 13)</b>	<b>81.575,00</b>	<b>MJ</b>
<b>Consumo de água potável (Eq. 7)</b>	<b>14,06</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Calor total requerido (Eq. 14)</b>	<b>1.303.903,66</b>	<b>MJ</b>
<b>Biogás requerido (Eq. 15)</b>	<b>62.300,52</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Biogás produzido (pós-digestão)</b>	<b>159.694,98</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>SALDO DA SECAGEM TÉRMICA (produzido - requerido)</b>	<b>-97.394,46</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Déficit de Biogás (Eq. 16)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor requerido pelo déficit</b>	<b>0,00</b>	<b>MJ</b>
<b>Quantidade de gás natural necessária (Eq. 17)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás utilizada</b>	<b>62.300,52</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás excedente</b>	<b>97.394,46</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor de biogás utilizado</b>	<b>1.303.903,66</b>	<b>MJ</b>
<b>Calor de biogás excedente</b>	<b>2.038.393,89</b>	<b>MJ</b>

**Tabela 40:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B2

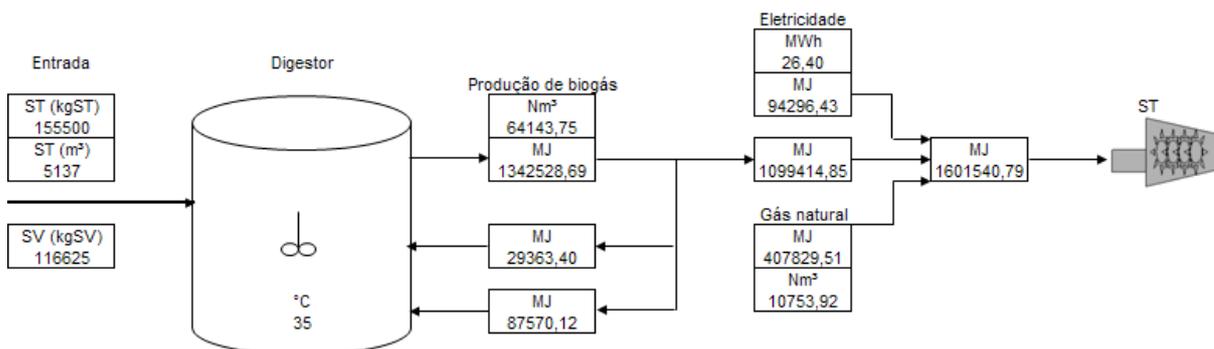
<b>Secador Térmico</b>		
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
Massa seca de lodo desidratado	62.200,00	kg ST
Massa seca de lodo importada de outras ETE's	140.900,00	kg ST
<b>Massa seca de lodo total</b>	<b>203.100,00</b>	<b>kg ST</b>
Massa seca de lodo desidratado para mistura	20.310,00	kg ST
Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica	182.790,00	kg ST
Massa de água evaporada	406.200,00	kg H <sub>2</sub> O
<b>Consumo de energia elétrica (Eq. 13)</b>	<b>94.296,43</b>	<b>MJ</b>
<b>Consumo de água potável (Eq. 7)</b>	<b>16,25</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Calor total requerido (Eq. 14)</b>	<b>1.507.244,36</b>	<b>MJ</b>
<b>Biogás requerido (Eq. 15)</b>	<b>72.016,14</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Biogás produzido (pós-digestão)</b>	<b>52.530,04</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>SALDO DA SECAGEM TÉRMICA (produzido - requerido)</b>	<b>19.486,09</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Déficit de Biogás (Eq. 16)</b>	<b>19.486,09</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor requerido pelo déficit</b>	<b>407.829,51</b>	<b>MJ</b>
<b>Quantidade de gás natural necessária (Eq. 17)</b>	<b>10.753,92</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás utilizada</b>	<b>52.530,04</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás excedente</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor de biogás utilizado</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
<b>Calor de biogás excedente</b>	<b>0,00</b>	<b>MJ</b>

Os valores negativos do saldo energético da secagem térmica indicam que a quantidade diária de biogás excedente do processo de digestão anaeróbia é superior à quantidade demandada diariamente pelos secadores térmicos e, conseqüentemente, a demanda por gás natural é nula.

As Figuras 29 e 30 seguintes esquematizam o balanço energético diário das ETE's Beta e Gama.



**Figura 29:** Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B2



**Figura 30:** Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B2

#### 6.4.6 Custos totais

A Tabela 41 mostra os custos de capital e os custos anuais de pessoal, operação, manutenção, insumos, depreciação, transporte e disposição em aterro sanitário das ETE's Beta e Gama para o cenário B2. Aqui se incluem os custos associados ao processo de secagem térmica, de modo que não são mais nulos os custos de capital e de O&M.

A Tabela 42, por sua vez, apresenta o custo total de projeto em valor presente. Lembra-se, aqui, que os custos de transporte incluem os custos de transporte do lodo desidratado das ETE's Alfa e Delta até a ETE Gama, de onde parte todo o lodo seco a 75% de teor de sólidos até o aterro sanitário Zwei.

**Tabela 41:** Custos de capital + custos anuais totais do cenário B2 (em R\$)

<b>ETE</b>	<b>Capital</b>	<b>Pessoal</b>	<b>Operação</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Insumos</b>	<b>Depreciação</b>	<b>Transporte</b>	<b>Aterro Sanitário</b>	<b>Subtotal</b>
Beta	30.000.000,00	271.700,00	285.000,00	1.425.000,00	1.648.600,13	2.000.000,00	1.728.137,62	6.746.880,00	44.105.317,75
Gama	30.000.000,00	271.700,00	285.000,00	1.425.000,00	6.551.386,72	2.000.000,00	4.350.848,56	11.698.560,00	56.582.495,28
<b>TOTAL</b>	<b>60.000.000,00</b>	<b>543.400,00</b>	<b>570.000,00</b>	<b>2.850.000,00</b>	<b>8.199.986,85</b>	<b>4.000.000,00</b>	<b>6.078.986,18</b>	<b>18.445.440,00</b>	<b>100.687.813,03</b>

**Tabela 42:** Custo total de projeto em valor presente do cenário B2 (em R\$)

<b>Capital</b>	<b>Operação e Manutenção</b>					<b>Transporte</b>	<b>Aterro sanitário</b>	<b>TOTAL</b>
	<b>Pessoal</b>	<b>Operação</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Insumos</b>	<b>Depreciação</b>			
60.000.000,00	4.058.895,67	4.257.582,87	21.287.914,33	61.249.339,50	29.877.774,50	45.406.644,54	137.777.174,21	<b>363.915.325,60</b>

## 6.5 Cenário B3

O cenário B3 é caracterizado pela produção de lodo com teor de sólidos de 90% a partir da secagem térmica realizada nas ETE's Beta e Gama. O lodo é, em seguida, transportado até os aterros sanitários Eins e Zwei, onde é disposto. O aterro Eins recebe o lodo da ETE Beta, enquanto os lodos processados na ETE Gama são direcionados ao aterro Zwei. Este cenário considera ainda o aproveitamento do biogás dos digestores nos processos de digestão anaeróbia e secagem térmica.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para as ETE's Beta e Gama, de forma semelhante aos cenários B1 e B2.

### 6.5.1 Cálculo da massa específica do lodo

A massa específica do lodo com teor de sólidos de 90% foi estimada em 1.270 kg/m<sup>3</sup>.

### 6.5.2 Cálculo das massas de mistura e de água evaporada

As massas diárias desidratadas para secagem térmica e para mistura pós-secagem térmica, a massa final do lodo misturado e a massa de água evaporada obtidas são apresentadas na Tabela 43.

**Tabela 43:** Massas diárias de mistura e de água evaporada para o cenário B3

ETE	Ano 2018			Ano 2030		
Beta	M =	175.700,0	kg/d	M =	181.200,0	kg/d
	M <sub>d</sub> =	585.666,7	kg/d	M <sub>d</sub> =	604.000,0	kg/d
	M <sub>ds</sub> =	175.700,0	kg ST/d	M <sub>ds</sub> =	181.200,0	kg ST/d
	M <sub>dm</sub> =	0,0	kg ST/d	M <sub>dm</sub> =	0,0	kg ST/d
	M <sub>m</sub> =	195.222,2	kg/d	M <sub>m</sub> =	201.333,3	kg/d
	M <sub>ae</sub> =	390.444,4	kg H <sub>2</sub> O/d	M <sub>ae</sub> =	402.666,7	kg H <sub>2</sub> O/d
Gama	M =	203.100,0	kg/d	M =	237.800,0	kg/d
	M <sub>d</sub> =	677.000,0	kg/d	M <sub>d</sub> =	792.666,7	kg/d
	M <sub>ds</sub> =	203.100,0	kg ST/d	M <sub>ds</sub> =	237.800,0	kg ST/d
	M <sub>dm</sub> =	0,0	kg ST/d	M <sub>dm</sub> =	0,0	kg ST/d
	M <sub>m</sub> =	225.666,7	kg/d	M <sub>m</sub> =	264.222,2	kg/d
	M <sub>ae</sub> =	451.333,3	kg H <sub>2</sub> O/d	M <sub>ae</sub> =	528.444,4	kg H <sub>2</sub> O/d

Com M = Massa seca total de lodo desidratado (kg ST)

M<sub>d</sub> = Massa de lodo desidratado (kg)

M<sub>ds</sub> = Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica (kg ST)

M<sub>dm</sub> = Massa seca de lodo desidratado para mistura (kg ST)

M<sub>m</sub> = Massa de lodo misturado (kg)

M<sub>ae</sub> = Massa de água evaporada (kg H<sub>2</sub>O)

### 6.5.3 Cálculo do número de secadores térmicos

O número de secadores térmicos foi determinado a partir da massa de água evaporada referente às produções de lodo de descarte do ano 2030 e da capacidade térmica do secador térmico. A Tabela 44 mostra os resultados obtidos para cada ETE, considerando a capacidade de 8.100 kgH<sub>2</sub>O/h.

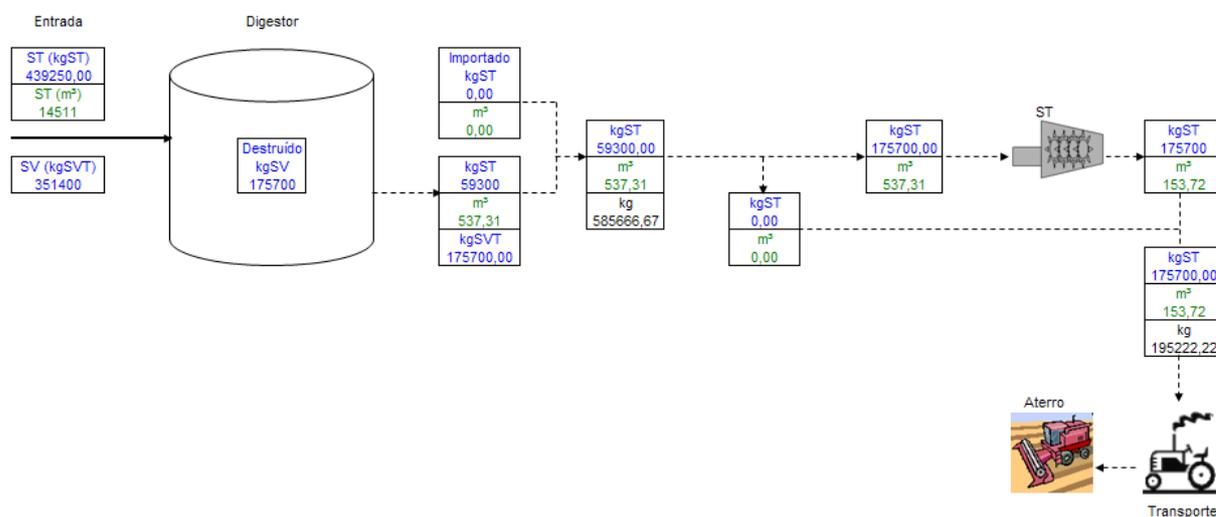
**Tabela 44:** Número de secadores térmicos por ETE para o cenário B3

ETE	TS	M <sub>ae</sub> (kg/d)	M <sub>ae</sub> (kg/h)	n
Beta	90%	402.667	16.778	02
Gama	90%	528.444	22.019	03

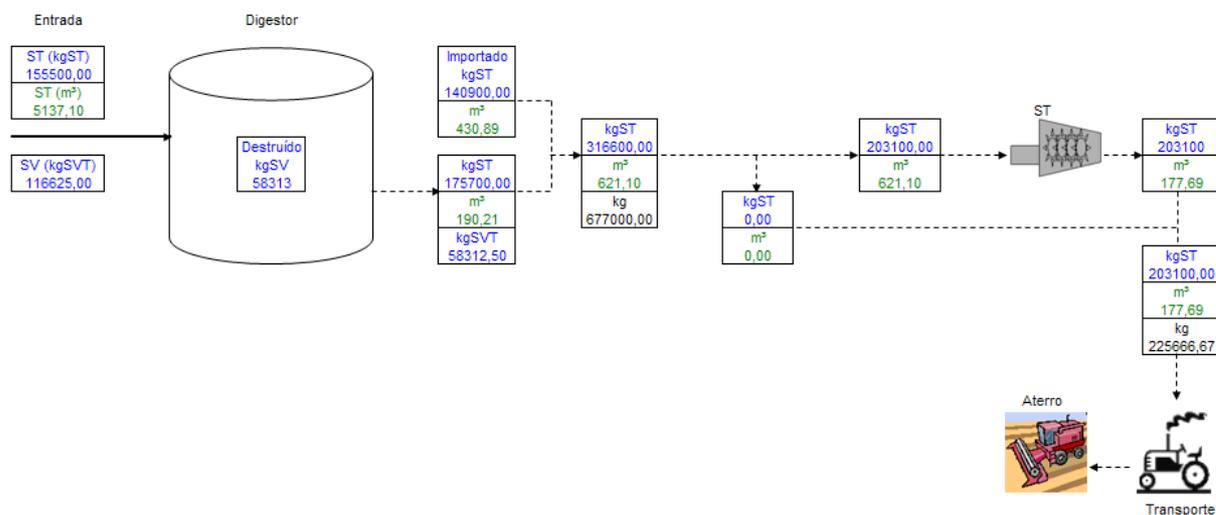
#### 6.5.4 Balanços de massa-volume

Assim como nos cenários B1 e B2, aqui os balanços diários de massa-volume das ETE's Alfa e Delta são semelhantes aos apresentados para o cenário A1. A única diferença é o destino final, que, neste caso, também é a ETE Gama, que processa termicamente os lodos desidratados das outras duas estações.

As Figuras 31 e 32 esquematizam os balanços diários de massa-volume das ETE's Beta e Gama para o cenário B3.



**Figura 31:** Balanço diário de massa-volume da ETE Beta para o cenário B3



**Figura 32:** Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário B3

### 6.5.5 Balanços energéticos

Após a utilização do biogás gerado nos digestores no próprio processo de digestão anaeróbia, se há excedente, os secadores térmicos também são abastecidos com ele, em lugar do gás natural. Mas não há aproveitamento do biogás excedente após a secagem térmica para geração de eletricidade.

As Tabelas 45 e 46 apresentam os resultados dos cálculos para o balanço energético das ETE's Beta e Gama, dado o saldo já calculado da digestão anaeróbia.

**Tabela 45:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B3

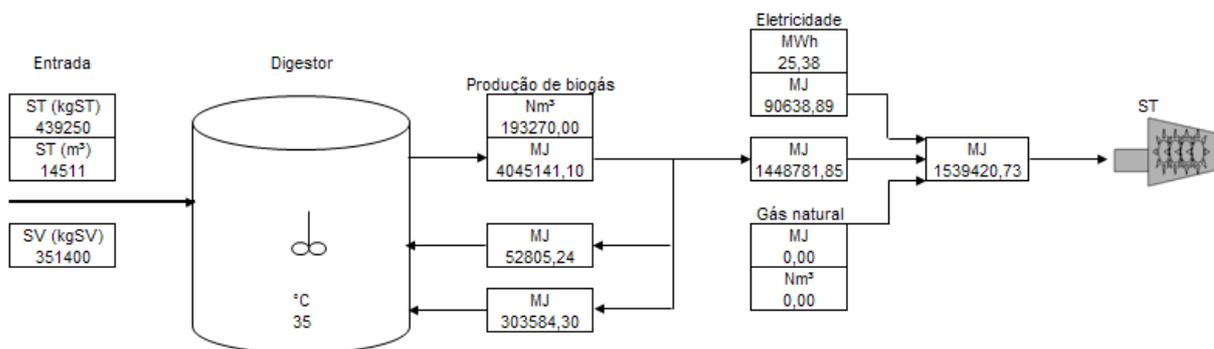
<b>Secador Térmico</b>		
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>3342297,55</b>	<b>MJ</b>
Massa seca de lodo desidratado	175.700,00	kg ST
Massa seca de lodo importada de outras ETE's	0,00	kg ST
<b>Massa seca de lodo total</b>	<b>175.700,00</b>	<b>kg ST</b>
Massa seca de lodo desidratado para mistura	0,00	kg ST
Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica	175.700,00	kg ST
Massa de água evaporada	390.444,44	kg H <sub>2</sub> O
<b>Consumo de energia elétrica (Eq. 13)</b>	<b>90.638,89</b>	<b>MJ</b>
<b>Consumo de água potável (Eq. 7)</b>	<b>15,62</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Calor total requerido (Eq. 14)</b>	<b>1.448.781,85</b>	<b>MJ</b>
<b>Biogás requerido (Eq. 15)</b>	<b>69.222,80</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Biogás produzido (pós-digestão)</b>	<b>159.694,98</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>SALDO DA SECAGEM TÉRMICA (produzido - requerido)</b>	<b>-90.472,18</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Déficit de Biogás (Eq. 16)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor requerido pelo déficit</b>	<b>0,00</b>	<b>MJ</b>
<b>Quantidade de gás natural necessária (Eq. 17)</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás utilizada</b>	<b>69.222,80</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás excedente</b>	<b>90.472,18</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor de biogás utilizado</b>	<b>1.448.781,85</b>	<b>MJ</b>
<b>Calor de biogás excedente</b>	<b>1.893.515,70</b>	<b>MJ</b>

**Tabela 46:** Cálculo do balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B3

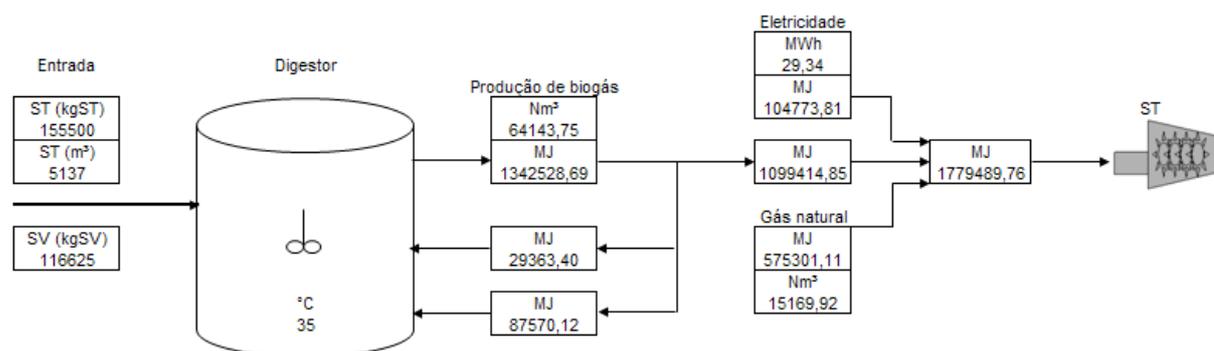
<b>Secador Térmico</b>		
<b>SALDO DA DIGESTÃO</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
Massa seca de lodo desidratado	62.200,00	kg ST
Massa seca de lodo importada de outras ETE's	140.900,00	kg ST
<b>Massa seca de lodo total</b>	<b>203.100,00</b>	<b>kg ST</b>
Massa seca de lodo desidratado para mistura	0,00	kg ST
Massa seca de lodo desidratado para secagem térmica	203.100,00	kg ST
Massa de água evaporada	451.333,33	kg H <sub>2</sub> O
<b>Consumo de energia elétrica (Eq. 13)</b>	<b>104.773,81</b>	<b>MJ</b>
<b>Consumo de água potável (Eq. 7)</b>	<b>18,05</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Calor total requerido (Eq. 14)</b>	<b>1.674.715,95</b>	<b>MJ</b>
<b>Biogás requerido (Eq. 15)</b>	<b>80.017,93</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Biogás produzido (pós-digestão)</b>	<b>52.530,04</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>SALDO DA SECAGEM TÉRMICA (produzido - requerido)</b>	<b>27.487,89</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Déficit de Biogás (Eq. 16)</b>	<b>27.487,89</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor requerido pelo déficit</b>	<b>575.301,11</b>	<b>MJ</b>
<b>Quantidade de gás natural necessária (Eq. 17)</b>	<b>15.169,92</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás utilizada</b>	<b>52.530,04</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Quantidade de biogás excedente</b>	<b>0,00</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>
<b>Calor de biogás utilizado</b>	<b>1.099.414,85</b>	<b>MJ</b>
<b>Calor de biogás excedente</b>	<b>0,00</b>	<b>MJ</b>

Os valores negativos do saldo energético da secagem térmica indicam que a quantidade diária de biogás excedente do processo de digestão anaeróbia é superior à quantidade demandada diariamente pelos secadores térmicos e, conseqüentemente, a demanda por gás natural é nula.

As Figuras 33 e 34 seguintes esquematizam o balanço energético diário das ETE's Beta e Gama.



**Figura 33:** Balanço energético diário da ETE Beta para o cenário B3



**Figura 34:** Balanço energético diário da ETE Gama para o cenário B3

### 6.5.6 Custos totais

A Tabela 47 mostra os custos de capital e os custos anuais de pessoal, operação, manutenção, insumos, depreciação, transporte e disposição em aterro sanitário das ETE's Beta e Gama para o cenário B3. Aqui se incluem os custos associados ao processo de secagem térmica, de modo que não são mais nulos os custos de capital e de O&M.

A Tabela 48, por sua vez, apresenta o custo total de projeto em valor presente. Lembra-se, aqui, que os custos de transporte incluem os custos de transporte do lodo desidratado das ETE's Alfa e Delta até a ETE Gama, de onde parte todo o lodo seco a 90% de teor de sólidos até o aterro sanitário Zwei.

**Tabela 47:** Custos de capital + custos anuais totais do cenário B3 (em R\$)

ETE	Capital	Pessoal	Operação	Manutenção	Insumos	Depreciação	Transporte	Aterro Sanitário	Subtotal
Beta	30.000.000,00	271.700,00	285.000,00	1.425.000,00	1.831.777,92	2.000.000,00	1.438.092,58	5.622.400,00	42.873.970,50
Gama	45.000.000,00	271.700,00	427.500,00	2.137.500,00	8.670.842,85	3.000.000,00	4.051.259,41	9.748.800,00	73.307.602,27
<b>TOTAL</b>	<b>75.000.000,00</b>	<b>543.400,00</b>	<b>712.500,00</b>	<b>3.562.500,00</b>	<b>10.502.620,77</b>	<b>5.000.000,00</b>	<b>5.489.351,99</b>	<b>15.371.200,00</b>	<b>116.181.572,77</b>

**Tabela 48:** Custo total de projeto em valor presente do cenário B3 (em R\$)

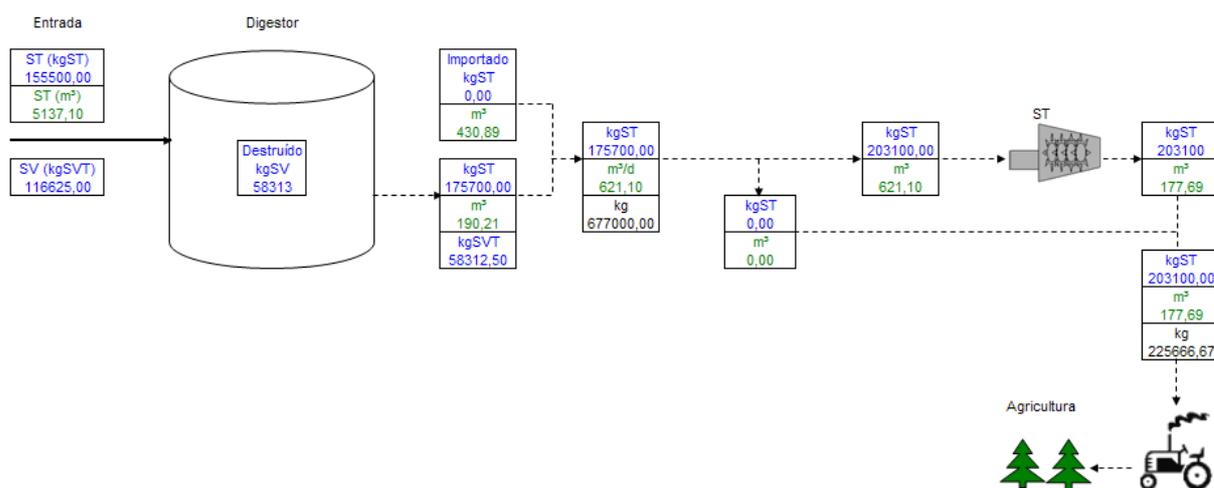
Capital	Operação e Manutenção					Transporte	Aterro sanitário	TOTAL
	Pessoal	Operação	Manutenção	Insumos	Depreciação			
75.000.000,00	4.058.895,67	5.321.978,58	26.609.892,91	78.448.733,78	37.347.218,12	41.002.405,26	114.814.311,84	<b>382.603.436,16</b>

## 6.6 Cenário C1

O cenário C1 é caracterizado pelo uso do lodo seco a 90% em áreas agrícolas. A este nível de teor de sólidos, conferido pela secagem térmica, o lodo se encontra dentro dos padrões aceitáveis para uso na agricultura, de modo que este se torna uma alternativa interessante à disposição em aterros sanitários. Essa opção, no entanto, depende não somente da atuação da Companhia de Saneamento, como também da participação dos agricultores.

Este cenário apresenta as mesmas características do cenário B3, com exceção da destinação final. Por isso, todos os cálculos já apresentados anteriormente valem para este caso. Considera-se, aqui, que o lodo proveniente da ETE Beta é direcionado para uma área a 70 km da estação; enquanto o lodo da ETE Gama é usado numa cultura de eucalipto localizada a 50 km da estação.

A Figura 35 esquematiza o balanço de massa-volume da ETE Gama para o cenário C1. Observa-se que os valores são os mesmos do cenário B3. A diferença é o destino final.



**Figura 35:** Balanço diário de massa-volume da ETE Gama para o cenário C1

### 6.6.1 Custos totais

A Tabela 49 mostra os custos de capital e os custos anuais de pessoal, operação, manutenção, insumos, depreciação e transporte das ETE's Beta e Gama para o cenário C1.

Já a Tabela 50 apresenta o custo total de projeto em valor presente. Lembra-se, aqui, que os custos de transporte incluem os custos de transporte do lodo desidratado das ETE's Alfa e Delta até a ETE Gama, de onde parte todo o lodo seco a 90% de teor de sólidos para a área agrícola.

**Tabela 49:** Custos de capital + custos anuais totais do cenário C1 (em R\$)

<b>ETE</b>	<b>Capital</b>	<b>Pessoal</b>	<b>Operação</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Insumos</b>	<b>Depreciação</b>	<b>Transporte</b>	<b>Subtotal</b>
Beta	30.000.000,00	271.700,00	285.000,00	1.425.000,00	1.831.777,92	2.000.000,00	3.452.227,85	39.265.705,77
Gama	45.000.000,00	271.700,00	427.500,00	2.137.500,00	8.670.842,85	3.000.000,00	5.828.982,25	65.336.525,10
<b>TOTAL</b>	<b>75.000.000,00</b>	<b>543.400,00</b>	<b>712.500,00</b>	<b>3.562.500,00</b>	<b>10.502.620,77</b>	<b>5.000.000,00</b>	<b>9.281.210,09</b>	<b>104.602.230,87</b>

**Tabela 50:** Custo total de projeto em valor presente do cenário C1 (em R\$)

<b>Capital</b>	<b>Operação e Manutenção</b>					<b>Transporte</b>	<b>TOTAL</b>
	<b>Pessoal</b>	<b>Operação</b>	<b>Manutenção</b>	<b>Insumos</b>	<b>Depreciação</b>		
75.000.000,00	4.058.895,67	5.321.978,58	26.609.892,91	78.448.733,78	37.347.218,12	69.325.475,55	<b>296.112.194,61</b>

## 7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste item são apresentados de forma compilada os resultados obtidos, de modo que seja facilitada a análise técnico-econômica para cada cenário.

Inicialmente, a Tabela 51 apresenta os custos de capital e os custos anuais totais por cenário, em R\$. As receitas provenientes da venda da eletricidade gerada através do biogás dos digestores anaeróbios também foram computadas, sendo apresentadas precedidas de sinal negativo.

**Tabela 51:** Custos de capital + custos anuais totais por cenário (em R\$)

Cenário	Capital	Operação e Manutenção	Transporte	Aterro sanitário	Eletricidade	Subtotal
A1	0,00	0,00	9.845.579,23	46.113.600,00	0,00	55.959.179,23
A2	44.969.968,20	0,00	9.845.579,23	46.113.600,00	-5.828.107,88	95.101.039,55
B1	45.000.000,00	8.477.930,37	7.828.157,15	27.668.160,00	0,00	88.974.247,52
B2	60.000.000,00	16.163.386,85	6.078.986,18	18.445.440,00	0,00	100.687.813,03
B3	75.000.000,00	20.321.020,77	5.489.351,99	15.371.200,00	0,00	116.181.572,77
C1	75.000.000,00	20.321.020,77	9.281.210,09	0,00	0,00	104.602.230,87

Observa-se que o cenário B3 é o que apresenta o maior custo, quando somados o custo de capital e o custo total do primeiro ano. Entretanto, quando não se computa o custo de capital, o cenário A1 passa a ser o mais oneroso anualmente, como mostrado na Tabela 52.

A manutenção do procedimento atual, isto é, a simples desidratação mecânica a um teor de sólidos de 30%, seguida da disposição nos aterros sanitários Eins e Zwei, representa, de todas as opções, os maiores custos anuais para a Companhia de Saneamento.

Observa-se, ainda, que são equivalentes os custos dos cenários que incluem a secagem térmica, independente do teor de sólidos alcançado.

**Tabela 52:** Custos anuais totais por cenário e por tonelada úmida processada (em R\$)

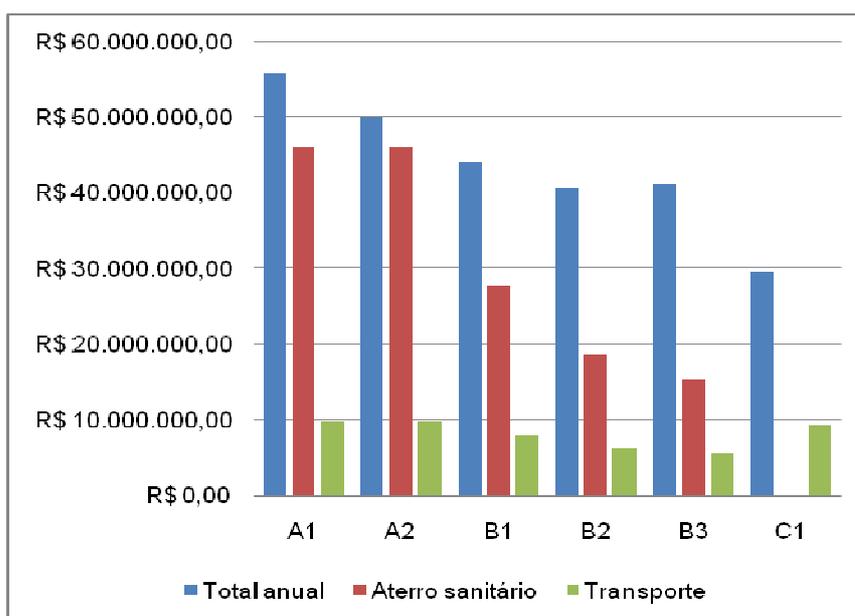
Cenário	Operação e Manutenção	Transporte	Aterro sanitário	Eletricidade	Subtotal	Custo/t
A1	0,00	9.845.579,23	46.113.600,00	0,00	55.959.179,23	123,11
A2	0,00	9.845.579,23	46.113.600,00	-5.828.107,88	50.131.071,35	110,28
B1	8.477.930,37	7.828.157,15	27.668.160,00	0,00	43.974.247,52	96,74
B2	16.163.386,85	6.078.986,18	18.445.440,00	0,00	40.687.813,03	89,51
B3	20.321.020,77	5.489.351,99	15.371.200,00	0,00	41.181.572,77	90,60
C1	20.321.020,77	9.281.210,09	0,00	0,00	29.602.230,87	65,12

Ainda com base na Tabela 52, é possível observar que a disposição em aterros sanitários representa a maior parcela dos custos totais quando se trata do procedimento atual.

Quando, porém, se inclui a secagem térmica nas etapas de gerenciamento do lodo, percebe-se uma redução significativa dos custos com aterro e um incremento dos custos de O&M. Isso se dá, pois a secagem térmica reduz o volume do lodo, acarretando redução dos custos com transporte e com disposição final; entretanto, por se tratar de uma nova instalação, surgem associados custos adicionais de operação e manutenção.

Os custos com disposição em aterros do cenário B3, caracterizado pela produção de lodo seco a 90%, representam apenas um terço daqueles do cenário que simula o procedimento atualmente empreendido pela Companhia de Saneamento. Os custos de O&M, no entanto, são os maiores. Mesmo assim, os custos anuais totais ainda são menores que os dos cenários A1 e A2.

O Gráfico 1 ilustra os custos anuais com transporte e disposição em aterros sanitários e os custos anuais totais por cenário. Observa-se que, à medida que o teor de sólidos aumenta, os custos com transporte e aterro diminuem. Os custos anuais totais também sofrem redução. O cenário C1 se diferencia dos outros, pois o lodo, neste caso, é destinado ao uso em culturas de eucalipto.



**Gráfico 1:** Custos com transporte e disposição em aterros sanitários e custos anuais totais

Diante disso, é possível perceber o impacto positivo da inclusão da secagem térmica nas etapas do gerenciamento de lodo, embora o custo de capital seja elevado.

No que diz respeito ao aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, observa-se o elevado custo de capital devido ao alto valor de compra das turbinas a gás. Quando todos os custos são trazidos para o valor presente, percebe-se que será necessário o tempo de projeto de 20 anos para cobrir o custo de capital das turbinas com as receitas geradas pela venda da energia elétrica.

A Tabela 53 apresenta o custo total de projeto por cenário em valor presente.

**Tabela 53:** Custo total de projeto em valor presente por cenário (em R\$)

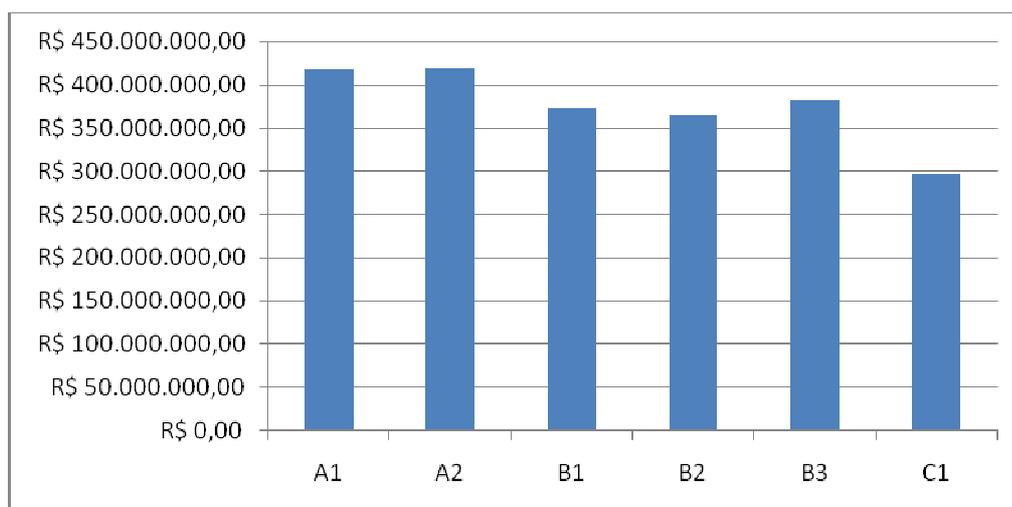
Cenário	Capital	Operação e Manutenção	Transporte	Aterro sanitário	Eletricidade	Subtotal
A1	0,00	0,00	73.540.999,01	344.442.935,51	0,00	417.983.934,52
A2	44.969.968,20	0,00	73.540.999,01	344.442.935,51	-43.532.723,24	419.421.179,49
B1	45.000.000,00	63.325.422,93	58.471.978,53	206.665.761,31	0,00	373.463.162,78
B2	60.000.000,00	120.731.506,86	45.406.644,54	137.777.174,21	0,00	363.915.325,60
B3	75.000.000,00	151.786.719,06	41.002.405,26	114.814.311,84	0,00	382.603.436,16
C1	75.000.000,00	151.786.719,06	69.325.475,55	0,00	0,00	296.112.194,61

Com base na Tabela 53, tem-se que o maior custo de projeto em valor presente se refere ao cenário A1, ou seja, ao procedimento atualmente empreendido na Região Metropolitana de Schönestadt. Quando da decisão de utilizar o biogás gerado no procedimento atual, as receitas com a venda de eletricidade durante 20 anos se equivalem ao custo de capital das turbinas a gás. Além disso, o custo total de projeto é ainda ligeiramente maior que o do cenário A1.

Os cenários que incluem a secagem térmica, por sua vez, apresentam custos totais de projeto em valor presente inferiores aos cenários A1 e A2, o que indica vantagens em sua implantação nas estações de tratamento de esgoto da região.

A opção pelo uso do lodo em áreas agrícolas, característica do cenário C1, também apresenta custos totais de projeto em valor presente inferiores aos dos cenários correspondentes ao procedimento atual. Embora seja ambientalmente a melhor opção, pois dá ao lodo um uso produtivo, o sucesso da implantação dessa alternativa depende da cooperação e do comprometimento dos agricultores.

O Gráfico 2 ilustra o custo total de projeto para cada cenário em valor presente.



**Gráfico 2:** Custo total de projeto por cenário em valor presente

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho foi possível concluir que a manutenção da prática atual mais usualmente adotada no país, desidratação mecânica seguida de disposição em aterros sanitários, representa maiores custos para as companhias de saneamento no longo prazo. Além disso, a disponibilidade de áreas livres para implantação de novos aterros está cada vez menor e as condicionantes ambientais estão cada vez mais restritivas, de modo que se torna imperativo pensar em novas opções de gerenciamento do lodo.

Diante disso, a secagem térmica tem se mostrado como opção tecnológica consolidada bastante promissora. Seu uso acarreta menores custos com transporte e disposição em aterros sanitários devido à redução da quantidade de lodo a receber destino final adequado. Em termos ambientais, existe a questão relacionada às emissões atmosféricas durante o processo de secagem. Entretanto, as unidades do processo já contam com mecanismos de tratamento dos gases, de modo que as emissões estejam de acordo com os padrões de lançamento vigentes.

O uso do biogás como fonte combustível para os processos de digestão anaeróbia e de secagem térmica tem crescido nos últimos anos. Com isso, dá-se a este gás liberado nos digestores um uso produtivo. Ademais, reduz-se a demanda por gás natural, combustível fóssil que contribui para a intensificação do efeito-estufa. Desse modo, as estações de tratamento de esgoto passam a contribuir para a redução das emissões de gases-estufa com o uso do biogás.

Já a produção de eletricidade a partir do biogás não constitui o objetivo principal das estações de tratamento, embora seja um uso produtivo do gás excedente. O custo de capital das turbinas a gás, no entanto, é extremamente elevado, de modo que se torna praticamente inviável. O prazo de retorno do investimento é de aproximadamente 20 anos, com base nos resultados obtidos no presente trabalho. Diante disso, é melhor que o biogás seja primeiramente usado como combustível para os próprios processos de tratamento, já que este é o objetivo maior das ETE's.

Quanto à destinação final do lodo, deve-se pensar a disposição em aterros sanitários como opção última. Antes, deve-se procurar atribuir ao lodo usos produtivos, tais como o uso agrícola e em áreas degradadas, a incorporação como matéria-prima em indústrias de material cerâmico e cimento, a recuperação de materiais. A incineração também surge como opção tecnológica para redução máxima de volume de lodo. No entanto, ainda assim é necessário dar destinação final adequada às cinzas resultantes do processo.

De qualquer modo, já existem opções tecnológicas para melhoria do gerenciamento do lodo nas grandes cidades. Algumas delas dependem exclusivamente das companhias de saneamento ambiental, tais como a secagem térmica e a incineração. Outras, no entanto, estão vinculadas ao

mercado, pois dependem da cooperação e do comprometimento de terceiros. Entre estas estão o uso agrícola, o reuso industrial e a recuperação de materiais. A própria disposição em aterros sanitários depende da disponibilidade deste para receber o lodo, uma vez que a disposição dos resíduos sólidos urbanos é a principal finalidade.

Em todo caso, a decisão pela melhor opção de gerenciamento do lodo é resultado de estudos que consideram tanto o lado técnico-econômico, como as características locais e as questões ambientais e legais. Portanto, trata-se de uma atividade complexa, mas de extrema importância, principalmente em função da necessidade de promoção da qualidade de vida e ambiental.

Diante disso, é importante que os estudos sobre o lodo gerado nas ETE's sejam continuados e aprofundados, como o objetivo de melhorar o gerenciamento do lodo realizado no Brasil, de modo a promover a sustentabilidade ambiental dos serviços de saneamento básico.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V.; GARBOSSA, L. H. P.; LUPATINI, G.; PEGORINI, E. S.; BILOTTA, P. (2007). Gerenciamento do lodo de estação de tratamento de esgoto no Brasil. In: *Conferencia Latinoamericana de Saneamento*. Cali – Colômbia. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Anais eletrônicos.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES F. (2001). Disposição do lodo no solo. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p.

ANDRITZ. *Fluid bed drying system FDS – Single-step drying and granulation*. Disponível em <http://www.andritz.com/ep-thermal-brochure-fds-e.pdf>. Acesso em 10 de julho de 2009.

ANDRITZ. *Drying technologies – Integrated systems for solid-/liquid separation from liquid suspensions to dry products*. Disponível em <http://www.andritz.com/ep-thermal-brochure-overview-e.pdf>. Acesso em 10 de julho de 2009.

BRINGHENTI, J.; ALMEIDA, J. B. S.; GONÇALVES, S. R.; LIMA, G. (2007). Efeitos da co-disposição de lixo urbano e lodo de ETE's em aterros sanitários. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24, Belo Horizonte – MG, 02 a 07 de setembro de 2007. Anais eletrônicos.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (1999). Portaria 4.230 – Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação.

CHAGAS, W. F. (2000). *Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro*. [Dissertação de Mestrado] Rio de Janeiro, FIOCRUZ/ENSP. 89p.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005). Resolução 357. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. D.O.U., Brasília, 18 de março de 2005.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2006). Resolução 375. *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*. D.O.U., Brasília, 30 de agosto de 2006.

EPA, United States Environmental Protection Agency (1988). *Ocean Dumping Ban Act*. EPA press release - November 21, 1988. Disponível em <http://www.epa.gov/history/topics/mprsa/02.htm>. Acesso em 10 de julho de 2009.

EPA, United States Environmental Protection Agency (1999). *Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States*. EPA530-R-99-009. USA. 81p.

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 de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. (2001). Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p.

GWRC, Global Water Research Coalition (2008). *State of Science Report: Energy and Resource Recovery from Sludge*. USA. WERF. 236p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2004). *Atlas de Saneamento*. Rio de Janeiro, IBGE. 151p.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. (1995). *Tratamento de esgotos domésticos*. Rio de Janeiro, ABES. 3. Ed, 940p.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. (2005). *Tratamento de esgotos domésticos*. Rio de Janeiro, SEGRAC. 4. Ed, 932p.

LEITE, J. Y. P.; ARAÚJO, F. S. D.; ARAÚJO, A. L. C.; INGUNZA, M. P. D. (2000). Caracterização de matérias-primas para reuso de lodo de ETE em produtos cerâmicos. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23, Campo Grande – MS, 18 a 23 de setembro de 2000. Anais eletrônicos.

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. (2001). Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p.

MALTA, T. S. (2001). *Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: estudo do caso do município de Rio das Ostras – RJ*. [Dissertação de Mestrado] Rio de Janeiro. FIOCRUZ/ENSP. 68p.

METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse*. New York, Metcalf & Eddy, Inc. 3. Ed, 1334p.

METCALF & EDDY (2003). *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. New York, McGraw-Hill Inc., 4. Ed, 1815p.

MIKI, M. K.; SOBRINHO, P. A.; VAN HAANDEL, A. C. (2006). Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: *Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento*. Rio de Janeiro, ABES. 417p.

NEDER, K. D. (2005). Aproveitamento Energético de Biogás na CAESB. In: *Semana da Eficiência Energética da CEMIG*, 2, Belo Horizonte - MG, 12 a 14 de setembro de 2005.

PINTO, M. T. (2001). Higienização de lodos. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2002). *Relatório R4 – Gestão dos Lodos, Relatório de Suporte à Decisão – Novas Tecnologias*. Projeto Tietê. São Paulo, SABESP.

ROCHA, M. T.; SHIROTA, R. (1999). Disposição final de lodo de esgoto. In: *Revista de Estudos Ambientais*. v.1, n.3, set/dez 1999.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2009). *Plano Diretor de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo. Relatório R-9: Reavaliação e proposição de alternativas para disposição final dos lodos produzidos pelas estações de tratamento de esgotos*. São Paulo, SABESP. 115p.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2008). *Relatório de Sustentabilidade*. São Paulo, SABESP. 132p.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. (2001). Lodo de esgotos: características e produção. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 484p.

VON SPERLING, M. (2005). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte, DESA/UFMG. 3. Ed, 452p.