



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Mayra de Castilho Bielschowsky

MODELO DE GERENCIAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTOS: APLICAÇÃO DO CASO DA BACIA DA BAÍA DE GUANABARA

Rio de Janeiro

2014



UFRJ

Mayra de Castilho Bielschowsky

MODELO DE GERENCIAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTOS: APLICAÇÃO DO CASO DA BACIA DA BAÍA DE GUANABARA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Isaac Volschan Junior

Rio de Janeiro,
2014

Bielschowsky, Mayra de Castilho.

Título: Modelo de gerenciamento de lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da Bacia da Baía de Guanabara/ Mayra de Castilho Bielschowsky. – 2014.
165 f.: il. 45

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2014.

Orientador: Isaac Volschan Jr.

1. Biogás. 2. Lodo. 3. Secagem Térmica. 4. Cogeração.
I.Volschan Jr., Isaac. II.Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Modelo de gerenciamento de lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da Bacia da Baía de Guanabara.



UFRJ

MODELO DE GERENCIAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTOS: APLICAÇÃO DO CASO DA BACIA DA BAÍA DE GUANABARA

Mayra de Castilho Bielschowsky

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Prof. Isaac Volschan Jr., D.Sc, UFRJ (orientador)

Prof. Eduardo Pacheco Jordão, Dr. Eng., USP

Profa. Iene Christie Figueiredo, D.Sc., UFRJ

Prof. João Paulo Bassin, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro

2014

O que realmente conta na vida não é apenas o fato de termos vivido;
é a diferença que fizemos nas vidas dos outros que determina
importância da nossa própria vida.

Nelson Mandela

DEDICATÓRIA

À minha família, que tanto amo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Isaac Volschan Jr., pela dedicação e ensinamentos transmitidos.

Ao Eng. Benito P. Da-Rin, não só pelas brilhantes sugestões que tanto ajudaram no desenvolvimento desta dissertação, mas principalmente pelos ensinamentos de vida.

Ao meu pai, Carlos Eduardo Bielschowsky, pelo apoio, dedicação e conselhos que sem eles não seria possível concluir este trabalho. À minha mãe, Dalila Weber de Castilho, por todo o carinho.

Aos grandes amigos Clara Gavilan, Pedro Vargas, Manna Nunes, Renata Castro e Renatah Correia que, cada um na sua área, foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos queridos amigos Lissa Maria Nocko e Miguel Fernández que a CEDAE me deu de presente e que tanto apoio me deram no desenvolvimento deste trabalho.

À minha equipe de trabalho na CEDAE por todo o apoio e compreensão dos desafios deste trabalho, em especial à Eng. Danielle Campista, ao Eng. Sergio Pinheiro e ao Eng. Tarcísio Paz.

À equipe da gerencia de tratamento de esgotos, à equipe de gestão de energia e à equipe do meio ambiente da CEDAE, sempre prestativos e atenciosos na passagem de informações, em especial ao Eng. José Maria e ao Eng. Paulo Reis.

À equipe da segurança e da automação da noite da CEDAE, em especial ao Wagner, ao Inamar e ao Wallace, pela companhia, grande simpatia e disposição em ajudar.

Aos amigos do mestrado, Fillippe, Francisco, Gustavo, Tiago e Viviane, que proporcionaram leveza e descontração diante desta jornada.

Aos meus amigos que souberam compreender a minha ausência e que tanto torceram pelo sucesso deste trabalho.

E por fim, a toda minha família que me deu todo o suporte para a construção deste trabalho.

RESUMO

BIELSCHOWSKY, Mayra de Castilho. **Modelo de Gerenciamento de Lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: Aplicação do Caso da Bacia da Baía de Guanabara**. Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Nos últimos anos, muito vem se investindo em saneamento no Brasil. A produção teórica sobre essa temática tem explorado, em geral, o gerenciamento do lodo e as técnicas de aproveitamento do biogás. Contudo, ainda existem poucos estudos que exploram a otimização dos balanços de massa e energia decorrentes da fase de tratamento do lodo e sua destinação final, o que motivou a elaboração do presente trabalho. Esse tem por objetivo desenvolver um modelo técnico-econômico, em planilha digital parametrizada, aplicado ao gerenciamento do lodo de estações de tratamento de esgotos, capaz de otimizar os balanços de massa e energia decorrentes das etapas de estabilização, desaguamento, secagem e destinação final. Para tanto, utilizou-se como método o desenvolvimento de nove Estratégias. Elas foram aplicadas no caso das cinco principais Estações de Tratamento de Esgotos da bacia da Baía de Guanabara, sob a operação e manutenção da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro, CEDAE, com as seguintes capacidades instaladas: Alegria (5.000 l/s), Penha (1.086 l/s), Ilha do Governador (525 l/s), Pavuna (1.500 l/s) e Sarapuí (1.500 l/s). Os resultados obtidos sugerem, primeiramente, que o encerramento do Aterro Sanitário de Gericinó e, por consequência, a destinação final no Aterro de Seropédica resultarão em um acréscimo significativo nos custos do gerenciamento do lodo das ETEs estudadas. Sugerem também que, ao se utilizar a unidade de secagem térmica, a aplicação da totalidade da energia contida no biogás em unidade de cogeração de energia e calor (CEC), seja durante as 24 horas do dia, seja durante as 3 horas de ponta, gera a necessidade de complementação energética externa às ETEs. Associando esse fato com o alto CAPEX necessário para a instalação das unidades CEC e avaliando as Estratégias sob o ponto de vista de menor Custo Total em valor presente (considerando o horizonte de projeto de 20 anos) em ambos os casos esta forma de gerenciamento não se justifica. Porém, ao aplicar a totalidade da energia contida no biogás diretamente na unidade de secagem térmica ou ao aplicar parte dessa energia como combustível para a unidade CEC, utilizando como combustível para a unidade de secagem térmica a sua parte remanescente junto com a energia térmica oriunda da unidade CEC, resulta em um Custo Total em valor presente equivalente e melhor que as outras alternativas apresentadas. Mesmo assim, o melhor resultado de Custo Total em valor presente foi quando

o lodo foi transportado da ETE Penha para a ETE Alegria e encaminhado para a unidade de secagem térmica junto com o lodo originário dessa última estação. Isso porque foi possível a geração de energia elétrica na ETE Penha e não foi necessária a aquisição de uma nova unidade de secagem térmica para ela, o que aumentaria o CAPEX total. Quando analisadas especificamente as ETEs Sarapui e Pavuna, que não possuem a geração de biogás, conclui-se que, após o encerramento do aterro de Gericinó, o uso de secagem térmica frente à estabilização por via alcalina resultará em uma economia do OPEX total de aproximadamente 50%.

Palavras-chave: biogás; lodo; Secagem Térmica; cogeração

ABSTRACT

BIELSCHOWSKY, Mayra de Castilho. **Management Model of Sludge from Sewage Treatment Plant: Application of the Case of the Basin of Guanabara Bay, Rio de Janeiro, 2014.** Thesis (MS) – Environmental Engineering, Polytechnic School and School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

In recent years, many investments in sanitation have been made in Brazil. The theoretical literature on this topic has explored, in general, the sewage sludge management techniques and the biogas use. However, there are few studies that explore the optimization of energy and mass balances arising from the treatment phase of the sludge and its disposal, which motivated the development of this research. This work aims to develop a technical-economic model, parameterized in digital spreadsheet, applied to the sludge management from sewage treatment plants, able to optimize energy and mass balances resulting from the phases of stabilization, dewatering, drying and final disposal. For this purpose, it was used as a method the development of nine Strategies. They were applied in the case of the five major Wastewater Treatment Stations of Guanabara Bay's basin, under operation and maintenance of the Water and Sewage Company of Rio de Janeiro State, CEDAE, with the following capacities: Alegria (5.000 l/s), Penha (1.086 l/s), Ilha do Governador (525 l/s), Pavuna (1.500 l/s) and Sarapui (1.500 l/s). The results suggest, first, that the closure of the Gericinó sanitary landfill and, consequently, the final disposal in Seropédica landfill will cause a significant increase in the costs of sewage sludge management from all WWTPs studied. The results also suggest that, when using the unit of thermal drying, the full implementation of the energy contained in biogas to the CHP unit, either during the 24 hours or during the 3 peak hours, generates the needs of external energy supplementation. Combining this fact with the high CAPEX required for installation of the CHP units and evaluating the Strategies from the point of view of lower Total Cost in present value (considering the project horizon of 20 years) in both cases this form of management is not justified. However, when applying the totality of the energy contained in the biogas directly on the thermal drying unit or when applying some of that energy as fuel for the CHP unit, using as fuel for the thermal drying unit its remaining part along with the thermal energy derived from CHP unit results in a total cost in present value equivalent and better than the others alternatives presented. Still, the best result of Total Cost in present value was achieved when the sewage sludge was transported from Penha WWTP to Alegria WWTP and there transported to the thermal drying unit with the sewage sludge originated from that last station. This was achieved because it was possible to generate electricity in Penha WWTP and it was not required the purchase of a new thermal drying unit for it, which would increase the total CAPEX. When analyzed specifically the WWTPs

Sarapui and Pavuna, which do not have biogas generation, it was possible to conclude that, after the closure of Gericinó landfill, the use of thermal drying in comparison with alkaline stabilization will result in savings of total OPEX of approximately 50%.

Keywords: biogas; sludge; thermal dryer; CHP

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo Geral	4
1.2.2	Objetivos Específicos.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	5
2.1	Resíduos de ETE:	5
2.2	Biogás	6
2.2.1	Digestão anaeróbia	6
2.2.2	Redução de sulfato.....	8
2.2.3	Principais fatores que influenciam na digestão anaeróbia	9
2.2.4	Estimativas de geração de metano e biogás.....	9
2.2.5	Composição do Biogás	9
2.3	Lodo.....	11
2.3.1	Composição e tratamento do lodo	12
2.4	Alternativas para uso e destinação final de lodo	23
2.4.1	Uso do lodo na agricultura ou áreas degradadas.....	24
2.4.2	Incineração do lodo.....	25
2.4.3	Reuso industrial do lodo.....	26
2.4.4	Disposição final em aterro sanitário	27
2.4.5	Lançamento do lodo no oceano.....	28
2.4.6	Outras técnicas de recuperação e transformação.	28
2.5	Alternativas para uso e destinação final do biogás.....	30
2.5.1	Lançamento sem tratamento (todo metano é liberado na atmosfera).....	30
2.5.2	Combustão direta sem recuperação de energia	30
2.5.3	Combustão direta com geração e utilização do calor	31
2.5.4	Geração de energia elétrica	31
2.5.5	Cogeração de energia elétrica e térmica	32
2.5.6	Utilização do biogás em substituição ao Gás Natural.	40
2.6	Balanco de massa	40
2.7	Legislações.....	41
2.8	Exemplos e estudos relacionados ao gerenciamento do lodo e do biogás	45

3	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS	51
3.1	Introdução.....	51
3.2	ETE Alegria.....	52
3.3	ETE Ilha do Governador - ETIG	53
3.4	ETE Penha.....	54
3.5	ETE Pavuna	56
3.6	ETE Sarapui.....	57
4	METODOLOGIA	59
4.1	Base de cálculo do modelo técnico-econômico de gerenciamento	59
4.2	Estratégias e rotas para o gerenciamento do lodo	59
4.3	Estrutura do modelo de gerenciamento.....	63
4.3.1	Cálculo do OPEX total de cada estratégia:	64
4.3.2	Cálculo do investimento total necessário para cada estratégia	64
4.3.3	Cálculo do valor presente do OPEX final.....	65
4.3.4	Custos referentes ao transporte de lodo da ETE para o aterro sanitário	65
4.3.5	Custos referentes à disposição no aterro sanitário	65
4.3.6	Custos referentes ao consumo de gás natural.....	66
4.3.7	Custos referentes à operação e manutenção do Secador Térmico - sem os custos relacionados à energia	70
4.3.8	Custos referentes à unidade de CEC	70
4.3.9	Receita da economia na ETE devido à utilização da energia elétrica gerada pela CEC	72
4.3.10	Custos relativos ao consumo de cal	72
4.3.11	Custos relativos ao transporte do lodo entre a ETE 1 e a ETE 2 – Apenas para a estratégia F.....	73
4.3.12	Investimentos.....	74
4.3.13	Custo Total	74
4.4	Cenários de aplicação das estratégias e rotas do modelo para o caso da Bacia da Baía de Guanabara	74
4.5	Dados de entrada do modelo para o estudo de caso	75
4.5.1	Dados de entrada para o balanço de massa das ETES	75
4.5.2	Dados de entrada para a rotina de cálculo	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
5.1	Balanço de massa e energia no entorno das etapas de estabilização anaeróbia e de desaguamento de lodo	78

5.2	Balanço de massa e energia no entorno da etapa de desaguamento do lodo para ETEs com estabilização alcalina.....	79
5.3	Principais resultados da aplicação do modelo de gerenciamento do lodo (MGL).....	80
5.4	Discussão dos resultados referentes à aplicação das Estratégias A, B, C, D e E nas ETEs Alegria, ETIG e Penha.....	87
5.4.1	Avaliação da eficiência energética das diferentes Estratégias.....	87
5.4.2	Avaliação do OPEX das diferentes Estratégias	90
5.4.3	Avaliação da relação massa/volume do lodo e energia demandada para a desidratação das diferentes Estratégias	97
5.4.4	Avaliação do CAPEX das diferentes Estratégias	98
5.4.5	Avaliação econômica das diferentes Estratégias com base no valor presente	100
5.5	Discussão dos resultados referentes à aplicação da Estratégia F com a ETE Penha como ETE 1 e a ETE Alegria como ETE 2.....	103
5.5.1	Avaliação da eficiência energética da Estratégia F	103
5.5.2	Avaliação do OPEX da Estratégia F.....	104
5.5.3	Avaliação econômica das diferentes Estratégias com base no valor presente para a Estratégia F.....	106
5.6	Discussão dos resultados referentes à aplicação das Estratégias G, H e I nas ETEs Pavuna e Sarapuí.....	106
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	112
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
8	APÊNDICE 01 - BALANÇO DE MASSA	121
9	APÊNDICE 02 – RESULTADOS COMPLETOS DO MGL.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Digestão Anaeróbica da Matéria Orgânica	7
Figura 2: Variação do Volume Ocupado por uma Amostra de Lodo em Função do seu Teor de Água e das Propriedades Físicas do Lodo para cada Faixa de Umidade	16
Figura 3: Exemplo da Eficiência da Cogeração de Energia Elétrica e Calor	32
Figura 4: Esquema Típico de um Microturbina com Regenerador	34
Figura 5: Motor de quatro tempos	36
Figura 6: Motor Stirling.....	38
Figura 7: Aplicações de Células de Combustível	39
Figura 8: Localização das ETEs e suas bacias de esgotamento	51
Figura 9: ETE Alegria, vista aérea.....	53
Figura 10: Fluxograma da ETE Alegria	53
Figura 11: ETE Ilha do Governador, vista aérea	54
Figura 12: Fluxograma da ETE Ilha do Governador.....	54
Figura 13: ETE Penha, vista aérea.....	55
Figura 14: Fluxograma da ETE Penha	55
Figura 15: ETE Pavuna, vista aérea	56
Figura 16: Fluxograma da ETE Pavuna	57
Figura 17: ETE Sarapui, vista aérea	57
Figura 18: Fluxograma da ETE Sarapui	58
Figura 19: Estratégias de A a E.....	61
Figura 20: Estratégia F	62
Figura 21: Estratégias de G a I	63
Figura 22: Principais resultados do balanço de massa da ETE Alegria.....	78
Figura 23: Principais resultados do balanço de massa da ETIG.....	79
Figura 24: Principais resultados do balanço de massa da ETE Penha.....	79
Figura 25: Principais resultados do balanço de massa da ETE Pavuna.....	80
Figura 26: Principais resultados do balanço de massa da ETE Sarapui	80
Figura 27: Fluxos de energia e massa das Estratégias do MGL.....	81
Figura 28: Energia ETE Alegria	87
Figura 29: Energia ETIG	88
Figura 30: Energia ETE Penha	88
Figura 31: OPEX ETE Alegria	91

Figura 32: OPEX ETIG	92
Figura 33: OPEX ETE Penha	92
Figura 34: T.S. x OPEX - Estratégia B	94
Figura 35: T.S. x OPEX - Estratégia C	95
Figura 36: T.S. x OPEX - Estratégia E	96
Figura 37: Massa Úmida – ETE Alegria	97
Figura 38: Massa Úmida – ETIG	97
Figura 39: Massa Úmida – ETE Penha	98
Figura 40: CAPEX – ETE Alegria	99
Figura 41: CAPEX - ETIG	99
Figura 42: CAPEX – ETE Penha	100
Figura 43: CAPEX e VP OPEX – ETE Alegria	101
Figura 44: CAPEX e VP OPEX – ETIG	101
Figura 45: CAPEX e VP OPEX – ETE Penha	102
Figura 46: Energia Estratégia E+B e Estratégia F	104
Figura 47: OPEX ETE Alegria e ETE Penha	105
Figura 48: CAPEX e VP OPEX para ETE Alegria e Penha	106
Figura 49: OPEX – ETE Pavuna	108
Figura 50: OPEX – ETE Sarapui	108
Figura 51: Teor de Sólidos x Despesas ETE Pavuna – Estratégia G-II	109
Figura 52: Teor de Sólidos x Despesas – ETE Pavuna Estratégia I	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resíduos segundo sua origem na ETE.....	5
Tabela 2: Composição típica do Biogás	10
Tabela 3: Poder Calorífico Inferior por Concentração de Metano	10
Tabela 4: Equivalência Energética entre 1 m ³ de Biogás e Outras Fontes Energéticas...11	
Tabela 5: Composição Típica dos Lodos Primário Não Digerido, Lodos Primário Digerido e Lodos Secundário Não Digerido	13
Tabela 6: Etapas intermediárias do tratamento do lodo e seus principais objetivos.....	14
Tabela 7: Faixa e Valor Típico para Eficiência da Captura de Sólidos e para o Teor de Sólidos do Lodo Depois de Adensado pelos Principais Tipos de Adensamento.....	15
Tabela 8: Principais Métodos para Desaguamento do Lodo	18
Tabela 9: Faixas e os Valores Típicos de uma Centrífuga para Desaguamento	20
Tabela 10: Características dos Secadores Internos e Externos	22
Tabela 11: Principais Tipos de Produtos Extraídos do Lodo.....	24
Tabela 12: Concentração de Nutrientes em Fertilizante e Lodo Típicos.....	25
Tabela 13: Estimativa Orçamentária para Disposição por Faixa de Teor de Sólidos.....	27
Tabela 14: Principais Produtos Recuperados ou Usos para Reutilização do Lodo	29
Tabela 15: Principais Características de Microturbinas e Turbinas.....	35
Tabela 16: Limites Recomendados do Biogás.....	36
Tabela 17: Características e Custos de Motores a Combustão	37
Tabela 18: Principais informações sobre as ETES.....	52
Tabela 19: Estratégia por ETE.....	74
Tabela 20: Dados de entrada do balanço de massa.....	75
Tabela 21: Dados de entrada do modelo.....	76
Tabela 22: Resumo das características das Estratégias	81
Tabela 23: Principais resultados do MGL para a ETE Alegria.....	82
Tabela 24: Principais resultados do MGL para a ETIG.....	83
Tabela 25: Principais resultados do MGL para a ETE Penha.....	84
Tabela 26: Principais resultados do MGL para a ETE Pavuna.....	85
Tabela 27: Principais resultados do MGL para a ETE Sarapui	86
Tabela 28: Parâmetros e seus valores	121
Tabela 29: Equações Balanço de Massa	123

LISTA DE SIGLAS

CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> – Despesas de Capital
CEC	Cogeração de Energia e Calor
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos
CEPT	<i>Chemically Enhanced Primary Treatment</i>
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETIG	Estação de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador
ICMS	Imposto sobre operações de circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual e intermunicipal e de comunicação
MCFC	<i>Molten Carbonate</i>
MGL	Modelo Técnico-econômico de Gerenciamento do Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos
NBR	Norma Brasileira
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> – Despesas Operacionais
PAFC	<i>Phosphoric Acid</i>
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SOFC	<i>Solide Oxide</i>
SST	Sólidos em Suspensão Totais
SSV	Sólidos em Suspensão Voláteis
T.S.	Teor de Sólidos
TPQA	Tratamento Primário Quimicamente Assistido
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
VP OPEX	OPEX em Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido
WWTP	<i>Wastewater Treatment Plant</i>
EMOP	Empresas de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro
CEG	Gás Natural Fenosa Brasil – Rio de Janeiro

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Nos últimos anos, muito vem se investindo em saneamento no Brasil. Segundo a última pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), só em 2012, foram investidos R\$ 9.753.700.000 na área. Porém, apesar de quase a metade destes investimentos serem destinados ao esgotamento sanitário, muito deve ser feito para alcançar os índices de abastecimento. Ainda segundo essa pesquisa, em 2012, 93,2% da população urbana foi atendida por sistema de abastecimento de água potável, mas apenas 56,1% dela tinha seu esgoto coletado. Quando se analisa o índice de tratamento de esgoto os resultados são ainda mais alarmantes, pois somente 38,7% dos esgotos gerados possuem tratamento (SNIS, 2014).

Uma situação muito similar é encontrada no estado do Rio de Janeiro, em que 90,1% da população urbana é atendida por rede de abastecimento de água potável, mas apenas 54,8% dos esgotos sanitários são coletados e apenas 34,5% possuem tratamento (SNIS, 2014). Além disso, aproximadamente 60% da população residente no Estado do Rio de Janeiro está concentrada na bacia hidrográfica da Baía de Guanabara, fazendo dela uma das principais regiões que mais investimento deve receber nos próximos anos, haja vista que estima-se que, em 2030, ela possuirá em torno de 12,5 milhões de habitantes (PERH, 2013).

A Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) é a instituição responsável por coletar, transportar, tratar e encaminhar ao destino final os esgotos de 11.896.540 habitantes do Estado do Rio de Janeiro, o que representa 73,3% da população total do Estado (IBGE, 2012 e SNIS 2012). Para tal, ela opera e mantém cinco das principais estações de tratamento de esgoto (ETEs) existentes na bacia de esgotamento sanitário da Baía de Guanabara, com as seguintes capacidades instaladas: Alegria (5.000 l/s), Penha (1.086 l/s), Ilha do Governador (525 l/s), Pavuna (1.500 l/s) e Sarapui (1.500 l/s).

Durante as fases de tratamento primário e secundário de uma ETE, é gerada a maior parte do lodo bruto que se destina à fase de tratamento dos sólidos. Esse lodo contém diversas características indesejáveis para o seu manejo e destinação final, tais como: a alta concentração de matéria orgânica putrescível, a presença de agentes patogênicos e a alta concentração de umidade. Por isso, deve ser submetido a processos e operações unitárias de tratamento, cuja escolha tem de levar em consideração tanto a situação original do lodo quanto a sua destinação final.

Com isso, o gerenciamento da fase sólida do tratamento de esgotos, que engloba o adensamento, a estabilização, o desaguamento, a secagem e a destinação final do lodo, embora envolva apenas de 1% a 2% do volume de esgoto tratado, é bastante complexo e seu custo geralmente se situa entre 20% e 60% do gasto total com a operação de tratamento de esgotos (ANDREOLI, 2001).

Para estabilização do lodo, dois processos se destacam para ETEs de médio e grande porte: a estabilização por via alcalina e a digestão por via anaeróbia. A primeira tem como principal vantagem o fato de ter um baixo valor de investimento inicial, porém, em contrapartida, esse processo aumenta o volume de lodo a ser transportado e disposto no aterro sanitário, o que implica em maiores custos. Por sua vez, a digestão anaeróbia requer um alto investimento inicial, mas, além de reduzir o volume de lodo a ser manuseado, oferece diversas oportunidades de recuperação de energia e de materiais, como, por exemplo, a recuperação e utilização do biogás como fonte combustível e a precipitação de estruvita, com a recuperação de fósforo e a geração de lodo em uma classe que pode ser aplicado como fertilizante em diversas agriculturas (RAHAMAN et al, 2014).

Atualmente, os dados mostram que a digestão anaeróbia é uma das tecnologias mais utilizadas no mundo para estabilização de lodo. Nos Estados Unidos, 43% das ETEs utilizam a digestão anaeróbia, tratando mais de 60% dos esgotos gerados (EPA, 2011). Segundo Kelessidis e Stasinakis (2012), a digestão anaeróbia é aplicada em 89% dos países da União Europeia e é a mais adotada em países como Espanha, Reino Unido, Itália, Finlândia e Eslováquia.

Especificamente em relação ao destino final do lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos, no Brasil, adota-se principalmente a disposição em Aterros. (LE BLANC et al, 2008). Os custos desta técnica de disposição estão fortemente relacionados à concentração de sólidos do lodo, principalmente porque quanto maior o teor de sólidos, menor é o volume do lodo a ser manuseado e mais fácil é sua aplicação nas células do aterro sanitário.

Além disso, a bibliografia assinala que uma das técnicas em expansão para redução do teor de sólidos é o uso de secadores térmicos, que são capazes de secar o lodo em até 90% de teor de sólidos. Por exemplo, nos países da União Europeia o número de secadores térmicos em operação cresceu de 110, em 1995, para mais de 450 unidades entorno de 2012 (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012). Ainda sobre os secadores térmicos, nota-se que diversos combustíveis (combinados ou utilizados separadamente)

podem ser usados para suprir a demanda energética desses secadores térmicos. Para ilustrar, pode-se citar o biogás gerado nos digestores anaeróbios.

Além desse uso, o biogás pode ser recuperado, tratado e utilizado em diversas aplicações como combustível como, por exemplo: o aquecimento dos próprios digestores anaeróbios e a geração de energia (com ou sem aproveitamento) do calor gerado e em substituição ao gás natural (VENKATESH; RASHID, 2013)

A recuperação do biogás e seu reaproveitamento como combustível para unidades de cogeração de energia e calor estão em ampla expansão. Segundo a EPA (2011), 104 ETES nos Estados Unidos têm potencia instalada de 190 MW para gerar energia elétrica por processos de cogeração utilizando apenas o biogás gerado em ETE. Ainda segundo a EPA (2011), outras 1.351 estações possuem viabilidade técnica para a implementação destas unidades e entre 257 e 662 possuem viabilidade técnica e econômica.

De acordo com a WERF (2011), essa técnica de cogeração é recomendada pelo incremento da eficiência global do processo de geração de energia elétrica e térmica, que passa de 58% de eficiência quando essas energias são geradas separadamente para 85% de eficiência no processo combinado de cogeração.

A otimização das técnicas de estabilização do lodo combinado com o aproveitamento do biogás e a concentração de sólidos do lodo para disposição em aterro sanitário pode reduzir os custos de operação e manutenção das estações de tratamento de esgotos.

Feito todo esse adendo, destaca-se a necessidade de aprofundar os estudos no âmbito do gerenciamento do lodo, pois essa economia pode e deve possibilitar que esses recursos economizados sejam reinvestidos na ampliação dos serviços de coleta e tratamento de efluentes, ampliando assim o atendimento do saneamento básico para a população.

Por conta disso, a fim de otimizar as técnicas de tratamento de lodo com o grau de secagem e as possibilidades de uso do biogás, busca-se no presente trabalho desenvolver um modelo técnico-econômico de gerenciamento do lodo de estações de tratamento de esgotos (MGL), em planilha digital parametrizada, capaz de otimizar os balanços de massa e energia decorrentes das etapas de estabilização, desaguamento, secagem e destinação final.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo técnico-econômico, em planilha digital parametrizada, aplicado ao gerenciamento do lodo de estações de tratamento de esgotos, capaz de otimizar os balanços de massa e energia decorrentes das etapas de estabilização, desaguamento, secagem e destinação final.

1.2.2 Objetivos Específicos

Otimizar técnica e economicamente os balanços de massa e energia associados ao gerenciamento da fase sólida das cinco principais Estações de Tratamento de Esgotos da bacia da Baía de Guanabara sob a operação e manutenção da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro, CEDAE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

2.1 Resíduos de ETE:

Uma Estação de Tratamento de Esgotos, ETE, assim como consta na definição da NBR 12.209/2011 é um conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento.

Nesse sentido, o principal objetivo de uma ETE é aplicar um conjunto de processos e operações unitárias que, quando utilizados de forma sucessiva, serão capazes de remover as cargas poluidoras do esgoto, para então, esse efluente poder ser encaminhado a um corpo receptor minimizando os impactos ambientais.

Porém, independente da combinação de processos e operações unitárias de tratamento utilizadas, uma ETE tem como característica comum a geração de resíduos. Assim sendo, a definição da norma também inclui como objetivo o condicionamento da matéria residual resultante do tratamento. A Tabela 1 busca apresentar aqueles que podem ser considerados os principais resíduos produzidos em uma ETE de acordo com a sua origem.

Tabela 1: Resíduos segundo sua origem na ETE

Resíduo	Origem do Resíduo na ETE
Sólido Grosseiro	Grade
Areia	Desarenador
Escuma	Desarenador, decantador primário, decantador secundário, reator anaeróbico e lagoa de estabilização
Lodo primário	tanque séptico e decantador primário
Lodo biológico aeróbico (não estabilizado)	Lodos ativados convencional e reatores aeróbicos com biofilme de alta carga
Lodo biológico aeróbico estabilizado	Lodos ativados aeração prolongada e reatores aeróbicos com biofilme de baixa carga
Lodo biológico anaeróbico	Lagoas de estabilização, Reatores anaeróbicos e filtros anaeróbicos
Lodo Químico	Decantadores primários com precipitação química, lodo estabilizado com Cal e outros tratamentos físico-químicos
Biogás	Digestores anaeróbicos e reatores anaeróbicos

Fonte: adaptado de Andreoli et al, 2006; Metcalf e Eddy 2002 apud Pedroza, 2011

Apesar de, durante muitos anos, esses resíduos de ETE serem considerados descartáveis e não se aplicarem qualquer tipo de reaproveitamento ou reciclagem, com o aumento dos custos e das restrições legais para a destinação final e com o aumento do valor da energia, passou-se a considerar o tratamento e o reaproveitamento destes produtos como parte do correto gerenciamento de uma estação de tratamento de esgotos. Destaca-se o caso dos lodos pelo seu grande volume gerado e possuir características específicas como difícil manipulação e o caso do biogás, por seu alto poder calorífico.

2.2 Biogás

O biogás é definido como o subproduto do processo de degradação biológica em meio anaeróbio que ocorre principalmente em dois tipos de unidades presentes nas ETEs: 1) no tratamento da fase líquida em reatores anaeróbios, tais como nos filtros anaeróbios e nos UASBs (reatores anaeróbios de fluxo ascendente); e 2) no tratamento da fase sólida nos digestores anaeróbios de lodo (SILVA, 2009).

2.2.1 Digestão anaeróbia

Os ambientes onde ocorrem os processos anaeróbios de degradação da matéria orgânica se assemelham a um ecossistema em que diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2007).

O processo de digestão anaeróbia pode ser subdividido em rotas metabólicas, cada uma com grupos microbianos específicos que têm um comportamento fisiológico diferente (CHERNICHARO, 2007). A Figura a seguir apresenta um fluxograma com essas rotas de digestão anaeróbia.

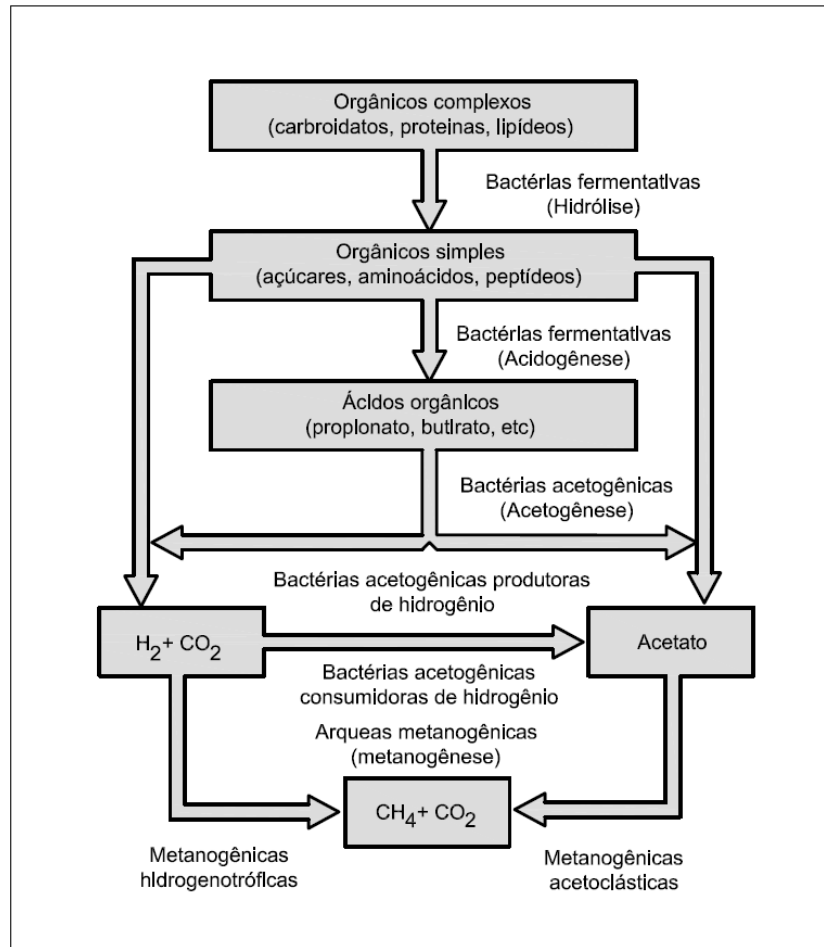


Figura 1: Digestão Anaeróbica da Matéria Orgânica
 Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 2007.

Portanto, conforme pode ser observado, esse processo pode ser simplificado como a sucessão de quatro fases principais: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese.

Na fase da **hidrólise**, os materiais particulados, isto é, os orgânicos complexos (tais como os carboidratos, proteínas e lipídios) são convertidos em materiais orgânicos simples, sendo dissolvidos em açúcares, aminoácidos, peptídeos, acetatos e hidrogênio, a partir das bactérias fermentativas hidrolíticas.

Na fase subsequente, denominada de **acidogênese**, essa matéria orgânica dissolvida é biodegradada em ácidos graxos voláteis (como, por exemplo, ácido acético, propiônico, butírico, hidrogênio, dióxido de carbono e alcoóis) por uma população heterogênea de bactérias, predominando, nesta etapa, as bactérias acidogênicas (SALOMON, 2007).

Depois, já na fase chamada de **acetogênese**, as moléculas oriundas da acidogênese são digeridas pelas bactérias acetogênicas, formando, sobretudo, os acetatos, o dióxido

de carbono e o hidrogênio. Cabe notar que o grupo bacteriano desta etapa tem um crescimento relativamente lento, com tempo de duplicação de 1,5 a 4 dias (Mussati (1998) apud SALOMON, 2007). Cabe observar, ainda, que as reações que esse grupo bacteriano produz são mais complexas do ponto de vista energético e são facilmente interrompidas devido ao acúmulo de gás hidrogênio dissolvido no meio (SALOMON, 2007).

Na última fase, a **metanogênese**, ocorre à conversão das moléculas oriundas da acetogênese em metano e dióxido de carbono. Os microrganismos metanógenos que atuam nesta fase podem ser divididos em dois grupos: os acetoclásticos, que convertem o acetato em metano e dióxido de carbono, e os hidrogenotróficos, que utilizam o gás carbônico e o hidrogênio na formação do metano. Esses microrganismos metanogênicos possuem uma velocidade de crescimento e um fator de produção de biomassa inferior se comparado ao dos grupos acidogênicos e dos sulfato redutores, o que, muitas vezes, gera desequilíbrio no processo de degradação do substrato (LEMA (1997) apud SALOMON, 2007).

2.2.2 Redução de sulfato

A conversão de sulfato em sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono ocorre durante a digestão anaeróbia do lodo, resultado da presença das bactérias redutoras de sulfato, que são os microrganismos responsáveis pela redução dos compostos de enxofre e que são capazes de utilizar vários tipos de substratos para o seu crescimento e manutenção (SALOMON, 2007). Porém, quando se deseja reaproveitar a energia contida no biogás, é importante levar em consideração a concentração destas bactérias, isso porque, apesar de serem mais eficientes na remoção da DQO (demanda química de oxigênio) a presença dessas bactérias em efluentes com concentração significativa de sulfato alteram as rotas metabólicas dos reatores anaeróbios e passam a competir pelos substratos disponíveis no meio com as bactérias fermentativas, acetogênicas e arqueas metanogênicas, levando à geração de gás sulfídrico em detrimento da geração de metano (CHERNICHARO, 2007). Além disso, a formação de gás sulfídrico ainda agrega ao biogás características corrosivas, que podem diminuir a vida útil das tecnologias de geração de energia.

2.2.3 Principais fatores que influenciam na digestão anaeróbia

Segundo Leattinga *et al* (1996, *apud* CHERNICHARO, 2007), os principais fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é digerido são: a temperatura operacional do reator; o tempo de residência do reator; a composição do substrato (como, por exemplo, os teores de lignina, carboidrato, proteína e gordura); o tamanho das partículas; o pH do meio; a concentração de $\text{NH}_4^+\text{-N}$; e, por fim, a concentração de produtos de hidrólise (como, por exemplo, os ácidos orgânicos voláteis).

2.2.4 Estimativas de geração de metano e biogás

Conforme afirma Chernicharo (2007), a geração do metano pode ser calculada a partir da composição química do líquido tratado ou por meio da DQO consumida durante o processo de digestão anaeróbia. Na primeira maneira, é necessário conhecer a composição química do afluente ao reator e utilizar a equação estequiométrica de Buswell. Nesta forma de cálculo, não é considerada a utilização do substrato para produção de biomassa bacteriana ou outras rotas de conversão da matéria orgânica, resultando na máxima produção de metano estequiometricamente possível (CHERNICHARO, 2007). A segunda maneira considera que se desprende um mol de metano para cada dois moles de oxigênio em completa oxidação para gás carbônico e água (CHERNICHARO, 2007).

Entretanto, os dois métodos acima descritos avaliam a produção teórica apenas do metano e, segundo Metcalf e Eddy (2003), usualmente, a geração total de biogás pode ser estimada levando-se em consideração a porcentagem de sólidos voláteis consumidos no reator anaeróbio, de 0,75 a 1,12 m^3/kg de SSV destruído. Pode-se, também, ainda que grosseiramente, estimar uma geração per capita, de 15 a 22 litros por pessoa para lodo primário e em torno de 28 litros por pessoa para estações com tratamento secundário (METCALF E EDDY, 2003).

2.2.5 Composição do Biogás

O biogás é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, uma pequena quantidade de sulfeto de hidrogênio e amônia, com traços de diversos outros componentes, como o nitrogênio, o hidrogênio e o oxigênio. Além disso, usualmente, o biogás é saturado de vapor de água e carrega com ele algum material particulado e compostos orgânicos com silício (siloxanas) (WELLINGER, 2006). Todavia, é fundamental salientar que a composição do biogás sofre grandes variações em função da

constituição do material degradado, das condições de anaerobiose do tratamento e dos fatores climáticos locais. A Tabela 2 apresenta uma faixa de variação típica dos principais constituintes do biogás produzido em digestores de lodo:

Tabela 2: Composição típica do Biogás

Biogás	% (volume/volume)
Metano	62-70
Dióxido de Carbono	30-38
Sulfeto de Hidrogênio	50-3.000 ppm
Nitrogênio	0,05-1.0
Oxigênio	0,022
Hidrogênio	<0,01
Vapor d`água	Saturado

Fonte: ANDREOLI, 2001

Quando se pretende utilizar a energia contida no biogás, é necessário conhecer sua composição e utilização pretendida para determinar o tratamento a que deve ser submetido. Dessa forma, conseguir-se-á evitar danos nos equipamentos de aproveitamento do biogás, o que aumentará sua durabilidade. Conseguir-se-á, ainda, conhecer o poder calorífico do biogás, que varia de acordo com a concentração de gás metano, conforme pode-se constatar na Tabela 3.

Tabela 3: Poder Calorífico Inferior por Concentração de Metano

Biogás		Poder Calorífico Inferior (PCI)	
% metano	% gás carbônico	kJ/g	MJ/m ³
(por volume)			
50	50	13,4	17,9
65	35	20,3	23,3
80	20	29,9	28,7
100	0	50	35,9

Fonte: adaptado de LIMA, 2011

Segundo Appels e outros (2008), a concentração típica de metano no biogás é de 63%, o que representa um poder calorífico inferior de 23 MJ/Nm³. Apesar de alto e recomendado para diversas utilizações, esse valor é inferior ao das fontes tradicionais de energia. A Tabela 4 indica a equivalência energética de 1 m³ de biogás (5.500 kcal) comparada a diversas outras fontes energéticas.

Tabela 4: Equivalência Energética entre 1 m³ de Biogás e Outras Fontes Energéticas

Fonte	Unidade	Faixa
Gasolina	l	0,7
Óleo Diesel	l	0,6
Álcool Anidro	l	1,1
Álcool Hidratado	l	1,14
Carvão Vegetal	kg	0,9
Carvão Mineral	kg	1,4
Lenha	kg	2,17
GLP	m ³	0,2
Gás Natural	kg	0,64

Fonte: adaptado de LIMA, 2005

2.3 Lodo

A Norma Brasileira (NBR) 12.209/2011 define lodo como a suspensão aquosa de componentes minerais e orgânicos separados no sistema de tratamento de esgotos. Ou seja, o lodo é a suspensão de partículas sólidas separada do meio líquido durante o processo de tratamento da fase líquida.

Andreoli (2001) distingue o termo *lodo* de *biossólido*, sendo o primeiro utilizado para os sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgotos antes do tratamento adequado à disposição final, e o segundo empregado ao lodo decorrente do tratamento adequado à sua possível utilização, ressaltando assim os seus aspectos benéficos, valorizando a utilização produtiva em comparação com a mera disposição final improdutiva como, por exemplo, em aterro sanitário.

Conclui-se, então, que o lodo é comumente classificado em função da fase de tratamento em que se origina. Nos tratamentos convencionais, os lodos são identificados como primário, secundário (ou biológico) e terciário, enquanto que, no tratamento em que produtos químicos são utilizados, o lodo é identificado como lodo químico.

O lodo primário é composto principalmente de sólidos em suspensão presentes no esgoto que foram sedimentado e retirados do fundo do decantador primário. Segundo Metcalf e Eddy (2003), o lodo primário é comumente cinza escuro ou negro, viscoso e possui um odor extremamente desagradável. O teor de sólidos do lodo primário está na faixa de 2% a 6%, e a produção é da ordem de 35 g SS/(hab.dia) a 40 g SS/(hab.dia) (ANDREOLI, 2001).

O lodo secundário, também conhecido como lodo biológico, é produzido nos processos de tratamento biológico e sedimentado em seus decantadores secundários. Este lodo é a própria biomassa que cresceu à custa do alimento fornecido pelo esgoto,

(ANDREOLI, 2001). Quando provenientes dos processos de lodos ativados convencionais, geralmente contêm o teor de sólidos entre 0,6 e 1,0 % e uma produção típica de 25 g SS/(hab.dia) a 35 g SS/(hab.dia) (ANDREOLI, 2001). Ainda sobre lodo secundário, Metcalf e Eddy (2003) destacam que ele tem a aparência de flocos marrons, exala um leve odor de “terra” e tende a se tornar séptico com o tempo, passando a apresentar um forte odor de putrefação.

Diversas ETEs promovem a mistura do lodo primário e do lodo secundário antes de continuarem na linha de tratamento. Neste caso, o lodo é chamado de *lodo misto* e apresenta um teor de sólidos que depende da fase de tratamento em que os lodos primários e secundários se encontravam antes do encaminhamento ao tratamento conjunto, como por exemplo, se um ou ambos já foram submetidos ao adensamento.

Por sua vez, lodo químico é o nome comumente dado para os lodos de estações que adotam etapas de tratamento físico-químicas, por exemplo, as que utilizam tratamento primário quimicamente assistido, (TPQA ou CEPT). Segundo Cassini (2003, apud FIGUEIREDO, 2009), estes processos apresentam uma produção de lodo cerca de 20% maior que o tratamento aeróbio e 100% superior à de processos combinados (anaeróbio+aeróbio).

Ao empregar o sulfato de alumínio como coagulante, estima-se que o lodo removido do decantador do TPQA apresenta de 60 g SS/(hab.dia) a 70 g SS/(hab.dia), com 65% a 68% de fração volátil. O volume produzido fica, com isso, na ordem de 2,0 a 7,0 L/(hab.dia). Quando o coagulante utilizado é o cloreto férrico, a produção de lodo aumenta em cerca de 10% a 12% se comparado ao sulfato de alumínio (TSUTIYA et al. (2001) apud FIGUEIREDO, 2009).

Já o lodo terciário é oriundo do tratamento terciário e suas características podem se assemelhar com as dos lodos primário, biológicos ou químicos ou ainda possuir características específicas, de acordo com o processo de tratamento adotado.

2.3.1 Composição e tratamento do lodo

O lodo de ETE possui composição variada, devido às características do efluente, à estação de tratamento e à fase de tratamento de onde ele é oriundo. Contudo, em geral, ele é composto de componentes orgânicos, nutrientes, patogênicos e metais, podendo conter, ainda, compostos tóxicos e em geral possuem baixíssimo teor de sólidos. Foi colocada a Tabela 5 a seguir para comprovar a afirmação feita.

Tabela 5: Composição Típica dos Lodos Primário Não Digerido, Lodos Primário Digerido e Lodos Secundário Não Digerido

Característica	Unidade	Lodo Primário Bruto		Lodo primário digerido		Lodo secundário Bruto
		Faixa	Típico	Faixa	Típico	Típico
Sólidos Totais	%	5-9	6	2-5	4	0,8-1,2
Sólidos Voláteis	% de ST	60-80	65	30-60	40	59-88
Proteínas	% de ST	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrogênio	% de ST	1,5-4,0	2,5	1,6-3,0	3,0	2,4-5,0
Fósforo	% de ST	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11
Potássio	% de ST	0-1,0	0,4	0-3,0	1,0	0,5-0,7
pH	-	5,0-8,0	6,0	6,5-7,5	7,0	6,5-8,0
Alcalinidade	MG CaCO ₃ /l	500- 1.500	600	2.500- 3.500	3.000	580-1.100
Ácidos Orgânicos	mg/l	200- 2.000	500	100- 600	200	1.100- 1.700
Energia contida	MJ/kg SST	23-29	25	9-14	12	19-23

Fonte: adaptado de METCALF E EDDY, 2003

Assim, conforme se pode perceber a partir do que foi exposto, o lodo oriundo do tratamento de esgoto possui diferentes características, o que dificulta o manejo e a disposição final, fazendo com que ele seja submetido a processos e operações unitárias de tratamento. Dessa maneira, para a escolha da linha de tratamento do lodo, deve-se levar em conta tanto a origem quanto a destinação final e esta, por sua vez, deve ser escolhida em função do local para onde o lodo tratado será encaminhado.

Segundo Andreoli (2001), as principais etapas intermediárias do tratamento do lodo e seus respectivos objetivos são:

Tabela 6: Etapas intermediárias do tratamento do lodo e seus principais objetivos

Etapas	Principais Objetivos
Condicionamento	Preparação para as etapas seguintes, particularmente para a desidratação (principalmente mecânica)
Adensamento ou espessamento	Remoção de umidade (redução de massa e volume)
Estabilização	Remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
Desaguamento ou desidratação	Remoção de umidade (redução de massa e volume)
Higienização	Remoção de organismos patogênicos
Disposição final	Destinação final

2.3.1.1 Condicionamento

O condicionamento trata-se de uma etapa anterior ao adensamento e ao desaguamento e influencia diretamente a eficiência dos processos mecanizados. Isto porque seu principal objetivo é aumentar o tamanho das partículas do lodo, por meio da união das pequenas partículas em agregados de partículas maiores, a fim de, com isso, melhorar as suas características de separação das fases sólido-líquidos do lodo. Esse processo dá-se através da adição de produtos químicos orgânicos ou inorgânicos ou, ainda, através de tratamento térmico. (ANDREOLI, 2001; ANDREOLI *et al*, 2006)

2.3.1.2 Adensamento ou espessamento

Conforme destaca Jordão (2011), a finalidade principal do adensamento é reduzir o volume do lodo que será processado nas etapas subsequentes do tratamento, reduzindo os custos de implantação e operação das unidades de digestão e secagem. Destarte, o adensamento do lodo consiste no aumento da concentração de sólidos em função da remoção de parte da água presente no lodo, processo esse que ocorre por meio dos adensadores, cujos tipos são: por gravidade, por flotação de ar dissolvido e mecanizados, como as centrífugas e as prensas desaguadoras (ANDREOLI, 2001). A próxima Tabela 7 indica a faixa e o valor típico do teor de sólidos do lodo depois de

adensado e a eficiência da captura de sólidos pelos principais tipos de adensamento sinalizados anteriormente.

Tabela 7: Faixa e Valor Típico para Eficiência da Captura de Sólidos e para o Teor de Sólidos do Lodo Depois de Adensado pelos Principais Tipos de Adensamento

Tipo de adensador	Origem do lodo	Teor de sólidos %		Captura de sólidos %	
		Faixa	Típico	Faixa	Típico
Gravidade	Primário	4 à 10	6	85 à 92	90
	Misto	2 à 6	4	80 à 90	85
Flotação	Com químicos	4 à 6	5	90 à 98	95
	Sem químicos	3 à 5	4	80 à 95	90
Centrífuga	Com químicos	4 à 8	5	90 à 98	95
	Sem químicos	3 à 6	4	80 à 90	85

Fonte: adaptado de METCALF E EDDY, 2003

Apesar da pequena variação do teor de sólidos do lodo antes e depois do adensamento, a quantidade de água removida pode ser suficiente para provocar uma redução muito significativa do volume de lodo. Isso se explica porque a variação do volume do lodo não mantém qualquer proporcionalidade com a redução da porcentagem de umidade, mas sim uma relação inversa com o teor de sólidos remanescente após o adensamento.

Para esclarecer a afirmação acima, traz-se o seguinte exemplo: supõe-se que 1 m³ de lodo biológico tenha sido submetido ao adensamento por gravidade e que, por conta desse processo, a porcentagem de água (isto é, a umidade) original tenha caído de 99% para 97% no lodo adensado. Então, por mais que aparentemente não tenha ocorrido uma redução significativa da umidade do lodo, nesta mesma operação, o teor de sólidos aumentou de 1% para 3%. Como a redução de volume é inversamente proporcional ao aumento do teor de sólidos, a relação entre volume inicial e final será de $1\% / 3\% = 0,333$, o que representa um volume de lodo adensado igual a 333 litros, ou seja, um terço do volume de lodo bruto.

A Figura 2 reproduzida a seguir mostra a variação do volume ocupado por uma amostra de lodo em função do seu teor de água e das propriedades físicas do lodo para cada faixa de umidade.

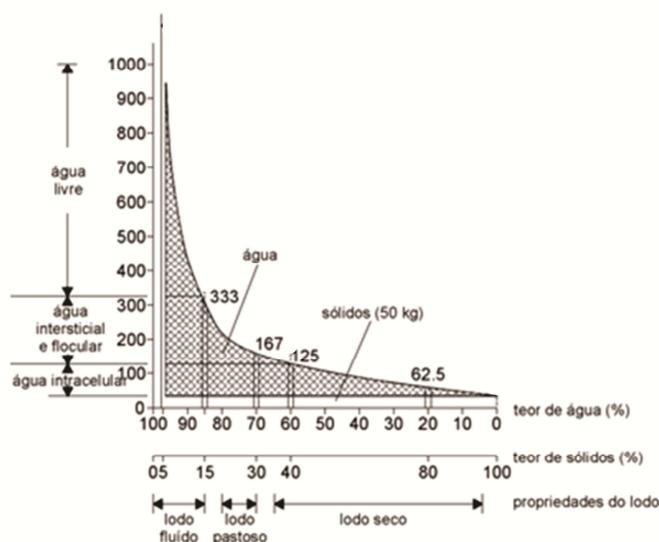


Figura 2: Variação do Volume Ocupado por uma Amostra de Lodo em Função do seu Teor de Água e das Propriedades Físicas do Lodo para cada Faixa de Umidade

Fonte: Adaptado de FERNANDES *et al*, 1999

Observa-se, assim como no exemplo descrito anteriormente, que inicialmente, qualquer redução do teor de água do lodo representa uma brusca variação no volume final do lodo, variação esta que reduz de acordo com o acréscimo do teor de sólidos do lodo.

2.3.1.3 Estabilização

O processo de estabilização tem como objetivo principal a inibição (ou destruição) matéria orgânica putrescível e da eliminação dos agentes patogênicos e pode ser realizada biológica, química ou termicamente.

Especificamente sobre os processos de estabilização biológica, sinaliza-se que eles podem ser efetivados tanto em meio aeróbio quanto em meio anaeróbio e têm por objetivo a conversão parcial da matéria putrescível em material estável, sob a forma de líquidos, sólidos dissolvidos e subprodutos gasosos. A estabilização biológica promove ainda a destruição de microrganismos patogênicos. Por consequência reduz parte dos sólidos secos do lodo, os riscos de emissão de maus odores e diminui a concentração de organismos patogênicos, facilitando o manuseio do lodo (ANDREOLI, 2001; JORDÃO, 2011; METCALF E EDDY, 2003).

A estabilização química consiste na adição de produtos químicos alcalinos, comumente cal, capazes de elevar o pH do lodo a 12 ou mais por, pelo menos, duas horas, impedindo ou retardando, assim, a ação dos microrganismos (patogênicos ou

não) que consumiriam a matéria orgânica presente no lodo, causando mal odor e riscos de contaminação daquele que por ventura viesse a manusear o lodo (JORDÃO, 2011). Nesse processo, apesar de haver uma grande economia de investimento inicial, via substituição dos digestores anaeróbios, classicamente utilizados, por sistemas de aplicação de cal, sobem os custos operacionais da ETE, em decorrência do aumento do volume de lodo a ser transportado para sua destinação final, um vez que esse lodo passa a conter a cal adicionada (JORDÃO, 2011). Além disso, com a substituição do digestor anaeróbio pela estabilização química, a ETE não produz biogás que poderia ser reaproveitado como fonte energética.

Por fim, há a estabilização térmica do lodo. Ela é obtida a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes fechados. Essa forma de estabilização resulta em um produto com elevado teor de sólidos, com significativa concentração de nitrogênio e livre de patogênicos, sendo indicada para uso irrestrito na agricultura (ANDREOLI, 2001). Porém, esta técnica demanda da aplicação de uma quantidade significativa de energia e, assim, os custos associados ao consumo de combustível podem tornar o processo extremamente oneroso.

2.3.1.4 Desaguamento

O desaguamento do lodo é uma operação unitária física (mecânica) que reduz o volume do lodo por meio da redução do seu teor de água (ANDREOLI *et al*, 2006).

Segundo Metcalf e Eddy (2003), as principais razões para aplicar o desaguamento são: 1) porque há uma redução do volume de lodo e por consequência uma redução do custo do transporte do lodo ou do bio-sólido até a destinação final; 2) pelo fato de que os lodos ou bio-sólidos desaguados são, de modo geral, mais fáceis e menos onerosos de manipular do que os lodos adensados ou líquidos; 3) por conta que, no caso de incineração do lodo, este processo é obrigatório para o funcionamento do incinerador 4) para que haja uma redução do volume de agentes aditivos necessários para a compostagem; 5) por, em alguns casos, evitar mau odor e adiar a putrefação do bio-sólido, em decorrência da remoção de umidade; e, por fim, 6) por reduzir a produção de lixiviado no aterro sanitário, naqueles casos em que a disposição final do lodo é acomodado nesses aterros.

Os sistemas de desaguamento podem ser naturais ou mecânicos. Andreoli (2001) elaborou uma relação, reproduzida a seguir na Tabela 8, apresentando uma comparação entre os principais métodos para desaguamento do lodo.

Tabela 8: Principais Métodos para Desaguamento do Lodo

Características	Processos Naturais		Processos Mecanizados			
	*Leito de Secagem	Lagoas de Lodos	Centrífuga	Filtro a Vácuo	Prensa desaguadora	Filtro prensa
Demanda de área	+++	+++	+	++	+	+
Demanda de energia	-	-	++	+++	++	+++
Custo de implantação	+	+	+++	++	++	++
Complexidade operacional	+	+	++	++	++	+++
Demanda de manutenção	+	+	++	++	+++	+++
Complexidade de instalação	+	+	++	++	++	++
Influência do clima	+++	+++	+	+	+	+
Sensibilidade à qualidade do lodo	+	+	+++	++	++	++
Produtos Químicos	+	-	+++	+++	+++	+++
Complexidade de remoção do lodo	++	++	+	+	+	+
Teor de ST na torta	+++	+++	++	+	++	+++
Odores e vetores	++	+++	+	+	+	+
Ruídos e vibrações	-	-	+++	++	++	++
Contaminação do lençol freático	++	+++	+	+	+	+

Legenda: + pouco, ++reduzido +++ grande, elevado, muito; - não há

*Ciclo de desaguamento de 30 dias

Fonte: ANDREOLI, 2001

Conforme pode ser identificado na Tabela reproduzida, as principais vantagens da utilização dos processos de desaguamento mecanizados, se comparados com os naturais, são: a demanda de menor área para sua instalação; a menor influência do clima local a instalação e a menor geração de odores e a menor atração de vetores. Como desvantagem, essas unidades demandam maior custo, além de produzir lodos com menores teores de sólidos.

Além disso, cabe observar que o método a ser utilizado deverá ser selecionado de acordo com o tipo de lodo que será desaguado, as características desejadas para o produto do desaguamento, o espaço disponível para implementação do sistema e, também, o tipo de destino final que será dado ao lodo (JORDÃO, 2011; METCALF E EDDY, 2003). Cabe observar, ainda, que, dentre processos naturais acima sintetizados, o mais utilizado é o leito de secagem e dos mecânicos, é a centrífuga¹ (ANDREOLI, 2001).

Os leitos de secagem são unidades onde se processa a redução de umidade através da drenagem e da evaporação da água liberada durante o período de secagem (JORDÃO, 2011) Esta forma de desaguamento é cada vez mais utilizada apenas em ETEs de pequeno porte devido, principalmente, a necessidade de grandes áreas para a instalação dos leitos.

O método de centrifugação consiste em na separação sólido-líquido do lodo forçada pela ação da força centrífuga. A unidade de centrifugação possui um tambor cilíndrico que gira em alta rotação para produzir essa força. Ao entrar na centrífuga, o lodo deposita-se junto à parede cilíndrica. No interior da centrífuga existe uma rosca transportadora instalada de tal forma que mantém apenas um pequeno espaço livre entre ela e a parede cilíndrica e gira com velocidade menor que a do tambor. Esta diferença de velocidade permite o transporte dos sólidos até a zona de descarga (ANDREOLI, 2001; ANDREOLI *et al*, 2006)

Especificamente sobre as centrífugas desaguadoras, nota-se que o teor de sólidos da torta, resultante dessa operação e a eficiência na captura de sólidos dependem, principalmente, do tipo de lodo e da adição de produtos químicos, como polímeros. A Tabela 9 apresenta estas relações.

¹ A centrífuga é, hoje, o método mais utilizado pela CEDAE para ETEs de médio e grande porte e, de acordo com Metcalf e Eddy (2003), ela é amplamente utilizada na Europa e nos Estados Unidos.

Tabela 9: Faixas e os Valores Típicos de uma Centrífuga para Desaguamento

Lodo	Teor de sólidos %		Captura de sólidos %	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Com uso de químicos	10 à 35	22	85 à 98	92
Sem o uso de químicos	10 à 30	18	55 à 90	80

Fonte: adaptado de METCALF E EDDY, 2003

Metcalf e Eddy (2003) indicam que, se comparada com o uso de outros métodos, a centrífuga tem como principais vantagens: a boa contenção de odor, podem ser ligadas e desligadas rapidamente, a produção de tortas relativamente secas, a baixa relação capital-investimento e a alta relação capacidade-área construída. Outra vantagem na utilização das centrífugas é que o mesmo tipo de equipamento pode ser preparado para o uso na função desaguamento ou adensamento, porém com configurações diferentes (sendo necessário informar ao fabricante no momento da compra), oferecendo, portanto, uma vantagem de manutenção e de operação na ETE.

Em contrapartida, como principais desvantagens, são apontados: o desgaste das roscas (que são um problema potencial de manutenção), a necessidade de remoção de areia, a possível necessidade de um triturador de lodos anterior à unidade, a necessidade de manutenção especializada e a produção de um centrado com sólidos em suspensão moderadamente altos.

2.3.1.5 Higienização

O lodo de esgoto tem, em sua constituição, diversos agentes patogênicos que co-precipitam com a matéria orgânica. Apesar do nível de patogenicidade do lodo ser reduzido pelos processos de estabilização, tais como a digestão biológica, muitos parasitas intestinais presentes no lodo e, sobretudo, seus ovos são pouco afetados por processos de digestão convencional, necessitando de uma etapa complementar ou conjugada, denominada de higienização, (ANDREOLI, 2001; FERNANDES *et al*, 1999) que pode ser realizada por via térmica, química, biológica ou por radiação (ANDREOLI, 2001).

Essa higienização tem, portanto, o objetivo de reduzir a concentração dos agentes patogênicos do lodo, em função do nível de contato com a população que esse lodo terá após sua destinação final, como, por exemplo, aquele destinado à aplicação em parques e jardins de acesso público e que será submetido a um nível maior de exigência sanitária do que os destinados a aterros sanitários.

2.3.1.6 *Secagem térmica*

O processo de secagem térmica consiste na evaporação do líquido contido no lodo através da aplicação de energia térmica, sem que ocorra a destruição de sua matéria orgânica (ANDREOLI *et al*, 2006). Esse processo permite a redução da umidade do lodo, sem uma mudança significativa da concentração dos seus sólidos totais.

Quando o lodo úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente. O primeiro consiste na evaporação da umidade da superfície do sólido (lodo), através da transferência de energia. O segundo é a transferência da umidade interna do sólido (lodo) para a superfície e a subsequente evaporação pelo primeiro processo. Essas transferências de energia do meio para o lodo úmido podem ocorrer como resultado de convecção (também conhecido como secagem direta), condução (igualmente conhecido por secagem indireta) ou radiação e, algumas vezes, como resultado de uma combinação destes efeitos (CHEN *et al*, 2006).

No processo de convecção o lodo permanece em contato direto com os mecanismos de transferência de calor, como gases aquecidos. Inversamente, no processo por condução, o lodo úmido não entra em contato direto com o fluido de aquecimento. Já o processo por radiação ocorre quando uma energia radiante (lâmpadas infravermelhas, resistências elétricas, materiais incandescentes) é usada para transferir calor para o lodo e assim reduzir a sua umidade (JORDÃO, 2011).

Destaca-se que a forma como ocorrerá à transferência de calor define o tipo de secador térmico a ser usado. Na secagem térmica de lodo de esgoto, são utilizados principalmente os secadores diretos, por convecção e os indiretos, por condução. A Tabela 10 apresenta as principais características destes dois tipos de secadores.

Tabela 10: Características dos Secadores Internos e Externos

Secadores Diretos	Secadores indiretos
<ul style="list-style-type: none"> • Contato direto dos gases quentes com os sólidos, para aquecê-los e remover a água neles presente. • As temperaturas de secagem podem atingir 750°C. • Nas temperaturas do gás abaixo do ponto de ebulição, o teor de vapor no gás influencia a velocidade de secagem e o teor final de umidade no sólido. Com as temperaturas do gás acima do ponto de ebulição, o teor de vapor do gás tem um pequeno efeito retardador sobre a velocidade de secagem e o teor final de umidade. • Quanto mais baixo for o teor final de umidade, maior será o consumo de combustível por m³ evaporado. • A eficiência aumenta com o aumento da temperatura do gás afluente. • Devido à necessidade de grandes volumes de gás para fornecer todo o calor, o equipamento de coleta de poeira pode ser muito grande e caro quando se operam sólidos em pequenas partículas. 	<ul style="list-style-type: none"> • O calor é transferido ao material úmido mediante a condução numa parede metálica. • As temperaturas das superfícies podem ultrapassar 540°C, no caso dos secadores aquecidos pelos produtos de combustão. • São convenientes para secar sob pressão reduzida e em atmosferas inertes, com o objetivo de permitir a recuperação de solventes e impedir a ocorrência de misturas explosivas ou a oxidação de materiais que se decompõem com facilidade. • A recuperação de poeira e de material pulverulento pode ser efetuada muito mais satisfatoriamente. • O fato de não ocorrer o contato direto do meio de secagem e o lodo, constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores.

Fonte: Perry e Green apud (LOBATO, 2011)

Em condições ideais são necessários 2.744 kJ (655 kcal) de energia para evaporar 1 kg de água do lodo. Em condições operacionais este valor costuma ser acrescido em até 100% (ANDREOLI, 2001). Segundo a empresa Perialisi, fornecedora dos equipamentos, os secadores em uso pela CEDAE na região metropolitana do Rio de Janeiro são todos do tipo de troca direta com tambor rotativo e pode-se considerar um consumo energético de 950 kcal por litro de água evaporada.

Portanto, os principais benefícios da secagem térmica do lodo são: a redução significativa do volume de lodo com capacidade de atingir teores de sólidos de 80 a 90%; a redução dos custos de transporte e estocagem (quando for o caso); a estabilização do lodo, que fica praticamente livre de patógenos, ou seja, é considerado

como lodo classe A; a preservação das propriedades agrícolas do lodo, que pode, inclusive, ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista; e a possibilidade de o lodo ser incinerado ou disposto em aterro sanitário. (ANDREOLI, 2001; JORDÃO, 2011) Já as principais desvantagens dos secadores térmicos são: o custo de aquisição e o elevado consumo de energia, além da liberação de gases para a atmosfera, o risco da liberação de odores e a geração de ruídos (ANDREOLI, 2001).

2.4 Alternativas para uso e destinação final de lodo

O tratamento e a destinação final do lodo de esgoto nem sempre recebem a devida atenção dos projetistas e operadores de estações de tratamento de esgotos. Metcalf e Eddy (2003) consideram, inclusive, que o processamento, o reuso e a disposição final do lodo e dos biossólidos possivelmente representam o mais complexo problema enfrentado pelos engenheiros no campo do tratamento de esgotos. Andreoli (2001) explica que, embora o lodo represente apenas de 1% a 2% do volume de esgoto tratado, o seu gerenciamento é bastante complexo e o seu custo geralmente se situa entre 20% e 60% do gasto total com a operação de tratamento de esgotos.

Conforme visto anteriormente, para cada destinação final do lodo é necessário um tratamento diferenciado produzindo lodo com características distintas, sendo as principais diferenças o teor de sólidos e a tolerância da presença de patogênicos. Quer-se dizer, com isso, que a definição do destino final do lodo é importante na seleção das tecnologias mais apropriadas para garantir que ele esteja em condições adequadas ao destino final escolhido.

Para definir o destino final Jordão (2011) indica que o assunto deve ser analisado sob uma ótica abrangente e que deve levar em consideração estudos e decisões sobre o acondicionamento, a estabilização, o grau de desidratação, as formas de transporte, o eventual reuso do lodo, os eventuais impactos e riscos ambientais e, também, os aspectos econômicos. Assim, além da importância de se conhecer a produção e as características do lodo, deve-se saber se, nos esgotos que o produziram, havia contribuição significativa de despejos industriais e quais seus efeitos no lodo gerado.

É possível afirmar, então, que se pode extrair diversos produtos do lodo. Aquele oriundo do tratamento de esgotos sanitários, por exemplo, possui diversos recursos renováveis, representados por seu potencial energético, além de matéria orgânica e de nutrientes. Porém, pode conter também produtos indesejáveis para a destinação que se pretende dar a ele, tais como metais pesados, poluentes orgânicos e agentes patogênicos.

A Tabela 11 indica os principais tipos de produtos que podem ser extraídos do lodo e suas utilizações possíveis.

Tabela 11: Principais Tipos de Produtos Extraídos do Lodo

Tipo de produto	Uso do produto
Metano	Eletricidade, calor, combustível
Gases	Eletricidade, calor
Óleo, gorduras e graxas	Biodiesel, metano
Fósforo	Fertilizantes
Nitrogênio	Fertilizantes
Metais	Coagulantes
Material inorgânico	Material de construção
Compostos orgânicos	Produção de ácido orgânico
Inóculo	Produção de gás bio-hidrogênio
Proteínas cristalizadas, esporos	Produção de bio-pesticidas

Fonte: WERF, 2008

Logo, conclui-se, a partir da Tabela acima e das ideias dos especialistas em engenharia sanitária, que o lodo oriundo do tratamento de esgotos é fonte de recursos valiosos (WERF, 2008) e que diversas formas podem ser utilizadas para o reaproveitamento ou a destinação final desse lodo, sendo as mais usuais: o uso agrícola e a recuperação de áreas degradadas; a incineração; o reuso industrial; o aterro sanitário; o lançamento no oceano e outras técnicas de recuperação e transformação. (ANDREOLI, 2001; JORDÃO, 2011; WERF, 2008)

2.4.1 Uso do lodo na agricultura ou áreas degradadas

A aplicação do lodo no solo para a agricultura é uma das práticas recomendadas e incentivadas pelo governo brasileiro, baseado na resolução CONAMA 375/2006 e é considerada a solução mais correta ambientalmente, por promover o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento do ciclo dos elementos. (FERNANDES e outros, 1999) Assim sendo, essa forma de disposição busca reaproveitar os nutrientes e a matéria orgânica presentes no lodo.

Apesar de conter concentrações de nutrientes inferiores às dos fertilizantes tipicamente utilizados na agricultura, conforme apresentado na Tabela 12, para a maior parte das aplicações os lodos contém nutrientes suficientes para o crescimento das plantas, necessitando, em alguns casos, apenas de complementação de fósforo e potássio.

Tabela 12: Concentração de Nutrientes em Fertilizante e Lodo Típicos

Produto	Nutriente %		
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
Fertilizante tipicamente utilizado na agricultura	5	10	10
Valores típicos para lodos de ETEs estabilizados (baseado nos ST)	3,3	2,3	0,3

Fonte: Adaptado de METCALF E EDDY, 2003

Todavia, essa aplicação pode acarretar na transferência dos poluentes presentes no lodo para o solo por diferentes processos ou transformações, que incluem lixiviação para o lençol freático, escoamento superficial, transformações microbiológicas, absorção pelas plantas, volatilizações e transferência dos componentes para o ar e para a água e sua subsequente introdução na cadeia alimentar (AUBAIN *et al*, 2002).

Segundo Lederer e Rechberger (2010), atualmente existe um consenso em torno do fato de que a aplicação de lodo contendo de baixa a média concentração de poluentes, usualmente lodos originários de áreas não urbanas, não impõem uma ameaça imediata para o solo e para as plantas. Porém, a exposição a metais pesados por um tempo prolongado pode levá-los a penetrar na cadeia alimentar e afetar os microrganismos do solo.

2.4.2 Incineração do lodo

A incineração do lodo é um processo que visa à completa conversão dos sólidos orgânicos do lodo em produtos finais de oxidação, dióxido de carbono primário, água, cinzas e, até mesmo, em energia (AUBAIN *et al*, 2002; METCALF E EDDY, 2003).

O processo de incineração pode ser classificado como: mono-incineração, em que a planta de incineração recebe apenas um tipo de resíduo, por exemplo, lodo de ETE; incineração combinada, em que a planta realiza a incineração de um conjunto de resíduos, por exemplo, lodos de ETE + resíduos sólidos urbanos; co-incineração, em que a planta de incineração utiliza os resíduos como fonte energética para, por exemplo, realizar a produção de cimentos. (AUBAIN *et al*, 2002; METCALF E EDDY, 2003).

As principais vantagens do processo de incineração são: a máxima redução do volume a ser transportado para a disposição (normalmente inferior a 4% do volume de lodo desaguado alimentado ao incinerador); a destruição dos patogênicos e de compostos tóxicos e o maior potencial de recuperação energética (ANDREOLI, 2001; METCALF E EDDY, 2003).

Já as principais desvantagens são: o alto custo de implantação e operação; a necessidade de pessoal altamente qualificado para a operação e a manutenção dos equipamentos e a emissão de poluentes no ar (material particulado, gases ácidos, gases do efeito estufa, metais pesados, volatilização de componentes orgânicos...), no solo (já que há a necessidade de dispôr as cinzas e os resíduos do tratamento dos gases que podem ser classificados como resíduos perigosos) e nas águas (líquidos oriundos do tratamento de gases). (AUBAIN *et al*, 2002; METCALF E EDDY, 2003)

Segundo Metcalf e Eddy (2003), o processo é indicado para ETEs de médio a grande porte que possuam limitações para a disposição do lodo. Em países como a Holanda e a Alemanha, em que a disposição do lodo em aterros sanitários sofre altíssimas restrições, a combustão do lodo passa a ser uma alternativa viável. (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012; LEDERER; RECHBERGER, 2010)

Observa-se que os lodos aplicados nos processos de incineração são usualmente secos e não devem ser submetidos à estabilização biológica. Isto porque, os processos biológicos de estabilização do lodo diminuem a quantidade de sólidos voláteis, reduzindo o poder calorífico do lodo e conseqüentemente aumentando a necessidade de combustíveis auxiliares (METCALF E EDDY, 2003).

2.4.3 Reuso industrial do lodo

O lodo de esgoto contém substâncias que servem como matéria prima para algumas atividades industriais e apesar de incomum algumas ETEs destinam seus lodos para serem utilizados nessas indústrias. Para ilustrar, recuperam-se os exemplos destacados por Jordão (2011) cita uma experiência piloto da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) que tem aplicado lodo para a fabricação de agregado leve para a construção civil. Ele menciona ainda a existência de experiências nos Estados Unidos, na África do Sul e no Japão que têm incorporado o lodo na fabricação de materiais cerâmicos, tais como pisos cerâmicos e tijolos.

2.4.4 Disposição final em aterro sanitário

A técnica de disposição final em aterro sanitário consiste na aplicação dos resíduos sólidos (e semissólidos) no solo utilizando-se de princípios de engenharia para confiná-los à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais (NBR 8419, 1992).

Existem dois tipos de aterros sanitários quando trata-se da disposição de lodo de estação de tratamento de esgotos. O primeiro, e menos usual, é o aterro exclusivo, em que apenas é depositado o lodo de esgotamento sanitário. O segundo, e mais usual, é o aterro combinado, em que o lodo é co-disposto com outros resíduos, em sua maioria resíduos sólidos urbanos. Ou seja, o lodo é disposto em aterro sanitário para resíduos não perigosos. A disposição do lodo nestes aterros é permitida pelas normas brasileiras, uma vez que a norma brasileira de classificação de resíduos, NBR 10004, excluiu a patogenicidade como um parâmetro para a classificação dos lodos de origem sanitária como resíduos perigosos, facilitando o seu enquadramento como resíduos não perigosos.

Em ambos os tipos de aterro, conforme assinala Fernandes e outros (1999), é necessário uma grande extensão de terra devido ao grande volume de lodo gerado. Por exemplo, uma cidade que gera 25 t/dia de lodo em base seca (300.000 - 500.000 habitantes), dependendo da tecnologia de aterro utilizada, necessitará de 2 a 20 ha/ano para dispor seu lodo.

Jordão (2011) alerta que o teor de sólidos do lodo deverá ser de, pelo menos, 30% para não dificultar ou impedir a compactação e o trabalho das máquinas sobre o aterro. Porém, segundo estudos da CEDAE, a maior parte dos aterros sanitários da Região Metropolitana do Rio de Janeiro recebe o lodo com qualquer teor de sólidos, e cobram de acordo com faixas de teor de sólido desse lodo na chegada ao aterro. A Tabela 13 apresenta as faixas típicas de umidade e uma estimativa orçamentária realizada no primeiro semestre de 2014 para a disposição por faixa.

Tabela 13: Estimativa Orçamentária para Disposição por Faixa de Teor de Sólidos

Faixa de Teor de sólidos (%)	Estimativa orçamentária para RMRJ
T.S > 60	R\$ 90,00 / ton
30 > T.S > 60	R\$ 110,00 / ton

T.S < 30	R\$ 160,00 / ton
----------	------------------

Fonte: Estudos da CEDAE

Como pode ser observado, passar da primeira para a segunda faixa significa um aumento de custo unitário da ordem de 20% e da segunda para a terceira da ordem de 45%. Cabe ressaltar que, além de aumentar o custo por tonelada, a massa de lodo a ser disposta no aterro sanitário também aumenta com a diminuição do teor de sólidos. Nota-se que esses custos são relativamente baixos quando comparados com o da disposição em alguns países desenvolvidos. Na Holanda, por exemplo, o custo de disposição do lodo em aterro sanitário é de aproximadamente 400 a 500 Euros por tonelada (van LIER, 2013).

Porém, em grandes cidades e regiões metropolitanas do Brasil, muitas vezes observa-se a estratégia de troca entre a prestação dos serviços de disposição final de lodo em aterro sanitário – pela administração municipal, e de tratamento de lixiviado de aterro sanitário – pela operadora de esgotamento sanitário. Esta estratégia permite que o custo da disposição de lodo oriundo de ETEs em aterro sanitário público não seja efetivamente cobrado das operadoras de esgotamento sanitário, seja por se tratar de um serviço de natureza pública ou com base na compensação da prestação do serviço de tratamento dos lixiviados dos aterros sanitários municipais.

2.4.5 Lançamento do lodo no oceano

Essa técnica consiste no lançamento do lodo em alto-mar, transportado por barcaças ou por tubulações submarinas. Apesar de hoje, de acordo com a Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, ser proibido o lançamento de resíduos *in natura* em corpos hídricos, essa técnica foi uma das primeiras adotadas no Brasil, com a estação de tratamento da Glória, no Rio de Janeiro, que atualmente está desativada. A referida estação possuía um “navio-lameiro”, chamado de Carioca, que transportava seus lodos para alto-mar (JORDÃO, 2011).

2.4.6 Outras técnicas de recuperação e transformação.

Reduzir a quantidade de lodo e recuperar a maior quantidade possível de recursos e energia é objetivo crescente dos gerenciadores de estações de tratamento,

principalmente em países com restrições para disposição de lodo em aterros sanitário e nações que possuem restrições legais para a aplicação do lodo na agricultura.

Neste sentido, diversas tecnologias vêm sendo empregadas buscando outras formas, além das tradicionais, de reutilização do lodo. A Tabela 14 apresenta algumas das formas de recuperação ou de transformação do lodo de esgoto, o tipo de processo que permite a recuperação ou a transformação e algumas tecnologias utilizadas.

Tabela 14: Principais Produtos Recuperados ou Usos para Reutilização do Lodo

Produto recuperado/Usado	Processo	Exemplo de Tecnologia
Fósforo	Processos Químicos	KREPO, Seaborne, Aqua-Reci, Kemicond, BioCon, SEPHOS
	Processos de cristalização	Crystalactor®, Phostrip
Materiais de construção	Solidificação térmica	GlassPack®
	Incineração	Cimento Portland
Nitrogênio	Processos Químicos	ARP Technology
Ácidos Voláteis	Microbiológico	Fermentação
	Hidrotérmico	Oxidação úmida
Biogás	Digestão anaeróbica avançada	Bioterminator ^{24/85}
	Hidrólise térmica	Cambi®, BioThelys®
	Célula de destruição físico-química	MicroSludge TM , Ultrasônico, Ozonização, Pulso elétrico
Syngas	Gaseificação	KOPF, EBARA
	Incineração	Thermylis® HTFB
Biodiesel	Pirólise	Enersludge TM , SlurryCarb TM
	Hidrotérmico	STORS
Líquido e calor	SCWO	Aqua Reci®, Aqua citrox®, Athos®

Fonte: Adaptado de WERF, 2008

Observa-se assim que muitas podem ser as formas de recuperação e transformação do lodo em matérias primas e combustíveis de extremo valor na sociedade atual.

2.5 Alternativas para uso e destinação final do biogás

O biogás, por possuir alta concentração de metano, pode ser reaproveitado como combustível para diversos processos. As bibliografias apontam que a utilização não é recente. Existem, inclusive, indicações de que, no século 10 A.C., o biogás foi utilizado para aquecer banhos na Assíria. (HE, 2010 apud BOND; TEMPLETON, 2011). Porém, foi a partir de meados do século XIX que há registros bem documentados de sua utilização como, por exemplo, combustível para lâmpadas de rua, por volta de 1890, em Exeter, no Reino Unido (UNIVERSITY OF ALAIDE, 2010 apud BOND; TEMPLETON, 2011).

Hoje em dia, principalmente devido ao alto custo da energia e às preocupações com o aquecimento global, a utilização do biogás de diferentes fontes é crescente e recomendada pelos órgãos governamentais em todo o mundo. Quando se trata de biogás oriundo de ETE, suas principais utilizações e destinações finais são: o lançamento sem tratamento (em que todo metano é liberado na atmosfera); a combustão direta sem recuperação de energia; a combustão direta com geração e utilização do calor; a geração de energia elétrica; a cogeração de energia elétrica e calor; e a sua utilização em substituição ao Gás Natural (LOBATO, 2011; VENKATESH; RASHID, 2013).

2.5.1 Lançamento sem tratamento (todo metano é liberado na atmosfera)

Quando o biogás é lançado sem tratamento, todos os gases provenientes da digestão anaeróbia são emitidos para a atmosfera. Esta prática não é recomendada pela NBR 12.209/2011. Isso porque, além de contribuir para o efeito estufa, devido à alta concentração de metano emitido, alguns elementos de menor concentração podem causar impactos adversos ao meio ambiente.

2.5.2 Combustão direta sem recuperação de energia

O biogás é submetido à combustão direta, sem que seja prevista a recuperação de energia, quando é realizada a queima, normalmente por meio de queimadores (*flare*). Esses equipamentos são projetados com vistas a maximizar a conversão de metano em gás carbônico e água, de forma a minimizar a emissão de produtos da oxidação incompleta, como o monóxido de carbono (LOBATO, 2011).

Esses queimadores são necessários para todas as ETEs que gerem biogás, mesmo para aquelas que preveem a recuperação do biogás. Isto porque, esses equipamentos trabalham, nestes casos, como dispositivos de emergência e devem ser acionados

quando ocorrer a interrupção da utilização do biogás, seja pela insuficiência momentânea de biogás para atender a demanda mínima do equipamento no qual esta sendo processada a recuperação do biogás como, por exemplo, os motores de geração de energia, seja devida a manutenção destes equipamentos.

2.5.3 Combustão direta com geração e utilização do calor

A forma de utilização mais simples para a recuperação energética do biogás é a combustão com a geração de calor, que pode ser reaproveitado para, por exemplo, o aquecimento do digestor e/ou o aquecimento de prédios das estações de tratamento de esgotos, localizadas em regiões de baixa temperatura. Além disso, conforme sinaliza Jordão (2011), uma boa utilização do biogás é o seu aproveitamento como fonte de energia para os secadores térmicos. Nesse caso, após ser submetido à combustão, o biogás gera gases quentes que, em contato direto com o lodo (secadores térmicos diretos) ou por meio da transmissão do calor mediante condução em uma parede metálica (secadores térmicos indiretos), realizam a evaporação da água contida no lodo promovendo uma redução da umidade (LOBATO, 2011).

Ainda de acordo com Jordão (2011), nos países de clima frio, os gases coletados dos digestores anaeróbios têm sido utilizados como combustível para alimentar caldeiras. Essas funcionam transferindo a energia do combustível para a água ou outro fluido contido no interior de uma câmara fechada (LOBATO, 2011). Tal fluido, já aquecido ou vaporizado, é utilizado como fonte de calor de vários processos, dentre eles os descritos acima (LOBATO, 2011).

Portanto, de acordo com Lobato (2011), a combustão direta com geração e utilização do calor é o método mais simples e eficiente de recuperação de energia contida no biogás, uma vez que 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil.

2.5.4 Geração de energia elétrica

O biogás pode ser utilizado como combustível para equipamentos geradores de energia elétrica, como os motores a combustão e turbinas². Segundo Jordão (2011), há bibliografias que indicam que a geração de energia via recuperação do gás da digestão

² Maiores informações sobre as vantagens da geração de energia o funcionamento e a eficiência destes equipamentos estão presentes no item 2.5.5

podia ser encontrada em várias estações de tratamento de esgoto na Alemanha durante as guerras.

2.5.5 Cogeração de energia elétrica e térmica

As tecnologias de cogeração de energia elétrica e calor estão em crescente uso no mundo e diversos trabalhos vêm sendo publicados com o intuito de estimular as estações de tratamento de esgoto a buscarem estas tecnologias como alternativa ao uso do biogás como combustível com no intuito de apenas gerar calor.

Os principais equipamentos em operação no mercado atualmente são as turbinas, as microturbinas, os motores a combustão e as células a combustível. Algumas tecnologias em desenvolvimento também são encontradas, exemplificada neste trabalho pelo motor stirling.

As tecnologias mencionadas consistem em sistemas que geram grande quantidade de energia térmica durante seu processo de geração de energia elétrica e, assim, possibilitem o reaproveitamento tanto da energia elétrica como da térmica. Desta forma, quando há usos tanto para a energia elétrica gerada como para a energia térmica o processo combinado é mais eficiente. A Figura 3 exemplifica o acima descrito a partir da comparação de dois sistemas de geração de energia e calor.

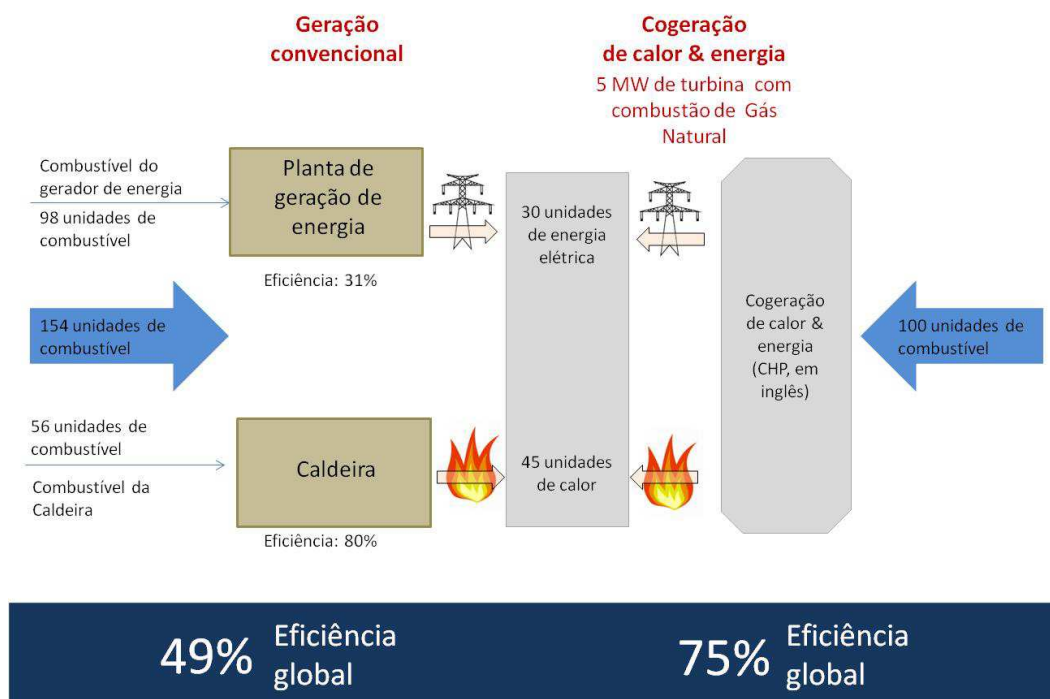


Figura 3: Exemplo da Eficiência da Cogeração de Energia Elétrica e Calor
Fonte: (Adaptado de EPA, 2011)

Observa-se que no sistema a esquerda (planta de geração de energia + caldeira) são necessários 154 unidades de combustível para produzir as mesmas 30 unidades de eletricidade e 45 unidades de vapor que podem ser produzidas pelas 100 unidades de combustível do sistema a direita (unidade de cogeração de energia e calor - CEC principalmente referenciada como *Co-generation of Heat and Power* – CHP).

Especificamente para o caso das ETEs a EPA (2011) destaca como as principais vantagens do uso de cogeração: 1) a produção de energia a um custo inferior a eletricidade de varejo; 2) a substituição de combustíveis externos para necessidades térmicas; 3) a possibilidade de qualificá-la como uma fonte de combustível renovável e de qualificar a ETE para programas de energia verde de serviços públicos; 4) a melhora na confiabilidade da energia para a ETE; 5) a produção de energia mais útil do que se aplicar o biogás unicamente para satisfazer as necessidades energéticas de aquecimento do digestor; 6) a redução das emissões gasosas que contribuem para o efeito estufa dentre outros poluentes do ar.

2.5.5.1 Turbinas e Microturbinas

Inicialmente, as turbinas foram desenvolvidas para serem utilizadas em transportes, tais como ônibus e aviões (GOMES 2001 apud FIGUEIREDO, 2011). Devido à baixa restrição ao teor de metano no combustível, de 25% a 35%, essa tecnologia passou a ser aplicada também para a geração de energia elétrica a partir do biogás (BRUNO *et al*, 2009).

Elas funcionam com base no processo termodinâmico do ciclo de Brayton, no qual o ar atmosférico é comprimido, misturado com o combustível e inflamado. A mistura aquecida e em alta pressão é expandida pela turbina fazendo com que suas pás girem em alta velocidade. A turbina move o compressor e o gerador de energia elétrica, gerando eletricidade. A mistura sai com pressão e temperatura reduzidas (COSTA, 2006; EPA, 2008; LIMA, 2005). Para realizar a recuperação da energia calorífica do gás na saída, muitas microturbinas são dotadas de regeneradores que recuperam parte da energia para pré-aquecer o gás que entrará na combustão, reduzindo assim o consumo de combustível. (BRUNO *et al*, 2009)

A energia produzida pela expansão na turbina e a consumida pelo compressor são proporcionais à diferença de temperatura dos gases que passam por estes equipamentos. Consequentemente, é vantajoso operar a turbina com a maior temperatura que os materiais economicamente viáveis permitam e operar a entrada de ar no compressor

com a menor temperatura possível. Com o avanço da tecnologia, vem sendo possível garantir maiores temperaturas nas turbinas e maior eficiência no resfriamento, aumentando a relação da pressão (EPA, 2008).

Por sua vez, embora recentes, as principais vantagens apontadas com relação às microturbinas são o baixo custo de manutenção e de ruído se comparado com o de outras tecnologias que utilizam o biogás, enquanto que a desvantagem seria o fato de que é uma tecnologia em desenvolvimento, que ainda não obteve sua maturidade.

Segundo WERF (2011), as principais características das microturbinas são: faixa de operação de 25-200 kW; a eficiência na utilização combinada de calor e energia 25-30%; a eficiência global de 50-80%; e a relação geração de energia – geração de calor 0.55-0.75.

As microturbinas apresentam um funcionamento similar às turbinas, mas a maioria delas possui um regenerador interno que recupera parte do calor de exaustão da turbina para pré-aquecer o ar comprimido. O gás ao sair do regenerador pode ainda ser utilizado em outros sistemas que necessitem de gases com altas temperaturas como boilers, aquecimento de áreas de convívio. (BRUNO *et al*, 2009) A Figura 4 exemplifica o funcionamento de uma microturbina com regenerador.

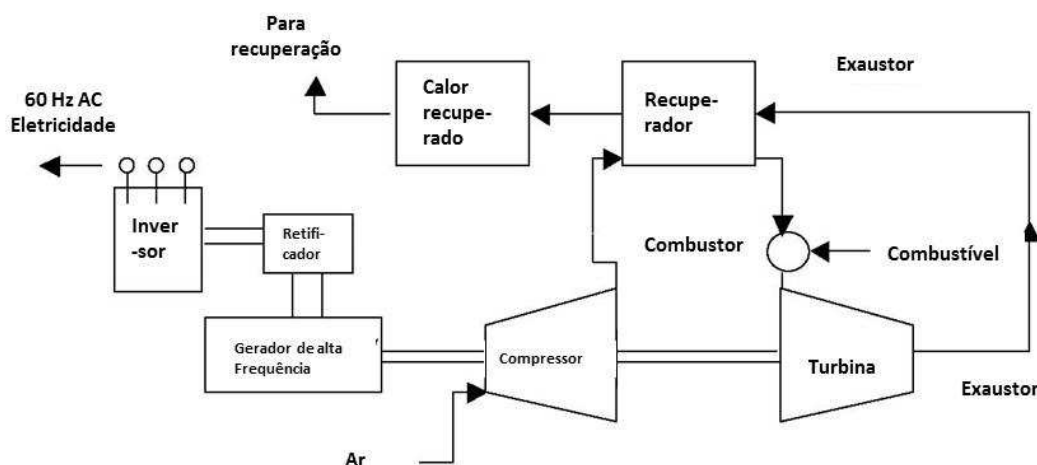


Figura 4: Esquema Típico de um Microturbina com Regenerador
Fonte: adaptado de EPA, 2008

EPA (2011) diferencia as principais características das microturbinas e das turbinas e apresenta os seus custos de implantação e manutenção, conforme indicado abaixo.

Tabela 15: Principais Características de Microturbinas e Turbinas

Equipamento	Faixa de Potência		Custo de instalação (CAPEX)	Custo de manutenção (OPEX)	Geração de energia térmica	Eficiência de geração de eletricidade	Eficiência global
	Min (kW)	Max (kW)	\$/kW ^(*)	\$/kWh ^(*)	Btu/ kWh	%	%
Microturbina	30	250	4.000	0,025	3.900	26	55
Turbina a combustão	4.000	16.000	2.100	0,012	3.900	35	75

Fonte: adaptado de EPA, 2011 * Valores em dólar Americano

2.5.5.2 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna são amplamente comercializados e possuem diversos usos. duas são as técnicas de motores que encontra-se no mercado: de um lado, o ciclo Otto, que leva o nome de seu inventor, o engenheiro alemão Nikolaus August Otto, que, em 1876, desenvolveu o conceito de motores à combustão de quatro tempos. Por outro lado, o ciclo Diesel, utilizado no motor a diesel, desenvolvido pelo engenheiro alemão Rudolph Diesel, em 1882.

A principal diferença entre os dois mecanismos é a forma como ocorre à combustão: no motor a diesel, ela ocorre devido ao aumento de temperatura provocado pela compressão da mistura de ar e óleo diesel na câmara de combustão, enquanto no Ciclo Otto a combustão é provocada por uma faísca elétrica, disparada no interior da câmara de combustão (COSTA, 2006).

Os motores Diesel, apesar de serem muito utilizados para a geração de energia, requerem combustíveis como o Diesel ou óleos pesados, enquanto os motores com ciclo Otto permitem a utilização de outros combustíveis, como o biogás. A Figura 5 exemplifica o funcionamento do motor de quatro tempos:

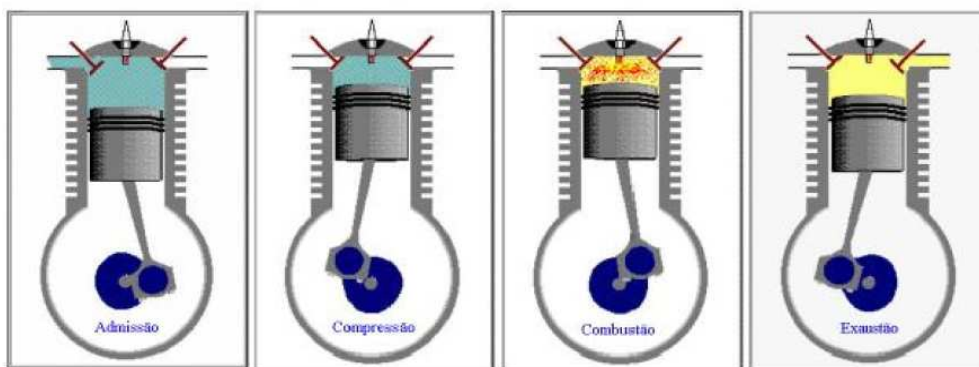


Figura 5: Motor de quatro tempos
Fonte: PERCORA, 2006 apud FIGUEIREDO, 2011

- No primeiro tempo ocorre a entrada da mistura ar-combustível sugada para o interior do cilindro pelo vácuo provocado pela descida do pistão;
- No segundo com a subida do pistão, a compressão da mistura;
- No terceiro ocorre a explosão da mistura causada pela faísca elétrica gerada pela aplicação de elevada tensão elétrica aos dois polos da “vela”, o que provoca a geração instantânea de grande quantidade de gases provenientes da combustão, cuja expansão força a descida do pistão que faz girar o eixo do motor;
- No quarto tempo os gases são expulsos para o exterior do cilindro pela subida do pistão.

Uma das principais vantagens da utilização destes motores é que eles não requerem um biogás de alta qualidade, quando comparado às outras tecnologias de geração de energia. A Tabela 16 adaptada de WERF (2011) lista os limites recomendados para o biogás:

Tabela 16: Limites Recomendados do Biogás

Poluente	Limite
H ₂ S	< 1.000 ppm
Siloxanos	< 50 mg Si/Nm ³ CH ₄
Umidade	Sem condensação

Fonte: adaptado WERF, 2011

Esta tecnologia libera ar quente durante o seu funcionamento que pode ser aproveitado como fonte de energia térmica. Segundo WERF (2011), a eficiência na geração de energia está entre 29 e 40%. EPA (2011) separa os motores a combustão de

acordo com a tecnologia utilizada e a capacidade de geração de energia. Tabela 17 indica para cada faixa os custos de implantação e manutenção (englobando os custos referentes ao tratamento do biogás) e as eficiências de geração de energia elétrica e calor. Nesta Tabela os valores são em dólar americano.

Tabela 17: Características e Custos de Motores a Combustão

Equipamento	Faixa de Potência		Custo de instalação (CAPEX)	Custo de manutenção (OPEX)	Geração de energia térmica	Eficiência de geração de eletricidade	Eficiência global
	Min (kW)	Max (kW)	\$/kW ^(*)	\$/kWh ^(*)	Btu/kWh	%	%
Motor a combustão "Rich-Burn" pequeno	30	100	4.500	0,030	5.800	28	76
Motor a combustão "Rich-Burn"	100	300	3.600	0,025	5.500	29	76
Motor a combustão "Lean-Burn" pequeno	300	900	3.200	0,020	4.000	32	71
Motor a combustão "Lean-Burn"	1.000	4.800	2.500	0,016	3.400	38	75

Fonte: adaptado de EPA, 2011 * Valores em dólar Americano

2.5.5.3 Motores Stirling

Nos motores Stirling, a geração de energia mecânica ocorre de forma parecida com os motores à combustão interna, ou seja, por meio da movimentação de um pistão. A principal diferença é que, nestes motores, o biogás é queimado em uma câmara externa ao motor, o que configura a principal vantagem do uso desse motor em relação ao de combustão interna já que o biogás não entra em contato direto com as partes internas do motor, sendo possível utilizar um biogás com maior concentração de poluentes, como o H₂S. Esta é uma tecnologia emergente, assim, poucos dados são conhecidos do seu funcionamento em longo prazo.

Por também libera gases quentes durante seu funcionamento, o Motor Stirling pode ser utilizado como unidade CEC. Segundo Pöschl e outros (2010) as eficiências

elétricas e térmicas para unidades superiores a 100 kWel são de 24% e 72% respectivamente

Conforme é possível observar na Figura 6, o motor Stirling é essencialmente composto de um cilindro contém um gás, normalmente o Hélio que movimenta o pistão. Movimento este possível pela compressão e expansão provocado pelos ciclos de aquecido e resfriado deste gás. O aquecimento do gás é promovido pelo calor liberado na combustão do combustível que acontece externamente ao cilindro quente (Rosa na Figura). No cilindro azul passa a água fornecendo o resfriamento do gás. (WERF, 2011)

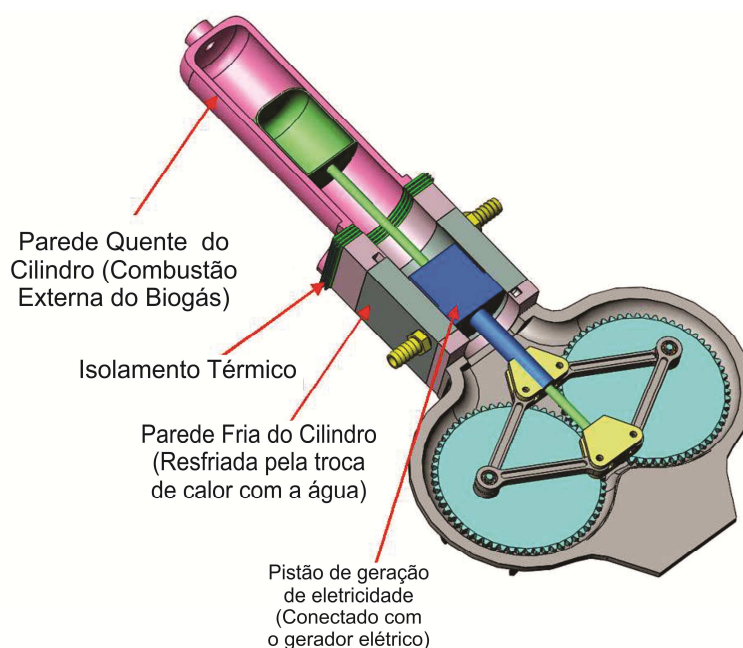


Figura 6: Motor Stirling
Fonte: Adaptado de WERF, 2011

2.5.5.4 Células de combustível

As células de combustível utilizam reações eletroquímicas para transformarem combustíveis (como o próprio biogás) em energia elétrica em corrente contínua e, em alguns casos, também em calor (LIMA, 2005). Neste último caso, a célula de combustível pode ser considerada uma forma de cogeração de calor e energia. Tudo isso é possível porque essas células são compostas de dois eletrodos, anodo e catodo, separados por um eletrólito. Tais eletrodos são capazes de conduzir corrente elétrica para ceder (anodo) ou consumir (catodo) os elétrons necessários às reações eletroquímicas. Já o eletrólito funciona como um isolante à corrente eletrônica, porém conduzindo os íons envolvidos (SPRENGER, 2009).

Embora, em princípio, as células de combustível possam oxidar qualquer tipo de combustível, na prática, apenas o hidrogênio é utilizado para a geração de energia. No caso das células que utilizam o biogás, a fonte de hidrogênio é oriunda do metano. (SPRENGER, 2009).

As células de combustível podem ser divididas em duas categorias principais: aquelas que trabalham com baixas temperaturas (abaixo de 500°C) e as que trabalham com altas temperaturas (acima de 500°C), sendo essas últimas as células que produzem gases quentes e que podem ser utilizadas como unidades CEC (WERF, 2011).

Uma das principais vantagens no uso da célula de combustível é o fato de sua eficiência ser praticamente independente da potência instalada, possibilitando diversas aplicações como as apresentadas na Figura 7 (SPRENGER, 2009).

Aplicação Típica	Equipamentos eletrônicos portáteis			Carros, barcos e CHP domesticas			Geração de energia elétrica para distribuição, CHP e ônibus	
	1	10	100	1K	10K	100K	1M	10M
Potência em Watts	1	10	100	1K	10K	100K	1M	10M
Principais vantagens	Alta densidade energética com baterias de rápido recarregamento			Potencial para emissão zero e alta eficiência			Alta eficiência, menos poluente, silenciosa	
Faixa de aplicação por tipo de célula de combustível	DMFC			AFC	SOFC			MCFC
	PEMFC						PAFC	

Figura 7: Aplicações de Células de Combustível
Fonte: Adaptado de WERF, 2011

WERF (2011) indica as tecnologias MCFC e SOFC como as mais apropriadas para o biogás produzidos em ETEs pela possibilidade de cogeração e pela amplitude da faixa de geração de energia atingida por elas. Elas apresentam vida útil estimada de 5 a 10-20 anos respectivamente e se encontravam em 2007 (ano da pesquisa) ainda em estágio experimental.

Ainda segundo a WERF (2011) a eficiência das células de combustível para capacidades de 250-2000 kW é de 50% na geração de energia e pode chegar a 75% de eficiência global com um custo estimado em 2007 de 13.000 a 18.000 dólares americanos por kW gerado.

Já Sprenger (2009) indica a PAFC como a tecnologia mais segura para ser aplicada nas ETEs, principalmente por ser a comercialmente mais madura. Ainda segundo Sprenger (2009) a eficiência da PAFC para geração de energia está entre 35% e 40% com um custo de 4.600 dólares americanos por kW gerado.

2.5.6 Utilização do biogás em substituição ao Gás Natural.

O biometano é um dos combustíveis mais limpos em uso no mundo. Isto porque ele é produzido a partir de recursos renováveis e sua produção ajuda a solucionar problemas no gerenciamento de resíduos. WERF (2011)

O biogás produzido em ETE pode ser purificado de forma a produzir biometano e, assim, permitir sua utilização como fonte combustível para qualquer uso previamente previsto para receber o gás natural. Porém, dependendo do seu uso são necessários diferentes graus de purificação WERF (2011). Este é o ponto onde a ampliação do uso do biogás em substituição ao gás natural encontra um impeditivo: o alto custo do seu tratamento, por normalmente necessitar de uma maior pureza quando comparado às outras tecnologias.

Mesmo assim, no Brasil, o aproveitamento do biogás como combustível para veículos automotores sofreu um impulso na segunda metade dos anos de 1970 devido ao aumento do preço de venda dos combustíveis líquidos (JORDÃO, 2011).

2.6 Balanço de massa

O balanço de massa pode ser aplicado tanto para estudar uma unidade da ETE isoladamente como pode ser aplicado em todas as unidades da estação de tratamento de esgoto de forma a considerar a influência das suas interações. Jordão (2011) define o conceito de balanço de massa como a consideração do aspecto dinâmico das vazões encaminhadas às diversas unidades da ETE, com a visão da ETE como um todo, e o inter-relacionamento entre suas diversas unidades.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), o princípio do balanço de massa é que uma massa nunca desaparece ou é criada, porém a forma da massa pode ser alterada como, por exemplo, passar de líquido para gás.

No cálculo do balanço de massa são necessárias diversas iterações até que a última a ser realizada não represente um acréscimo significativo em relação à anteriormente realizada. Metcalf e Eddy (2003) indica a vazão média, a DBO média e o SST como os itens que tipicamente compõem o balanço de massa, Jordão (2011) inclui os SSV e a DQO a esta lista.

2.7 Legislações

As restrições quanto ao tratamento, à utilização e à disposição do lodo estabelecidas na legislação vigente são determinantes para definição das tecnologias serem utilizadas em cada país.

Na União Europeia (EU), a Decision 2001/118/EC classifica o lodo de ETE como não-perigoso e apresenta uma ordem de prioridade a ser seguida no gerenciamento deste resíduo, a saber: a) prevenção, b) preparação para reuso, c) reciclagem, d) outras recuperações, como a recuperação de energia e e) disposição (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012). Já a Directive 86/278/EEC encoraja o uso do lodo na agricultura e regula a amostragem e as análises, estabelecendo limites de metais pesados no lodo e no solo, de forma a evitar danos no solo, vegetação, animais e humanos. Em síntese, ela proíbe o uso de lodo não-tratado, a menos que seja incorporado ao solo (WERF, 2008 e KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012)

Em relação à disposição do lodo em aterro sanitário, a Directive 99/31/EC proíbe a descarga de resíduos líquidos ou não-tratados nesses aterros e impõe a meta de redução de 65% da quantidade de resíduo biodegradável a ser disposto neles até 2020, incluindo, portanto, o lodo de ETE (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012).

Em alguns países da União Europeia, as legislações nacionais são ainda mais restritivas, como é o caso da Holanda. Nessa nação, a disposição do lodo na agricultura é proibida desde 1995 (ROELEVELD et al., 2004 apud WERF, 2008) e determina-se a disposição máxima de 5% de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012). Na Polônia, há restrição da porcentagem de materiais biodegradáveis em relação à base seca de até 5% de carbono total, de até 8% de perda na calcinação e de, no máximo, 6,0 MJ/kg de poder calorífico para disposição em aterros sanitários (WERLE; WILK, 2010). Ou seja, na prática, proíbe-se a disposição de lodo de ETE.

Segundo Hultman e outros (2003 apud WERF, 2008), na Suíça, que não é membro da UE, o governo propôs acabar com a permissão de disposição do lodo na agricultura.

Como tratamento alternativo, o governo suíço recomenda que o lodo seja incinerado. (ED, 2002^a apud WERF, 2008)

Nos Estados Unidos, os lodos são classificados como dois tipos. De um lado, há os lodos submetidos a tratamentos, como aquecimento, digestão ou aumento do pH, de forma a reduzir a níveis não detectáveis de patogênicos (lodo A). Somente esses lodos podem ser aplicados na agricultura, sem restrição de local, desde que atendam os níveis de metais pesados. Por outro lado, há os lodos com redução de patogênicos a níveis que protejam a saúde humana e o meio ambiente (lodo B). Devido a isso, eles só podem ser aplicados com restrições (WERF, 2008).

A geração de energia a partir do biogás também sofre restrições nos Estados Unidos e a seleção do processo que será utilizado pode ser determinada pela eficiência da combustão e pela emissão de poluentes como os óxidos nitrosos (NOx). Áreas com excessiva concentração de ozônio no nível do solo e de poluição são classificadas de acordo com uma lei americana “lei do ar limpo” e, nesse caso, tecnologias como células de combustível e microturbinas são consideradas mais apropriadas (MONTEITH et al., 2006 apud WERF, 2008)

Nos EUA algumas regulações ao uso do biogás são legisladas por Estado. Por exemplo, no Estado de Minnesota, as ETEs precisam de uma permissão específica para emissão de gases da agência de controle de poluição de Minnesota que dependerá da capacidade total do sistema de recuperação de energia (WERF, 2008).

Em Ontário, Canadá, a geração de energia a partir do biogás também é regulada e depende da potência total instalada. Plantas com menos de 25 MW são classificadas como A e não precisam de avaliação ambiental. Outras plantas com maiores capacidades precisam de uma avaliação ambiental completa (WERF, 2008).

No Brasil, a resolução CONAMA 357/2006 e a sua ratificação pela resolução CONAMA 380/2006 definem os critérios e os procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETEs e seus produtos derivados. Essas resoluções consideram que a aplicação do lodo de esgoto na agricultura enquadra-se nos princípios de forma ambientalmente adequada de reutilização de resíduos.

Da mesma forma que a legislação americana, a CONAMA 357/2006 classifica o lodo em (A- livre de patogênicos) e (B- baixa presença de patogênicos) e seu uso é restrito segundo a classificação. Porém, esta resolução determina que, passados cinco anos de sua publicação, não seria permitido o uso do lodo classe B, salvo fossem determinados novos critérios comprovados por estudos nacionais.

Outras questões são reguladas por essa resolução, CONAMA 357/2006, como a periodicidade das amostragens e análises do lodo, a concentração máxima permitida de metais pesados para a disposição, os locais onde é permitida a utilização do lodo na forma de adubo e como deve ser realizado o transporte do lodo.

Cabe observar que, a NBR 12.209/2011, que apresenta as recomendações para elaboração de projetos de tratamento de esgotos sanitários, não emite qualquer recomendação relacionada à disposição final do lodo.

Contudo, em relação ao biogás, essa mesma norma, do item 6.4.20 ao 6.4.29, faz diversas recomendações para o manejo do biogás na ETE, dentre as quais se destaca a obrigatoriedade da queima do biogás, preferencialmente com queima completa, quando não aproveitado e no item recomenda a oxidação térmica dos compostos odorantes do biogás, utilizando o metano como combustível ou o tratamento seletivo dos compostos odorantes do biogás com a recuperação do metano para fins energéticos.

Ao tratar de secadores térmicos, a NBR 12.209/2011 recomenda, no item 7.7.8.3, que, sempre que possível, o secador deverá utilizar como fonte energética os gases gerados na própria estação.

NBR 10.004/2004 tem como objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Essa norma classifica os resíduos em: I – Perigosos e II – Não-perigosos, sendo, os não-perigosos dividido em: IIA – Não inertes e IIB – Inertes. Um dos critérios para determinação do resíduo classe I é a patogenicidade, caracterizada por conter ou pela suspeita de conter microorganismos patogênicos, proteínas virais, ácido desoxiribonucléico (ADN) ou ácido ribonucléico (ARN) recombinantes, organismos geneticamente modificados, plasmídios, cloroplastos e/ou mitocôndrias ou toxinas capazes de produzir doenças em homens, animais ou vegetais. Os outros critérios definidos na norma são a inflamabilidade, a corrosividade, a reatividade e a toxicidade. No entanto, tal norma exclui os resíduos gerados nas estações de tratamento de esgotos domésticos da classificação segundo os critérios de patogenicidade, permitindo sua disposição em aterros sanitários de resíduos não perigosos.

Já a NBR 13.896/1997 tem por objetivo fixar as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas. Esta norma não fixa condições específicas para a aplicação dos resíduos de ETE como, por exemplo,

restrição ao teor de sólidos do lodo. Apenas estabelece que não deve possuir líquidos livres.

A Lei n. 11.445, de 5 de Janeiro de 2007, que estabelece as diretrizes nacionais para saneamento básico, não trata das questões relacionadas ao gerenciamento dos resíduos de ETE. Nessa lei, a eficiência e a sustentabilidade econômica e a utilização de tecnologias apropriadas, considerando a capacidade de pagamento dos usuários, são incluídas dentro dos princípios fundamentais para os serviços públicos de saneamento básico.

Elaborada com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, a Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa lei representa um avanço na forma como os resíduos são tratados do ponto de vista de sustentabilidade. Por exemplo, ela diferencia resíduos sólidos de rejeitos, sendo o segundo apenas os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação, por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade a não ser a disposição final ambientalmente adequada.

Essa lei diferencia, ainda, a disposição final ambientalmente adequada da destinação final ambientalmente adequada. A primeira refere-se à disposição de rejeitos e resíduos em aterros, enquanto que a segunda inclui, além do definido para disposição final ambientalmente adequada, a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético dos resíduos. Para ambas as definições ficam determinado que devam ser observadas as normas operacionais específicas, de modo a minimizar e evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, bem como ao meio ambiente.

Além disso, a Lei n. 12.305 reconhece o resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. Isso explica o fato de ela ter, entre seus objetivos principais, a finalidade de incentivar o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para o reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos aí a recuperação e o aproveitamento energético deles. Ela determina, também, que a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos devem priorizar a não-geração, a redução, a reutilização, a reciclagem deles e o seu tratamento e disposição final de maneira ambientalmente adequada. Tudo isso explica, destarte, a proibição da queima a céu aberto ou o lançamento de resíduos sólidos ou rejeitos *in natura* em praias, no mar ou em qualquer corpo hídrico.

A utilização de tecnologias visando a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos é permitida, porém a lei não determina o mesmo para a utilização do que foi definido como "resíduos dos serviços públicos de saneamento básico", o que inclui o lodo de ETE. Mesmo assim, na seção V, os geradores de resíduos de serviços públicos de saneamento básico são incluídos como os sujeitos a elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos.

No Estado do Rio de Janeiro, os órgãos da administração pública estadual direta e suas fundações e autarquias possuíam isenção do imposto sobre operações de circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual e intermunicipal e de comunicação (ICMS) relativos ao consumo de energia elétrica e outros bens regulamentado pela Lei 4.485 de 2004. Esta autorização foi dada através do Convênio ICMS 107/95, incorporado pela Resolução SEF nº 2656/96, que posteriormente foi alterado pelo Convênio ICMS 44/96, incorporado pela Resolução SEF nº 2709/96. Porém a lei estadual 4056 de 2002 instituiu a cobrança de 1% de ICMS para ser direcionado para o Fundo de Combate à Pobreza e às Desigualdades Sociais. Assim sendo, a CEDAE, que é uma empresa de administração pública, paga 1% de alíquota de ICMS, que para as demais empresas, salvo outras isenções, é de 19% para consumos inferiores a 300 kWh/mês e de 29% para consumos superiores a 300 kWh/mês (LIGHT, 2014).

Assim, observa-se que, tanto no Brasil como no mundo, as restrições legais buscam a reutilização e o reaproveitamento dos resíduos, como o lodo e o biogás, porém, a legislação brasileira, diferente da tendência dos países Europeus, não impõem barreiras à disposição do lodo oriundo de ETE em aterros sanitários.

2.8 Exemplos e estudos relacionados ao gerenciamento do lodo e do biogás

Nas últimas décadas, muitos trabalhos foram elaborados e publicados com o intuito de elucidar as técnicas e as práticas tradicionais para a destinação e utilização do lodo e de analisar as mudanças em curso, principalmente as maiores restrições legais que estão sendo impostas para a destinação final do lodo em aterros sanitários e para a sua utilização na agricultura. Muito incentivados pelos órgãos governamentais, outros importantes trabalhos foram produzidos a respeito do crescente mercado de aproveitamento do biogás, principalmente em uma conjuntura de aumento no valor da produção de energia. Propõe-se, agora, reproduzir e analisar alguns trechos desses trabalhos, trechos esses considerados mais relevantes.

Segundo EPA (2011), nos Estados Unidos da America (EUA), até junho de 2011, 43% das estações, que são responsáveis por 60% do volume de esgoto tratado, utilizavam digestor anaeróbio como unidade de estabilização.

EPA (2011) também identificou que existiam 133 plantas de cogeração de energia elétrica e calor, CEC, presente em trinta dos cinquenta Estados dos EUA. Juntas elas representavam uma capacidade instalada para geração de energia elétrica de 437 MW. Dessas plantas, cento e quatro (ou seja, 78%) utilizam biogás produzido em digestores anaeróbios de ETE como fonte primária de combustível e no total representam uma capacidade instalada de 190 MW. As demais utilizam gás natural, diesel e outros combustíveis.

Dentre as tecnologias de cogeração a mais adotada é o motor a combustão presente em 54 plantas representando um total de 85,8 MW instalados, posteriormente aparecem as microturbinas com 29 plantas com um total de 5,2 MW instalado. Em terceiro lugar está a célula a combustão, presente em 13 plantas com um total de 5,2 MW. Em menores números se encontram as turbinas a combustão com 5 plantas com um total de 39,9 MW, a turbina com 1 planta de 23 MW e o ciclo combinado com 1 planta de 28 MW.

Neste mesmo trabalho, foram realizadas entrevistas com 14 gestores de ETEs com vazões variando de 87 a 3.286 l/s que os resultados mostram claramente os fortes benefícios de operar CEC em ETEs e sugerem que a cogeração é comprovadamente um método de utilizar biogás tanto para produzir como para conservar energia.

O trabalho de EPA (2011) ainda simulou a aplicação do biogás em dois cenários. O primeiro considerando que a maior parte das estações de tratamento não utilizava o biogás como combustível antes da aplicação na unidade de CEC. Já o segundo cenário considerando que todas as unidades utilizavam o biogás para aquecer o digestor anaeróbio antes de aplicar na unidade de CEC. Foi adotado como critério de determinação de viabilidade econômica um retorno do investimento em um período igual ou inferior a 7 anos. A análise identificou que no cenário 01 das 1.351 estações, 662 unidades possuíam viabilidade econômica com capacidade para gerar 260MW. No cenário 02, 257 unidades possuíam viabilidade econômica com capacidade para gerar 178 MW. Destas unidades a vasta maioria possuía mais de 1,3 m³/s. O estudo identificou que as ETEs com vazões inferiores, utilizando o biogás prioritariamente para aquecer digestores anaeróbios, não costumam apresentar resultados positivos ao menos se estiverem localizadas em áreas com altos valores para a compra de energia elétrica.

Costa (2006) realizou uma análise comparativa entre os sistemas de geração de energia a partir do biogás, utilizando microturbinas e motores a combustão, ambos com 30 kW de potência nominal, tendo sido instalado esses dois sistemas de geração na ETE Barueri da SABESP. Esse estudo demonstrou que os custos de implantação do sistema de geração com microturbinas e de manutenção e operação foram de R\$ 151.046,40 e R\$ 141.585,48, respectivamente. Já a vida útil dos equipamentos foi de 40.000 horas, resultando em um custo total de 0,4690 reais por kWh. No grupo gerador, o investimento inicial foi de R\$ 24.680 e os custos com a manutenção e a operação totalizaram R\$ 3.400 reais. Com a vida útil de 5.000 horas, resultando em um custo total de R\$ 0,2808 reais por kWh.

Após a aplicação de uma análise de Valor Presente Líquido (VPL), utilizando 13,75% de taxa de juros, receita de 0,20 reais por kWh de energia gerada e aplicando-se para a vida útil da microturbina de 40.000 horas Costa (2006) concluiu que o VPL para a microturbina foi de -166.930,39 reais e para o grupo gerador de 80.857,18 reais. O autor conclui, ainda, que *“a simples observação do fluxo de caixa não permite que essa prática seja considerada viável economicamente. Enquanto isto todas as demais vantagens são deixadas de lado”* (COSTA, 2006).

Segundo Jordão (2011) a pioneira no aproveitamento de biogás sob a forma de cogeração no Brasil foi a ETE Arrudas em Minas Gerais. Nessa ETE O biogás é encaminhado para um conjunto de turbinas para a geração de energia elétrica. O calor remanescente das turbinas é reaproveitado para o aquecimento dos digestores anaeróbios.

Na Polônia, no ano de 2008, 63% da população era atendida com serviço de coleta e tratamento de esgotos. Nesse país, havia das 3090 estações de tratamento de esgoto e de efluentes industriais, que produziram mais de 1.100 milhares de toneladas, , de lodos em base seca. A média polonesa de geração de lodo é, então, de 0,25 kg S.T./m³ de esgoto tratado. A estimativa é que aumente, de 2010 para 2018, de 612,8 para 706,6 toneladas de lodo na base seca (WERLE; WILK, 2010).

WERLE e WILK (2010) destacam também que, devido, sobretudo, às restrições legais, existe uma crescente mudança da forma de destinação final do lodo na Polônia. Em 2000, praticamente todo o lodo era disposto em lagoas de lodo e aterros sanitários, porém, existe uma previsão de que, para até 2018, 59% do lodo passe a ser tratado termicamente, 18% seja utilizado como composto, 10% seja utilizado na agricultura e 13% na recuperação de áreas degradadas.

Na Grécia, apenas 0,15% do lodo é utilizado na agricultura e existe uma previsão que, em 2020, esse número suba para 5%. Essa baixa aplicação é devido à falta de restrições em relação ao teor de sólidos, à patogenicidade do lodo e à adição de cal como estabilizador que faz com que os agricultores locais não confiam no uso de lodo como fertilizante (AGGELAKIS *et al* Apud SAMOLADA E ZABANIOTOU, 2013; SAMOLADA; ZABANIOTOU, 2013).

Segundo Kelessidis e Stasinakis (2012), em 1992, nos quinze primeiros países que se tornaram membros da União Europeia³, 48% do lodo era reutilizado, 33% era disposto em aterros sanitários, 11% era incinerado, 6% era lançado em águas superficiais e 2% era disposto ou reutilizado de outras formas. Já em 2005, esses países passaram a reutilizar 54% do lodo (sendo 44% para uso na agricultura e 10% para composto), a incinerá-lo (contabilizando 21%), a dispô-lo em aterros sanitários (totalizando 15%) e a utilizar de outras formas (em um total de 9%).

Ainda de acordo com Kelessidis e Stasinakis (2012), em 2005, nos vinte e sete membros da União Europeia³ 41% do lodo era utilizado na agricultura, 19% era incinerado, 17% era disposto em aterros sanitários, 12% era utilizado como composto e 12% era usado de outras formas. Essas outras formas incluíam: pirolise, estocagem temporária e longa, reuso em áreas verdes e florestas, camada de cobertura para aterros sanitários e exportação do lodo entre outras.

Kelessidis e Stasinakis (2012) indicam também que, de 1995 para os dias de hoje, o uso de secadores térmicos cresceu de 110 plantas para mais de 450 plantas, sendo que quase 50% delas localizadas na Alemanha. A maior parte desses secadores térmicos é utilizada como a primeira unidade do processo de incineração.

Lobato (2011) realizou um estudo do aproveitamento energético do biogás proveniente de três reatores em escala de demonstração. Todos foram instalados na área do Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Minas Gerais, cada um com capacidade de 320, 640 e 380 habitantes equivalentes. Nesse estudo, o biogás foi encaminhado para um aparato experimental, contendo: sistema de produção; limpeza e armazenamento de biogás; sistema de CEC com um motor de combustão interna; e um protótipo de um secador térmico de lodo, que utilizava como meio de secagem o calor proveniente dos gases de exaustão do CEC. O

³ Os 15 primeiros membros da UE foram: Alemanha, Reino Unido, Espanha, França, Itália, Holanda, Áustria, Suécia, Portugal, Finlândia, Dinamarca, Grécia, Bélgica, Irlanda e Luxemburgo. Seguidos pelos 12 membros: Polônia, Hungria, República Checa, Romênia, Lituânia, Eslováquia, Bulgária, Estônia, Letônia, Eslovênia, Chipre e Malta.

aparato experimental possibilitou a geração de 1,35 kWh por Nm³ de biogás, com um consumo de 0,32 kWh em todo o sistema, gerando um excedente de 1,03 kWh por Nm³ de biogás.

A energia térmica gerada pelo CEC e aplicada no protótipo de secador possibilitou a completa inativação de ovos de helmintos em curto tempo de exposição (1,5 h) e a elevação do teor de sólidos do lodo de 4% para 8%, ou seja, foi possível alcançar a redução de 50% do volume de lodo.

Basrawi e outros (2012) analisaram a relação entre a escala das ETEs e a otimização da capacidade de geração de energia das microturbinas para sistemas de cogeração. Para isso, adotou como base uma ETE de 600 l/s, que produz 130.000 m³ de biogás por mês. Para simular os diferentes tamanhos de ETEs, Basrawi e outros (2012) adotaram dois fatores de redução, um de 50% (ou seja, uma ETE produzindo 65.000 m³/mês de biogás) e outro com 75%, produzindo 32 m³/mês. A fim de estudar a influência do clima local com a viabilidade da utilização de CEC, essa pesquisa considerou cada uma das unidades simuladas trabalhando em três diferentes faixas de temperatura típicas para o Japão: baixa (entre 9,3 e 18,6 °C); média (entre 17,1 e 27,6 °C); alta (entre 23,2 e 29,8 °C).

Para estudar a melhor combinação entre as potências das unidades CEC foram comparados 4 cenários, o primeiro apenas com microturbinas de 30 kW, o segundo apenas com microturbinas de 65 kW, o terceiro apenas com microturbinas de 200 kW e o último com um conjunto com uma combinação de microturbinas com estas diferentes capacidades. Nesses cenários, foram considerados como forma de aproveitamento do calor produzido nas microturbinas o aquecimento do digestor e o aquecimento das áreas de convivência dos prédios administrativos da ETE.

Como resultado, o trabalho encontrou que o cenário onde as microturbinas de diferentes potências foram combinados foi o que manteve a melhor eficiência de geração de energia, independente da zona climática. O estudo concluiu, ainda, que as unidades de CEC podem recuperar mais que 40% da energia do biogás na forma de calor e energia elétrica e que, em qualquer escala de ETE, a eficiência do conjunto aumenta com o decréscimo da temperatura, indicando sustentabilidade para CECs apenas para regiões de temperaturas baixas. Para regiões de temperaturas elevadas, o estudo demonstrou que o sistema de CEC, para qualquer um dos cenários, produz mais calor que o necessário para atender a demanda destas ETEs.

A análise geral de parte desses trabalhos indica que, apesar de amplamente debatido, usualmente, as soluções de gerenciamento destes dois principais resíduos das estações de tratamento de esgoto, a relembrar, o lodo e o biogás, são apresentadas e trabalhadas separadamente. Por tanto, existem poucos estudos que explorem a otimização dos balanços de massa e energia decorrentes da fase de tratamento do lodo e sua destinação final.

3 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

3.1 Introdução

A Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro é responsável por operar e manter os sistemas de esgotamento sanitário da bacia da Baía de Guanabara, a saber: Alegria, Penha, Pavuna-Meriti, Sarapuí, Ilha do Governador, Paquetá, Alcântara, Imboassú, Bota, Iguazu, Estrela, Roncador, Macacu e Guaxindiba.

Dentre essas, destaca-se, da infra-estrutura de saneamento já existentes, cinco estações de tratamento de esgoto (ETEs) em operação no entorno da Baía de Guanabara: Alegria (5.000 l/s), Penha (1.086 l/s), Ilha do Governador (525 l/s), Pavuna (1.500 l/s) e Sarapuí (1.500 l/s). A Figura 8 apresenta a localização destas ETEs com as suas áreas de influência.

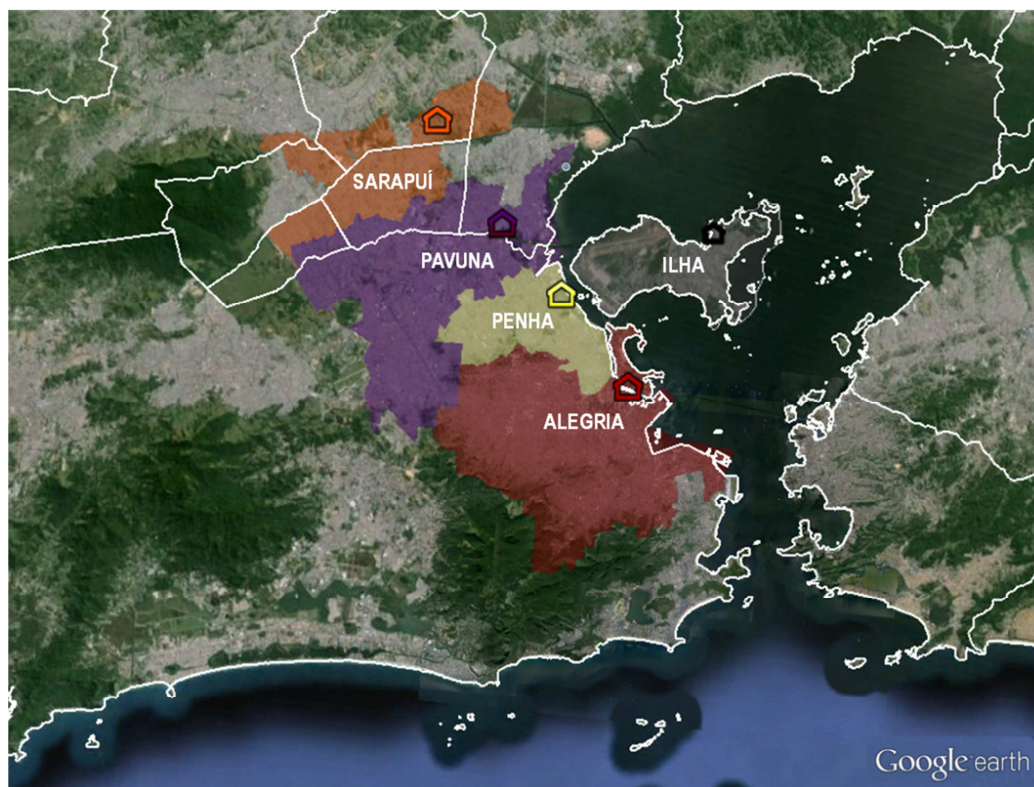


Figura 8: Localização das ETEs e suas bacias de esgotamento
Fonte: Google Earth, 2014

As principais características de cada uma dessas ETEs estão indicadas no quadro de análise seguinte, Tabela 18.

Tabela 18: Principais informações sobre as ETEs

ETE	Alegria	ETIG	Penha	Pavuna	Sarapui
Vazão média	5.00 l/s	525 l/s	1.086 l/s	1.500 l/s	1.500 l/s
Tratamento Primário	Convencional	Convencional	Convencional	Quimicamente assistido	Quimicamente assistido
Tratamento Secundário	Lodos Ativados	Lodos Ativados	Lodos Ativados	Lodos Ativados	Lodos Ativados
Adensamento lodo Primário	Gravidade	Não há	Não há	Não há	Não há
Adensamento lodo Secundário	Centrífuga	Centrífuga	Não há	Centrífuga	Centrífuga
Adensamento lodo Misto	Não há	Não há	Gravidade	Não há	Não há
Estabilização do lodo	Biológica (anaeróbia)	Biológica (anaeróbia)	Biológica (anaeróbia)	Química	Química
Desaguamento	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga
Desidratação	Secagem térmica	Secagem térmica	Não há	Secagem térmica	Secagem térmica
Destino final atual	Aterro de Gericinó	Aterro de Gericinó	Aterro de Gericinó	Aterro de Gericinó	Aterro de Gericinó
Destino final futuro previsto	Aterro de Seropédica	Aterro de Seropédica	Aterro de Seropédica	Aterro de Seropédica	Aterro de Seropédica

3.2 ETE Alegria

A Estação de Tratamento de Esgotos da Alegria, ETE Alegria, situada no bairro do Caju, na Zona Portuária da cidade do Rio de Janeiro, atualmente, é a maior do Estado do Rio de Janeiro. Sua bacia de esgotamento sanitário abrange uma área contribuinte de 8.634 ha atendendo a partes da Zona Norte e do Centro da referida cidade. A Figura 9 apresenta uma vista aérea da ETE e a Figura 10 ilustra seu fluxograma.



Figura 9: ETE Alegria, vista aérea
Fonte: CEDAE

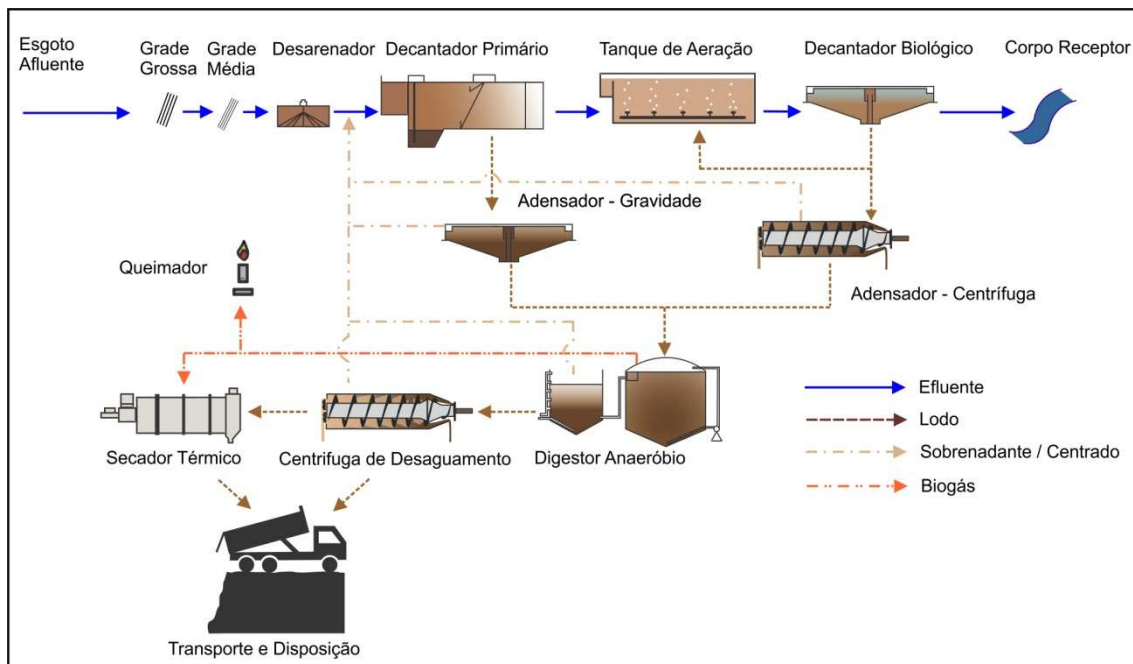


Figura 10: Fluxograma da ETE Alegria

3.3 ETE Ilha do Governador - ETIG

A estação de tratamento de esgotos da Ilha do Governador (ETIG) é a responsável pelo tratamento dos esgotos oriundos de toda a Ilha do Governador, o que corresponde a uma área contribuinte de 3.600 ha. Ela foi a segunda ETE construída no Brasil

utilizando o processo de lodos ativados. A Figura 11 apresenta uma vista aérea da ETE e a Figura 12 ilustra seu fluxograma.

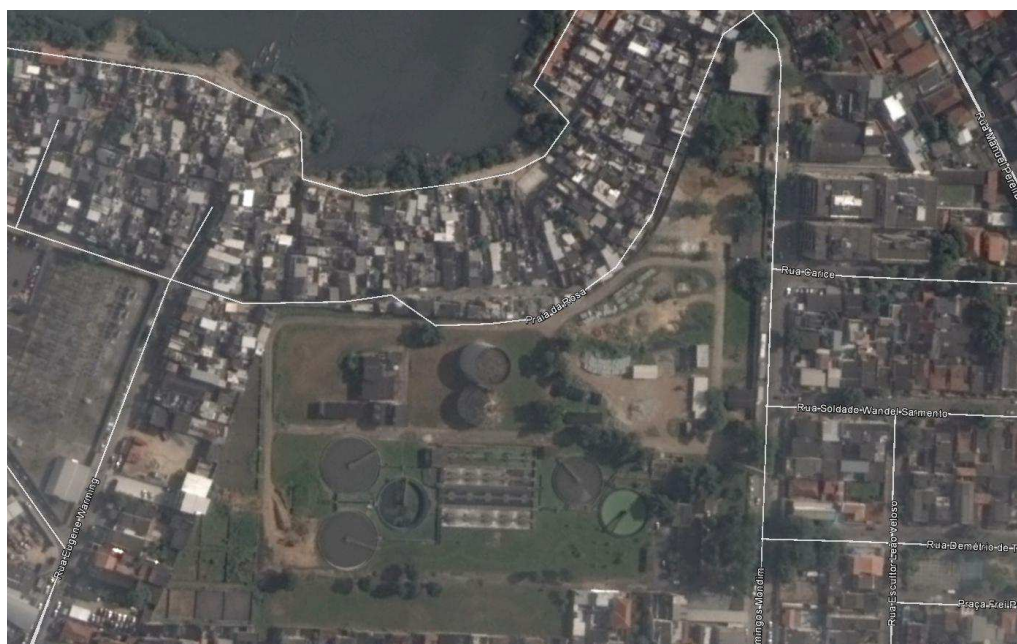


Figura 11: ETE Ilha do Governador, vista aérea
Fonte: Google Earth, 2014

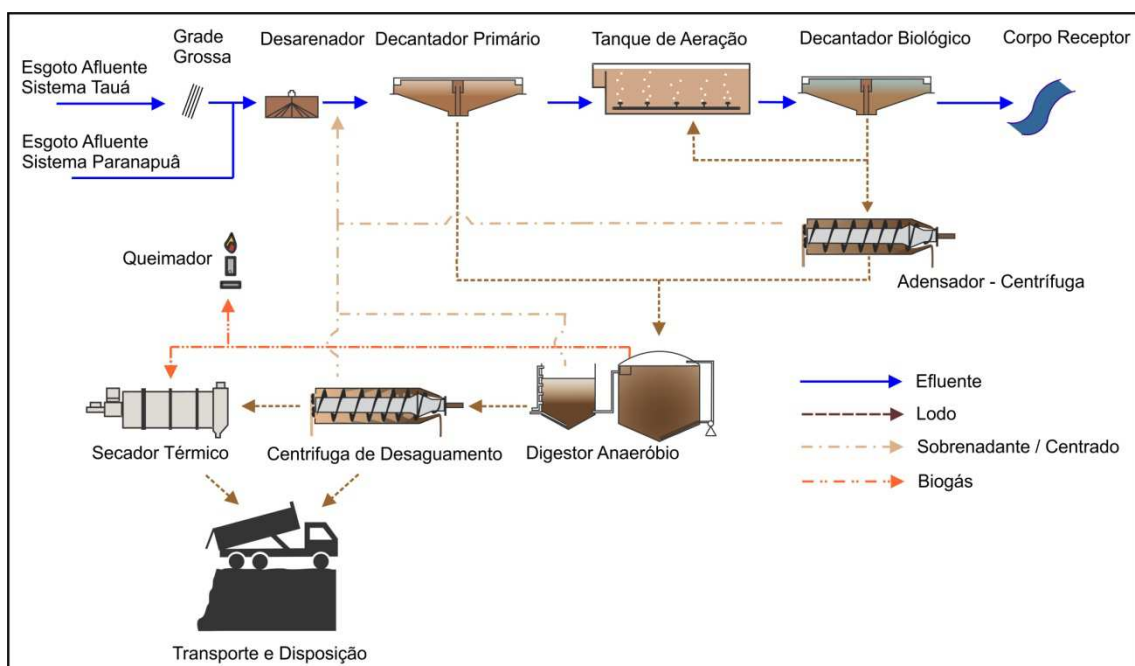


Figura 12: Fluxograma da ETE Ilha do Governador

3.4 ETE Penha

A Estação de tratamento de esgotos da Penha foi construída em 1939 e é a mais antiga em funcionamento na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. O processo de

tratamento original dessa ETE era a decantação primária com coagulação química. Após diversas etapas de ampliação, a ETE Penha passou a utilizar o processo de tratamento de lodos ativados. Atualmente, essa estação atende as Bacias de esgotamento da Penha e de Irajá, situadas na cidade do Rio de Janeiro. A Figura 13 apresenta uma vista aérea da ETE e a Figura 14 ilustra seu fluxograma.



Figura 13: ETE Penha, vista aérea
Fonte: Google Earth, 2014

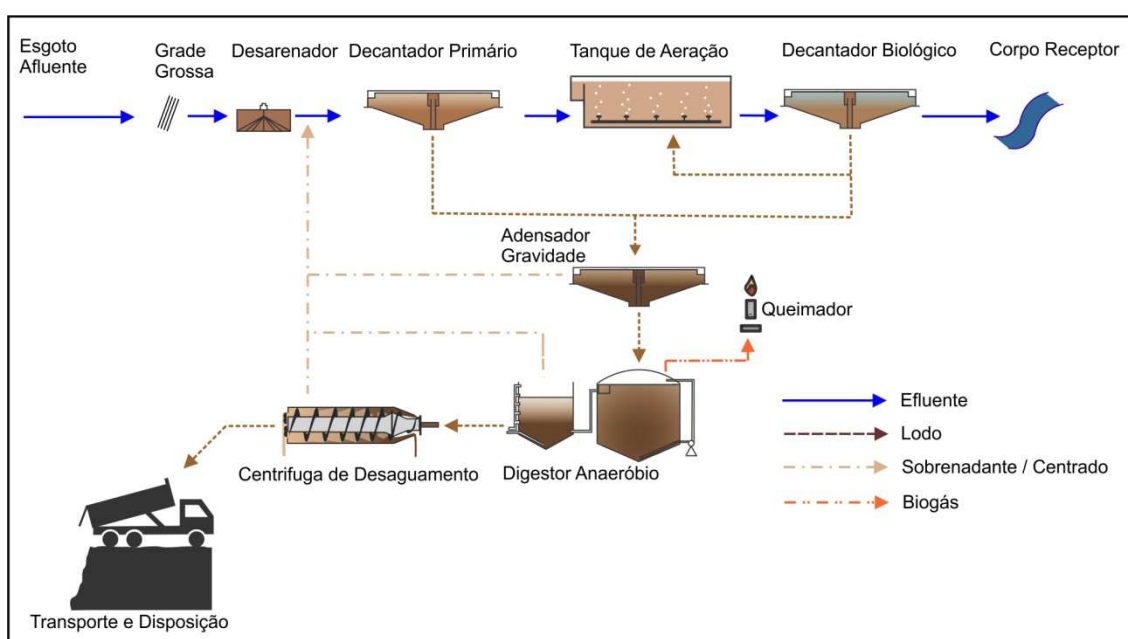


Figura 14: Fluxograma da ETE Penha

3.5 ETE Pavuna

A estação de tratamento de esgotos da Pavuna foi assim nomeada em virtude de receber os esgotos da bacia do Rio Pavuna. Ela situa-se no Bairro de Vigário Geral, a 6 km à montante da foz daquele curso d'água na Baía de Guanabara. Sua bacia de esgotamento sanitário abrange uma área de 4.730 ha, distribuída em partes de quatro municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro: São João de Meriti, Duque de Caxias, Nilópolis e Rio de Janeiro (partes da Zona Norte). A Figura 15 apresenta uma vista aérea da ETE e a Figura 16 ilustra seu fluxograma.



Figura 15: ETE Pavuna, vista aérea
Fonte: Google Earth, 2014

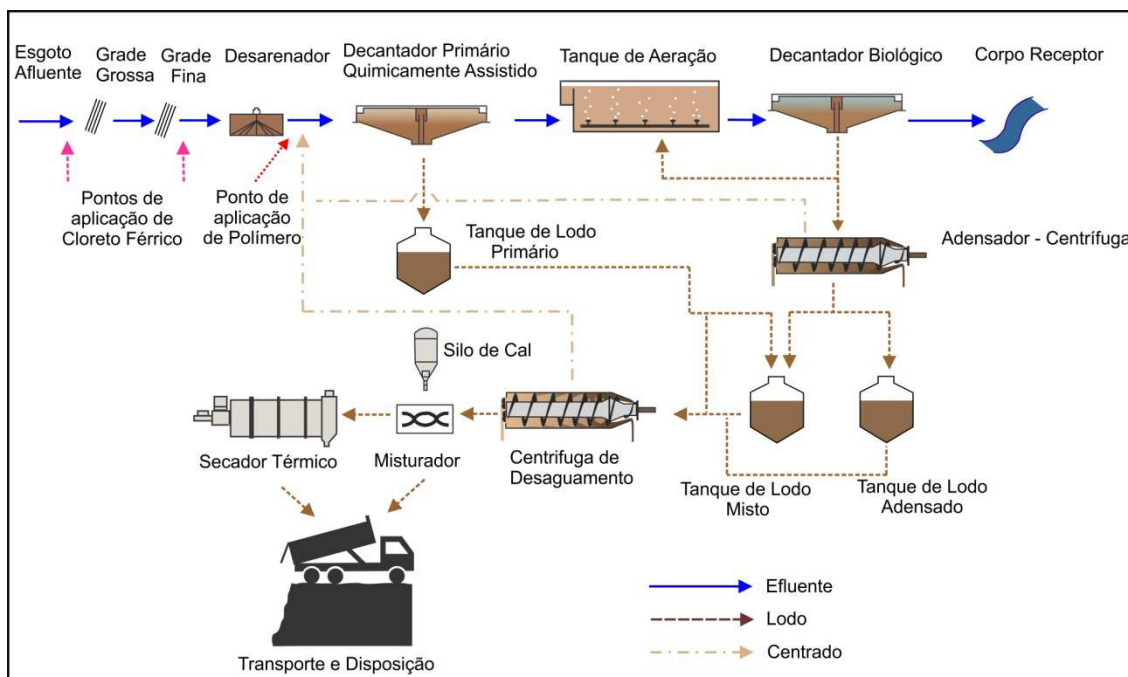


Figura 16: Fluxograma da ETE Pavuna

3.6 ETE Sarapui

A estação de tratamento de esgotos de Sarapui está localizada às margens do Rio Sarapui, a 10 km da desembocadura no Rio Iguaçu que, por sua vez, tem sua foz na Baía de Guanabara. A bacia de esgotamento sanitário contribuinte à essa ETE abrange uma área de 6.500 ha, distribuída em parte dos municípios de Duque de Caxias, Nilópolis, São João de Meriti e Nova Iguaçu, todos pertencentes à Baixada Fluminense. A Figura 17 apresenta uma vista aérea da ETE e a Figura 18 ilustra seu fluxograma.



Figura 17: ETE Sarapui, vista aérea
Fonte: Google Earth, 2014

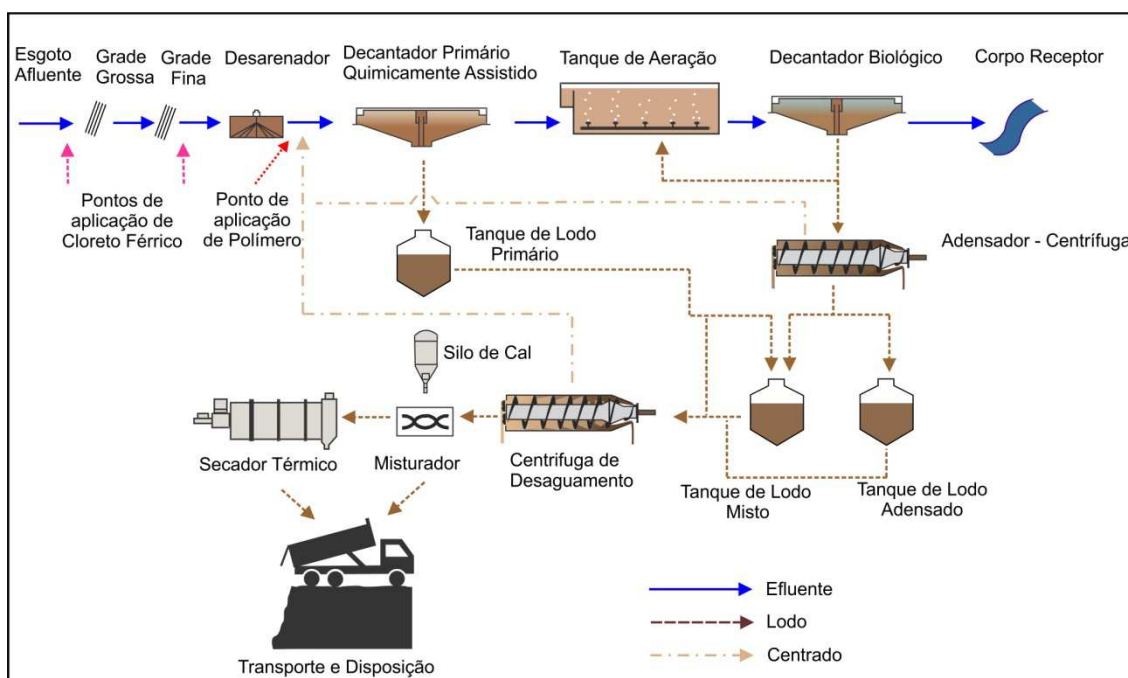


Figura 18: Fluxograma da ETE Sarapui

Como pode ser observado comparando as Figura 16 e Figura 18 as ETEs Sarapuí e Pavuna possuem o mesmo fluxograma. Na época da concepção destas ETEs a CEDAE solicitou a empresa projetista que os seus projetos fossem o mais parecido possível para que durante a fase de operação fosse possível o intercâmbio de peças e equipamentos, facilitando a operação, a manutenção e a manutenção de estoque.

4 METODOLOGIA

4.1 Base de cálculo do modelo técnico-econômico de gerenciamento

A base do modelo técnico-econômico de gerenciamento de lodos de estações de tratamento de esgotos, MGL, é constituída pelos balanços de massa e energia decorrentes das etapas de estabilização e desidratação, transporte e destinação final do lodo.

O balanço de massa expressa a relação entre a massa seca de sólidos e o volume de lodo úmido, desde a geração do lodo bruto nas etapas de tratamento primário e secundário dos esgotos até a etapa de transporte e de destinação final do lodo (no caso, em aterro sanitário).

O balanço de energia expressa quantidades de energia elétrica e térmica requeridas e também geradas em decorrência da aplicação de diferentes estratégias (rotas) para o tratamento e destino final do lodo.

Os resultados dos balanços de massa e de energia são associados aos custos de capital (CAPEX) e de operação e manutenção (OPEX) das unidades que correspondem cada uma das estratégias (rotas), que quando conjuntamente analisado, portanto de forma global, permitem a otimização econômica de todas as etapas do tratamento e de destinação final do lodo.

4.2 Estratégias e rotas para o gerenciamento do lodo

As estratégias (rotas) para o gerenciamento do lodo que o modelo técnico e econômico contempla teve como principal referência a forma de aproveitamento do biogás gerado nos digestores anaeróbios da etapa de estabilização do lodo e o grau de desidratação do lodo que promovem as etapas de desaguamento por centrifugação e secagem térmica.

As estratégias estabelecidas pelo modelo de gerenciamento de lodo são:

- Estratégia A
 - Quanto ao aproveitamento do biogás: Não há, simples queima;
 - Quanto ao grau de desidratação: 22%;
- Estratégia B
 - Quanto ao aproveitamento do biogás: 100% como combustível para a etapa de secagem térmica;
 - Quanto ao grau de desidratação: até 90%
- Estratégia C

- Quanto ao aproveitamento do biogás: 100% como combustível para unidade de cogeração de energia elétrica e térmica e aproveitamento de 100% da energia térmica como combustível para a etapa de secagem térmica.
- Quanto ao grau de desidratação: até 90%
- Estratégia D
 - Quanto ao aproveitamento do biogás: 100% como combustível para a geração de energia elétrica em conjunto moto-gerador e uso da energia na própria ETE durante horário de ponta
 - Quanto ao grau de desidratação: até 90%
- Estratégia E
 - Quanto ao aproveitamento do biogás: Parte como combustível para a unidade de cogeração de energia elétrica e térmica. Parte remanescente do biogás e a energia térmica oriunda da cogeração utilizadas como combustível para a unidade de secagem térmica
 - Quanto ao grau de desidratação: até 90%

A Figura 19 representa as rotas de cada uma das estratégias anteriormente descritas.

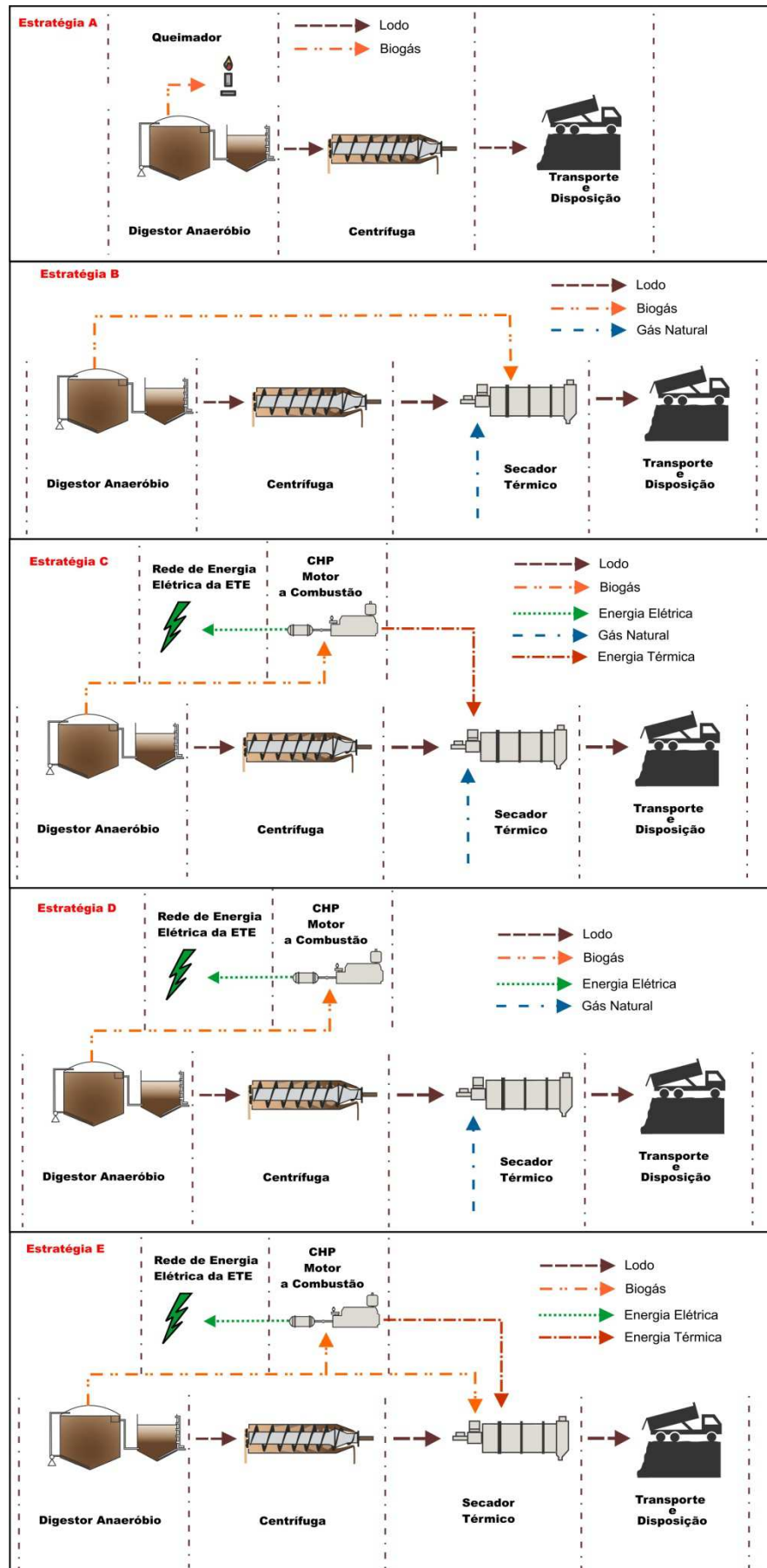


Figura 19: Estratégias de A a E

Para o caso de ETEs que ainda não dispõem de unidade de secagem térmica, o modelo sugere a Estratégia F, representada pela Figura 20, que prevê o transporte do lodo desaguado por centrífugas (teor de sólido de 22%) para processamento em outra ETE que já disponha de unidade de secagem térmica e na qual se aplicaria o que estabelece a estratégia B. Neste caso, considera-se que o aproveitamento do biogás da digestão anaeróbia da ETE não dotada de unidade de secagem térmica obedeça ao que estabelece a estratégia D, geração de energia elétrica no horário de pico, porém gerando energia durante as 24 horas do dia.

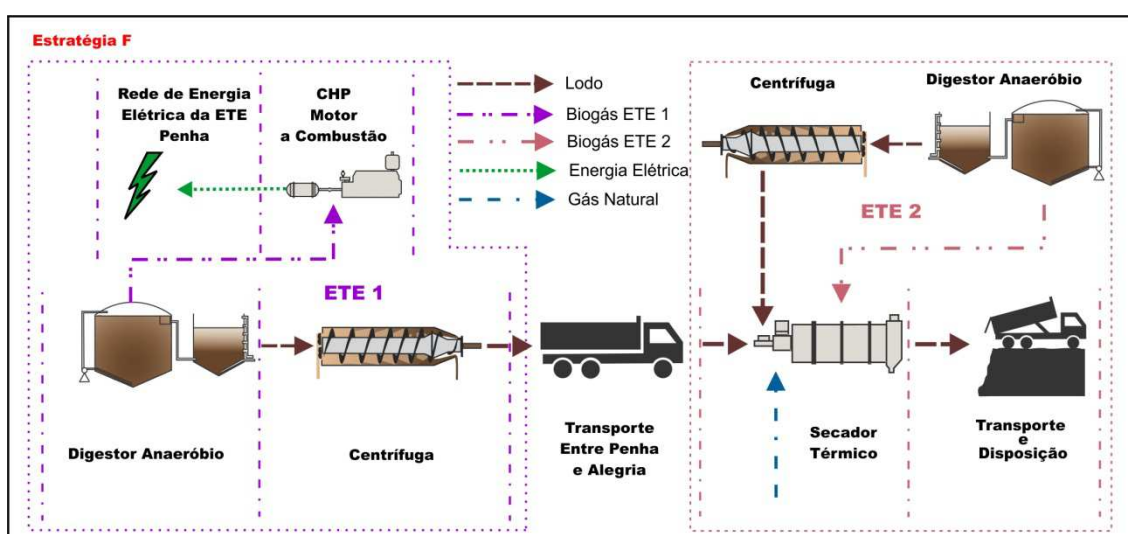


Figura 20: Estratégia F

Para o caso das ETEs que não processam a estabilização do lodo por via anaeróbia, que conseqüentemente não geram biogás, o modelo sugere as estratégias:

- Estratégia G: Processamento exclusivo de estabilização alcalina
- Estratégia H: Processamento combinado da estabilização alcalina e a secagem térmica
- Estratégia I: Processamento exclusivo da secagem térmica

A Figura 21 apresentam as configurações das estratégias G, H e I respectivamente.

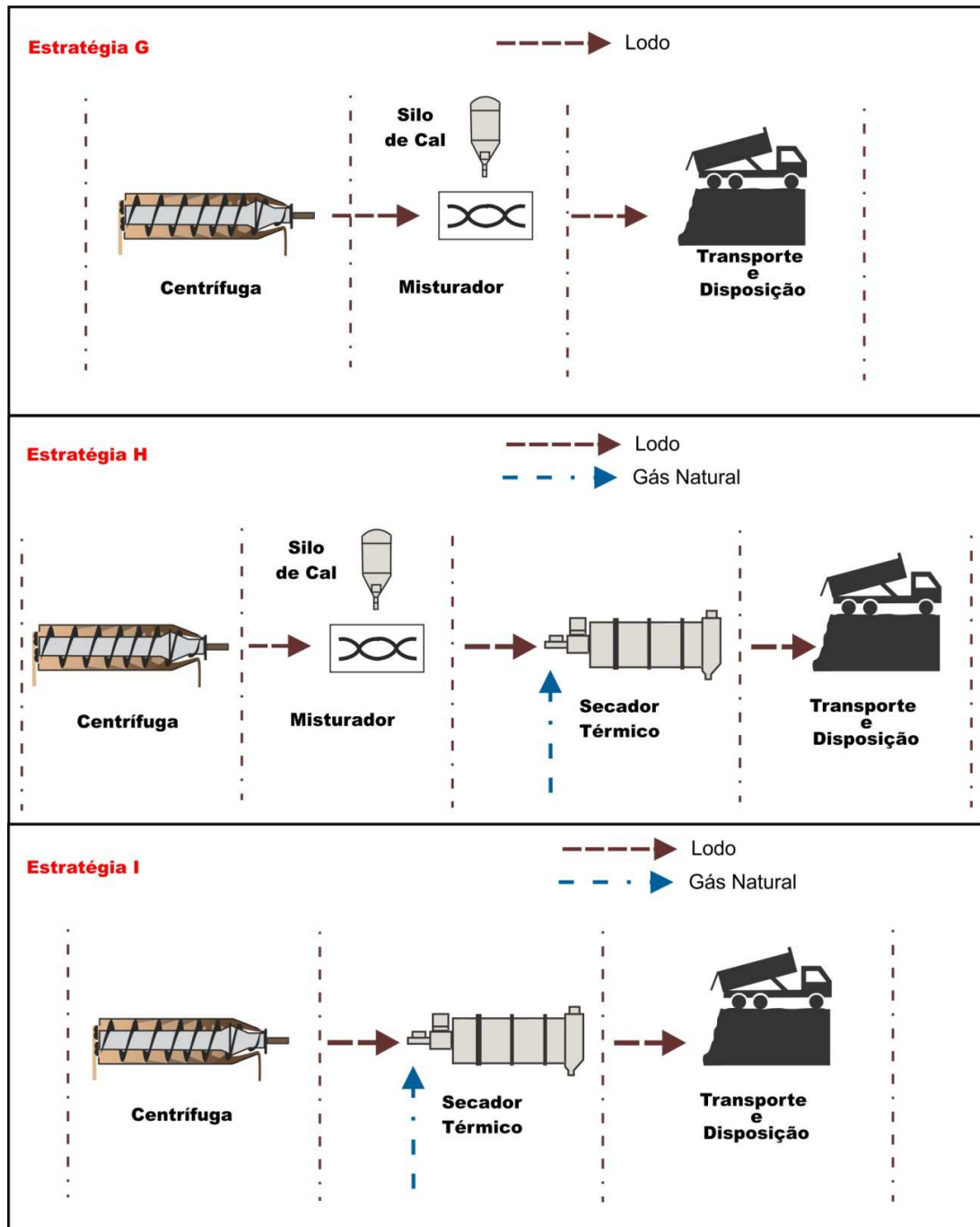


Figura 21: Estratégias de G a I

4.3 Estrutura do modelo de gerenciamento

A estrutura principal do modelo técnico-econômico de gerenciamento de lodo de estações de tratamento de esgotos é baseada na avaliação econômica das diferentes estratégias da seguinte forma:

4.3.1 Cálculo do OPEX total de cada estratégia:

$$D_{Total} = D_T + D_A + D_{GN} + D_{opm} + D_{CHP} - \Delta V + D_{cal} + D_{ETE\ 1\ para\ 2} \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

- D_{Total} : Custos de manutenção e operação total diário para cada Estratégia do MGL (OPEX total) (R\$/dia)
- D_T : Custos com o transporte do lodo da ETE para o aterro sanitário (R\$/dia)
- D_A : Custos referentes à disposição no aterro sanitário (R\$/dia)
- D_{GN} : Custos com Gás Natural (R\$/dia)
- D_{opm} : Custos com operação e manutenção do Secador Térmico – sem os custos relacionados ao pagamento da energia suprida por fonte externa a ETE (Secador OPEX) (R\$/dia)
- D_{CHP} : Custos relativos ao tratamento do biogás, manutenção e operação das unidades de cogeração de energia elétrica e térmica (CEC OPEX) (R\$/dia)
- D_{cal} : Custos com cal (R\$/dia)
- $D_{ETE\ 1\ para\ 2}$: Custos com o transporte do lodo entre as ETEs – Apenas para a estratégia F (R\$/dia)
- ΔV : Receita da economia com o uso da energia elétrica gerada na unidade de cogeração (R\$/dia)

4.3.2 Cálculo do investimento total necessário para cada estratégia

$$I_{Total} = I_{CHP} + I \dots\dots\dots(2)$$

Onde:

- I_{Total} : Investimento total necessário para a adoção da estratégia (CAPEX) (R\$)
- I_{CHP} : Investimento para implantação da unidade de CEC (CEC CAPEX) (R\$)

- I : Investimento para implantação da unidade de secagem térmica (Secador Térmico CAPEX) (R\$)

4.3.3 Cálculo do valor presente do OPEX final

$$OPEX_{VP} = D_{Total} \times 365 \times \frac{(1+i)^A - 1}{i \times (1+i)^A} \dots \dots \dots (3)$$

Onde:

- i = Taxa de juros anual
- A = Anos referentes ao horizonte de projeto

As equações seguintes expressam a rotina e os respectivos parâmetros de cálculo para a obtenção de cada uma das parcelas que compõem o modelo de avaliação econômico anteriormente apresentado:

4.3.4 Custos referentes ao transporte de lodo da ETE para o aterro sanitário

Para calcular os custos com o transporte do lodo foi utilizada a equação:

$$D_T = M \times L \times C_{Tu} \dots \dots \dots (4)$$

Onde:

- M : Massa úmida transportada (t/dia)
- L : Distância do trajeto entre a ETE e o aterro sanitário (km)
- C_{Tu} : Custo unitário de transporte do lodo (R\$/t.km)

4.3.5 Custos referentes à disposição no aterro sanitário

A disposição no aterro é calculada de acordo com:

$$D_A = M \times C_{Au} \dots \dots \dots (5)$$

Onde:

- C_{Au} : Custo unitário de disposição em aterro sanitário (R\$/t)
- M : Massa úmida transportada (t/dia)

A massa úmida transportada (M) dependerá da estratégia adotada e do grau de desidratação do lodo.

- No caso das estratégias A, B, C, D, E, F e I será:

$$M = \frac{SST_{cts}}{TS} \dots\dots\dots(6)$$

Onde:

SST_{cts} : massa de sólidos secos efluente à centrífuga (kg/dia)

TS : Teor de sólidos do lodo de acordo com a estratégia adotada (%)

- No caso da estratégia G será:

$$M = M_{cts} + M_{cal} \dots\dots\dots(7)$$

Onde:

M_{cts} : Massa úmida efluente à centrífuga (kg/dia)

M_{cal} : Massa de cal consumida (kg/dia)

- No caso da estratégia H será:

$$M = \frac{SST_{cal}}{TS} \dots\dots\dots(8)$$

Onde:

SST_{cal} : Massa seca efluente à estabilização alcalina (kg/dia)

4.3.6 Custos referentes ao consumo de gás natural

Os custos com gás natural são calculados de acordo com seu volume consumido:

$$D_{GN} = V_{GN} \times C_{GNu} \dots\dots\dots(9)$$

Onde:

V_{GN} : Volume consumido de gás natural (m³/dia)

C_{GNu} : Custo do gás natural por faixa de consumo mensal (R\$/m³)

E o volume consumido é referente à energia complementar suprida com gás natural:

$$V_{GN} = \frac{E_{GN}}{c_{GN}} \dots\dots\dots(10)$$

Onde:

E_{GN} : Energia complementar suprida com gás natural (kWh/dia)

c_{GN} : Calor específico do gás natural (kWh/m³)

O Secador Térmico pode trabalhar com a combinação de diversas fontes de energia. A contribuição referente ao uso do gás natural ocorrerá caso a demanda energética do Secador Térmico não seja atendida pelas outras fontes disponíveis, que varia de estratégia para estratégia:

- No caso das estratégias B e F será:

$$\text{Se } \begin{cases} E_{ST} < E_{DiG} \therefore 0 \\ E_{ST} > E_{DiG} \therefore E_{GN} = E_{ST} - E_{DiG} \end{cases} \dots\dots\dots(11)$$

Onde:

E_{ST} : Energia demandada pelo Secador Térmico (kWh)

E_{DiG} = Energia contida no biogás produzido no digestor anaeróbico (kWh)

- No caso da estratégia C será:

$$E_{GN} = E_{ST} - E_C \dots\dots\dots(12)$$

Onde:

E_C = Energia térmica produzida pela CEC (kWh)

- Nos casos das estratégias D, H e I será:

$$E_{GN} = E_{ST} \dots\dots\dots(13)$$

- Nos casos da estratégia E será:

$$E_{GN} = 0 \dots\dots\dots(14)$$

Para calcular a demanda energética do Secador Térmico adota-se a expressão:

$$E_{ST} = M_{H_2O} \times E_u \times 0,001163 \dots\dots\dots(15)$$

Onde:

M_{H_2O} : Massa de água evaporada (kg/dia)

E_u : Energia demandada pelo Secador Térmico por kg de água evaporada (kcal/kgH₂O) (deve ser informada pelo fabricante)

0,001163: Fator de correção

A massa de água evaporada é a diferença dos volumes afluentes e efluentes ao Secador Térmico:

$$M_{H_2O} = Q_{AST} - Q_{EST} \dots \dots \dots (16)$$

Onde:

Q_{AST} : Volume de lodo afluente ao Secador Térmico (m³/dia)

Q_{EST} : Volume de lodo efluente ao Secador Térmico (m³/dia)

Os volumes de lodo afluentes ao Secador Térmico podem ser calculados de acordo com:

$$Q_{AST} = \frac{SST_A}{p \times TS_A} \dots \dots \dots (17)$$

Onde:

SST_A : SST_{CtS} para as estratégias B, C, D, E, F e I

SST_A : SST_{Cal} para a estratégia H

TS_A : teor de sólidos do lodo afluente ao Secador Térmico que poderá ser:

- TS_{CtS} : Teor de sólidos do lodo efluente à centrífuga desaguadora para as estratégias B, C, D, E, F e I
- TS_{Cal} : Teor de sólidos do lodo efluente à estabilização alcalina para a estratégia H

p : densidade da massa sólida úmida (kg/m³)

Por sua vez o p é calculado de acordo com o teor de sólidos através da equação:

$$p = \left(\frac{TS}{100} \right) \times 1300 + \left(\left(\frac{1-TS}{100} \right) \times 1000 \right) \dots \dots \dots (18)$$

Uma vez que não se altera a massa de lodo seco, o volume de lodo efluente é calculado por:

$$Q_{EST} = \frac{SST_A}{p \times TS_{ST}} \dots \dots \dots (19)$$

Onde:

TS_{ST} = Teor de sólidos após a secagem térmica (%)

Cabe destacar, que a definição do TS_{ST} para as estratégias B, C, D, E, F, H e I é realizada através de interações que resulte no menor D_{Total}

Parte desta demanda energética do Secador Térmico será atendida parcialmente ou totalmente pela queima do biogás dependendo de sua estratégia de utilização. As equações seguintes definem a parcela utilizada de acordo com a estratégia:

o No caso das estratégias B e F será:

$$\text{Se } \begin{cases} E_{ST} < E_{DiG} \therefore E_{bio} = E_{ST} \\ E_{ST} > E_{DiG} \therefore E_{bio} = E_{DiG} \end{cases} \dots\dots\dots(20)$$

Onde:

E_{bio} : Energia do biogás aplicada no Secador Térmico (kWh/dia)

o No caso da estratégia E será:

$$\text{Se } \begin{cases} E_{RB} + E_C < E_{ST} \therefore E_{bio} = E_{RB} \\ E_{RB} + E_C > E_{ST} \therefore E_{bio} = E_{ST} - E_C \end{cases} \dots\dots\dots(21)$$

Onde:

E_{RB} : Energia remanescente do biogás (kWh/dia)

A energia remanescente do biogás é um caso exclusivo da estratégia E, onde o biogás é dividido em parte para a unidade de CEC e em parte para aplicação direta no Secador Térmico:

$$E_{RB} = E_{DiG} - E_{CHP} \dots\dots\dots(22)$$

Onde:

E_{CHP} : Energia do biogás aplicada na unidade de CEC (kWh/dia)

4.3.7 Custos referentes à operação e manutenção do Secador Térmico - sem os custos relacionados à energia

Os custos de operação e manutenção do Secador Térmico (Secador OPEX), excluindo o consumo energético para a secagem do lodo, foram calculados a partir do custo de implementação da unidade, com base no informado por um dos principais fabricantes.

$$D_{opm} = \frac{1,5\% \times I}{365} \dots\dots\dots(23)$$

4.3.8 Custos referentes à unidade de CEC

O cálculo dos custos de manutenção e operação das unidades de CEC (CEC OPEX) é baseado no custo por kWh gerado:

$$D_{CHP} = \tau \times n \times h_{\text{útil}} \times C_{Mu} \dots\dots\dots(24)$$

Onde:

τ : Potência unitária do equipamento de cogeração (CEC) (kW)

n : número de equipamento de cogeração instalados (unid.)

$h_{\text{útil}}$: Horas úteis de trabalho do motor (h)

C_{Mu} : Custo de manutenção e operação por kWh gerado (incluindo o tratamento prévio do biogás)

Para encontrar o n arredonda-se o número de equipamentos de CEC, n_c , calculado de acordo com a equação

$$n_c = \frac{E_{CHP} \times e}{h_{\text{útil}} \times \tau} \dots\dots\dots(25)$$

Onde:

n_c : Número de equipamentos de CEC necessários (unid.)

e : Eficiência da CEC para a geração de energia (%)

Para encontrar o $h_{\text{útil}}$ aplicasse a equação:

$$h_{\text{útil}} = h \times F \dots\dots\dots(26)$$

Onde:

h : Número de horas de trabalho do conjunto motor-gerador (h)

F : Fator de capacidade de funcionamento do conjunto motor-gerador (%)

Por sua vez a quantidade de energia do biogás aplicada como combustível para a unidade CEC depende da estratégia adotada:

- o No caso das estratégias C, D e F:

$$E_{CHP} = E_{DiG} \dots \dots \dots (27)$$

- o No caso da estratégia E:

$$E_{CHP} = \frac{E_{DiG} - EST}{1 - e_c} \dots \dots \dots (28)$$

Onde:

e_c : Eficiência da unidade de CEC na geração de energia térmica (kWh/dia)

Esta eficiência calcula-se a partir da eficiência de geração de energia elétrica e da relação entre a energia elétrica gerada e a geração de energia térmica:

$$e_c = \frac{E_{DiG} \times e \times R_{ZG}}{E_{DiG}} \dots \dots \dots (29)$$

Onde:

R_{ZG} : Relação entre a energia elétrica e a energia térmica geradas pela unidade de CEC (kWh/ kWh)

No caso da estratégia E, a energia do biogás aplicada na CEC deve ser recalculada de forma a otimizar a energia disponível:

$$\text{Se } \begin{cases} n < n_c \therefore E_{CHP} = \frac{n \times \tau \times h_{\text{útil}}}{e} \\ n > n_c \therefore E_{CHP} = \frac{n_c \times \tau \times h_{\text{útil}}}{e} \end{cases} \dots \dots \dots (30)$$

A quantidade de energia produzida depende do número de unidades implementadas:

$$\text{Se } \begin{cases} n > n_c \therefore E_p = E_{DiG} \times e \\ n < n_c \therefore E_p = n \times \tau \times h_{\text{útil}} \end{cases} \dots \dots \dots (31)$$

Onde:

E_p : Energia elétrica produzida pela CEC (kWh/dia)

E a quantidade de energia térmica gerada depende da quantidade de energia elétrica gerada:

$$E_c = E_p \times R_{zG} \dots \dots \dots (32)$$

4.3.9 Receita da economia na ETE devido à utilização da energia elétrica gerada pela CEC

Este ganho financeiro é resultante na redução do consumo de energia elétrica de fontes externas a ETE devido à utilização da energia gerada na CEC

$$\Delta V = V_u \times E_p \dots \dots \dots (33)$$

Onde:

V_u : Custo da energia elétrica para a ETEs (R\$/kWh)

No caso das estratégias B, C, E e F onde ocorre o consumo da energia gerada durante as 24 horas do dia este valor deverá ser correspondente ao valor médio da energia. No caso da estratégia D onde a energia é consumida apenas nas horas de ponta, o valor deverá ser correspondente ao valor de ponta.

4.3.10 Custos relativos ao consumo de cal

Nas estratégias H e I a estabilização do lodo é realizada por via química. Neste trabalho foi considerada a utilização de cal como agente estabilizador.

Os custos com a cal serão resultantes de:

$$D_{cal} = M_{cal} \times C_{cal_u} \dots \dots \dots (34)$$

Onde:

C_{cal_u} : Custo unitário da cal (R\$/kg)

A massa de cal necessária para estabilizar o lodo pode ser calculada por:

$$M_{cal} = SST_{ctS} \times CAL \dots \dots \dots (35)$$

Onde:

CAL = Porcentagem de cal adicionada por SST (%)

Para definição deste parâmetro deverão ser realizadas interações, partindo da massa mínima necessária para estabilizar o lodo, até que resulte no menor D_{Total}

Conhecendo a massa de cal é possível calcular a massa de lodo seco após a adição da cal:

$$SST_{Cal} = M_{Cal} + SST_{CtS} \dots \dots \dots (36)$$

E por seguinte, o teor de sólidos efluente ao processo de estabilização alcalina será:

$$TS_{Cal} = \frac{100 \times SST_{Cal}}{M_{H2O_{Ct}} + SST_{Cal}} \dots \dots \dots (37)$$

Onde:

$$M_{H2O_{Ct}} = \text{Massa de água efluente à centrifugação (kg/dia)}$$

Para calcular o teor de sólidos resultante ao acréscimo da cal calcula-se a massa de água agregada ao lodo afluente a etapa de estabilização:

$$M_{H2O_{Ct}} = M_{CtS} - SST_{CtS} \dots \dots \dots (38)$$

4.3.11 Custos relativos ao transporte do lodo entre a ETE 1 e a ETE 2 – Apenas para a estratégia F

Na estratégia F, o lodo depois de desaguado por centrifugação na ETE 1 será encaminhado pra a ETE 2 onde passará pela operação de secagem. O transporte entre estas ETEs gera um custo igual a:

$$D_{ETE\ 1\ para\ 2} = M_{ETE\ 1} \times L_{ETE\ 1\ p\ ETE\ 2} \times D_{Tu} \dots \dots \dots (39)$$

Onde:

$$M_{ETE\ 1} : \text{Massa de lodo úmida a ser transportada entre as ETEs (kg/dia)}$$

$$L_{ETE\ 1\ p\ ETE\ 2} : \text{Distância do trajeto entre a ETE 1 e a ETE 2 (km)}$$

Esta massa será igual à massa úmida efluente à centrífuga da ETE 1:

$$M_{ETE\ 1} = M_{CtS\ ETE\ 1} \dots \dots \dots (40)$$

4.3.12 Investimentos

O investimento na unidade de CEC (CEC CAPEX) pode ser calculado como:

$$I_{CHP} = D_{Iu} \times P_{CHP} \dots \dots \dots (41)$$

Onde:

D_{Iu} : Custo de implantação por capacidade instalada (incluindo o pré-tratamento do biogás) (R\$/kW)

P_{CHP} : Potencia instalada da CEC (kW)

Para calcular esta potência utiliza-se a equação:

$$P_{CHP} = \tau \times n \dots \dots \dots (42)$$

4.3.13 Custo Total

$$\text{Custo Total} = I_{Total} + OPEX_{VP} \dots \dots \dots (43)$$

4.4 Cenários de aplicação das estratégias e rotas do modelo para o caso da Bacia da Baía de Guanabara

A Tabela 19 indica as estratégias de gerenciamento de lodo aplicadas no âmbito do estudo de caso das cinco principais ETEs operadas e mantidas pela CEDAE na bacia da Baía de Guanabara.

Tabela 19: Estratégia por ETE

	Estratégia								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Alegria	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N.A	N.A	N.A
ETIG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N.A	N.A	N.A
Penha	✓	✓	✓	✓	✓	✓	N.A	N.A	N.A
Pavuna	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	✓	✓	✓
Sarapui	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	✓	✓	✓

*NA: Não aplicável

As Estratégias A e G foram desenvolvidas com as variantes I e II de forma que a variante I representasse a realidade da disposição final atual que tem como destino final do lodo o aterro de Gericinó e a variante II representasse a realidade da disposição final futura para o aterro de Seropédica.

Os cenários indicados na Tabela 19 como “Não aplicável” deve-se ao fato de contemplarem outra tecnologia de estabilização do lodo diferentemente daquela que a Estratégia se baseia (digestão anaeróbia x estabilização alcalina).

4.5 Dados de entrada do modelo para o estudo de caso

Os dados de entrada utilizados para a aplicação do modelo para a realidade das ETEs pertencentes ao estudo de caso são apresentados neste item.

4.5.1 Dados de entrada para o balanço de massa das ETEs

Para efeito de homogeneizar a previsão de geração de biogás e produção de lodo nas diferentes ETEs estudadas escolheu-se como referência o ano 2030, quando todas as instalações envolvidas estarão recebendo a vazão correspondente à sua respectiva capacidade instalada descrita na Tabela 20.

Foi realizado o balanço de massa relativo àquele ano em cada uma das cinco ETEs em estudo (Alegria, Penha, Ilha do Governador, Sarapuú e Pavuna) considerando como base de cálculo os respectivos fluxogramas apresentados nas Figuras Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 e respeitando as vazões de fim de plano e as concentrações de DBO e SST afluentes conforme indicadas na Tabela 20. A metodologia de cálculo, as equações e a lista completa de parâmetros utilizados para efetuar os balanços de massa estão apresentados no apêndice 01 deste trabalho.

Tabela 20: Dados de entrada do balanço de massa

Parâmetro ETE	Vazão (Q)		DBO		SST	
	l/s	m ³ /dia	mg/l	kg/dia	mg/l	kg/dia
Alegria	5.000	432.000	250	108.000	294	127.059
Ilha do Governador	525	45.360	194	8.799,8	228	10.353
Penha	1.086	93.830	197	18.485	202	18.954
Pavuna	1.500	129.600	250	32.400	294	38.117
Sarapuú	1.500	129.600	250	32.400	294	38.117

4.5.2 Dados de entrada para a rotina de cálculo

As cinco ETEs descritas neste trabalho estão localizadas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Os parâmetros apontados na Tabela 21 foram estimados levando em consideração este estudo de caso.

Tabela 21: Dados de entrada do modelo

Parâmetro	Notação	Unidade	Valor	Fonte
Custo unitário de transporte para caminhão basculante de 12 t				
$\bar{V} = 50$ km/h	C_{Tu}	R\$/t.km	0,44	EMOP
Valor do gás natural por mês				
0 a 200 m ³	C_{GNU}	R\$/m ³	3,73	CEG
201 a 2.000 m ³			2,17	
2.001 a 10.000 m ³			1,92	
10.001 a 50.000 m ³			1,58	
50.001 a 100.000 m ³			1,45	
100.001 a 300.000 m ³			1,31	
300.001 a 600.000 m ³			1,14	
600.001 a 1.500.000 m ³			1,13	
1.500.001 a 3.000.000 m ³			1,12	
3.000.001 a 100.000.000			1,08	
Custo unitário de disposição em aterro				
T.S. $\geq 60\%$	C_{Au}	R\$/t	90	Estimado para o Aterro de Seropédica
30% >T.S. > 60%			110	
T.S. $\leq 30\%$			160	
Poder calorífico do Biogás	c_{bio}	MJ/m ³	23	Appels 2008
Energia consumida no Secador Térmico por kg de água evaporada	E_u	kcal /kgH ₂ O	950	Pieralisi
Investimento inicial do Secador Térmico	I	R\$	18.000.000	Estimado para ETE Alegria
			12.000.000	Estimado para ETE Pavuna, Sarapuí e Penha
			8.000.000	Estimado para ETE Ilha do Governador
Horas de trabalho diário do conjunto motor-gerador	h	h	24	adotado
			3	Horas de ponta Light
Fator de capacidade de funcionamento do conjunto motor-gerador	F	%	90	adotado
Motor a combustão tipo “Rich Burn” pequeno ^(*) Valores em dólar Americano				
Faixa de potência	τ	kW	30-100	EPA, 2011
Eficiência da CEC para a geração de energia elétrica	e	%	28	EPA, 2011
Geração de calor	R_{ZG}	kWh/kWh	1,7	EPA, 2011
Custo de implantação	D_{Lu}	\$/kW ^(*)	4.500	EPA, 2011
Custo de manutenção	C_{Mu}	\$/kWh ^(*)	0,030	EPA, 2011

Parâmetro	Notação	Unidade	Valor	Fonte
Motor a combustão tipo “Rich Burn” ^(*) Valores em dólar Americano				
Faixa de potência	τ	kW	100 - 300	EPA, 2011
Eficiência na geração de	e	%	29	EPA, 2011
Geração de calor	R_{zG}	kWh/kW	1,612	EPA, 2011
Custo de implantação	D_{Iu}	\$/kW ^(*)	3.600	EPA, 2011
Custo de manutenção	D_{Mu}	\$/kWh ^(*)	0.025	EPA, 2011
Motor a combustão tipo “Lean Burn” ^(*) Valores em dólar Americano				
Faixa de potência	τ	kW	1000- 4.800	EPA, 2011
Eficiência na geração de	e	%	38	EPA, 2011
Geração de calor	R_{zG}	kWh/kW	0,996	EPA, 2011
Custo de implantação	D_{Iu}	\$/kW ^(*)	2.500	EPA, 2011
Custo de manutenção	D_{Mu}	\$/kWh ^(*)	0.016	EPA, 2011
Calor específico do gás natural	c_{GN}	kWh/m ³	10,93	CEG
Conversão do dólar para real	\$-R\$	\$/R\$	2,4	Janeiro 2014
Valor médio do custo da energia elétrica				
ETE Alegria	V_u	R\$/kWh	0,233	Média do ano de 2013
ETE Ilha do Governador			0,241	
ETE Penha			0,236	
ETE Pavuna			0,242	
ETE Sarapui			0,246	
Custo da energia elétrica na hora de ponta para todas as ETES	V_u	R\$/kWh	0,851	Calculado-base ETE Alegria.
Porcentagem necessária de cal para estabilizar o lodo	CAL	% SST	25	Jordão 2011
Custo com cal unitário	C_{calu}	R\$/kg	0,42	Estimado (CEDAE)
Horizonte de projeto	A	anos	20	Estimado
Taxa de juros anual	i	%	12,0	Estimado (CEDAE)
Distância das ETES para o Aterro Sanitário de Gericinó				
ETE Alegria	V_u	km	34,1	Google Earth
ETE Ilha do Governador			24,7	
ETE Penha			36,7	
ETE Pavuna			21,9	
ETE Sarapui			29,4	
Distância das ETES para o Aterro Sanitário de Seropédica				
ETE Alegria	V_u	km	74	Google Earth
ETE Ilha do Governador			64,6	
ETE Penha			78,8	
ETE Pavuna			61,8	

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados apenas os principais resultados referentes à otimização técnica e econômica dos balanços de massa e energia associados ao gerenciamento da fase sólida das cinco principais ETEs da bacia da Baía de Guanabara sob a operação e manutenção da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE). Esta otimização foi realizada através da aplicação do modelo de gerenciamento desenvolvido, conforme apresentado no capítulo de metodologia. A totalidade dos resultados é parte integrante dos Apêndices 01 (balanço de massa) e 02 (MGL) deste trabalho.

5.1 Balanço de massa e energia no entorno das etapas de estabilização anaeróbia e de desaguamento de lodo

O balanço de massa e energia no entorno da etapa de estabilização anaeróbia do lodo foi baseado na massa bruta de sólidos totais e sólidos voláteis provenientes das etapas de tratamento primário e secundário dos esgotos.

A vazão de biogás e as quantidades de massa seca e úmida do centrifugado, dados de entrada do modelo de otimização técnica e econômica, são apresentadas nos quadros síntese das Figura 22, Figura 23 e Figura 24 que expressam os balanços de massa e energia de parte da fase sólida das ETEs Alegria, ETIG e Penha respectivamente.

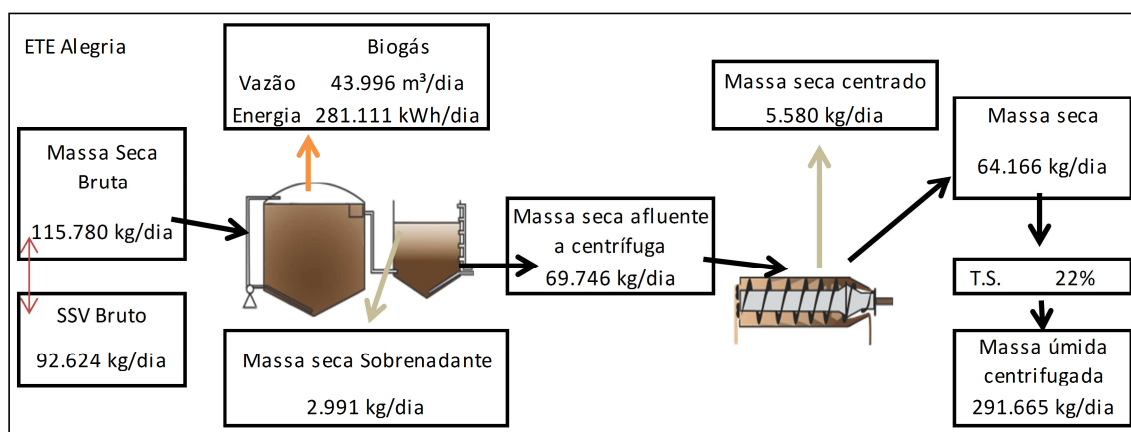


Figura 22: Principais resultados do balanço de massa da ETE Alegria

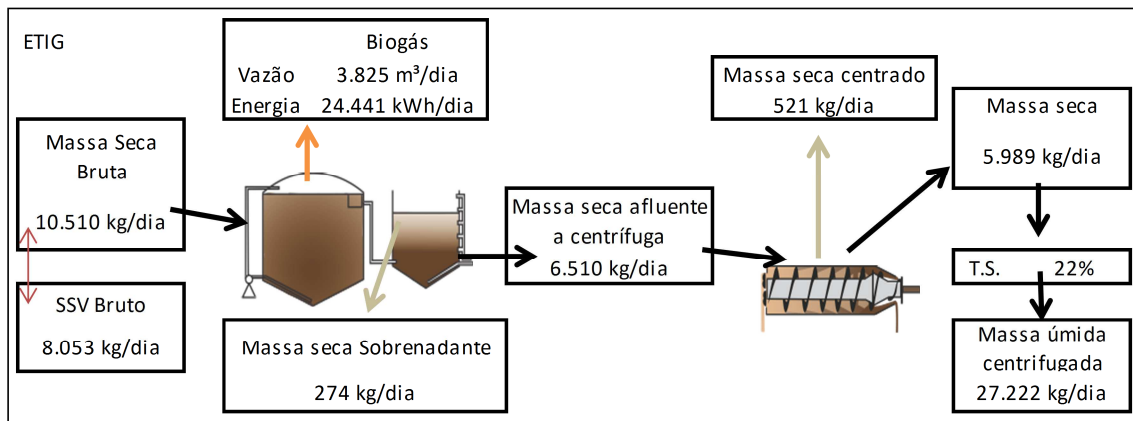


Figura 23: Principais resultados do balanço de massa da ETIG

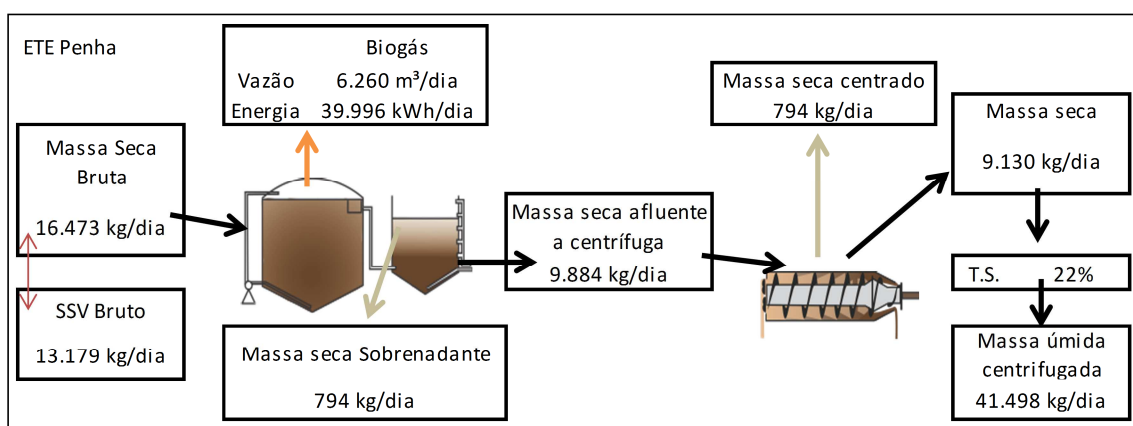


Figura 24: Principais resultados do balanço de massa da ETE Penha

5.2 Balanço de massa e energia no entorno da etapa de desaguamento do lodo para ETEs com estabilização alcalina

No caso das ETEs que atualmente estabilizam o lodo por via alcalina, os resultados do balanço de massa que serão considerados como dados de entrada no modelo de gerenciamento do lodo correspondem aqueles devidos exclusivamente à operação unitária de desaguamento: quantidades de massa seca e úmida do lodo centrifugado.

O balanço de massa em torno desta operação foi baseado na massa bruta de sólidos totais provenientes das etapas de tratamento primário e secundário dos esgotos. Os quadros sínteses das Figura 25 Figura 26 expressam os balanços de massa das ETEs Pavuna e Sarapui respectivamente.

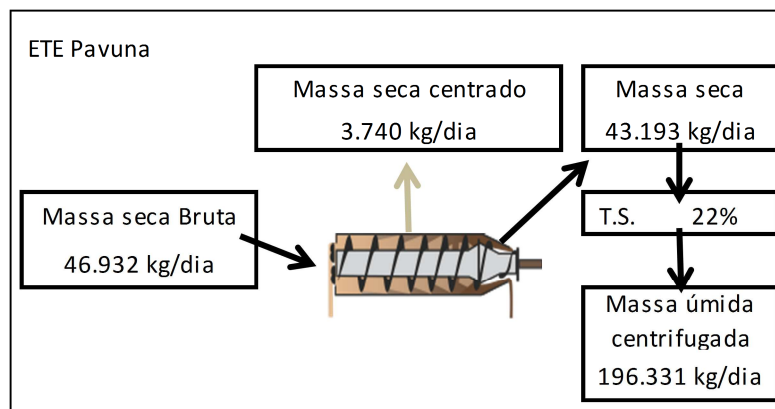


Figura 25: Principais resultados do balanço de massa da ETE Pavuna

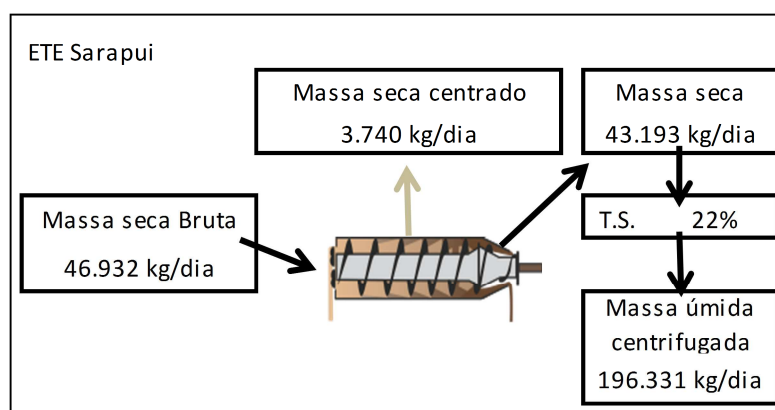


Figura 26: Principais resultados do balanço de massa da ETE Sarapui

5.3 Principais resultados da aplicação do modelo de gerenciamento do lodo (MGL).

De forma a facilitar a compreensão dos resultados, a Figura 27 apresenta um fluxograma contendo as Estratégias estabelecidas pelo MGL. A Tabela 22 relaciona cada uma das ETEs objeto de estudo às Estratégias do MGL, enquanto a Figura 27: Fluxos de energia e massa das Estratégias do MGL indica os fluxos de energia e massa respectivamente correspondentes às mesmas.

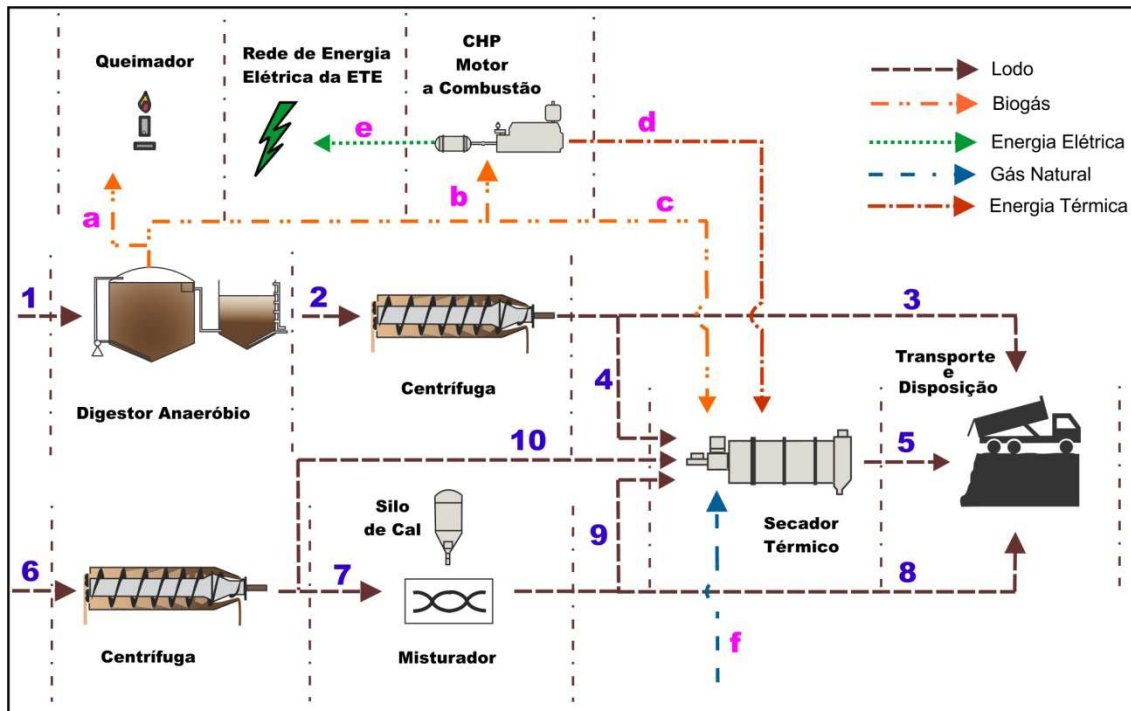


Figura 27: Fluxos de energia e massa das Estratégias do MGL

Tabela 22: Resumo das características das Estratégias

Estratégia	ETE*	Fluxos Energia	Fluxos Massa	Características Principais				
				Estabilização	Biogás	Gás Natural	Secador	Destino Final
A-I	A,I e Pe	a	1,2,3	Anaeróbia	Queima	N.A	N.A	Gericinó
A-II	A,I e Pe	a	1,2,3	Anaeróbia	Queima	N.A	N.A	Seropédica
B	A,I e Pe	c, f	1,2,4,5	Anaeróbia	Secador	Sim	Sim	Seropédica
C	A,I e Pe	b, e, f	1,2,4,5	Anaeróbia	Cogeração	Sim	Sim	Seropédica
D	A,I e Pe	b, d, e, f	1,2,4,5	Anaeróbia	Energia Elétrica	Sim	Sim	Seropédica
E	A,I e Pe	b, c, d, e,	1,2,4,5	Anaeróbia	Cogeração / Secador	N.A	Sim	Seropédica
F	Pe e A	Estratégia F – Figura na Metodologia		Anaeróbia	Energia Elétrica/ Secador	Sim	Sim	Seropédica
G-I	Pa e S	-	6,7,8	Alcalina	-	N.A	N.A	Gericinó
G-II	Pa e S	-	6,7,8	Alcalina	-	N.A	N.A	Seropédica
H	Pa e S	f	6,7,9,5	Alcalina	-	Sim	Sim	Seropédica
I	Pa e S	f	6,10,5	Térmica	-	Sim	Sim	Seropédica

* A para ETE Alegria, I para ETIG, Pe para ETE Penha, Pa para ETE Pavuna e S para ETE Sarapuí.

Os principais resultados relativos aos fluxos de massa e energia, bem como o resultado econômico de cada Estratégia do MGL estão apresentados nas Tabelas 23, 24, 25, 26 e 27 que respectivamente correspondem as ETes Alegria, ETE Penha, ETE Ilha do Governador, ETE Pavuna e ETE Sarapuí.

Tabela 23: Principais resultados do MGL para a ETE Alegria

ETE Alegria		Notação	Unidade	Estratégia A-I	Estratégia A-II	Estratégia B	Estratégia C	Estratégia D	Estratégia E
Fluxo de Energia	Fluxo de Energia	-	-	a	a	c, f	b, d, e, f	b, e, f	b, c, d, e
	Energia contida no biogás produzido	E_{DIG}	kWh/dia	281.111	281.111	281.111	281.111	281.111	281.111
	Energia do biogás aplicada na CEC	E_{CHP}	kWh/dia	-	-	-	281.111	281.111	74.483
	Energia elétrica produzida pela CEC	E_p	kWh/dia	-	-	-	81.522	106.822	21.600
	Energia térmica produzida pela CEC	E_c	kWh/dia	-	-	-	131.414	106.395	34.819
	Potência instalada da CEC	P_{CHP}	kW	-	-	-	3.800	40.000	1.000
	CEC CAPEX	I_{CHP}	R\$	-	-	-	32.832.000	240.000.000	8.640.000
	CEC OPEX	D_{CHP}	R\$/dia	-	-	-	4.925	4.147	1.296
	Receita da economia com energia elétrica	ΔV	R\$/dia	-	-	-	18.968	90.906	5.026
	Energia demandada pelo Secador Térmico	E_{ST}	kWh/dia	-	-	240.270	202.161	240.270	240.270
	Energia complementar suprida com gás natural	E_{GN}	kWh/dia	-	-	0	70.748	240.270	-
	Custos com gás natural	D_{GN}	R\$/dia	-	-	0	9.306	27.591	-
Fluxo de Massa	Fluxo de Massa	-	-	1,2,3	1,2,3	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5
	T.S. do lodo na saída da ETE	TS	%	22	22	90	60	90	90
	Massa úmida transportada	M	t/dia	292	292	71	107	71	71
	Secador Térmico OPEX	D_{opm}	R\$/dia	-	-	740	740	740	740
	Custos com transporte de lodo	D_T	R\$/dia	3.382	7.338	1.794	2.691	1.794	1.794
	Custos com disposição no aterro sanitário	D_A	R\$/dia	0	46.666	6.417	9.625	6.417	6.417
Total	OPEX total	D_{Total}	R\$/dia	3.382	54.005	8.950	8.318	-50.217	5.221
	CAPEX total	I_{Total}	R\$	-	-	-	32.832.000	240.000.000	8.640.000
	Valor Presente do OPEX total	$OPEX_{VP}$	R\$	9.219.305	147.235.345	24.401.215	22.678.701	-136.910.166	14.232.999
	Custo Total	Total	R\$	9.219.305	147.235.345	24.401.215	55.510.710	103.089.834	22.872.999

Tabela 24: Principais resultados do MGL para a ETIG

	ETIG	Notação	Unidade	Estratégia	Estratégia	Estratégi	Estratégia	Estratégia	Estratégia
				A-I	A-II	a B	C	D	E
Fluxo de Energia	Fluxo de Energia	-	-	a	a	c, f	b, d, e, f	b, e, f	b, c, d, e
	Energia contida no biogás produzido	E_{DiG}	kWh/dia	24.441	24.441	24.441	24.441	24.441	24.441
	Energia do biogás aplicada na CEC	E_{CHP}	kWh/dia	-	-	-	24.441	24.441	3.847
	Energia elétrica produzida pela CEC	E_p	kWh/dia	-	-	-	6.480	8.100	1.077
	Energia térmica produzida pela CEC	E_c	kWh/dia	-	-	-	10.446	8.068	1.831
	Potência instalada da CEC	P_{CHP}	kW	-	-	-	300	3.000	60
	CEC CAPEX	I_{CHP}	R\$	-	-	-	2.592.000	18.000.000	648.000
	CEC OPEX	D_{CHP}	R\$/dia	-	-	-	432	311	93
	Receita da economia com energia elétrica	ΔV	R\$/dia	-	-	-	1.561	6.893	259
	Energia demandada pelo Secador Térmico	E_{ST}	kWh/dia	-	-	22.425	18.869	18.869	22.425
	Energia complementar suprida com gás natural	E_{GN}	kWh/dia	-	-	0	8.423	18.869	-
	Custos com gás natural	D_{GN}	R\$/dia	-	-	0	1.360	2.865	-
Fluxo de Massa	Fluxo de Massa	-	-	1,2,3	1,2,3	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5
	T.S. do lodo na saída da ETE	TS	%	22	22	90	60	60	90
	Massa úmida transportada	M	t/dia	27	27	7	10	10	7
	Secador Térmico OPEX	D_{opm}	R\$/dia	-	-	329	329	329	329
	Custos com transporte de lodo	D_T	R\$/dia	340	729	178	267	267	178
	Custos com disposição no aterro sanitário	D_A	R\$/dia	0	4.356	599	898	898	599
Total	OPEX total	D_{Total}	R\$/dia	340	5.085	1.106	1.726	-2.222	940
	CAPEX total	I_{Total}	R\$	0	0	0	2.592.000	18.000.000	648.000
	Valor Presente do OPEX total	$OPEX_{VP}$	R\$	926.082	13.863.181	3.015.172	4.705.196	-6.059.214	2.562.384
	Custo Total	Total	R\$	926.082	13.863.181	3.015.172	7.297.196	11.940.786	3.210.384

Tabela 25: Principais resultados do MGL para a ETE Penha

ETE Penha		Notação	Unidade	Estratégia	Estratégia	Estratégia	Estratégia	Estratégia	Estratégia	Estratégia F
				A-I	A-II	B	C	D	E	(Alegria e Penha)
Fluxo de Energia	Fluxo de Energia	-	-	a	a	c, f	b, d, e, f	b, e, f	b, c, d, e	-----
	Energia contida no biogás produzido	E_{DiG}	kWh/dia	39.996	39.996	39.996	39.996	39.996	39.996	321.107
	Energia do biogás aplicada na CEC	E_{CHP}	kWh/dia	-	-	-	39.996	39.996	11.089	39.996
	Energia elétrica produzida pela CEC	E_p	kWh/dia	-	-	-	10.800	15.199	3.105	10.800
	Energia térmica produzida pela CEC	E_c	kWh/dia	-	-	-	17.410	15.138	5.279	17.410
	Potência instalada da CEC	P_{CHP}	kW	-	-	-	500	6.000	150	500
	CEC CAPEX	I_{CHP}	R\$	-	-	-	4.320.000	36.000.000	1.620.000	4.320.000
	CEC OPEX	D_{CHP}	R\$/dia	-	-	-	648	622	233	648
	Receita da economia com energia elétrica	ΔV	R\$/dia	-	-	-	2.550	12.934	733	2.550
	Energia demandada pelo Secador Térmico	E_{ST}	kWh/dia	-	-	34.186	28.763	28.763	34.186	274.455
	Energia complementar suprida com gás natural	E_{GN}	kWh/dia	-	-	0	11.354	28.763	-	0
	Custos com gás natural	D_{GN}	R\$/dia	-	-	0	1.784	4.178	-	0
Fluxo de Massa	Fluxo de Massa	-	-	1,2,3	1,2,3	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5	-----
	T.S. do lodo na saída da ETE	TS	%	22	22	90	60	60	90	90
	Massa úmida transportada	M	t/dia	41	41	10	15	15	10	81
	Secador Térmico CAPEX	I	R\$	-	-	12.000.000	12.000.000	12.000.000	12.000.000	-
	Secador Térmico OPEX	D_{opm}	R\$/dia	-	-	493	493	493	493	740
	Custos com transporte de lodo	D_T	R\$/dia	451	911	223	334	334	223	2.256*
	Custos com disposição no aterro sanitário	D_A	R\$/dia	0	6.640	913	1.369	1.369	913	913
Total	OPEX total	D_{Total}	R\$/dia	349	7.551	1.629	2.079	-5.937	1.229	8.424
	CAPEX total	I_{Total}	R\$	0	0	12.000.000	16.320.000	48.000.000	13.620.000	4.320.000
	Valor Presente do OPEX total	$OPEX_{VP}$	R\$	950.132	20.587.026	4.440.969	5.668.319	-16.185.914	3.078.127	22.965.777
	Custo Total	Total	R\$	950.132	20.587.026	16.440.969	21.988.319	31.814.086	16.698.127	27.285.777

*soma dos transportes do lodo da ETE Penha para a ETE Alegria e de ambos da ETE Alegria para o Aterro Sanitário de Seropédica

Tabela 26: Principais resultados do MGL para a ETE Pavuna

ETE Pavuna		Notação	Unidade	Estratégia G-I	Estratégia G-II	Estratégia H	Estratégia I
Fluxo de Energia	Fluxos de Energia	-	-	-	-	f	f
	Energia demandada pelo Secador Térmico	E_{ST}	kWh/dia	-	-	127.995	136.083
	Energia complementar suprida com gás natural	E_{GN}	kWh/dia	-	-	127.995	136.083
	Custos com gás natural	D_{GN}	R\$/dia	-	-	15.875	16.720
Fluxo de Massa	Fluxo de Massa		-	6,7,8	6,7,8	6,7,9,5	6,10,5
	T.S. do lodo na saída da ETE	TS	%	26	30	60	60
	Massa úmida transportada	M	ton/dia	207	219	90	72
	Secador Térmico OPEX	D_{opm}	R\$/dia	-	-	493	493
	Massa de Cal consumida	M_{Cal}	kg/dia	10.798	22.460	10.798	-
	Custos com Cal	D_{Cal}	R\$/dia	4.535	9.433	4.535	-
	Custos com transporte de lodo	D_T	R\$/dia	1.542	4.597	1.891	1.513
	Custos com disposição no aterro sanitário	D_A	R\$/dia	0	24.067	8.099	6.479
Total	OPEX total	D_{Total}	R\$/dia	6.078	38.098	30.893	25.204
	Investimento total	I_{Total}	R\$	0	0	0	0
	Valor presente do OPEX final	$OPEX_{VP}$	R\$	16.569.456	103.867.255	84.224.879	68.715.962
	Custo Total	Total	R\$	16.569.456	103.867.255	84.224.879	68.715.962

Tabela 27: Principais resultados do MGL para a ETE Sarapui

ETE Sarapui		Notação	Unidade	Estratégia G-I	Estratégia G-II	Estratégia H	Estratégia I
Fluxo de Energia	Fluxos de Energia	-	-	-	-	f	f
	Energia demandada pelo Secador Térmico	E_{ST}	kWh/dia	-	-	127.995	136.083
	Energia complementar suprida com gás natural	E_{GN}	kWh/dia	-	-	127.995	136.083
	Custos com gás natural	D_{GN}	R\$/dia	-	-	15.875	16.720
Fluxo de Massa	Fluxo de Massa		-	6,7,8	6,7,8	6,7,9,5	6,10,5
	T.S. do lodo na saída da ETE	TS	%	26	30	60	60
	Massa úmida transportada	M	ton/dia	207	219	90	72
	Secador Térmico OPEX	D_{opm}	R\$/dia	-	-	493	493
	Massa de Cal consumida	M_{Cal}	kg/dia	10.798	22.460	10.798	-
	Custos com Cal	D_{Cal}	R\$/dia	4.535	9.433	4.535	-
	Custos com transporte de lodo	D_T	R\$/dia	2.070	4.426	1.820	1.456
	Custos com disposição no aterro sanitário	D_A	R\$/dia	0	24.067	8.099	6.479
Total	OPEX total	D_{Total}	R\$/dia	6.606	37.926	30.823	25.148
	Investimento total	I_{Total}	R\$	0	0	0	0
	Valor presente do OPEX final	$OPEX_{VP}$	R\$	18.009.456	103.400.792	84.033.031	68.562.484
	Custo Total	Total	R\$	18.009.456	103.400.792	84.033.031	68.562.484

5.4 Discussão dos resultados referentes à aplicação das Estratégias A, B, C, D e E nas ETEs Alegria, ETIG e Penha.

5.4.1 Avaliação da eficiência energética das diferentes Estratégias

As Figura 28, Figura 29 e Figura 30 consolidam de forma gráfica os resultados referentes ao fluxo de energia de cada Estratégia do MGL, respectivamente para as ETEs Alegria, ETIG e Penha. Nestes gráficos, a primeira coluna relativa a cada uma das estratégias indica as fontes e respectivas quantidades de energia utilizadas; a segunda coluna indica a forma de uso (secador térmico ou CEC) e as respectivas quantidades de energia demandada. A terceira e quarta colunas indicam respectivamente as quantidades de energia elétrica e térmica produzida pela CEC.

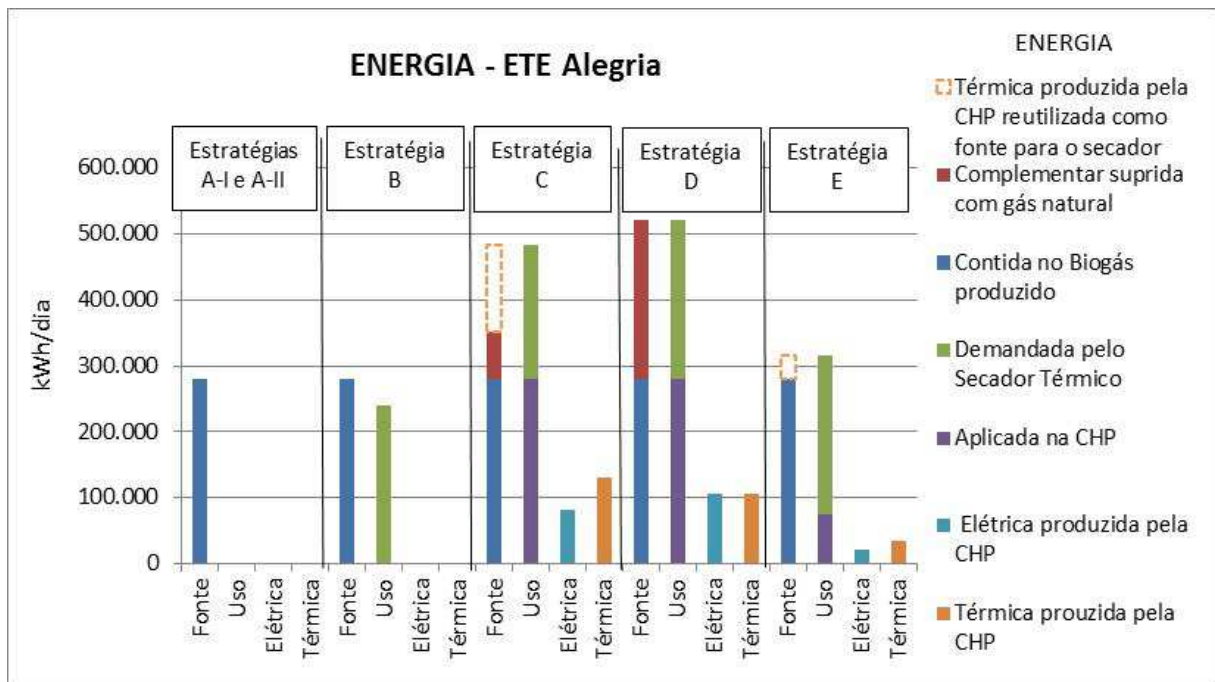


Figura 28: Energia ETE Alegria

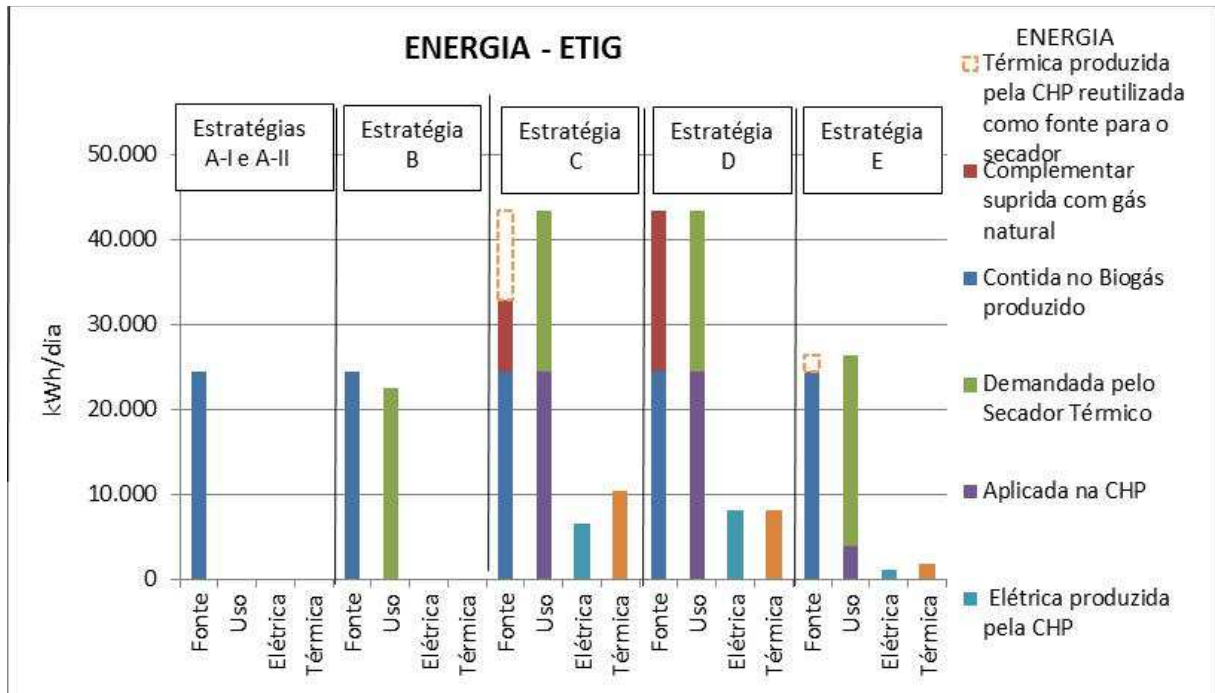


Figura 29: Energia ETIG

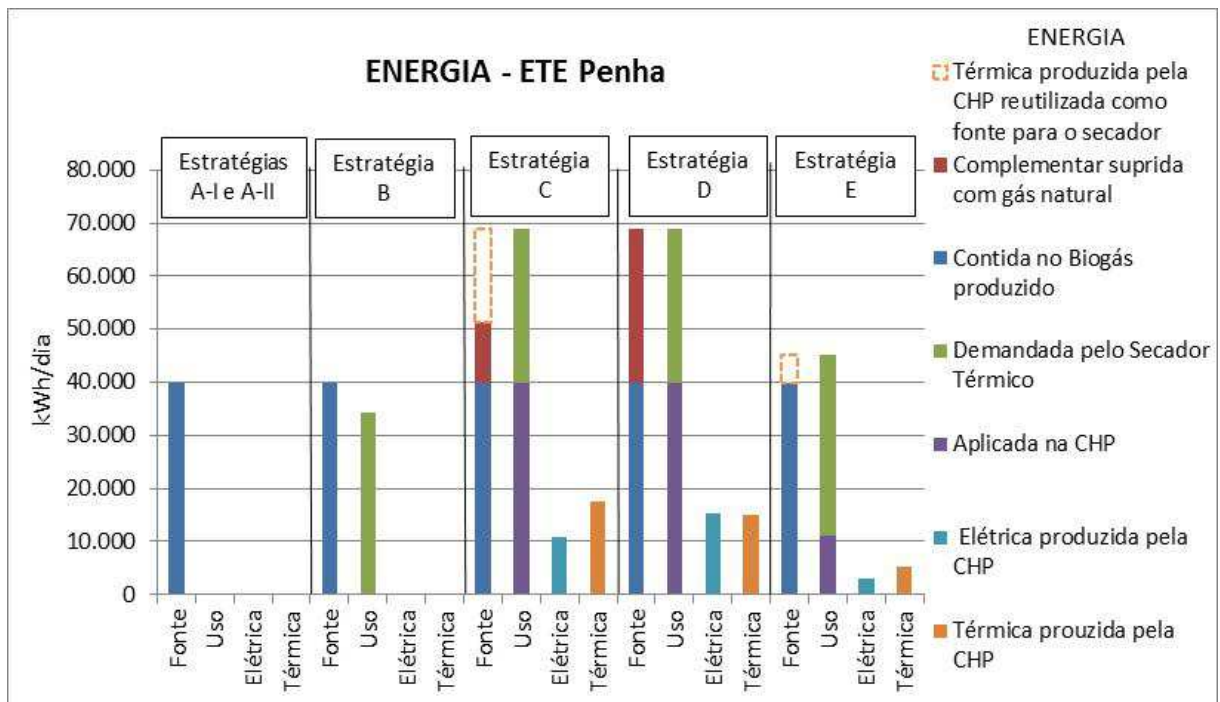


Figura 30: Energia ETE Penha

Como podem ser observadas nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30, as Estratégias A-I e II não fazem uso da energia oriunda do biogás produzido na digestão anaeróbia, simplesmente promovem a queima da mesma por meio de *flare*.

A estratégia B prevê o uso da totalidade do biogás produzido para atender exclusivamente a demanda energética do secador térmico, condição satisfeita para o caso das ETes Alegria,

ETIG e Penha, até mesmo para a demanda energética correspondente ao teor de sólidos de 90%, como indicaram as Tabelas 23, 24 e 25 anteriormente apresentadas.

De acordo com os gráficos das Figura 28, Figura 29 e Figura 30 observa-se que mesmo para esta elevada concentração de sólidos (90%), a quantidade de energia demandada pelo secador térmico, para o caso das três ETEs, é inferior à quantidade de energia contida no biogás produzido na etapa de digestão anaeróbia.

Ambas as Estratégias C e D baseiam-se no uso integral da energia contida no biogás para a cogeração de energia elétrica e térmica na unidade CEC, e no caso da Estratégia C, no uso da energia térmica então gerada (na CEC) pela unidade de secagem térmica do lodo.

Pelos gráficos anteriores, observa-se que a energia térmica produzida nas unidades CEC não é suficiente para atender a demanda energética do secador térmico (no gráfico, coluna “térmica”), sendo assim requerida energia complementar e, no caso, suprida por gás natural (no gráfico, coluna “fonte”). Por outro lado, obtém-se a geração de energia elétrica pela unidade CEC.

A diferença entre as Estratégias C e D corresponde ao tempo de funcionamento da unidade de geração. Na Estratégia C prevê-se a geração de energia elétrica e térmica durante 24 horas do dia, enquanto na Estratégia D é somente prevista a geração de energia elétrica e térmica durante as 3 horas que correspondem ao período de ponta.

No caso da Estratégia D, também se observa pelos gráficos anteriores que há a produção de energia térmica (no gráfico, coluna “térmica”), mas não aproveitada como fonte para suprimento de energia para a unidade de secagem térmica, uma vez que esta é usualmente operada durante períodos de no mínimo 8 horas diárias. Consequentemente, a quantidade de energia requerida por esta unidade é atendida em sua totalidade pelo uso de gás natural.

Da mesma forma que a Estratégia C, verifica-se no caso da Estratégia D, a geração de energia elétrica pela unidade CEC. Porém, de acordo com o que demonstram os gráficos anteriores, neste caso, é maior o potencial de geração de energia elétrica em função da concentração de uso da mesma no período de somente 3 horas, o que possibilita a instalação de conjuntos moto-geradores de maior potência e que possuem maior eficiência na geração de energia elétrica.

Diferentemente das Estratégias C e D que impõem o uso da totalidade do biogás pela unidade CEC, a Estratégia E busca otimizar o uso da energia de forma concomitante pela unidade CEC e pela unidade de secagem térmica. A otimização do uso concomitante tem como objetivo evitar a utilização complementar de gás natural.

No caso, os gráficos das Figura 28, Figura 29 e Figura 30 indicam que a totalidade da energia demandada por ambas as unidades, CEC e secador térmico, não é satisfeita exclusivamente pela energia contida no biogás (no gráfico, coluna “uso”), porém em função do desenho da própria estratégia, ela é satisfeita, complementarmente, pela energia térmica produzida pela unidade CEC (no gráfico, coluna “térmica”). Da mesma forma que nas Estratégias anteriores, também verifica-se a geração de energia elétrica pela unidade CEC.

Considerando todas as Estratégias avaliadas, é oportuno concluir que aquela que menor quantidade de energia complementar (gás natural) requerer e que ainda assim seja capaz de gerar energia é a que resulta em a maior eficiência energética. **Assim, verifica-se que a Estratégia E é aquela que sob o ponto de vista energético apresenta a maior eficiência.**

5.4.2 Avaliação do OPEX das diferentes Estratégias

Como inicialmente destacado, o MGL associa os resultados dos balanços de massa e energia aos custos de capital (CAPEX) e de operação e manutenção (OPEX) das unidades que correspondem a cada uma das Estratégias, propiciando a otimização econômica, de forma global, do conjunto das etapas de tratamento, transporte e destinação final do lodo.

São estes os resultados que constam nas Tabelas 23, 24 e 25 anteriormente apresentadas, e que destacavam CAPEX e OPEX das unidades CEC e de secagem térmica, bem como o OPEX associado à energia complementar demandada pelo secador térmico (gás natural), ao transporte e à disposição final no aterro sanitário.

Neste contexto, a otimização econômica que o MGL permite alcançar passa pelo equilíbrio entre CAPEX e OPEX das diferentes unidades. Porém, é a unidade de secagem térmica a sua principal referência, em razão de ela possibilitar a variação da concentração de sólidos, e consequentemente otimizar a massa úmida (volume) de lodo a ser transportada e/ou disposta em aterro sanitário. Em outras palavras, quanto maior o T.S. do lodo a ser transportado para a destinação final, maior a energia requerida para a secagem térmica (OPEX maior), menor o momento do transporte do lodo - t.km (OPEX menor) e menor a área/volume requerida para disposição final do lodo no aterro sanitário (OPEX menor). Assim é que a unidade de secagem térmica torna-se o elemento-chave por detrás desta lógica.

A interpretação dos resultados que constam nas Tabelas 23, 24 e 25 leva à concluir que a otimização econômica das diferentes Estratégias que contemplam o emprego da unidade de secagem térmica resultou, em função dos respectivos OPEX e CAPEX, na imposição de diferentes graus de secagem, alternando entre os valores ótimos de 60% e 90% de T.S.. No

caso das Estratégias B e E, o valor ótimo de 90% para todas as três ETEs; no caso da Estratégia C, 60% também para todas as três ETEs; somente no caso da estratégia D é que a otimização do teor de sólidos da unidade de secagem térmica da ETE Alegria assumiu o valor de 90%, enquanto nas demais o mesmo esteve limitado a 60%.

Isto posto, os gráficos das Figura 31, Figura 32 e Figura 33 seguintes detalham o valor de OPEX relativo a cada uma das parcelas que compõem a equação econômica do MGL, a novamente saber: $D_{Total} = (D_T + D_A + D_{GN} + D_{opm} + D_{CHP} - \Delta V)$, onde:

- D_{Total} : Custos de manutenção e operação total diário para cada Estratégia do MGL (OPEX total) (R\$/dia)
- D_T : Custos com o transporte do lodo da ETE para o aterro sanitário (R\$/dia)
- D_A : Custos referentes à disposição no aterro sanitário (R\$/dia)
- D_{GN} : Custos com Gás Natural (R\$/dia)
- D_{opm} : Custos com operação e manutenção do Secador Térmico – sem os custos relacionados ao pagamento da energia suprida por fonte externa a ETE (Secador OPEX) (R\$/dia)
- D_{CHP} : Custos relativos ao tratamento do biogás, manutenção e operação das unidades de cogeração de energia elétrica e térmica (CEC OPEX) (R\$/dia)
- ΔV : Receita da economia com o uso da energia elétrica gerada na unidade de cogeração (R\$/dia)

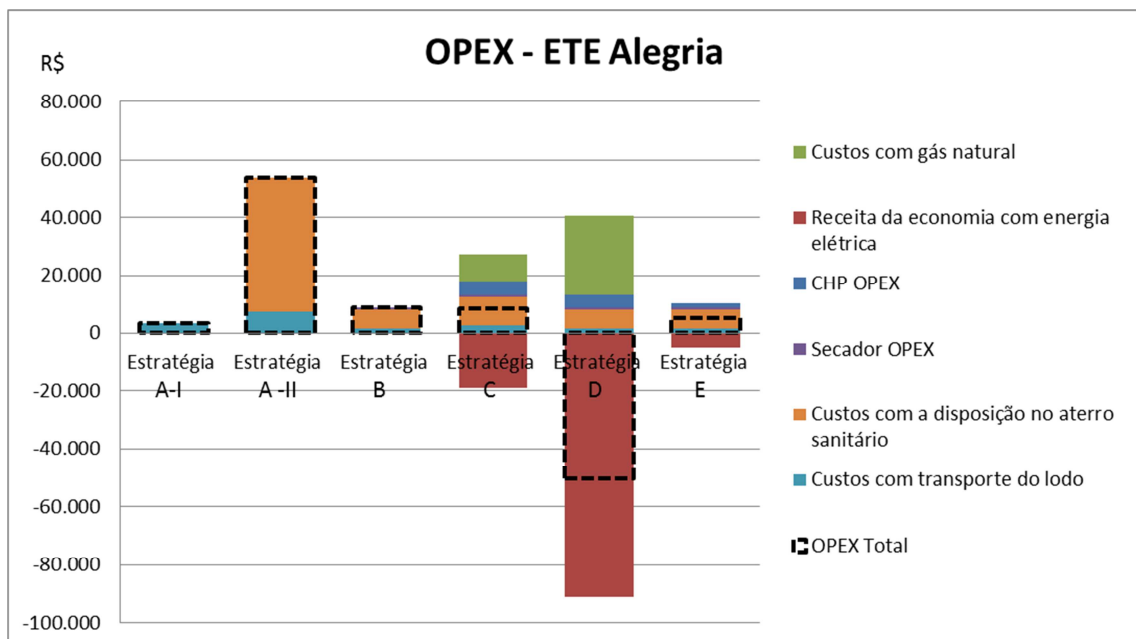


Figura 31: OPEX ETE Alegria

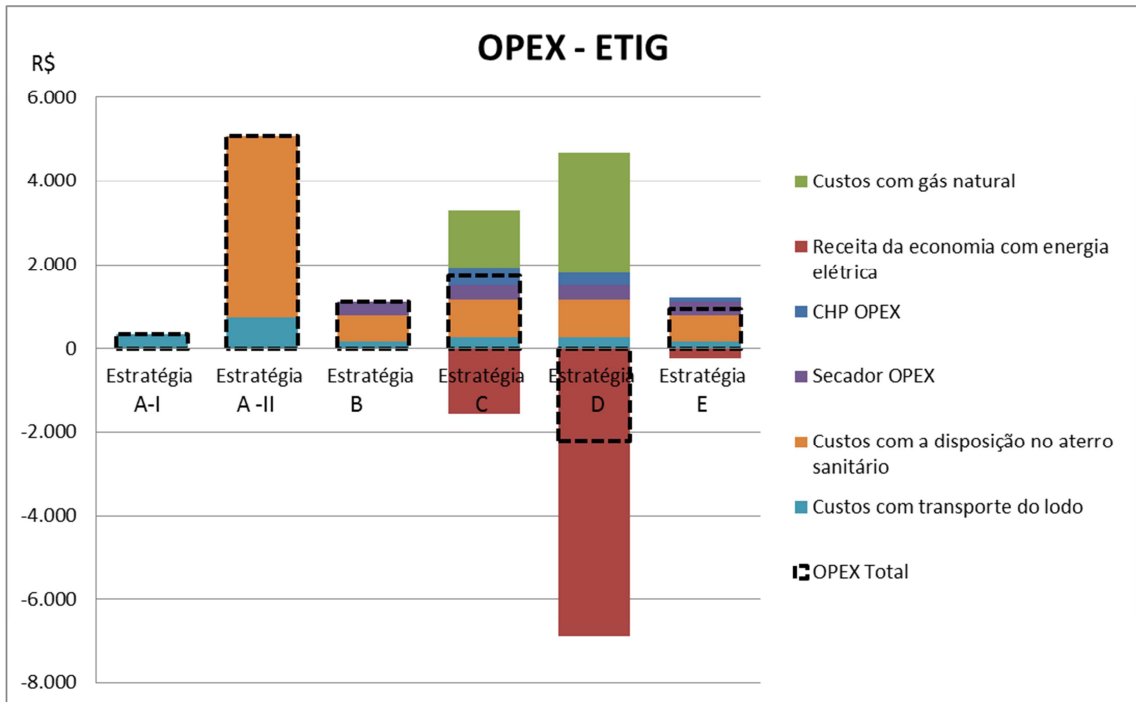


Figura 32: OPEX ETIG

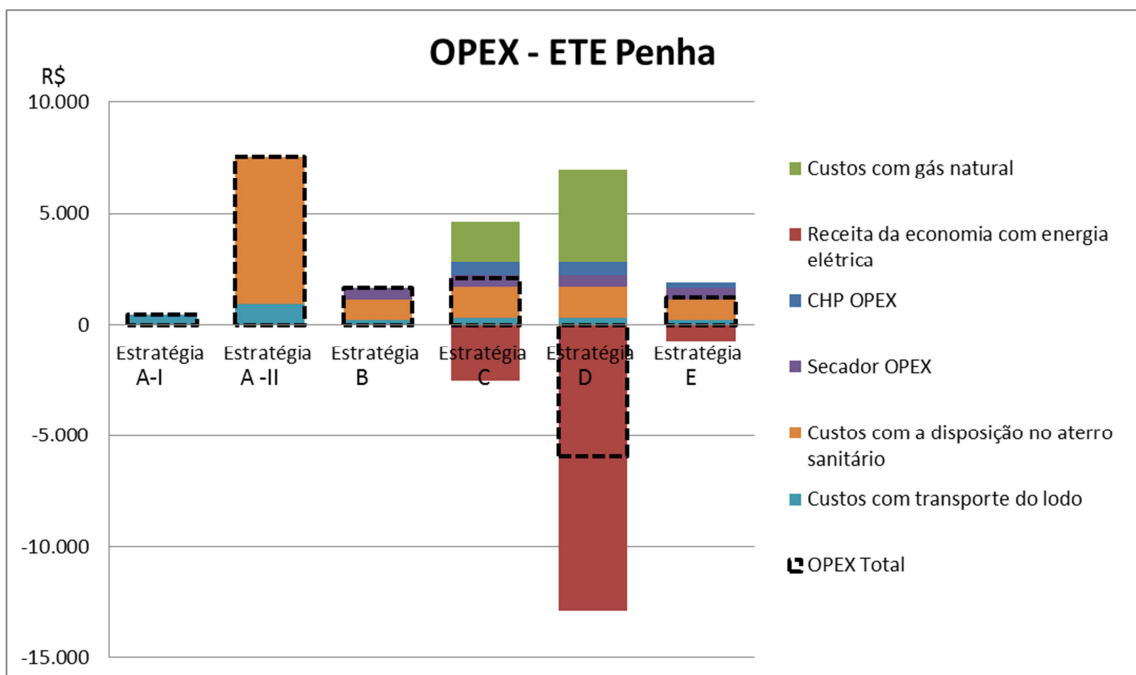


Figura 33: OPEX ETE Penha

Estratégia A

Comparando-se a coluna referente à Estratégia A-I (despejo no Aterro de Gericinó) com a coluna referente à Estratégia A-II (despejo no Aterro de Seropédica), observa-se que, para todas as ETEs estudadas, a desativação do Aterro Sanitário de Gericinó representaria um aumento significativo do OPEX relativo ao gerenciamento do lodo quando consideradas as vazões para a capacidade instalada de cada ETE (Alegria 5.000 l/s, ETIG 525 l/s e Penha

1.086 l/s). Estes aumentos variariam entre 15 vezes para a ETE Ilha do Governador e 17 vezes para a ETE Penha.

O acréscimo na distância a ser percorrida para a disposição final no Aterro de Seropédica é em parte responsável pelo aumento do OPEX, porém a parcela mais representativa é devida aos custos relativos à disposição do lodo no aterro sanitário.

Observa-se em grandes cidades e regiões metropolitanas do Brasil a estratégia de troca entre a prestação dos serviços de disposição final de lodo em aterro sanitário – pela administração municipal, e de tratamento de lixiviado de aterro sanitário – pela operadora de esgotamento sanitário. Esta estratégia permite que o custo da disposição de lodo oriundo de ETEs em aterro sanitário público não seja efetivamente cobrado das operadoras de esgotamento sanitário, seja por se tratar de um serviço de natureza pública ou com base na compensação da prestação do serviço de tratamento dos lixiviados dos aterros sanitários municipais.

Esta é a realidade que atualmente ocorre no caso da CEDAE e das ETEs estudadas, onde não há a cobrança por parte da COMLURB, responsável pelo gerenciamento do Aterro Sanitário de Gericinó. Por outro lado, a partir do encerramento das atividades deste aterro, prevista para ocorrer brevemente, a alternativa de destinação final do lodo das ETEs da CEDAE passaria a ser o Aterro Sanitário de Seropédica, sob administração privada e cujos custos específicos de disposição final do lodo obedecem a lógica de manejo de lodo de forma mais ou menos complexa em função da maior ou menor presença de água, a saber:

- Para lodo com T.S. inferior a 30% => R\$ 160,00/t
- Para lodo com T.S. compreendido entre 30% e 60% => R\$110,00/t
- Para lodo com T.S. superior a 60% => R\$ 90,00/t

Considerando que na Estratégia A, o lodo é apenas desaguado por centrifugação, o mesmo é disposto no aterro sanitário com T.S inferior a 30%, resultando para o caso das ETEs Alegria, ETIG e Penha custos de transporte e disposição final do lodo que totalizam respectivamente R\$ 54.005, R\$ 5.085 e R\$ 7.551.

Estratégia B

Por outro lado, quando a Estratégia B propõe a utilização do Secador Térmico e a consequente elevação do T.S. para 90%, tem-se não somente a redução de custos de transporte e de disposição final devido a redução da massa úmida e do volume de lodo, como principalmente em função do menor custo unitário específico de disposição final do lodo no

aterro sanitário (R\$ 90,00/t), equivalente a 56% do custo unitário para a disposição do lodo na Estratégia A.

De uma forma geral, e que é especificamente corroborado pela Estratégia B, os gráficos da Figura 34 ilustram o efeito da redução da massa úmida e do volume de lodo decorrente do aumento do T.S. sobre os custos de transporte e de disposição final do lodo, e consequentemente sobre o OPEX total das ETEs Alegria, ETIG e Penha. Observa-se, no entanto, que no caso da Estratégia B, não é computado o custo do combustível da unidade de secagem térmica, em virtude de ser plenamente satisfeita pela energia advinda do biogás produzido em cada uma das ETEs.

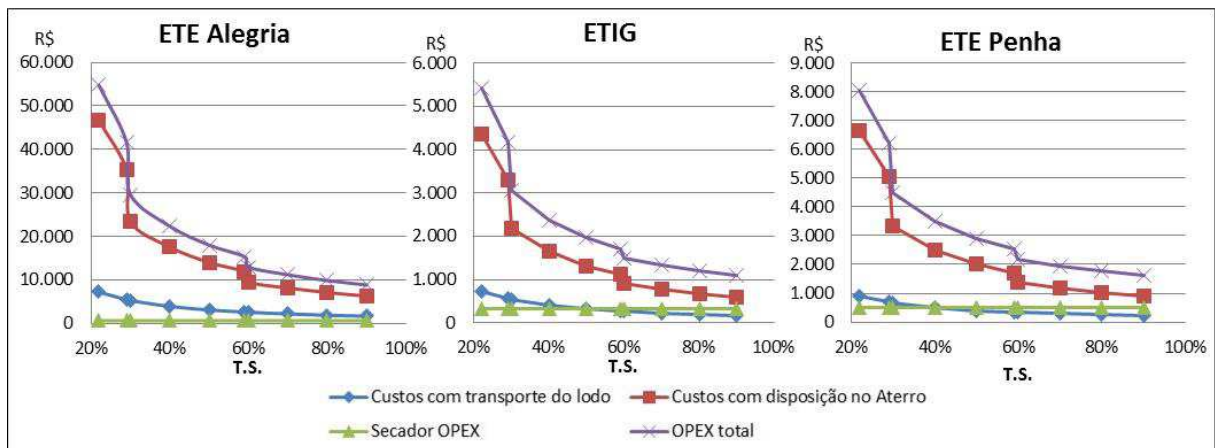


Figura 34: T.S. x OPEX - Estratégia B

O efeito da aplicação dos custos unitários específicos de disposição final do lodo no aterro sanitário sobre a curva de custos de disposição no aterro sanitário pode ser facilmente observado nos gráficos da Figura 34 especificamente em torno dos teores de sólidos de 30% e 60%.

Estratégia C

Comparando os dados relativos às Estratégias C e B, exibido nos gráficos das Figura 31, Figura 32 e Figura 33, é possível concluir que apenas no caso da ETE Alegria, a Estratégia C sugere menor OPEX total que a Estratégia B. Ainda que a Estratégia C possibilite receita com a economia advinda da geração de energia elétrica, observa-se que no caso das ETEs ETIG e Penha preponderam os custos associados ao uso de gás natural e ao transporte e disposição final de maior quantidade de lodo – maior massa úmida e volume devido ao menor teor de sólidos de 60%.

Os gráficos da Figura 35 apresentam os custos que compõem o OPEX da Estratégia C para as três ETEs estudadas. Como já discutido para a Estratégia B, observa-se também a redução de custos de transporte e disposição final do lodo que é promovida pelo aumento do teor de sólidos. Porém, contrariamente, tem-se a contínua elevação do custo da energia advinda do gás natural, o que repercute sobre a trajetória do OPEX total, incrementando seu valor em função da elevação do teor de sólidos. Assim, com base nos custos específicos utilizados no MGL, poder-se-ia afirmar que, a partir de 60% de T.S. é desprezível a diferença do valor do OPEX total.

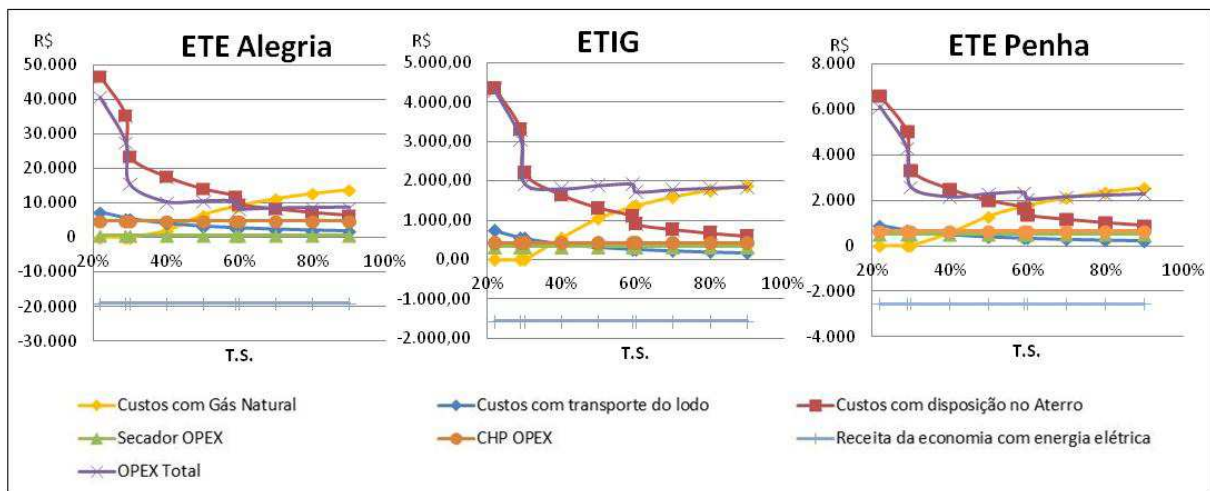


Figura 35: T.S. x OPEX - Estratégia C

Estratégia D

Conforme mencionado anteriormente, a diferença entre as Estratégias C e D corresponde ao tempo de funcionamento da unidade CEC. Na Estratégia C é prevista a geração de energia elétrica durante 24 horas do dia, enquanto na Estratégia D esta é somente prevista durante as 3 horas que correspondem ao período de ponta. Como o custo unitário da energia elétrica alterna entre R\$ 0,24/kWh durante o período regular, e R\$ 0,84/kWh durante o período de ponta, a receita com a economia realizada com o uso da energia elétrica gerada no horário de ponta é muito superior àquela realizada com o uso da energia elétrica gerada durante as 24 horas do dia.

Considerando que na Estratégia D a totalidade da demanda energética do secador térmico é suprida com a energia advinda do gás natural, os custos relativos ao uso de gás natural nessa Estratégia são superiores aos despendidos na Estratégia C.

Porém, como mencionado anteriormente, o MGL promoveu a otimização econômica das diferentes Estratégias que contemplam o emprego da unidade de secagem térmica em função

dos respectivos OPEX e CAPEX e em função da otimização do grau de secagem térmica do lodo, no caso de 60% para as ETEs Penha e ETIG e de 90% para a ETE Alegria.

No caso da ETE Alegria que exerce enorme consumo de gás natural, diferentemente da Estratégia C, a Estratégia D aponta para a importante redução do custo unitário do gás natural e que implica na redução de custo relativo ao uso de gás natural que passa a ser compensado pela redução de custos de transporte e disposição final do lodo promovida pelo aumento do teor de sólidos.

Estratégia E

A Estratégia E não contempla custo com o uso de gás natural, sendo toda a energia demandada pelo secador térmico suprida pelo somatório entre a energia térmica gerada na CEC e a energia do biogás aplicada diretamente na unidade de secagem. Para esta Estratégia, o MGL indicou como referencia para a otimização do OPEX total, o teor de sólidos de 90% para todas as ETEs estudadas. Assim como apresentado para as Estratégias B e C, os gráficos da Figura 36 relacionam graficamente os custos e o teor de sólidos respectivamente para a ETEs Alegria, ETIG e Penha.

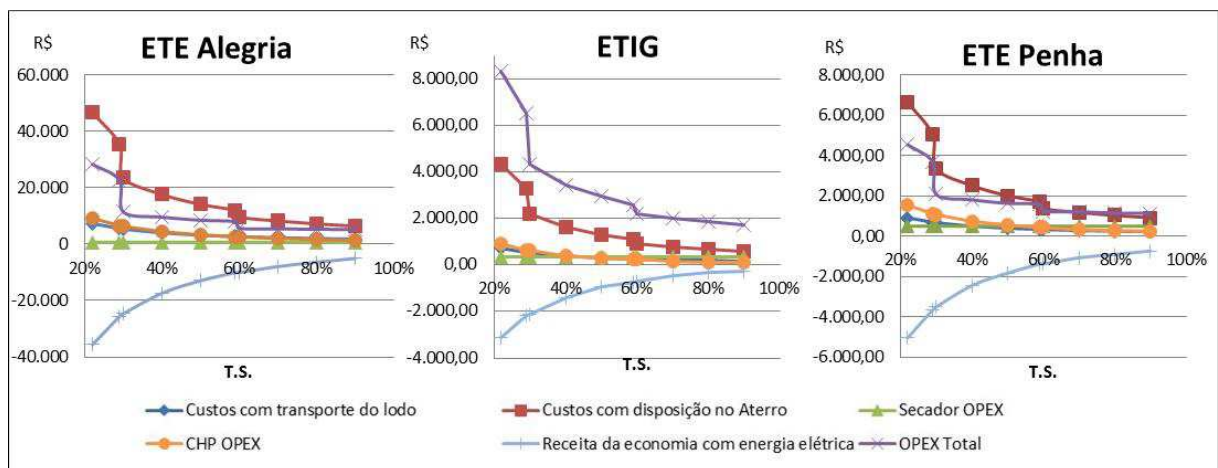


Figura 36: T.S. x OPEX - Estratégia E

Nos gráficos da Figura 36 é possível verificar que quanto menor o teor de sólidos do lodo, menor será a energia demandada pelo Secador Térmico, especificamente nesta Estratégia E. Assim sendo, mais energia pode ser aplicada na unidade CEC e maior é a receita com a geração de energia elétrica advinda da economia do seu uso. Por outro lado, observa-se também que esta receita não compensa a elevação de custos advindos do aumento da massa

úmida e do volume de lodo a ser transportado e disposto em aterro sanitário. Assim o MGL resulta na otimização do OPEX total quando a secagem do lodo atinge 90% de T.S..

5.4.3 Avaliação da relação massa/volume do lodo e energia demandada para a desidratação das diferentes Estratégias

Visando a ressaltar a influência do teor de sólidos sobre a relação entre as massas seca e úmida de lodo, as Figura 37, Figura 38 e Figura 39 ilustram de forma gráfica e para cada Estratégia do MGL, os pontos de otimização do OPEX total, e consequentemente, também expressam as massas seca e de água contida no lodo a ser transportado para o aterro sanitário, respectivamente a partir das ETES Alegria, ETIG e Penha.

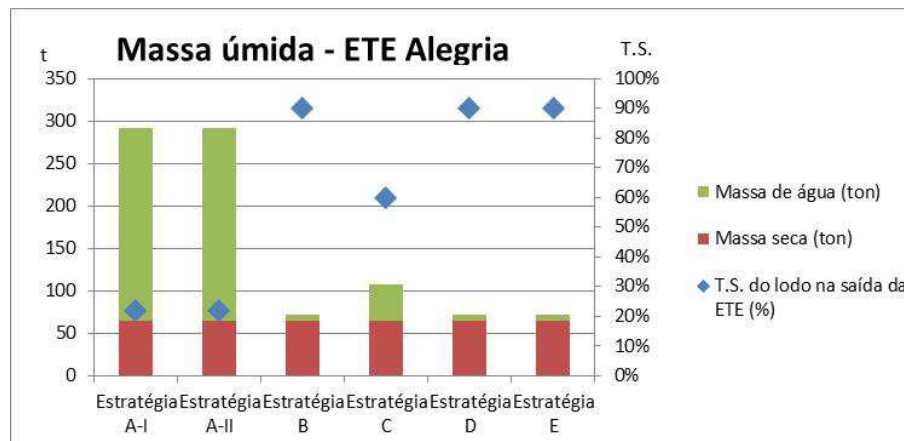


Figura 37: Massa Úmida – ETE Alegria

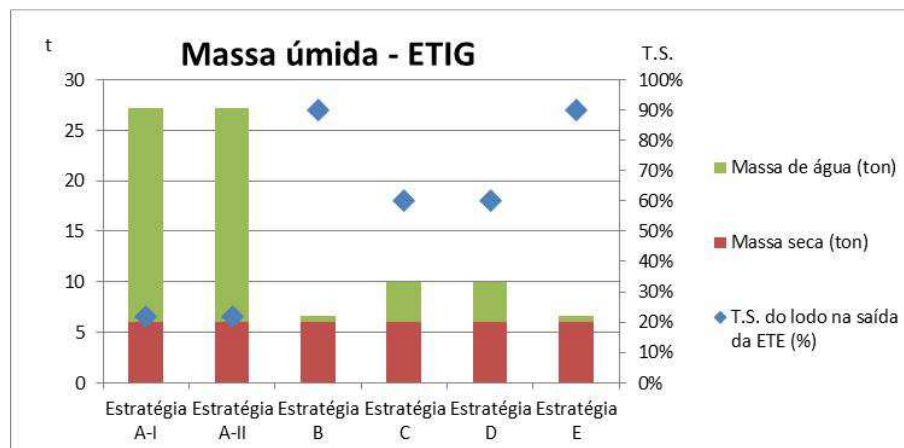


Figura 38: Massa Úmida – ETIG

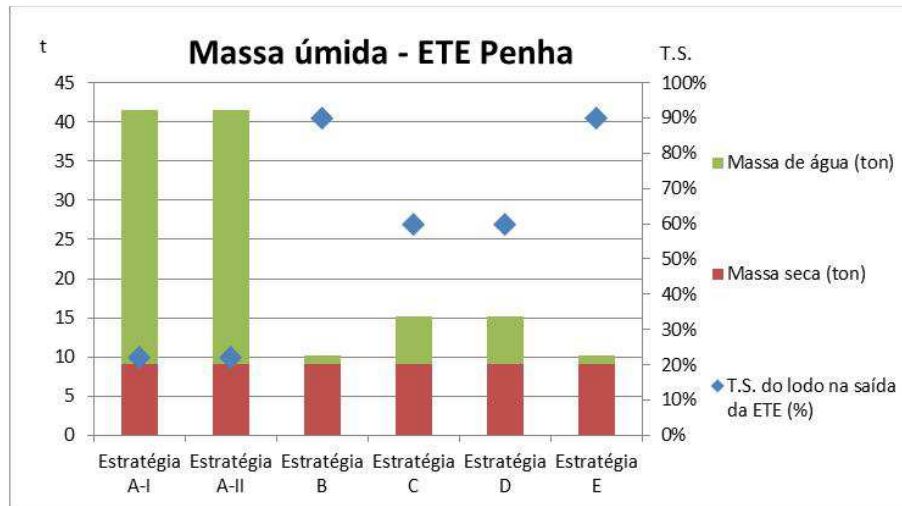


Figura 39: Massa Úmida – ETE Penha

Todos os gráficos das Figuras anteriores demonstram, obviamente, a relação inversamente proporcional entre a massa de lodo úmido e o teor de sólidos do lodo. A preocupação quanto ao OPEX das etapas de transporte do lodo e destinação final é exposta quando analisado o efeito da elevação do teor de sólidos sobre a massa úmida a ser transportada e disposta no aterro sanitário.

5.4.4 Avaliação do CAPEX das diferentes Estratégias

Ainda que os resultados anteriores permitam julgar as Estratégias sob os pontos de vista energético e econômico operacional (OPEX), faz-se necessário também avaliar o impacto econômico das mesmas sob o ponto de vista do investimento de capital (CAPEX).

Neste sentido, considerando que as Estratégias avaliadas incorporam em suas rotas unidades com vultoso investimento de capital, as Figura 40, Figura 41 e Figura 42 apresentam de forma gráfica os investimentos requeridos (CAPEX) por cada uma das Estratégias do MGL aplicadas ao caso das ETEs Alegria, ETIG e Penha, respectivamente.

Observa-se que no caso das ETEs Alegria e ETIG, o CAPEX corresponde somente aos custos de investimento na unidade de CEC, uma vez que as mesmas já são dotadas de unidades de secagem térmica. Somente no caso da ETE Penha, o CAPEX corresponde aos custos de investimento na unidade de CEC e na unidade de secagem térmica que esta ainda não dispõe.

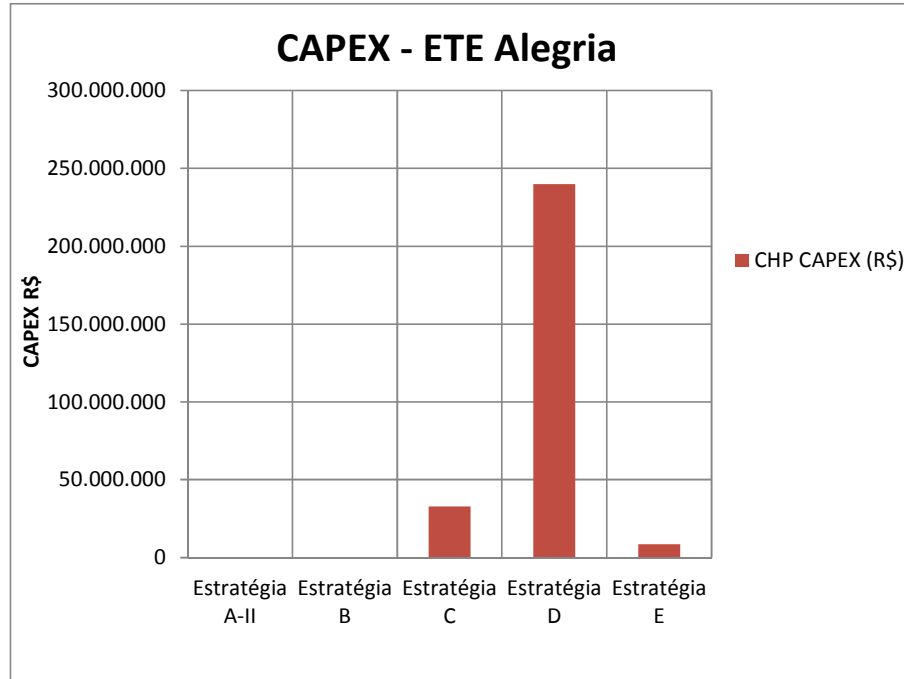


Figura 40: CAPEX – ETE Alegria

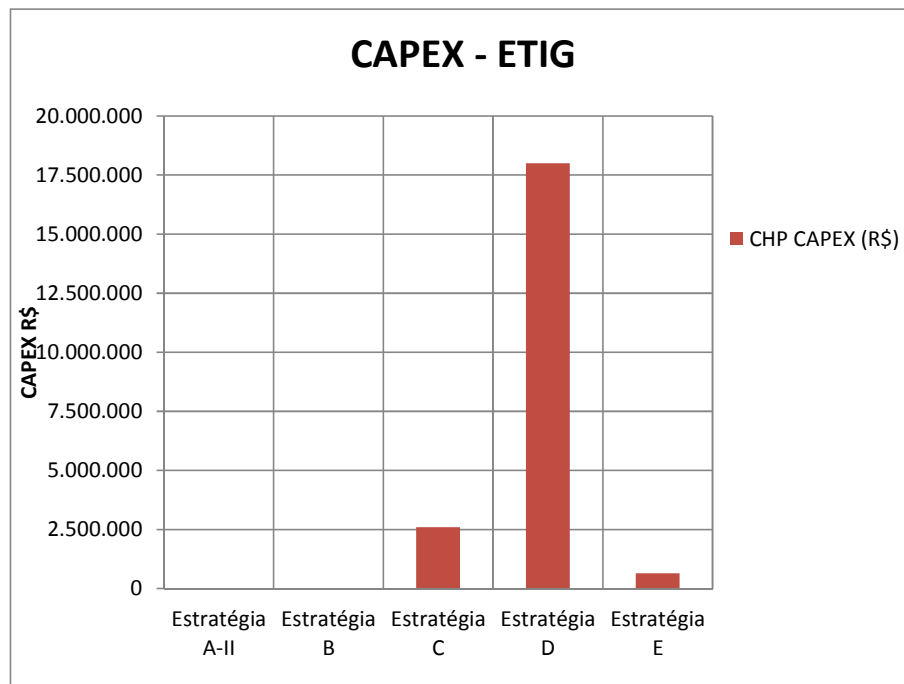


Figura 41: CAPEX - ETIG

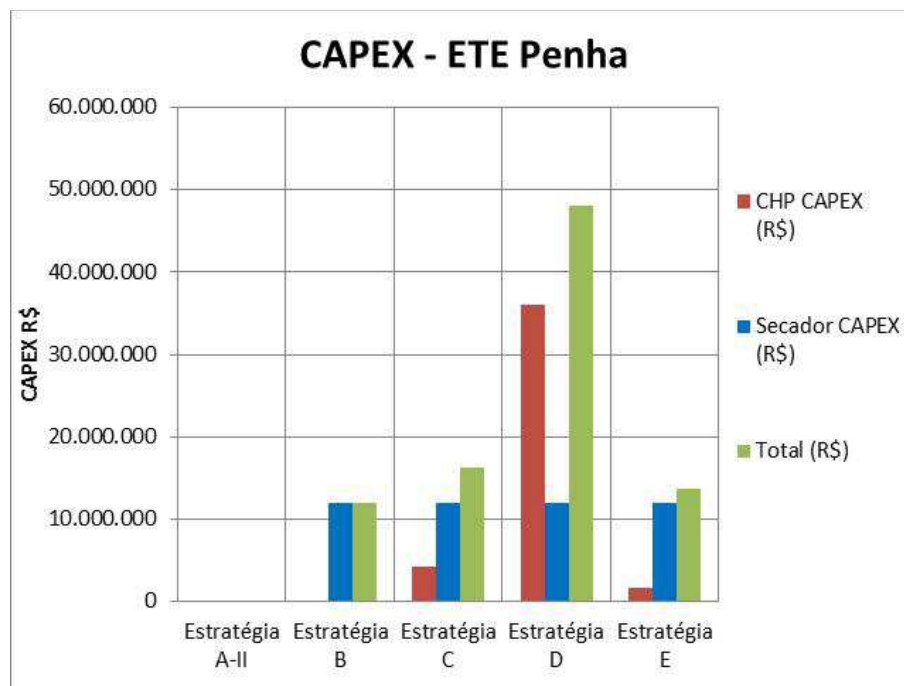


Figura 42: CAPEX – ETE Penha

Na Estratégia A-II, o biogás é queimado e não aproveitado, e portanto, não há qualquer investimento de capital (CAPEX). Na Estratégia B, apenas na ETE Penha haverá CAPEX relativo ao secador térmico. Já na Estratégia D, a sobrelevação do CAPEX quando comparada à Estratégia C é devida à concentração da geração de energia no período de 3 horas de ponta, o que, consequentemente exigirá maior potência do conjunto CEC o que fará com que o CAPEX venha a ser superior até mesmo ao da unidade de secagem térmica. O contrário se aplica à análise do CAPEX da Estratégia E.

Sob a ótica econômica e da capacidade de investimento de capital, considerando exclusivamente os resultados do CAPEX requerido pelas Estratégias avaliadas, conclui-se que, excluída a Estratégia A-II, é a Estratégia B que em todos os casos menor CAPEX requer.

5.4.5 Avaliação econômica das diferentes Estratégias com base no valor presente

Neste trabalho, a avaliação econômica do OPEX obedece cálculo do valor presente considerando 20 anos de horizonte de projeto e a taxa de juros de 12% a.a.. Os gráficos das Figuras Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam para as ETES Alegria, ETIG e Penha, respectivamente, os custos CAPEX, VP OPEX e Custo Total de cada uma das Estratégias estudadas.

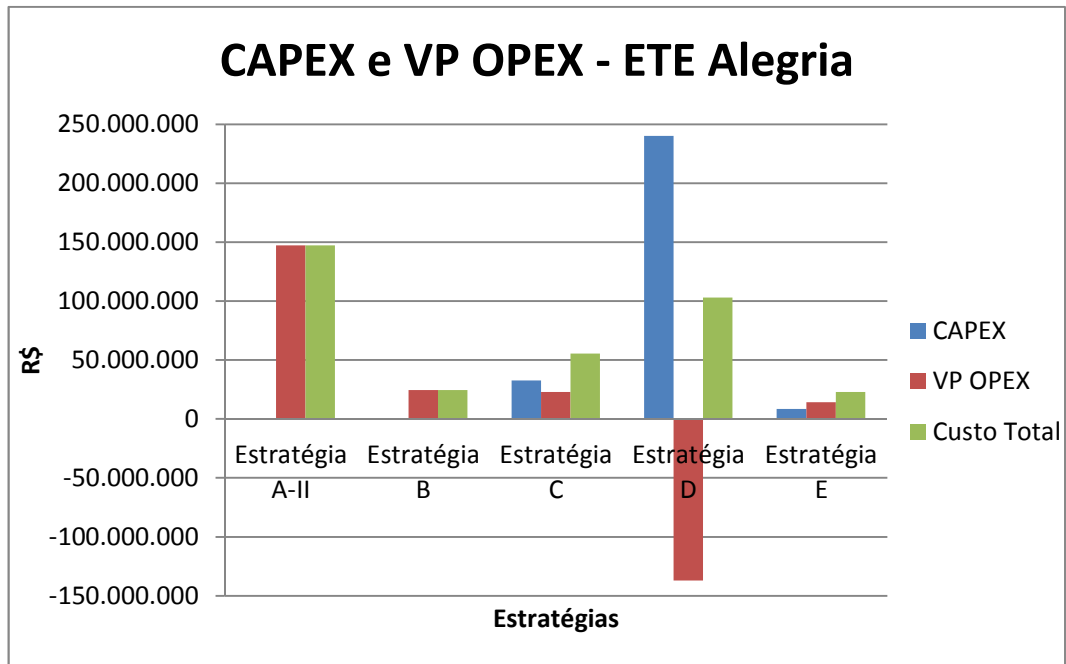


Figura 43: CAPEX e VP OPEX – ETE Alegria

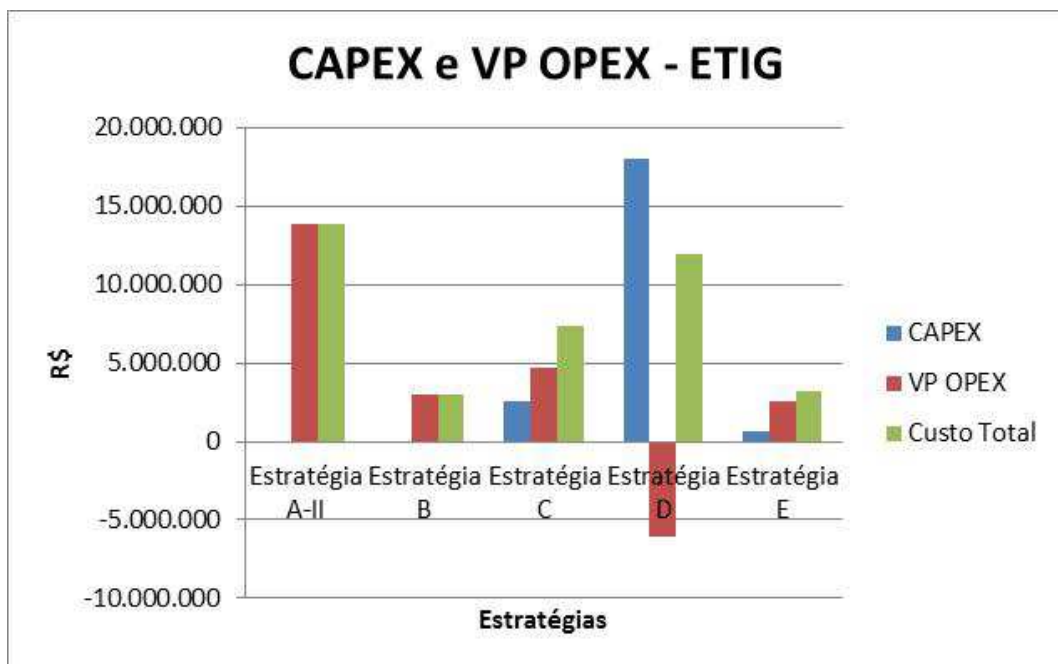


Figura 44: CAPEX e VP OPEX – ETIG

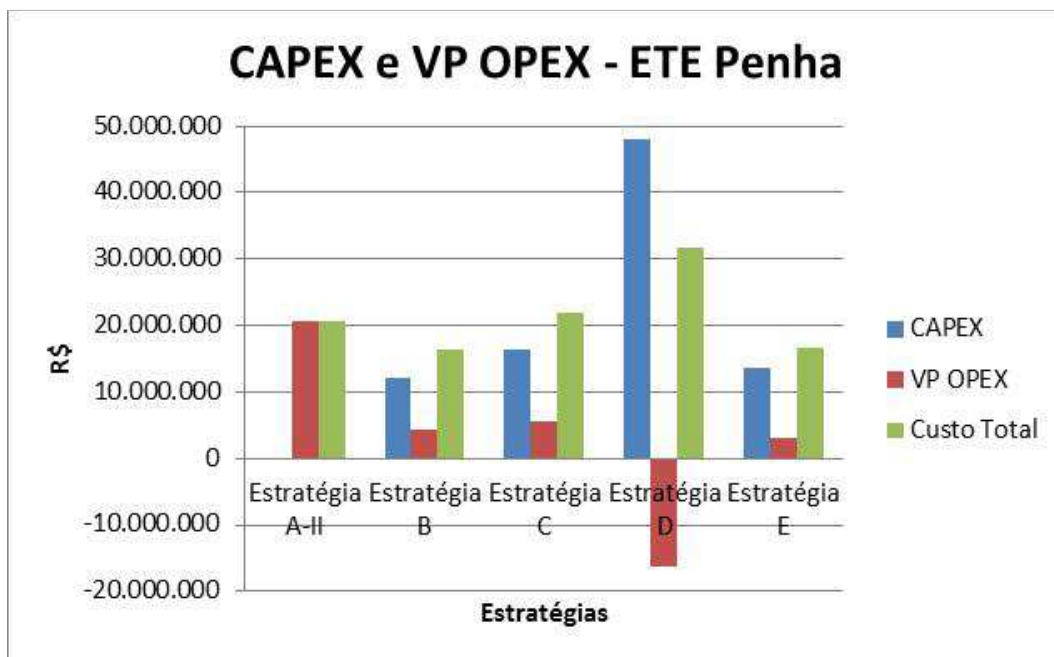


Figura 45: CAPEX e VP OPEX – ETE Penha

Observando estes gráficos, verifica-se que como não há investimento CAPEX em nenhuma das ETEs no caso da Estratégia A-II, os valores de VP OPEX e Custo Total são iguais. Ressalta-se ser esta a Estratégia atualmente adotada pela CEDAE para gerenciamento do lodo.

Observa-se também que a secagem térmica e o aproveitamento integral do biogás como combustível desta unidade implica redução do Custo Total, mesmo para a ETE Penha, onde a aquisição de um conjunto de secagem térmica se faria ainda necessária. **Para as ETEs ETIG e Penha esta foi a Estratégia (Estratégia B) que dentre todas as demais, apresentou o menor Custo Total (R\$ 3.015.172 ETIG e R\$ 16.440.969 ETE Penha).**

Em relação à Estratégia C, observa-se que os resultados do Custo Total da ETE Alegria contrariam o que fora descrito em EPA (2011) que indicava a maior viabilidade econômica do emprego de unidade CEC para o caso de ETEs com vazões superiores a 1.300 l/s, mas que destinavam a energia térmica produzida na CEC para o aquecimento da unidade de digestão anaeróbia e o aquecimento de áreas internas das ETEs. Por outro lado, estes mesmos resultados vão ao encontro do que menciona Basrawi e outros (2012) ao concluir que a viabilidade econômica para a implementação de unidade CEC reduz de acordo com o aumento da temperatura local.

Apesar da Estratégia D ser a única que apresentou OPEX final negativo e principalmente devido à receita advinda da economia com a geração da energia elétrica, ressalta-se que o maior Custo Total foi fortemente influenciado pelo CAPEX das unidades CEC.

A observação dos gráficos das mesmas Figuras permite inferir a equivalência de custos entre as Estratégias E e B para todas as ETEs. No entanto **a indicação de qual seja a melhor alternativa deve também contemplar outros aspectos de natureza técnica, além dos econômicos, como, por exemplo, dificuldades operacionais das unidades CEC, a necessidade de equipe especializada e eventuais impactos ambientais.**

5.5 Discussão dos resultados referentes à aplicação da Estratégia F com a ETE Penha como ETE 1 e a ETE Alegria como ETE 2

5.5.1 Avaliação da eficiência energética da Estratégia F

Na Estratégia F, o lodo gerado na ETE Penha é centrifugado e encaminhado para a ETE Alegria, onde será destinado para a unidade de secagem térmica, juntamente com o lodo lá gerado. Esse secador térmico utilizará como fonte energética o biogás produzido na unidade de digestão anaeróbia da ETE Alegria. Por sua vez, o biogás produzido na ETE Penha será aplicado em uma unidade CEC, para geração de energia elétrica e térmica.

Conforme pode ser visto no item 5.4 deste trabalho, as Estratégias que tiveram o menor Custo Total para as ETEs Alegria e Penha foram a E e a B, respectivamente. Assim sendo, a avaliação do fluxo energético da Estratégia F, que engloba a ETE Alegria e a ETE Penha, deve ser realizada por meio da comparação da soma das energias envolvidas nessas duas Estratégias, que aqui intitulou-se "Estratégia E+B".

A Figura 46 apresenta, de forma gráfica, a totalidade do fluxo de energia da Estratégia E+B e da Estratégia F do MGL, que por sua vez envolve as duas ETEs, a Alegria e a Penha.

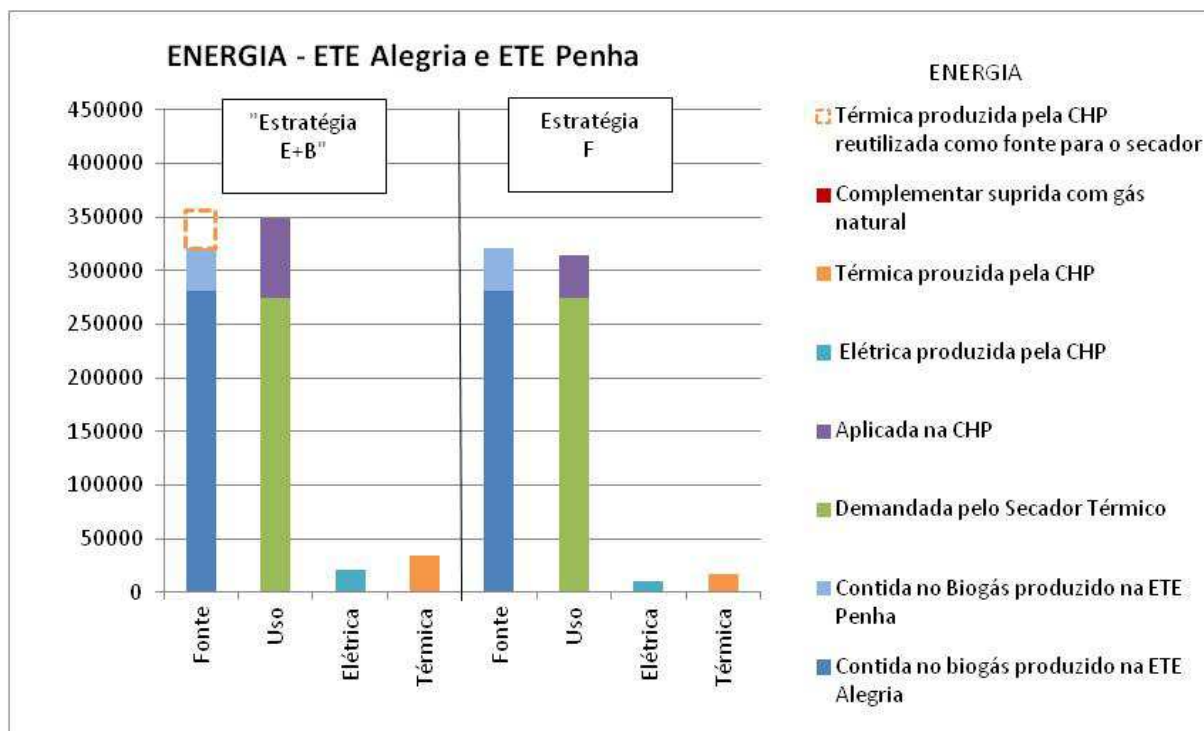


Figura 46: Energia Estratégia E+B e Estratégia F

Como pode-se observar, comparando as colunas “fonte” e “uso” da Estratégia F do gráfico anterior, a energia contida no biogás produzido nos digestores anaeróbios da ETE Alegria é capaz de atender demanda energética não somente para a secagem térmica do lodo da ETE Alegria como também aquele oriundo da ETE Penha.

Observa-se também que, apesar da geração de energia térmica na unidade CEC da Estratégia F (no gráfico, coluna “térmica”), essa energia não foi reaproveitada por essa Estratégia não prever o uso de secagem térmica na ETE Penha (no gráfico, coluna “fonte”).

Comparando as duas Estratégias, verifica-se que, apesar da energia contida no biogás ser a mesma para os dois casos, foi na "Estratégia E+B" que a maior quantidade de energia elétrica foi gerada, sem que fosse necessária uma complementação energética externa às ETEs (gás natural). Pode-se, então, considerá-la a mais eficiente sob o ponto de vista energético.

5.5.2 Avaliação do OPEX da Estratégia F

Conforme pode ser visto no item 5.4 deste trabalho, as Estratégias que tiveram o menor Custo Total para as ETEs Alegria e Penha foram a E e a B, respectivamente. Assim sendo, a avaliação econômica do OPEX da Estratégia F, que engloba a ETE Alegria e a ETE Penha, deve ser realizada por meio da comparação da soma destas duas Estratégias, que aqui intitulou-se "Estratégia E+B".

Para ilustrar esta comparação, apresenta-se a Figura 47, que sintetiza de forma gráfica o OPEX relativo à "Estratégia E+B" e o OPEX relativo à Estratégia F.

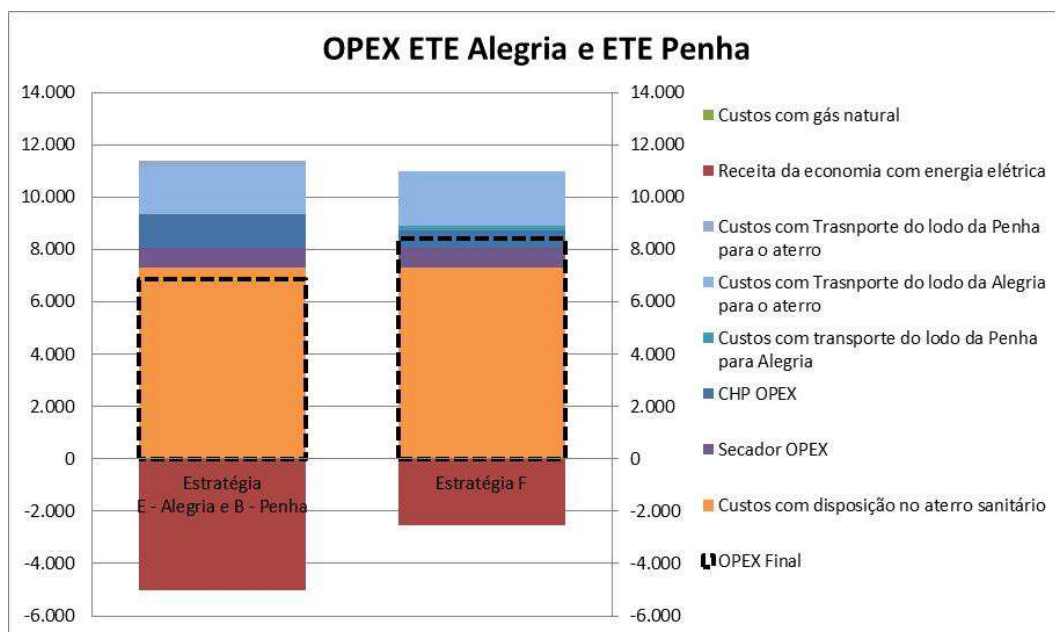


Figura 47: OPEX ETE Alegria e ETE Penha

Diferente da forma apresentada nos gráficos das OPEX relativas as Estratégias de A a E, devido a necessidade do transporte do lodo entre as ETE, nesse gráfico, os custos de transporte foram divididos em três: transporte da ETE Penha para o Aterro Sanitário; transporte da ETE Alegria para o Aterro Sanitário; e transporte da ETE Penha para a ETE Alegria. A partir da análise do referido gráfico, observou-se um aumento dos custos totais com transporte por conta do transporte do lodo apenas centrifugado da ETE Penha para seguir com seu tratamento na ETE Alegria.

Observa-se, ainda, que o custo da disposição do lodo no aterro sanitário para a "Estratégia E+B" é igual ao custo da Estratégia F, isso porque, em todos os casos, o lodo é disposto com teor de sólidos de 90%.

Além disso, tendo em vista a maior capacidade instalada da unidade CEC na "Estratégia E+B", o gráfico demonstra a maior receita com a economia na geração de energia elétrica. Devido a isso, **o OPEX Total resultante da "Estratégia E+B" é inferior ao da Estratégia F.**

5.5.3 Avaliação econômica das diferentes Estratégias com base no valor presente para a Estratégia F

Assim como foi feito para o OPEX Total, para a avaliação econômica com base no valor presente da Estratégia F, comparar-se-á a soma destes valores das Estratégias E para a ETE Alegria e Estratégia B para a ETE Penha, ou seja, "Estratégia E+B", com o valor presente relativo à Estratégia F (que engloba as ETES Alegria e Penha). Dessa forma, a Figura 48 apresenta o VP OPEX, o CAPEX e o Custo Total tanto da "Estratégia E+B" como da Estratégia F.

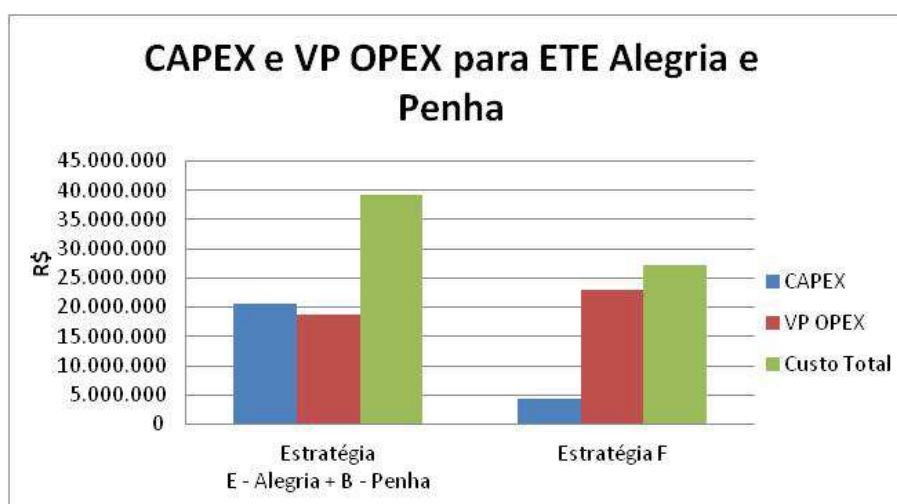


Figura 48: CAPEX e VP OPEX para ETE Alegria e Penha

Para a "Estratégia E+B", é necessária a instalação de uma unidade de Secagem Térmica na ETE Penha e a instalação de unidade CEC na ETE Alegria de 1.000 kW de potência. Já na Estratégia F, prevê-se a instalação de unidade CEC na ETE Penha com 500 kW de potência. Observa-se que o CAPEX necessário para a implementação da "Estratégia E+B" é muito superior se comparado ao da Estratégia F. **Nota-se, então, que, apesar do valor presente do OPEX (VP OPEX) da Estratégia E+B ser inferior ao da Estratégia F, essa última é a que resulta no menor Custo Total devido ao seu baixo CAPEX.**

5.6 Discussão dos resultados referentes à aplicação das Estratégias G, H e I nas ETES Pavuna e Sarapui

No caso das ETES Pavuna e Sarapui a estabilização do lodo bruto ocorre por meio da adição de cal após a etapa de desagamento que é realizada por meio de centrífugas de desidratação. A técnica de adição de cal, além de promover a estabilização do lodo através da

elevação da alcalinidade do meio e inibição da atividade microbiana, aumenta o teor de sólidos do lodo devido ao simples acréscimo de massa seca (cal).

Apesar da secagem térmica ser uma operação que visa a remoção da umidade do lodo em função da elevação da temperatura, ela também promove não somente a eliminação de organismos indicadores de contaminação fecal e eventual contaminação patogênica, bem como a eliminação de organismos com potencial de degradação da matéria orgânica, eventual putrefação, geração de maus odores e atração de vetores. Neste sentido, a unidade de secagem térmica é também uma unidade capaz de estabilizar o lodo e promover sua desinfecção.

Diferentemente das discussões relativas às Estratégias de A a F aplicadas para as ETEs Alegria, ETIG e Penha, a aplicação das Estratégias G, H e I do MGL para o caso das ETEs Pavuna e Sarapui objetiva avaliar técnica e economicamente a aplicabilidade da secagem térmica do lodo quando estabilizado quimicamente. Neste contexto, as Estratégias consistem em:

- d) Estratégia G: Processamento exclusivo de estabilização alcalina
- e) Estratégia H: Processamento combinado da estabilização alcalina e a secagem térmica
- f) Estratégia I: Processamento exclusivo da secagem térmica

Cabe ressaltar, que para os casos das ETEs Pavuna e Sarapui não caberá a valoração do CAPEX, uma vez, que as mesmas já são dotadas de todas as unidades requeridas para o desenvolvimento das respectivas Estratégias do MGL.

Neste contexto, a avaliação econômica que promove o MGL passa exclusivamente pelo equilíbrio entre os custos específicos das técnicas de estabilização e a otimização dos custos que variam de acordo com o grau de desidratação, sendo estes: custos referentes à massa de cal empregada e/ou custos referentes à energia requerida pelo Secador Térmico, OPEX específico do Secador Térmico (excluindo a energia), custos referentes ao transporte do lodo ao aterro sanitário e custos referentes à disposição do lodo no aterro sanitário. As Figuras Figura 49 e Figura 50 reapresentam, desta vez de forma gráfica, os resultados da otimização das Estratégias de G a I do MGL que constam nas Tabelas 26 e 27.

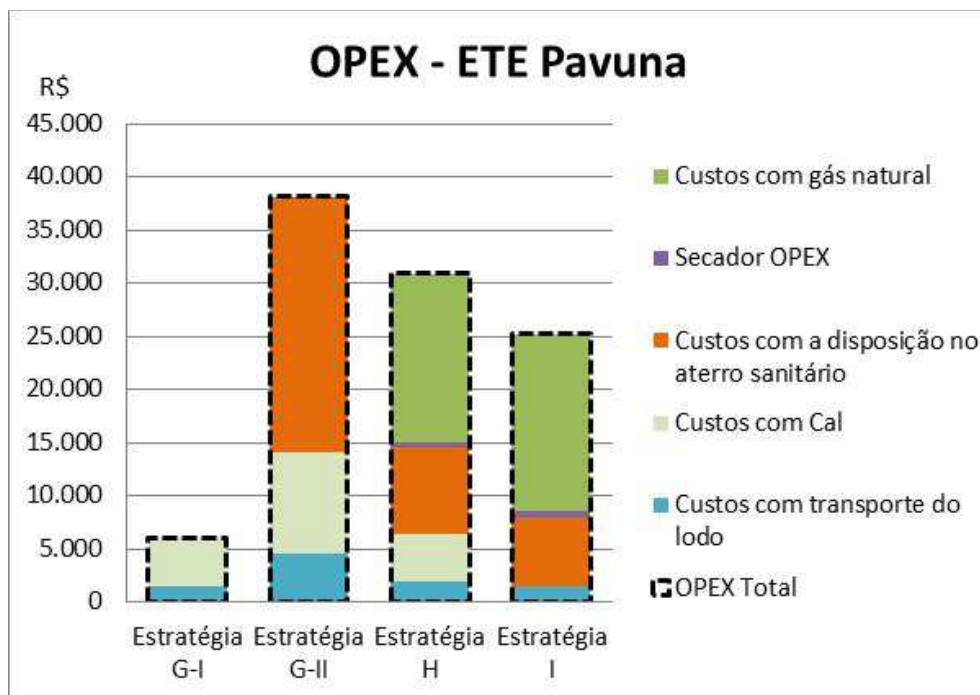


Figura 49: OPEX – ETE Pavuna

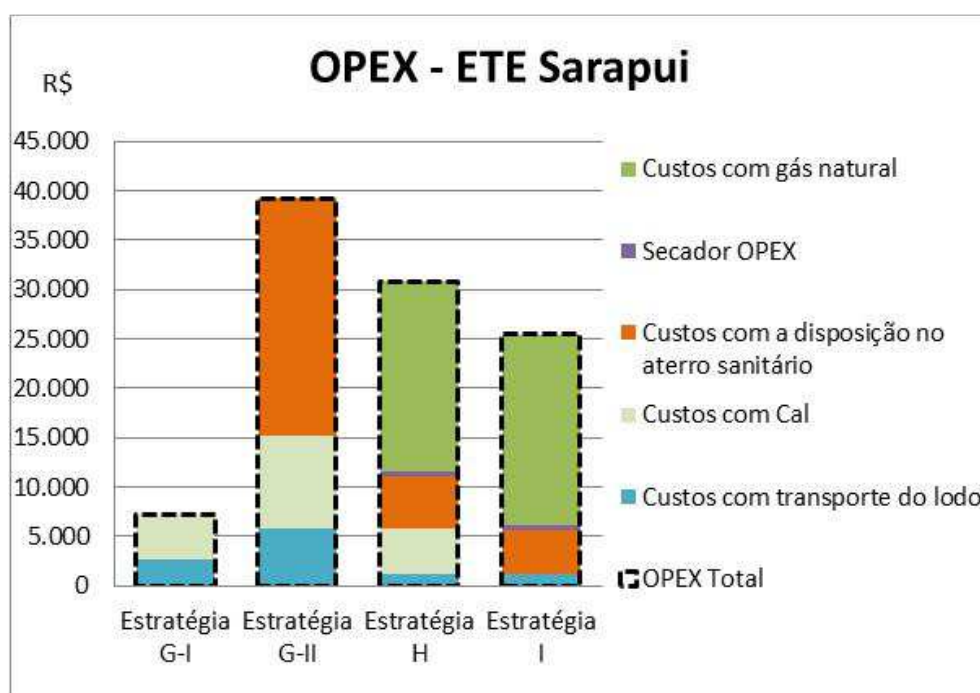


Figura 50: OPEX – ETE Sarapui

Estratégia G

Comparando os custos relativos às Estratégias G-I (disposição no Aterro de Gericinó) e G-II (disposição no Aterro de Seropédica) e de acordo com o que preconiza a Estratégia G (estabilização alcalina) observa-se, que assim como discutido para as ETEs Alegria, ETIG e

Penha, o encerramento do aterro de Gericinó irá representar um expressivo aumento do OPEX total de ambas as ETEs.

Ainda comparando as variantes I e II da Estratégia G observa-se que os custos com cal aumentam na Estratégia G-II. Isto porque, nesta Estratégia, a otimização do OPEX total resulta na indicação da relação ótima entre SST e massa de cal requerida. Neste caso, tem-se como resultado a elevação da massa de cal até atingir o teor de sólidos (da mistura lodo + cal) de 30%, o que representa significativa redução do custo da disposição do lodo no aterro sanitário. Observa-se que esta redução assume valor maior que aquele correspondente à elevação dos custos devidos ao consumo de cal e ao transporte de maiores quantidade de massa úmida e de volume de lodo. O gráfico da Figura 51 mostra variação dos custos da adição de cal, do transporte e da disposição do lodo no aterro sanitário de Seropédica (Estratégia G-II) em função do teor de sólidos, usando como exemplo a ETE Pavuna.

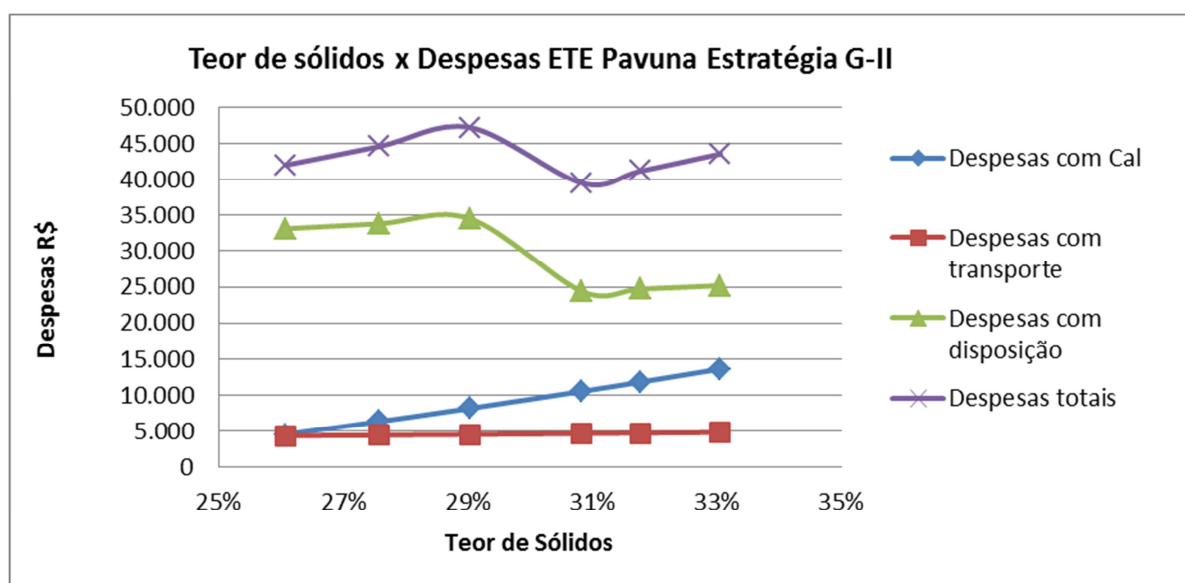


Figura 51: Teor de Sólidos x Despesas ETE Pavuna – Estratégia G-II

Estratégia I

A Estratégia I propõe a utilização do Secador Térmico para os processos de estabilização e secagem do lodo. No caso desta Estratégia tem-se a redução de custos de transporte e de disposição final devido à redução da massa úmida e do volume de lodo e à redução do custo da disposição do lodo devido ao menor custo unitário e específico de disposição final do lodo no Aterro Sanitário de Seropédica com teor de sólidos de 60% (R\$ 110,00/t). Por outro lado, nesta Estratégia tem-se, conseqüentemente, o incremento de custo devido ao atendimento das

necessidades energéticas do Secador Térmico, no caso, suprida pelo uso da energia advinda do gás natural.

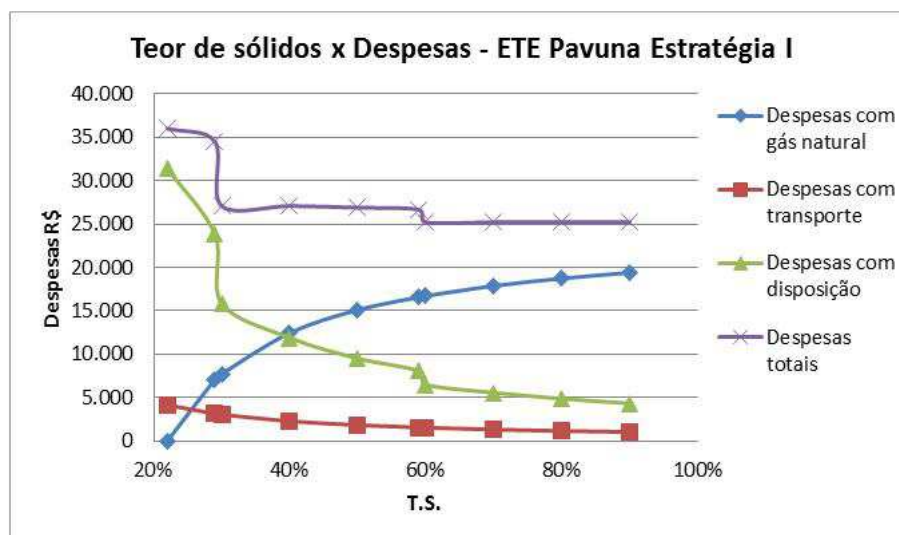


Figura 52: Teor de Sólidos x Despesas – ETE Pavuna Estratégia I

O gráfico da Figura 52 apresenta os custos que compõem o OPEX da Estratégia I para as duas ETEs estudadas. Observa-se também a redução de custos de transporte e disposição final do lodo devida ao aumento do teor de sólidos que por sua vez é parcialmente compensada pela contínua elevação do custo da energia advinda do gás natural, o que repercute sobre a variação do OPEX total.

Estratégias H

Entende-se que o que a Estratégia H propõe não encontra justificativa técnica seja sob o ponto de vista teórico, seja conceitual do emprego e da finalidade das operações de estabilização alcalina e de secagem térmica. Como anteriormente mencionado, o lodo seco termicamente é também estabilizado, não se justificando o emprego da estabilização alcalina prévia à unidade de secagem térmica. Ainda assim, apenas a título de contabilizar o OPEX associado ao emprego de ambos os processos e de forma sucessiva, os gráficos da Figuras Figura 49 e Figura 50 ilustram que o OPEX total desta Estratégia H (estabilização alcalina e secagem térmica do lodo a 60% de T.S.) é superior ao OPEX total da Estratégia I (somente secagem térmica do lodo a 60% de T.S.), em 22% para ambas as ETEs.

Os resultados da avaliação econômica corroboram o entendimento prévio que o emprego da estabilização alcalina combinada com a secagem térmica além de não se

justificar tecnicamente, apresenta OPEX total 22% superior ao OPEX total relativo ao emprego exclusivo da etapa de secagem térmica.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo técnico-econômico, em planilha digital parametrizada, aplicado ao gerenciamento do lodo de estações de tratamento de esgotos, que foi capaz de otimizar os balanços de massa e energia decorrentes das etapas de estabilização, desaguamento, secagem e destinação final.

Este modelo foi aplicado para as cinco principais Estações de Tratamento de Esgotos da bacia da Baía de Guanabara sob a operação e manutenção da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro, CEDAE, a relembrar: Alegria (5.000 l/s), Penha (1.086 l/s), Ilha do Governador (525 l/s), Pavuna (1.500 l/s) e Sarapuí (1.500 l/s).

Após a análise dos resultados do MGL, com relação às Estratégias de A a E, foi possível concluir que:

- A Estratégia E (onde o aproveitamento do biogás é em parte utilizado como combustível para a unidade de cogeração de energia elétrica e térmica e a parte remanescente do biogás e a energia térmica oriunda da cogeração são utilizadas como combustível para a unidade de secagem térmica) é aquela que, sob o ponto de vista energético, apresenta a maior eficiência, capaz de gerar energia elétrica e não requerer complementação de energia externa a ETE (gás natural).
- Sob a ótica econômica e da capacidade de investimento de capital, considerando exclusivamente os resultados do CAPEX requerido pelas Estratégias avaliadas (excluída a Estratégia A-II, onde o biogás não é aproveitado e o lodo é apenas desaguado a 22% de T.S.), é a Estratégia B (onde o biogás é em sua totalidade aproveitado como fonte energética para o secador térmico e o lodo seco a 90% de T.S.) que em todos os casos menor CAPEX requer.
- Sob o ponto de vista do menor Custo Total em valor presente (CAPEX + VP OPEX), considerando o horizonte de projeto de 20 anos, para as ETEs ETIG e Penha, a Estratégia B (onde o biogás é em sua totalidade aproveitado como fonte energética para o secador térmico e o lodo seco a 90% de T.S.) foi que, dentre todas as demais, apresentou o menor Custo Total. No caso da ETE Alegria, a melhor Estratégia foi a E (onde o aproveitamento do biogás é em parte utilizado como combustível para a unidade de cogeração de energia elétrica e térmica e a parte remanescente do biogás e a energia térmica oriunda da cogeração são utilizadas como combustível para a unidade de secagem térmica). Porém, devido à equivalência de custos entre as Estratégias E e B para todas as ETEs, a indicação de qual seja a melhor alternativa deve

também contemplar outros aspectos de natureza técnica, além dos econômicos, como, por exemplo, dificuldades operacionais das unidades CEC, a necessidade de equipe especializada e eventuais impactos ambientais.

Comparando os resultados da Estratégia F (lodo centrifugado da ETE Penha sendo seco termicamente na ETE Alegria) com a soma dos resultados específicos da Estratégia E para a ETE Alegria e específicos da Estratégia B para a ETE Penha ("Estratégia E+B"), conclui-se que:

- Apesar da energia contida no biogás ser a mesma para os dois casos, foi na "Estratégia E+B" que a maior quantidade de energia elétrica foi gerada, sem que fosse necessária uma complementação energética externa às ETEs (gás natural). Pode-se, então, considerá-la a mais eficiente sob o ponto de vista energético;
- A "Estratégia E+B" foi a que resultou no menor OPEX Total;
- Apesar do OPEX total da "Estratégia E+B" ser inferior ao da Estratégia F, essa última é a que resulta no menor Custo Total devido ao seu menor CAPEX.

Sobre as Estratégias G-II (Disposição do lodo estabilizado quimicamente com adição de cal para atingir T.S. de 30%), H (Disposição do lodo estabilizado quimicamente e seco termicamente – 60% de T.S.) e I (Disposição do lodo apenas seco termicamente – 60% de T.S.), por sua vez, conclui-se que:

- Devido ao menor custo unitário de disposição no aterro sanitário, a elevação da massa de cal para atingir o teor de sólidos de 30%, apesar de implicar em maior massa úmida para transporte e disposição no aterro sanitário, resulta em significativa redução do OPEX total;
- Embora incorpore custo associado à energia advinda do gás natural, OPEX total da Estratégia I é equivalente a aproximadamente 50% do OPEX total da Estratégia G-II, em função das reduções de custo devidas ao transporte e disposição de menor massa úmida e volume de lodo, bem como ao não uso de cal;
- Os resultados da avaliação econômica corroboram o entendimento prévio que o emprego da estabilização alcalina combinada com a secagem térmica (Estratégia H) além de não se justificar tecnicamente, apresenta OPEX total 22% superior ao OPEX total relativo ao emprego exclusivo da etapa de secagem térmica.

É importante destacar que este trabalho utilizou como parâmetros de custos de aquisição, implantação, operação e manutenção dos equipamentos de geração de energia elétrica e térmica (CEC) os dados fornecidos por EPA (2011). Esta fonte contempla indicadores de custos do mercado dos Estados Unidos da América no ano 2010. Recomenda-se a realização de uma estimativa orçamentária para o mercado Brasileiro de forma a aproximar os estudos da realidade local.

O modelo de avaliação econômica contido no MGL não incorpora valores ambientais de mais difícil mensuração, mas não menos importantes. Neste sentido, entende-se que o MGL deva ainda ser associado a metodologia de Análise de Ciclo de Vida no sentido da otimização dos balanços de massa e energia decorrentes das etapas de estabilização, desaguamento, secagem e destinação final do lodo de ETEs.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 10004, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

ABNT NBR 12209, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011. 53p.

ABNT NBR 13896, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12p.

ABNT NBR 8419, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos 1992. 7p.

ANDREOLI, Cleverson. V.; von SPERLING, Marcos.; FERNANDES, Fernando. 'Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final'. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 484p. 2001.

ANDREOLI, Cleverson V. (coordenador). Alternativas de uso de resíduos do saneamento. ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 417 p. 2006.

APPELS, Lise; BAEYENS, Jan; DEGREVE, Jan; DEWIL, Raf. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Energy and Combustion Science*, v.34, p. 755–781, 2008.

AUBAIN, Philippe; GAZZO, Alexis; LE MOUX, Jan; MUGNIER, Eric; BRUNET, Hubert; LANDREA, Benoît. Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge - Synthesis report. European Commission DG Environment - B/2. 25 p. 2002. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/synthesisreport020222.pdf> . Acesso em Jan 2014.

BASRAWI, Mohamad Firdaus Bin; YAMADA, Takanobu; NAKANISHI, Kimio; KATSUMATA, Hideaki. Analysis of the performances of biogas-fuelled micro gas turbine cogeneration systems (MGT-CGSs) in middle- and small-scale sewage treatment plants: Comparison of performances and optimization of MGTs with various electrical power outputs. *Energy*, v.38, p. 291–304, 2012.

BOND, Tom; TEMPLETON, Michael R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, v.15, p. 347–354, 2011.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 8 dez. 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em 05 nov. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 05 nov. 2014.

BRUNO, Joan Carles; ORTEGA-LÓPEZ, Víctor; CORONAS, Alberto. Sludge: Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. *Applied Energy*, v.86, p.837-847, 2009.

CABIROL, N.; BARRAGÁN, E.J.; DURÁN, A.; NOYOLA, A. Effect of aluminium and sulphate on anaerobic digestion of sludge from wastewater enhanced primary treatment. *Water Science and Technology*, v.48, p. 235–240, 2005.

CHEN, G.; YUE, P.L.; MUJUMDAR, A.S. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. *Handbook of Industrial Drying*. 3ª ed., CRC Press. 1312 p., 2006.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores anaeróbios*. 2. ed., Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, Belo Horizonte, 380 p., 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. 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. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 30 ago. 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 380, de 31 de outubro de 2006. Retifica a Resolução CONAMA nº 375/06 – 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. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 7 nov. 2006. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2006_380.pdf. Acesso em 05 nov. 2006.

COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado)— Programa de Pós-Graduação em Energia - EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency, Catalog of CHP Technologies. Combined Heat and Power Partnership, 2008. Disponível em: <http://www.epa.gov/chp/>. Acesso em Jan 2014

EPA - U.S. Environmental Protection Agency, Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field. Combined Heat and Power Partnership, 2011. Disponível em: <http://www.epa.gov/chp/>. Acesso em Jan 2014

FERNANDES, Fernando (coordenador). Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 98 p. 1999.

FIGUEIREDO, Iene Christie. **Avaliação de Desempenho do Processo CEPT (Chemically Enhanced Primary Treatment) no Tratamento Primário de Esgotos Domésticos**. 2009. 125 f. Tese (doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Vérdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para a geração de energia elétrica - Estudo de Caso**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado)— Programa de Pós-Graduação em Energia - EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. 'Tratamento de Esgotos Domésticos'. 6ª Edição. 1050 p., Rio de Janeiro, 2011.

KELESSIDIS, Alexandros; STASINAKIS, Athanasios S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, v.32, p. 1186–1195, 2012.

LEBLANC, Ronald J.; MATTHEWS, Peter.; RICHARD, Roland P. *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome uses of a Global Resource*. United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT) ISBN: 978-92-1-132009-1. 2008

LEDERER, Jakob; RECHBERGER, Helmut. Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options. *Waste Management*, v.30, p. 1043–1056, 2010.

LIGHT - Agência Virtual da Light. Disponível em: <https://agenciavirtual.light.com.br/gcav/tributos.do>. Acesso em Set 2014.

LIMA, Felipe Palma. **Energia no tratamento de esgoto: Análise tecnológica e institucional para a conservação de energia e uso do biogás**. 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado)—Programa de Pós-Graduação em Energia - EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (doutorado), Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

METCALF E EDDY, *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4. ed., Revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. Published by Mc Graw Hill, USA, 1819 p., 2003.

PEDROZA, Marcelo Mendes. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 2011. 210 f. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PÖSCHL, Martina; WARD, Shane; OWENDE, Philip. Sludge: Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, v.87, p.3305-3321, 2010.

PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. Laboratório de Hidrologia - COPPE/UFRJ R3-A Temas Técnicos Estratégicos, RT - 04 - Fontes Alternativas para o Abastecimento do Estado do Rio de Janeiro, com Ênfase na RMRJ. 2013. Disponível em: <http://www.hidro.ufrj.br/perhi/> Acesso em Set 2014.

RAHAMAN, MD. S.; MAVINIC D. S.; MEIKLEHAM A.; ELLIS N. 2014. Modeling phosphorus removal and recovery from anaerobic digester supernatant through struvite crystallization in a fluidized bed reactor. *Water Research*, v.51, p.1-10.

RIO DE JANEIRO (Estado) Secretaria de Estado de Fazenda. Resolução nº 2.656, de 8 de janeiro de 1996. Incorpora à legislação tributária do Estado os Convênios ICMS nºs 104/95,

105/95 e 107/95. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 10 jan. 1996. Disponível em: <http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/content/conn/UCMServer/path/Contribution%20Folders/site_fazenda/legislacao/tributaria/resolucao/1996/2656.html>. Acesso em 05 nov. 2014.

RIO DE JANEIRO (Estado) Secretaria de Estado de Fazenda. Resolução nº 2.709, de 2 de julho de 1996. Incorpora à legislação tributária do Estado o Convênio ICMS nº 44/96. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 3 jul. 1996. Disponível em: <http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/content/conn/UCMServer/path/Contribution%20Folders/site_fazenda/legislacao/tributaria/resolucao/1996/2709.html>. Acesso em 05 nov. 2014.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei nº 4.056, de 30 de dezembro de 2002. Autoriza o poder executivo a instituir no exercício de 2003, o fundo estadual de combate à pobreza e às desigualdades sociais, em obediência à emenda constitucional nacional nº 31, de 14/12/2000, que alterou o ato das disposições constitucionais transitórias, introduzindo o artigo 82 que cria o fundo estadual de combate e erradicação da pobreza. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 31 dez. 2002. Disponível em: <<http://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/90537/lei-4056-02>>. Acesso em 05 nov. 2014.

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei nº 4.485, de 28 de dezembro de 2004. Dispõe sobre isenção do ICMS nos casos em que especifica. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1º jan. 2005. Disponível em: <<http://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/88485/lei-4485-04>>. Acesso em 05 nov. 2014.

SALOMON, Karina Riberio. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (doutorado), Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SAMOLADA, M.C.; ZABANIOTOU, A.A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. Waste Management (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.003>. (in press)

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2012, SNSA/MCIDADES, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2014.

SPRENGER, Humberto Elias. **Viabilidade do uso de biogás de ETE para alimentação de células a combustível de ácido fosfórico**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado)— Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia - Instituto de Tecnologia para o

Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, 2009.

van LIER, Jules. Notas de aula do curso CTB3365x - Introduction to Water Treatment , Aula W6a - Thinckening. TUDelftx, 2013. Disponível em: www.edx.org. Acesso em Jan 2014.

VENKATESH , G.; RASHID, Abdi Elmi. Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). Energy, v.58, p. 220–235, 2013.

VON SPERLING, Marcos. 'Lodos Ativados'. 2ª Edição. 428 p., Belo Horizonte, 2002.

WERF-Water Environment Research Foundation. State of Science Report: Energy and Resource Recovery from Sludge, Project Number OWS03R072. 2008.

WERF- Water Environment Research Foundation, State of the Science on Biogas: Treatment, Co-generation, and Utilization in High Temperature Fuel Cells and Vehicle Fuel, Project Number OWSO10C10a, 2011.

WELLINGER, Margareta Persson and Arthur. Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid. IEA Bioenergy, 2006. Disponível em: http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Biogas_upgrading_and_utilisation_IEA_Bioenergy_Report.pdf. Acesso em Jan 2014.

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

8 APÊNDICE 01 - BALANÇO DE MASSA

8.1 Parâmetros de entrada

A Tabela 28 apresenta os parâmetros adotados para os cálculos das unidades de tratamento no balanço de massas, suas notações, faixa de valores e os valores adotados. Cabe ressaltar que foram utilizados dados de literatura para a realização dos balanços de massa.

Tabela 28: Parâmetros do balanço de massas e seus valores

Parâmetro	Notação	Unidade	Faixa de valores	Valor adotado	Fonte
Decantador Primário					
Remoção de DBO	$RDBO_{DP}$	%	25 a 30	30	Jordão 2011
Remoção de SST	$RSST_{DP}$	%	40 a 70	60	Jordão 2011
TS do lodo	TS_{DP}	%	2 a 6	3	Von Sperling 2002
SSV/SST	SSV_{DP}/SST_{DP}	-	0,75 a 0,80	0,75	Von Sperling 2002
Decantador Primário Quimicamente assistido					
Remoção de DBO	$RDBO_{DPQA}$	%	44 a 55	50	Jordão 2011
Remoção de SST	$RSST_{DPQA}$	%	70 a 85	75	Jordão 2011
TS do lodo	TS_{DPQA}	%	-	3	Jordão 2011
Relação SSV/SST	SSV_{DPQA}/SST_{DPQA}	-	-	0,75	Adotado
Dosagem de $FeCl_3$	d_{FeCl_3}	mg/l	-	70	Figueiredo 2009
Dosagem de polieletrólito aniônico	d_{PA}	mg/l	-	0,5	Jordão 2011
Fase Biológica – Lodos Ativados + Decantador Secundário					
Remoção de DBO	$RDBO_{FB}$	%	85 a 95	90	Jordão 2011
TS do lodo	TS_{FB}	%	0,6 a 1	0,8	Von Sperling 2002
SSV/SST	SSV_{FB}/SST_{FB}	-	0,75 a 0,80	0,77	Von Sperling 2002

Yobs	Y_{OBS}	-	0,4 a 0,8	0,6	Von Sperling 2002
Adensador Primário - Gravidade					
Captura de sólidos	CS_{AP}	%	85 a 92	90	Metcalf & Eddy 2003
TS do lodo	TS_{AP}	%	4 a 10	6	Metcalf & Eddy 2003
SSV/SST	SSV_{AP}/SST_{AP}	-	0,75 a 0,80	0,8	Von Sperling 2002
DBO sobrenadante	DBO_{APSo}	kg/m ³	0,1 a 0,4	0,25	Metcalf & Eddy 2003
Adensador Secundário - Centrífuga					
Captura de sólidos	CS_{AS}	%	90 a 98	95	Metcalf & Eddy 2003
TS do lodo	TS_{AS}	%	4 a 8	5	Metcalf & Eddy 2003
DBO Centrado	DBO_{cent}	kg/m ³	0,17 a 3	1	Metcalf & Eddy 2003
SSV/SST	SSV_{AS}/SST_{AS}	-	-	0,8	adotado
Consumo de polímero	C_{pol}	kg/t	-	4	Metcalf & Eddy 2003
Adensador Misto - Gravidade					
Captura de sólidos	CS_{AM}	%	80 a 90	85	Metcalf & Eddy 2003
TS do lodo	TS_{AM}	%	4 a 8	5	Jordão 2011
Relação SSV/SST	$\frac{SSV_{AM}}{SST_{AM}}$	-	0,75 a 0,80	0,80	Von Sperling 2002
DBO Sobrenadante	DBO_{AMSo}	kg/m ³	60 a 400	0,3	Metcalf & Eddy 2003
Digestor Anaeróbico + Tanque de lodo					
Destruição de SV	DSV	%	-	50	Jordão 2011
TS do lodo	TS_{Di}	%	3 a 6	5	Von Sperling 2002
DBO sobrenadante	DBO_{DiSo}	kg/m ³	0,5 a 5	1	Metcalf & Eddy 2003
SST Sobrenadante	SST_{DiSo}	kg/m ³	1 a 11,5	4,5	Metcalf & Eddy 2003

Produção de Biogás	P_{bio}	m ³ /kgSSV	0,75 a 1,12	0,95	Metcalf & Eddy 2003
Poder calorífico do Biogás	c_{bio}	MJ/m ³	-	23	Appels, Lise et al 2008
Desaguamento - Centrífuga					
Captura de sólidos	CS_{Ct}	%	85 a 98	92	Metcalf & Eddy 2003
TS do lodo	TS_{Ct}	%	10 a 35	22,5	Metcalf & Eddy 2003
DBO centrado	DBO_{CtC}	kg/m ³	0,1 a 2,0	1	Metcalf & Eddy 2003
Consumo de polímero	C_{pol}	kg/t	1 a 7,5	4	Metcalf & Eddy 2003

8.2 Equações

A Tabela 29 apresenta as equações adotadas para desenvolver o balanço de massas.

Tabela 29: Equações utilizadas para o Balanço de Massa

Nº	Parâmetro	Notação	Unidade	Equação	Estações	
Decantador primário						
Resultados - Sólido						
1	Vazão	Q_{DPS}	m ³ /dia	$Q_{DPS} = \frac{SST_{DPS}}{p \times \frac{TS_{DP}}{100}}$	Alegria, Ilha do Governador, Penha	
2	densidade	p_{DP}	kg/m ³	$p_{DP} = \left(\frac{TS_{DP}}{100}\right) \times 1300 + \left((1 - \frac{TS_{DP}}{100}) \times 1000\right)$		
3	SST	SST_{DPS}	kg/dia	$SST_{DPS} = SST - SST_{DPL}$		
4	SSV	SSV_{DPS}	kg/dia	$SSV_{DPS} = SSV - SSV_{DPL}$		
Resultados - Líquido						
5	Vazão	Q_{DPL}	m ³ /dia	$Q_{DPL} = Q - Q_{DPS}$		
6	DBO	DBO_{DPL}	kg/dia	$DBO_{DPL} = DBO \times \left(\frac{100 - RDBO_{DP}}{100}\right)$		
7	SST	SST_{DPL}	kg/dia	$SST_{DPL} = SST \times \left(\frac{100 - RSST_{DP}}{100}\right)$		
8	SSV	SSV_{DPL}	kg/dia	$SSV_{DPL} = SST_{DPL} \times \frac{SSV_{DP}}{SST_{DP}}$		
Decantador primário quimicamente assistido						
Resultados - Sólido						
9	Vazão	Q_{DPQAS}	m ³ /dia	$Q_{DPQAS} = \frac{SST_{DPQAS} + M_{Fe(OH)_3}}{\frac{p_{DPQA}}{100 \times TS_{DPQA}}}$	Pavuna, Sarapuí	

10	densidade	p_{DPQA}	kg/m ³	$p_{DPQA} = \left(\frac{TS_{DPQA}}{100} \right) \times 1300 + \left(\left(1 - \frac{TS_{DPQA}}{100} \right) \times 1000 \right)$	
11	SST	SST_{DPQAS}	kg/dia	$SST_{DPQAS} = SST - SST_{DPL}$	
12	SSV	SSV_{DPQAS}	kg/dia	$SSV_{DPQAS} = SST_{DPQAS} \times \frac{SSV_{DPQA}}{SST_{DPQA}}$	
13	Massa consumida de FeCl ₃	M_{FeCl_3}	kg/dia	$M_{FeCl_3} = \frac{Q \times d_{FeCl_3}}{1000}$	
14	Massa de Fe(OH) ₃ formada	$M_{Fe(OH)_3}$	kg/dia	$M_{Fe(OH)_3} = M_{FeCl_3} \times \left(\frac{2 \times 106,9}{2 \times 162,9} \right)$	
Resultados - Líquido					
15	Vazão	Q_{DPQAL}	m ³ /dia	$Q_{DPQAL} = Q - Q_{DPQAS}$	
16	DBO	DBO_{DPQAL}	kg/dia	$DBO_{DPQAL} = DBO \times \left(\frac{100 - RDBO_{DPQA}}{100} \right)$	
17	SST	SST_{DPQAL}	kg/dia	$SST_{DPQAL} = SST \times \left(\frac{100 - RSST_{DPQA}}{100} \right)$	
18	SSV	SSV_{DPQAL}	kg/dia	$SSV_{DPQAL} = SST_{DPQAL} \times \frac{SSV_{DPQA}}{SST_{DPQA}}$	
Fase biológica (tanque aeróbio + decantador secundário)					
Resultados - Sólido					
19	Vazão	Q_{FBS}	m ³ /dia	$Q_{FBS} = \frac{SST_{FBS}}{p_{FBS} \times \frac{TS_{FBS}}{100}}$	Todas
20	Densidade	p_{FBS}	kg/m ³	$p_{FBS} = \left(\frac{TS_{FBS}}{100} \right) \times 1300 + \left(\left(1 - \frac{TS_{FBS}}{100} \right) \times 1000 \right)$	Todas
21	SST	SST_{FBS}	kg/dia	$SST_{FBS} = Y_{obs} \times DBO_{DPL} \times RDBO_{FB}$	Alegria, Ilha do Governador, Penha
				$SST_{FBS} = Y_{obs} \times DBO_{DPQAL} \times RDBO_{FB}$	Pavuna e Sarapuí
22	SSV	SSV_{FBS}	kg/dia	$SSV_{FBS} = SST_{FBS} \times \frac{SSV_{FB}}{SST_{FB}}$	Todas
Resultados - Líquido					
23	Vazão	Q_{FBL}	m ³ /dia	$Q_{FBL} = Q_{DPL} - Q_{FBS}$	Alegria, Ilha do Governador, Penha
				$Q_{FBL} = Q_{DPQAL} - Q_{FBS}$	Pavuna e Sarapuí
24	DBO	DBO_{FBL}	kg/dia	$DBO_{FBL} = DBO_{DPL} - \left(DBO_{DPL} \times \left(\frac{RDBO_{FB}}{100} \right) \right)$	Alegria, Ilha do Governador, Penha

				$DBO_{FBL} = DBO_{DPQAL} - (DBO_{DPQAL} \times \left(\frac{RDBO_{FB}}{100}\right))$	Pavuna e Sarapuí	
25	SST	SST_{FBL}	kg/dia	$SST_{FBL} = SST_{DPL} - SST_{FBS}$	Alegria, Ilha do Governador, Penha	
				$SST_{FBL} = SST_{DPQAL} - SST_{FBS}$	Pavuna e Sarapuí	
26	SSV	SSV_{FBL}	kg/dia	$SSV_{FBL} = SST_{FBL} \times \frac{SSV_{FB}}{SST_{FB}}$	Todas	
Resultados - Sólido						
27	Vazão	Q_{APS}	m³/dia	$Q_{APS} = \frac{SST_{APS}}{p_{AP} \times \frac{TS_{AP}}{100}}$	Alegria	
28	densidade	p_{AP}	kg/m³	$p_{AP} = \left(\frac{TS_{AP}}{100}\right) \times 1300 + \left(\left(1 - \frac{TS_{AP}}{100}\right) \times 1000\right)$		
29	SST	SST_{APS}	kg/dia	$SST_{APS} = SST_{DPS} \times \frac{CS_{AP}}{100}$		
30	SSV	SSV_{APS}	kg/dia	$SSV_{APS} = SST_{APS} \times \frac{SSV_{AP}}{SST_{AP}}$		
Resultados - Líquido						
31	Vazão	Q_{APL}	m³/dia	$Q_{APL} = Q_{DPS} - Q_{APS}$		
32	DBO	DBO_{APL}	kg/dia	$DBO_{APL} = Q_{APL} \times DBO_{APSO}$		
33	SST	SST_{APL}	kg/dia	$SST_{APL} = SST_{DPS} - SST_{APS}$		
34	SSV	SSV_{APL}	kg/dia	$SSV_{APL} = SST_{APL} \times \frac{SSV_{AP}}{SST_{AP}}$		
Adensador secundário						
35	Massa de polímero	M_{pol}	kg/dia	$M_{pol} = SST_{FBS} \times \frac{C_{pol}}{1000}$	Alegria, Ilha do Governador, Pavuna e Sarapuí	
Resultados - Sólido						
36	Vazão	Q_{ASS}	m³/dia	$Q_{ASS} = \frac{SST_{ASS}}{p_{AS} \times \frac{TS_{AS}}{100}}$		
37	densidade	p_{AS}	kg/m³	$p_{AS} = \left(\frac{TS_{AS}}{100}\right) \times 1300 + \left(\left(1 - \frac{TS_{AS}}{100}\right) \times 1000\right)$		
38	SST	SST_{ASS}	kg/dia	$SST_{ASS} = (SST_{FBS} + M_{pol}) \times \frac{CS_{AS}}{100}$		
39	SSV	SSV_{ASS}	kg/dia	$SSV_{ASS} = SST_{ASS} \times \frac{SSV_{AS}}{SST_{AS}}$		
Resultados - Líquido						
40	Vazão	Q_{ASL}	m³/dia	$Q_{ASL} = Q_{FBS} - Q_{ASS}$		
41	DBO	DBO_{ASL}	kg/dia	$DBO_{ASL} = Q_{ASL} \times DBO_{cent}$		
42	SST	SST_{ASL}	kg/dia	$SST_{ASL} = SST_{FBS} + M_{pol} - SST_{ASS}$		

43	SSV	SSV_{ASL}	kg/dia	$SSV_{ASL} = SST_{ASL} \times \frac{SSV_{AS}}{SST_{AS}}$		
Adensador misto						
Resultados - Sólido						
44	Vazão	Q_{AMS}	m ³ /dia	$Q_{AMS} = \frac{SST_{AMS}}{p_{AM} \times \frac{TS_{AM}}{100}}$	Penha	
45	densidade	p_{AM}	kg/m ³	$p_{AM} = \left(\frac{TS_{AM}}{100}\right) \times 1300 + \left(\left(1 - \frac{TS_{AM}}{100}\right) \times 1000\right)$		
46	SST	SST_{AMS}	kg/dia	$SST_{AMS} = (SST_{DPS} + SST_{FBS}) \times \frac{CS_{AM}}{100}$		
47	SSV	SSV_{AMS}	kg/dia	$SSV_{AMS} = SST_{AMS} \times \frac{SSV_{AM}}{SST_{AM}}$		
Resultados - Líquido						
48	Vazão	Q_{AML}	m ³ /dia	$Q_{AML} = Q_{DPS} + Q_{FBS} - Q_{AMS}$		
49	DBO	DBO_{AML}	kg/dia	$DBO_{AML} = Q_{AML} \times DBO_{AMS0}$		
50	SST	SST_{AML}	kg/dia	$SST_{AML} = SST_{DPS} + SST_{FBS} - SST_{AMS}$		
51	SSV	SSV_{AML}	kg/dia	$SSV_{AML} = SST_{AML} \times \frac{SSV_{AM}}{SST_{AM}}$		
Digestor + tanque de lodo						
Afluente						
52	Vazão	Q_{DiA}	m ³ /dia	$Q_{DiA} = Q_{APS} + Q_{ASS}$	Alegria	
				$Q_{DiA} = Q_{DPS} + Q_{ASS}$	Ilha do Governador	
				$Q_{DiA} = Q_{AMS}$	Penha	
53	SST	SST_{DiA}	kg/m ³	$SST_{DiA} = SST_{APS} + SST_{ASS}$	Alegria	
				$SST_{DiA} = SST_{DPS} + SST_{ASS}$	Ilha do Governador	
				$SST_{DiA} = SST_{AMS}$	Penha	
54	SSV	SSV_{DiA}	kg/m ³	$SSV_{DiA} = SSV_{APS} + SSV_{ASS}$	Alegria	
				$SSV_{DiA} = SSV_{DPS} + SSV_{ASS}$	Ilha do Governador	
				$SSV_{DiA} = SSV_{AMS}$	Penha	
55	SSF	SSF_{DiA}	kg/m ³	$SSF_{DiA} = SST_{DiA} - SSV_{DiA}$	Todas com digestão	
Resultados - Sólido						
56	Vazão	Q_{Dis}	m ³ /dia	$Q_{Dis} = \frac{SST_{Dis}}{p_{Di} \times \frac{TS_{Di}}{100}}$	Todas com digestão	
57	Densidade	p_{Di}	kg/m ³	$p_{Di} = \left(\frac{TS_{Di}}{100}\right) \times 1300 + \left(\left(1 - \frac{TS_{Di}}{100}\right) \times 1000\right)$		
58	SST	SST_{Dis}	kg/dia	$SST_{Dis} = SSV_{Dis} + SSF_{Dis}$		
59	SSV	SSV_{Dis}	kg/dia	$SSV_{Dis} = \frac{SSV_{DiA} \times DSV}{100}$		
Resultados - Líquido						
60	Vazão	Q_{DiL}	m ³ /dia	$Q_{DiL} = Q_{DiA} - Q_{Dis}$		

61	DBO	DBO_{DiL}	kg/dia	$DBO_{DiL} = Q_{DiL} \times DBO_{DiSo}$	
62	SST	SST_{DiL}	kg/dia	$SST_{DiL} = Q_{DiL} \times SST_{DiSo}$	
Resultados - Biogás					
63	vazão	Q_{bio}	m ³ /dia	$Q_{bio} = G_{bio} \times (SSV_{Dis} - SSV_{DiA})$	
64	Energia	E_{DiG}	MJ/dia	$E_{DiG} = Q_{bio} \times c_{bio}$	
65	Energia	E_{DiG}	kWh/dia	$E_{DiG}(kWh) = E_{bio}(MJ) \times 0,2778$	
Centrífuga					
66	Massa de polímero	M_{pol}	kg/dia	$M_{pol} = SST_{Dis} \times \frac{C_{pol}}{1000}$	Alegria, Ilha do Governador,
				$M_{pol} = (SST_{DPQAS} + SST_{ASS} + M_{Fe(OH)_3}) \times \frac{C_{pol}}{1000}$	Pavuna Sarapuí
Resultados - Sólido					
67	Vazão	Q_{cts}	m ³ /dia	$Q_{cts} = \frac{SST_{cts}}{p_{ct} \times \frac{TS_{cts}}{100}}$	Todas
68	SST	SST_{cts}	kg/dia	$SST_{cts} = (SST_{Dis} + M_{pol}) - SST_{ctl}$	Alegria, Ilha do Governador
				$SST_{cts} = (SST_{DPQAS} + SST_{ASS} + M_{Fe(OH)_3} + M_{pol}) - SST_{ctl}$	Pavuna Sarapuí
69	Densidade	p_{ct}	kg/m ³	$p_{ct} = \left(\frac{TS_{ct}}{100}\right) \times 1300 + \left((1 - \frac{TS_{ct}}{100}) \times 1000\right)$	Todas
70	Massa úmida	M_{cts}	kg/dia	$M_{cts} = Q_{cts} \times p_{ct}$	Todas
Resultados - Líquido					
71	Vazão	Q_{ctl}	m ³ /dia	$Q_{ctl} = Q_{Dis} - Q_{cts}$	Alegria, Ilha do Governador,
				$Q_{ctl} = Q_{DPQAS} + Q_{ASS} - Q_{cts}$	Pavuna, Sarapuí
72	DBO	DBO_{ctl}	kg/dia	$DBO_{ctl} = Q_{ctl} \times DBO_{cent}$	Todas
73	SST	SST_{ctl}	kg/dia	$SST_{ctl} = (SST_{Dis} + M_{pol}) \times \frac{100 - CS_{ct}}{1000}$	Alegria, Ilha do Governador, Penha
				$SST_{ctl} = (SST_{DPQAS} + SST_{ASS} + M_{Fe(OH)_3}) \times \frac{100 - CS_{ct}}{1000}$	Pavuna Sarapuí

8.3 Resultados

8.3.1 ETE Alegria

Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Rec. 1	Rec.2	Rec.3	Rec.4	Final
Dados de entrada							
Vazão	m ³ /dia	432.000,00	439.355,13	439.832,92	439.863,86	439.865,86	439.865,99
Diferença entre			7.355,13	477,79	30,93	2,00	0,13
DBO	kg/dia	108.000,00	114.308,73	114.704,02	114.729,34	114.730,97	114.731,08
Diferença entre			6.308,73	395,28	25,32	1,63	0,11
SST	kg/dia	127.058,82	137.076,89	137.758,34	137.803,03	137.805,93	137.806,12
SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
SSV	kg/dia	95.294,12	102.807,66	103.318,76	103.352,27	103.354,45	103.354,59
Decantador Primário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	30	30	30	30	30	30
Remoção de SST	%	60	60	60	60	60	60
TS do lodo	%	3	3	3	3	3	3
Relação SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Resultados - Sólido (lodo primário)							
Vazão	m ³ /dia	2.518,51	2.717,08	2.730,59	2.731,48	2.731,53	2.731,54
p	kg/m ³	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00
SST	kg/dia	76.235,29	82.246,13	82.655,00	82.681,82	82.683,56	82.683,67
SSV	kg/dia	57.176,47	61.684,60	61.991,25	62.011,36	62.012,67	62.012,75
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	429.481,49	436.638,05	437.102,33	437.132,38	437.134,32	437.134,45
DBO	kg/dia	75.600,00	80.016,11	80.292,81	80.310,54	80.311,68	80.311,76
SST	kg/dia	50.823,53	54.830,75	55.103,34	55.121,21	55.122,37	55.122,45
SSV	kg/dia	38.117,65	41.123,07	41.327,50	41.340,91	41.341,78	41.341,84
Fase Biológica: Tanque de Aeração + Decantador Secundário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	90	90	90	90	90	90
TS do lodo	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Relação SSV/SST	-	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Yobs	-	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Resultados - Sólido (lodo biológico)							
Vazão	m ³ /dia	5.090,78	5.388,16	5.406,79	5.407,98	5.408,06	5.408,06
p	kg/m ³	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40
SST	kg/dia	40.824,00	43.208,70	43.358,12	43.367,69	43.368,31	43.368,35
SSV	kg/dia	31.434,48	33.270,70	33.385,75	33.393,12	33.393,60	33.393,63
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	424.390,71	431.249,89	431.695,54	431.724,40	431.726,26	431.726,39
DBO	kg/dia	7.560,00	8.001,61	8.029,28	8.031,05	8.031,17	8.031,18
SST	kg/dia	9.999,53	11.622,05	11.745,22	11.753,52	11.754,06	11.754,10
SSV	kg/dia	7.699,64	8.948,98	9.043,82	9.050,21	9.050,63	9.050,66
Adensador Primário - Gravidade							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de Sólido	%	90	90	90	90	90	90
TS do lodo	%	6	6	6	6	6	6
Relação SSV/SST	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
DBO Sobrenadante	kg/m ³	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Resultados - Sólido (lodo primário adensado)							
Vazão	m ³ /dia	1.123,31	1.211,88	1.217,90	1.218,30	1.218,32	1.218,33
p	kg/m ³	1.018,00	1.018,00	1.018,00	1.018,00	1.018,00	1.018,00
SST	kg/dia	68.611,76	74.021,52	74.389,50	74.413,64	74.415,20	74.415,30
SSV	kg/dia	54.889,41	59.217,21	59.511,60	59.530,91	59.532,16	59.532,24
Resultados - Líquido (Sobrenadante)							
Vazão	m ³ /dia	1.395,20	1.505,21	1.512,69	1.513,18	1.513,21	1.513,21
DBO	kg/dia	348,80	376,30	378,17	378,29	378,30	378,30
SST	kg/dia	7.623,53	8.224,61	8.265,50	8.268,18	8.268,36	8.268,37
SSV	kg/dia	6.098,82	6.579,69	6.612,40	6.614,55	6.614,68	6.614,69

Adensador Secundário - Centrífuga							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de Sólido	%	95	95	95	95	95	95
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO Centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Relação SSV/SST	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	163,30	172,83	173,43	173,47	173,47	173,47
Resultados - Sólido (lodo biológico adensado)							
Vazão	m ³ /dia	767,25	812,07	814,88	815,06	815,07	815,07
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	38.937,93	41.212,46	41.354,97	41.364,10	41.364,69	41.364,73
SSV	kg/dia	31.150,34	32.969,97	33.083,98	33.091,28	33.091,75	33.091,78
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	4.323,53	4.576,09	4.591,91	4.592,93	4.592,99	4.593,00
DBO	kg/dia	4.323,53	4.576,09	4.591,91	4.592,93	4.592,99	4.593,00
SST	kg/dia	2.049,36	2.169,08	2.176,58	2.177,06	2.177,09	2.177,09
SSV	kg/dia	1.639,49	1.735,26	1.741,26	1.741,65	1.741,67	1.741,67
Digestor + Tanque de lodo							
Premissas da unidade de tratamento							
Destruição de SV	%	50	50	50	50	50	50
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO Sobrenadante	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
SST Sobrenadante	kg/m ³	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Produção de Biogás	m ³ /kgSSV	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Poder cal. do Biogás	MJ/m ³	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Afluente							
Vazão afluente	m ³ /dia	1.890,56	2.023,95	2.032,78	2.033,35	2.033,39	2.033,39
SST afluente	kg/m ³	107.549,70	115.233,98	115.744,48	115.777,74	115.779,90	115.780,04
SSV afluente	kg/m ³	86.039,76	92.187,18	92.595,58	92.622,19	92.623,92	92.624,03
SSF afluente	kg/m ³	21.509,94	23.046,80	23.148,90	23.155,55	23.155,98	23.156,01
Resultados - Sólido (lodo digerido)							
Vazão	m ³ /dia	1.271,52	1.362,37	1.368,41	1.368,80	1.368,83	1.368,83
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	64.529,82	69.140,39	69.446,69	69.466,64	69.467,94	69.468,02
SSV	kg/dia	43.019,88	46.093,59	46.297,79	46.311,10	46.311,96	46.312,01
SSF	kg/dia	21.509,94	23.046,80	23.148,90	23.155,55	23.155,98	23.156,01
Resultados - Líquido (Sobrenadante)							
Vazão	m ³ /dia	619,04	661,57	664,37	664,55	664,57	664,57
DBO	kg/dia	619,04	661,57	664,37	664,55	664,57	664,57
SST	kg/dia	2.785,66	2.977,08	2.989,67	2.990,49	2.990,54	2.990,55
Resultado - Biogás							
Vazão	m ³ /dia	40.868,88	43.788,91	43.982,90	43.995,54	43.996,36	43.996,41
Energia bruta contida no biogás produzido	MJ/dia	939.984,34	1.007.144,97	1.011.606,74	1.011.897,45	1.011.916,29	1.011.917,51
Energia bruta contida no biogás produzido	kWh/dia	261.127,65	279.784,87	281.024,35	281.105,11	281.110,34	281.110,68

Centrífuga Desaguamento							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de sólidos	%	92	92	92	92	92	92
TS do lodo	%	22	22	22	22	22	22
DBO Centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	258,12	276,56	277,79	277,87	277,87	277,87
Resultados - Sólido (lodo desaguado)							
Vazão	m ³ /dia	254,16	272,32	273,52	273,60	273,61	273,61
SST	kg/dia	59.604,90	63.863,59	64.146,52	64.164,95	64.166,14	64.166,22
p	kg/m ³	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00
Massa úmida	kg/dia	270.931,37	290.289,06	291.575,07	291.658,86	291.664,29	291.664,64
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	1.017,37	1.090,06	1.094,89	1.095,20	1.095,22	1.095,22
DBO	kg/dia	1.017,37	1.090,06	1.094,89	1.095,20	1.095,22	1.095,22
SST	kg/dia	5.183,03	5.553,36	5.577,96	5.579,56	5.579,66	5.579,67

8.3.2 ETE Ilha do Governador – ETIG

Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Rec. 1	Rec.2	Rec.3	Rec.4	Final
Dados de entrada							
Vazão	m ³ /dia	45.360,00	45.957,22	46.009,14	46.014,17	46.014,67	46.014,72
Diferença entre			597,22	51,92	5,03	0,51	0,05
DBO	kg/dia	8.799,84	9.397,06	9.448,98	9.454,01	9.454,51	9.454,56
Diferença entre			597,22	51,92	5,03	0,51	0,05
SST	kg/dia	10.352,75	11.676,18	11.819,43	11.834,31	11.835,84	11.835,99
SSV/SSS	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
SSV	kg/dia	7.764,56	8.757,14	8.864,57	8.875,73	8.876,88	8.876,99

Decantador Primário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	30	30	30	30	30	30
Remoção de SST	%	60	60	60	60	60	60
TS do lodo	%	3	3	3	3	3	3
Relação SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Resultados - Sólido (lodo primário)							
Vazão	m ³ /dia	205,21	231,44	234,28	234,57	234,61	234,61
p	kg/m ³	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00
SST	kg/dia	6.211,65	7.005,71	7.091,66	7.100,58	7.101,50	7.101,60
SSV	kg/dia	4.658,74	5.254,28	5.318,74	5.325,44	5.326,13	5.326,20
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	45.154,79	45.725,78	45.774,86	45.779,59	45.780,07	45.780,12
DBO	kg/dia	6.159,89	6.577,94	6.614,28	6.617,81	6.618,16	6.618,20
SST	kg/dia	4.141,10	4.670,47	4.727,77	4.733,72	4.734,33	4.734,40
SSV	kg/dia	3.105,83	3.502,85	3.545,83	3.550,29	3.550,75	3.550,80

Fase Biológica: Tanque de Aeração + Decantador Secundário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	90	90	90	90	90	90
TS do lodo	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Relação SSV/SST	-	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Yobs	-	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Resultados - Sólido (lodo biológico)							
Vazão	m ³ /dia	414,80	442,95	445,40	445,63	445,66	445,66
p	kg/m ³	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40
SST	kg/dia	3.326,34	3.552,09	3.571,71	3.573,61	3.573,81	3.573,83
SSV	kg/dia	2.561,28	2.735,11	2.750,22	2.751,68	2.751,83	2.751,85
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	44.739,99	45.282,83	45.329,46	45.333,96	45.334,41	45.334,46
DBO	kg/dia	615,99	657,79	661,43	661,78	661,82	661,82
SST	kg/dia	814,76	1.118,38	1.156,06	1.160,11	1.160,53	1.160,57
SSV	kg/dia	627,37	861,16	890,16	893,28	893,61	893,64

Adensador Secundário - Centrífuga							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de Sólido	%	95	95	95	95	95	95
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO Sobrenadante	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Relação SSV/SST	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	13,31	14,21	14,29	14,29	14,30	14,30
Resultados - Sólido (lodo secundário adensado)							
Vazão	m ³ /dia	62,52	66,76	67,13	67,16	67,17	67,17
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	3.172,66	3.387,98	3.406,70	3.408,51	3.408,70	3.408,71
SSV	kg/dia	2.538,13	2.710,38	2.725,36	2.726,81	2.726,96	2.726,97
Resultados - Líquido (Sobrenadante)							
Vazão	m ³ /dia	352,28	376,19	378,27	378,47	378,49	378,49
DBO	kg/dia	352,28	376,19	378,27	378,47	378,49	378,49
SST	kg/dia	166,98	178,31	179,30	179,40	179,41	179,41
SSV	kg/dia	133,59	142,65	143,44	143,52	143,52	143,52
Digestor + Tanque de lodo							
Premissas da unidade de tratamento							
Destruição de SV	%	50	50	50	50	50	50
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO Sobrenadante	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
SST Sobrenadante	kg/m ³	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Produção de Biogás	m ³ /kgSSV	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Poder cal. do Biogás	MJ/m ³	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
Afluente							
Vazão afluente	m ³ /dia	267,72	298,20	301,41	301,74	301,77	301,78
SST afluente	kg/m ³	9.384,31	10.393,69	10.498,36	10.509,10	10.510,20	10.510,31
SSV afluente	kg/m ³	7.196,87	7.964,67	8.044,10	8.052,25	8.053,08	8.053,17
SSF afluente	kg/m ³	2.187,45	2.429,02	2.454,25	2.456,85	2.457,11	2.457,14
Resultados - Sólido (lodo digerido)							
Vazão	m ³ /dia	114,01	126,33	127,61	127,74	127,76	127,76
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	5.785,88	6.411,36	6.476,31	6.482,97	6.483,66	6.483,73
SSV	kg/dia	3.598,43	3.982,33	4.022,05	4.026,12	4.026,54	4.026,58
SSF	kg/dia	2.187,45	2.429,02	2.454,25	2.456,85	2.457,11	2.457,14
Resultados - Líquido (Sobrenadante)							
Vazão	m ³ /dia	153,72	171,87	173,80	173,99	174,01	174,02
DBO	kg/dia	153,72	171,87	173,80	173,99	174,01	174,02
SST	kg/dia	691,72	773,40	782,08	782,98	783,07	783,08
Resultado - Biogás							
Vazão	m ³ /dia	3.418,51	3.783,22	3.820,95	3.824,82	3.825,21	3.825,26
Energia bruta contida no biogás produzido	MJ/dia	78.625,79	87.013,97	87.881,82	87.970,83	87.979,93	87.980,87
Energia bruta contida no biogás produzido	kWh/dia	21.842,25	24.172,48	24.413,57	24.438,30	24.440,83	24.441,08

Centrífuga Desaguamento							
Premissas da unidade de tratamento							
TS do lodo	%	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
DBO Centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Captura de sólidos	%	92	92	92	92	92	92
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	23,14	25,65	25,91	25,93	25,93	25,93
Resultados - Sólido (lodo desaguado)							
Vazão	m ³ /dia	22,79	25,25	25,51	25,53	25,54	25,54
SST	kg/dia	5.344,30	5.922,04	5.982,03	5.988,19	5.988,82	5.988,89
p	kg/m ³	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00
Massa úmida	kg/dia	24.292,28	26.918,37	27.191,06	27.219,06	27.221,93	27.222,22
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	91,22	101,08	102,10	102,21	102,22	102,22
DBO	kg/dia	91,22	101,08	102,10	102,21	102,22	102,22
SST	kg/dia	464,72	514,96	520,18	520,71	520,77	520,77

8.3.3 ETE Penha

Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Rec. 1	Rec.2	Rec.3	Rec.4	Final
Dados de entrada							
Vazão	m ³ /dia	93.830,40	95.040,52	95.087,60	95.089,85	95.089,96	95.089,96
Diferença entre iterações			1.210,12	47,07	2,25	0,11	0,01
DBO	kg/dia	18.484,59	18.975,56	18.996,43	18.997,45	18.997,50	18.997,51
Diferença entre iterações			490,97	20,87	1,02	0,05	0,00
SST	kg/dia	18.953,74	20.259,30	20.328,20	20.331,70	20.331,88	20.331,88
SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
SSV	kg/dia	14.215,31	15.194,47	15.246,15	15.248,77	15.248,91	15.248,91

Decantador Primário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	30	30	30	30	30	30
Remoção de SST	%	60	60	60	60	60	60
TS do lodo	%	3	3	3	3	3	3
Relação SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Resultados - Sólido (lodo primário)							
Vazão	m ³ /dia	375,69	401,57	402,94	403,01	403,01	403,01
p	kg/m ³	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00
SST	kg/dia	11.372,24	12.155,58	12.196,92	12.199,02	12.199,13	12.199,13
SSV	kg/dia	8.529,18	9.116,68	9.147,69	9.149,26	9.149,34	9.149,35
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	93.454,71	94.638,95	94.684,66	94.686,84	94.686,95	94.686,95
DBO	kg/dia	12.939,21	13.282,89	13.297,50	13.298,22	13.298,25	13.298,25
SST	kg/dia	7.581,50	8.103,72	8.131,28	8.132,68	8.132,75	8.132,75
SSV	kg/dia	5.686,12	6.077,79	6.098,46	6.099,51	6.099,56	6.099,57

Fase Biológica: Tanque de Aeração + Decantador Secundário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	90	90	90	90	90	90
TS do lodo	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Relação SSV/SST	-	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Yobs	-	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Resultados - Sólido (lodo biológico)							
Vazão	m ³ /dia	871,31	894,45	895,43	895,48	895,48	895,48
p	kg/m ³	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40
SST	kg/dia	6.987,17	7.172,76	7.180,65	7.181,04	7.181,06	7.181,06
SSV	kg/dia	5.380,12	5.523,03	5.529,10	5.529,40	5.529,41	5.529,41
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	92.583,40	93.744,50	93.789,23	93.791,36	93.791,47	93.791,47
DBO	kg/dia	1.293,92	1.328,29	1.329,75	1.329,82	1.329,83	1.329,83
SST	kg/dia	594,32	930,96	950,63	951,64	951,69	951,70
SSV	kg/dia	457,63	716,84	731,98	732,77	732,80	732,81
Adensador Misto - Gravidade							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de Sólido	%	85	85	85	85	85	85
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
Relação SSV/SST	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
DBO Sobrenadante	kg/m ³	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Resultados - Sólido (lodo misto adensado)							
Vazão	m ³ /dia	307,50	323,73	324,55	324,59	324,59	324,59
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	15.605,51	16.429,09	16.470,94	16.473,05	16.473,15	16.473,16
SSV	kg/dia	12.484,40	13.143,27	13.176,75	13.178,44	13.178,52	13.178,53
Resultados - Líquido (Sobrenadante)							
Vazão	m ³ /dia	939,50	972,29	973,82	973,90	973,90	973,90
DBO	kg/dia	281,85	291,69	292,15	292,17	292,17	292,17
SST	kg/dia	2.753,91	2.899,25	2.906,64	2.907,01	2.907,03	2.907,03
SSV	kg/dia	2.203,13	2.319,40	2.325,31	2.325,61	2.325,62	2.325,62
Digestor + Tanque de lodo							
Premissas da unidade de tratamento							
Destruição de SV	%	50	50	50	50	50	50
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO Sobrenadante	kg/m ³	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
SST Sobrenadante	kg/m ³	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Produção de Biogás	m ³ /kgSSV	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Poder cal. do Biogás	MJ/m ³	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Afluente							
Vazão afluente	m ³ /dia	307,50	323,73	324,55	324,59	324,59	324,59
SST afluente	kg/m ³	15.605,51	16.429,09	16.470,94	16.473,05	16.473,15	16.473,16
SSV afluente	kg/m ³	12.484,40	13.143,27	13.176,75	13.178,44	13.178,52	13.178,53
SSF afluente	kg/m ³	3.121,10	3.285,82	3.294,19	3.294,61	3.294,63	3.294,63
Resultados - Sólido (lodo digerido)							
Vazão	m ³ /dia	184,50	194,24	194,73	194,76	194,76	194,76
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	9.363,30	9.857,45	9.882,56	9.883,83	9.883,89	9.883,90
SSV	kg/dia	6.242,20	6.571,64	6.588,37	6.589,22	6.589,26	6.589,26
SSF	kg/dia	3.121,10	3.285,82	3.294,19	3.294,61	3.294,63	3.294,63
Resultados - Líquido (Sobrenadante)							
Vazão	m ³ /dia	123,00	129,49	129,82	129,84	129,84	129,84
DBO	kg/dia	61,50	64,75	64,91	64,92	64,92	64,92
SST	kg/dia	553,50	582,71	584,19	584,27	584,27	584,27
Resultado - Biogás							
Vazão	m ³ /dia	5.930,09	6.243,05	6.258,96	6.259,76	6.259,80	6.259,80
Energia bruta contida no biogás produzido	MJ/dia	136.392,12	143.590,24	143.955,97	143.974,44	143.975,37	143.975,41
Energia bruta contida no biogás produzido	kWh/dia	37.889,73	39.889,37	39.990,97	39.996,10	39.996,36	39.996,37

Centrífuga Desaguamento							
Premissas da unidade de tratamento							
TS do lodo	%	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
DBO Centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Captura de sólidos	%	92	92	92	92	92	92
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	37,45	39,43	39,53	39,54	39,54	39,54
Resultados - Sólido (lodo desaguado)							
Vazão	m ³ /dia	36,88	38,82	38,92	38,93	38,93	38,93
SST	kg/dia	8.648,70	9.105,13	9.128,32	9.129,49	9.129,55	9.129,56
p	kg/m ³	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00
Massa úmida	kg/dia	39.312,26	41.386,97	41.492,38	41.497,70	41.497,97	41.497,99
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	147,62	155,41	155,81	155,83	155,83	155,83
DBO	kg/dia	147,62	155,41	155,81	155,83	155,83	155,83
SST	kg/dia	752,06	791,75	793,77	793,87	793,87	793,87

8.3.4 ETE Pavuna

Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Rec. 1	Rec.2	Rec.3	Rec.4	Final
Dados de entrada							
Vazão	m ³ /dia	129.600,00	131.663,78	131.818,44	131.830,47	131.831,41	131.831,49
Diferença entre iterações			2.063,78	154,66	12,03	0,94	0,07
DBO	kg/dia	32.400,00	34.463,78	34.618,44	34.630,47	34.631,41	34.631,49
Diferença entre iterações			2.063,78	154,66	12,03	0,94	0,07
SST	kg/dia	38.117,65	41.989,68	42.300,11	42.324,59	42.326,52	42.326,67
SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
SSV	kg/dia	28.588,24	31.492,26	31.725,09	31.743,44	31.744,89	31.745,00
Decantador Primário Quimicamente Assistido com Cloreto Férrico							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	50	50	50	50	50	50
Remoção de SST	%	75	75	75	75	75	75
TS do lodo	%	3	3	3	3	3	3
Relação SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Dosagem de FeCl ₃	mg/l	70	70	70	70	70	70
Dosagem de	mg/l	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Resultados - Sólido (lodo químico)							
Vazão	m ³ /dia	1.141,96	1.241,05	1.248,97	1.249,60	1.249,65	1.249,65
p	kg/m ³	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00
SST	kg/dia	28.588,24	31.492,26	31.725,09	31.743,44	31.744,89	31.745,00
SSV	kg/dia	21.441,18	23.619,20	23.793,81	23.807,58	23.808,67	23.808,75
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	128.458,04	130.422,73	130.569,46	130.580,87	130.581,76	130.581,83
DBO	kg/dia	16.200,00	17.231,89	17.309,22	17.315,23	17.315,71	17.315,74
SST	kg/dia	9.529,41	10.497,42	10.575,03	10.581,15	10.581,63	10.581,67
SSV	kg/dia	7.147,06	7.873,07	7.931,27	7.935,86	7.936,22	7.936,25
Resultados - produtos químicos							
FeCl ₃	kg/dia	9.072,00	9.216,46	9.227,29	9.228,13	9.228,20	9.228,20
Massa de Fe(OH) ₃	kg/dia	5.979,02	6.074,23	6.081,36	6.081,92	6.081,96	6.081,97

Fase Biológica: Tanque de Aeração + Decantador Secundário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	90	90	90	90	90	90
TS do lodo	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Relação SSV/SST	-	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Yobs	-	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Resultados - Sólido (lodo biológico)							
Vazão	m ³ /dia	1.090,88	1.160,37	1.165,57	1.165,98	1.166,01	1.166,01
p	kg/m ³	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40
SST	kg/dia	8.748,00	9.305,22	9.346,98	9.350,23	9.350,48	9.350,50
SSV	kg/dia	6.735,96	7.165,02	7.197,17	7.199,67	7.199,87	7.199,89
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	127.367,15	129.262,36	129.403,89	129.414,89	129.415,75	129.415,82
DBO	kg/dia	1.620,00	1.723,19	1.730,92	1.731,52	1.731,57	1.731,57
SST	kg/dia	781,41	1.192,20	1.228,05	1.230,92	1.231,15	1.231,17
SSV	kg/dia	601,69	917,99	945,60	947,81	947,98	948,00
Adensador Secundário - Centrífuga							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de Sólido	%	95	95	95	95	95	95
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Relação SSV/SST	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	34,99	37,22	37,39	37,40	37,40	37,40
Resultados - Sólido (lodo biológico adensado)							
Vazão	m ³ /dia	164,41	174,88	175,67	175,73	175,73	175,73
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	8.343,84	8.875,32	8.915,15	8.918,25	8.918,49	8.918,51
SSV	kg/dia	6.675,07	7.100,26	7.132,12	7.134,60	7.134,79	7.134,81
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	926,47	985,48	989,91	990,25	990,28	990,28
DBO	kg/dia	926,47	985,48	989,91	990,25	990,28	990,28
SST	kg/dia	439,15	467,12	469,22	469,38	469,39	469,40
SSV	kg/dia	351,32	373,70	375,37	375,51	375,52	375,52
Centrífuga Desaguamento							
Premissas da unidade de tratamento							
TS do lodo	%	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
DBO Centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Captura de sólidos	%	92	92	92	92	92	92
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	171,64	185,77	186,89	186,97	186,98	186,98
Resultados - Sólido (lodo desaguado)							
Vazão	m ³ /dia	169,07	182,98	184,08	184,17	184,17	184,18
SST	kg/dia	39.649,85	42.912,23	43.170,76	43.191,10	43.192,69	43.192,82
p	kg/m ³	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00
Massa umida	kg/dia	180.226,60	195.055,61	196.230,71	196.323,16	196.330,43	196.331,00
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	1.137,31	1.232,95	1.240,56	1.241,16	1.241,21	1.241,21
DBO	kg/dia	1.137,31	1.232,95	1.240,56	1.241,16	1.241,21	1.241,21
SST	kg/dia	3.432,89	3.715,34	3.737,73	3.739,49	3.739,63	3.739,64

8.3.5 ETE Sarapui

Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Rec. 1	Rec.2	Rec.3	Rec.4	Final
Dados de entrada							
Vazão	m ³ /dia	129.600,00	131.663,78	131.818,44	131.830,47	131.831,41	131.831,49
Diferença entre			2.063,78	154,66	12,03	0,94	0,07
DBO	kg/dia	32.400,00	34.463,78	34.618,44	34.630,47	34.631,41	34.631,49
Diferença entre			2.063,78	154,66	12,03	0,94	0,07
SST	kg/dia	38.117,65	41.989,68	42.300,11	42.324,59	42.326,52	42.326,67
SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
SSV	kg/dia	28.588,24	31.492,26	31.725,09	31.743,44	31.744,89	31.745,00
Decantador Primário Quimicamente Assistido com Cloreto Férrico							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	50	50	50	50	50	50
Remoção de SST	%	75	75	75	75	75	75
TS do lodo	%	3	3	3	3	3	3
Relação SSV/SST	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Dosagem de FeCl ₃	mg/l	70	70	70	70	70	70
Dosagem de	mg/l	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Resultados - Sólido (lodo químico)							
Vazão	m ³ /dia	1.141,96	1.241,05	1.248,97	1.249,60	1.249,65	1.249,65
p	kg/m ³	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00	1.009,00
SST	kg/dia	28.588,24	31.492,26	31.725,09	31.743,44	31.744,89	31.745,00
SSV	kg/dia	21.441,18	23.619,20	23.793,81	23.807,58	23.808,67	23.808,75
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	128.458,04	130.422,73	130.569,46	130.580,87	130.581,76	130.581,83
DBO	kg/dia	16.200,00	17.231,89	17.309,22	17.315,23	17.315,71	17.315,74
SST	kg/dia	9.529,41	10.497,42	10.575,03	10.581,15	10.581,63	10.581,67
SSV	kg/dia	7.147,06	7.873,07	7.931,27	7.935,86	7.936,22	7.936,25
Resultados - produtos químicos							
FeCl ₃	kg/dia	9.072,00	9.216,46	9.227,29	9.228,13	9.228,20	9.228,20
Massa de Fe(OH) ₃	kg/dia	5.979,02	6.074,23	6.081,36	6.081,92	6.081,96	6.081,97
Fase Biológica: Tanque de Aeração + Decantador Secundário							
Premissas da unidade de tratamento							
Remoção de DBO	%	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
TS do lodo	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Relação SSV/SST	-	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Yobs	-	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Resultados - Sólido (lodo biológico)							
Vazão	m ³ /dia	1.090,88	1.160,37	1.165,57	1.165,98	1.166,01	1.166,01
p	kg/m ³	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40	1.002,40
SST	kg/dia	8.748,00	9.305,22	9.346,98	9.350,23	9.350,48	9.350,50
SSV	kg/dia	6.735,96	7.165,02	7.197,17	7.199,67	7.199,87	7.199,89
Resultados - Líquido							
Vazão	m ³ /dia	127.367,15	129.262,36	129.403,89	129.414,89	129.415,75	129.415,82
DBO	kg/dia	1.620,00	1.723,19	1.730,92	1.731,52	1.731,57	1.731,57
SST	kg/dia	781,41	1.192,20	1.228,05	1.230,92	1.231,15	1.231,17
SSV	kg/dia	601,69	917,99	945,60	947,81	947,98	948,00

Adensador Secundário - Centrífuga							
Premissas da unidade de tratamento							
Captura de Sólido	%	95	95	95	95	95	95
TS do lodo	%	5	5	5	5	5	5
DBO centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Relação SSV/SST	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	34,99	37,22	37,39	37,40	37,40	37,40
Resultados - Sólido (lodo biológico adensado)							
Vazão	m ³ /dia	164,41	174,88	175,67	175,73	175,73	175,73
p	kg/m ³	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00	1.015,00
SST	kg/dia	8.343,84	8.875,32	8.915,15	8.918,25	8.918,49	8.918,51
SSV	kg/dia	6.675,07	7.100,26	7.132,12	7.134,60	7.134,79	7.134,81
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	926,47	985,48	989,91	990,25	990,28	990,28
DBO	kg/dia	926,47	985,48	989,91	990,25	990,28	990,28
SST	kg/dia	439,15	467,12	469,22	469,38	469,39	469,40
SSV	kg/dia	351,32	373,70	375,37	375,51	375,52	375,52
Centrífuga Desaguamento							
Premissas da unidade de tratamento							
TS do lodo	%	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
DBO Centrado	kg/m ³	1	1	1	1	1	1
Captura de sólidos	%	92	92	92	92	92	92
Consumo de polímero	kg/t	4	4	4	4	4	4
Massa de polímero	kg/dia	171,64	185,77	186,89	186,97	186,98	186,98
Resultados - Sólido (lodo desaguado)							
Vazão	m ³ /dia	169,07	182,98	184,08	184,17	184,17	184,18
SST	kg/dia	39.649,85	42.912,23	43.170,76	43.191,10	43.192,69	43.192,82
p	kg/m ³	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00	1.066,00
Massa úmida	kg/dia	180.226,60	195.055,61	196.230,71	196.323,16	196.330,43	196.331,00
Resultados - Líquido (Centrado)							
Vazão	m ³ /dia	1.137,31	1.232,95	1.240,56	1.241,16	1.241,21	1.241,21
DBO	kg/dia	1.137,31	1.232,95	1.240,56	1.241,16	1.241,21	1.241,21
SST	kg/dia	3.432,89	3.715,34	3.737,73	3.739,49	3.739,63	3.739,64

9 APÊNDICE 02 – RESULTADOS COMPLETOS DO MGL

9.1 ETE Alegria

9.1.1 Estratégia A

9.1.1.1 Estratégia A-I

ETE Alegria Estratégia A-I		
T.S. do lodo na saída da ETE	22,0	%
Massa úmida transportada	t/dia	292
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km/h	34
Valor da disposição no aterro	R\$/t	0
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	3.381,56
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	0,00
OPEX total	R\$/dia	3.381,56

9.1.1.2 Estratégia A-II

ETE Alegria Estratégia A-II		
T.S. do lodo na saída da ETE	22,0	%
Massa úmida transportada	t/dia	292
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	74
Valor da disposição no aterro	R\$/t	160
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	7.338,28
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	46.666,34
OPEX total	R\$/dia	54.004,63

9.1.2 Estratégia B

Secador Térmico Estratégia B		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	56,14
SST	kg/dia	64.166,22
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida transportada	kg/dia	71.295,80
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	217.468,18
Energia demandada pelo Secador	kcal/dia	206.594.772,18
Energia demandada pelo Secador	kWh/dia	240.269,72

ETE Alegria Estratégia B		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	43.996,41
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	281.110,68
Secagem térmica do lodo a	90 %	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	240.269,72
Demanda atendida por biogás	kWh/dia	240.269,72
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
Investimento inicial já realizado	R\$	18.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	739,73
T.S. do lodo na saída da ETE	90 %	
Massa úmida transportada	t/dia	71
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	74
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.793,80
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	6.416,62
OPEX total	R\$/dia	8.950,15

9.1.3 Estratégia C

Secador Térmico Estratégia C		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60%
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	90,63
SST	kg/dia	64.166,22
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	106.943,70
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	182.976,35
Energia demandada pelo Secador	kcal/dia	173.827.533,73
Energia demandada pelo Secador	kWh/dia	202.161,42

ETE Alegria Estratégia C		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	43.996,41
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	281.110,68
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Rich Burn Engine EPA		
Potência por unidade	kW	100
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	29
Geração de calor/ kWh gerado	kWh/kWh	1,612
Número de unidades calculado	Ncalc.	37,74
Número de unidades utilizadas	N	38,00
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	81.522,10
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	131.413,62
Custo de implantação por kW	R\$/kW	8.640,00
CHP CAPEX	R\$	32.832.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,06
CHP OPEX	R\$/dia	4.924,80
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,23
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	18.967,52
Secagem térmica do lodo a	60,0%	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	202.161,42
Demanda atendida pela energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	131.413,62
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	70.747,80
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	6.471,51
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,31
Custo com gás natural	R\$	9.305,71
Investimento inicial já realizado	R\$	18.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	739,73
T.S. do lodo na saída da ETE	60,0%	
Massa úmida transportada	t/dia	107
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	74
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	2.690,70
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	9.624,93
OPEX total	R\$/dia	8.318,35

9.1.4 Estratégia D

Secador Térmico Estratégia D		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90%
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	56,14
SST	kg/dia	64.166,22
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	71.295,80
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	217.468,18
Energia demandada pelo Secador	kcal/dia	206.594.772,18
Energia demandada pelo Secador	kWh/dia	240.269,72

ETE Alegria Estratégia D		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	43.996,41
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	281.110,68
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão -Lean Burn Engine EPA		
Potência produzida	kW	1000
Horas de trabalho diário	h	3
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	2,7
Eficiência geração de energia	%	38
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	0,996
Número de unidades calculado	Ncalc.	39,56
Número de unidades utilizadas	N	40
Energia elétrica produzida pela CHP	kW/dia	106.822,06
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	106.394,77
Custo de implantação por kw	R\$/kW	6.000,00
CHP CAPEX	R\$	240.000.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,038
CHP OPEX	R\$/dia	4.147,20
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,85
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	90.905,57
Secador Térmico		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	240.269,72
Demanda atendida por biogás	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	21.978,17
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,14
Custo com gás natural	R\$	27.590,78
Investimento inicial já realizado	R\$	18.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	739,73
T.S. do lodo na saída da ETE		90 %
Massa úmida transportada	t/dia	71
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	74
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.793,80
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	6.416,62
OPEX total	R\$/dia	-50.217,44

9.1.5 Estratégia E

Secador Térmico Estratégia E		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90%
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	56,14
SST	kg/dia	64.166,22
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	71.295,80
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	217.468,18
Energia demandada pelo Secador	kcal/dia	206.594.772,18
Energia demandada pelo Secador	kWh/dia	240.269,72

ETE Alegria Estratégia E		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	43.996,41
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	281.110,68
Secagem térmica do lodo a 90,0%		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	240.269,72
Validade do cenário	Válido	
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Rich Burn Engine EPA		
Energia contida no biogás produzido aplicada na CHP	kWh/dia	76.693,76
Potência produzida	kW	100
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	29
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	1,612
Eficiência da unidade de CHP na geração de energia térmica	%	46,75
Número de unidades calculado	Ncalc.	10,30
Número de unidades utilizadas	N	10,00
Energia contida no biogás produzido aplicada na CHP	kWh/dia	74.482,76
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	21.600,00
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	34.819,20
Custo de implantação por kW	R\$/kW	8.640,00
CHP CAPEX	R\$	8.640.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,060
CHP OPEX	R\$/dia	1.296,00
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,23
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	5.025,61
Secador Térmico		
Demanda atendida pela energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	34.819,20
Biogás remanescente	kWh/dia	206.627,92
Demanda atendida por Biogás	kWh/dia	205.450,52
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
Investimento inicial já realizado	R\$	18.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	739,73
T.S. do lodo na saída da ETE 90,0%		
Massa úmida transportada	t/dia	71
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	74
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.793,80
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	6.416,62
OPEX total	R\$/dia	5.220,54

9.2 ETE Ilha do Governador - ETIG

9.2.1 Estratégia A

9.2.1.1 Estratégia A-I

ETIG Estratégia A-I		
T.S. do lodo na saída da ETE		22,0 %
Massa úmida transportada	t/dia	27
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	37
Valor da disposição no aterro	R\$/t	0
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	339,68
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	0,00
OPEX total	R\$/dia	339,68

9.2.1.2 Estratégia A-II

ETIG Estratégia A-II		
T.S. do lodo na saída da ETE		22,0 %
Massa úmida transportada	t/dia	27
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	79
Valor da disposição no aterro	R\$/t	160
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	729,34
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	4.355,55
OPEX total	R\$/dia	5.084,89

9.2.2 Estratégia B

Secador Térmico Estratégia B		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	5,24
SST	kg/dia	5.988,89
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	6.654,32
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	20.297,17
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	19.282.309,87
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	22.425,33

ETIG Estratégia B		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	3.825,26
Energia disponível	kWh/dia	24.441,08
Secagem térmica do lodo a 90 %		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	22.425,33
Demanda atendida por biogás	kWh/dia	22.425,33
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
Investimento inicial já realizado	R\$	8.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	328,77
T.S. do lodo na saída da ETE 90 %		
Massa úmida transportada	t/dia	7
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	79
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	178,28
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	598,89
OPEX total	R\$/dia	1.105,94

9.2.3 Estratégia C

Secador Térmico Estratégia C		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	8,46
SST	kg/dia	5.988,89
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	9.981,48
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	17.077,91
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	16.224.013,48
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	18.868,53

ETIG Estratégia C		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	87.979,93
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	24.441,08
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Rich Burn Engine EPA		
Potência produzida	kW	100
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	29
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	1,612
Número de unidades calculado	Ncalc.	3,28
Número de unidades utilizadas	N	3,00
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	6.480,00
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	10.445,76
Custo de implantação por kW	R\$/kW	8.640,00
CHP CAPEX	R\$	2.592.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,060
CHP OPEX	R\$/dia	432,00
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,24
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	1.560,50
Secagem térmica do lodo a	60,0 %	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	18.868,53
Demanda atendida pela energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	10.445,76
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	8.422,77
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	770,45
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,58
Custo com gás natural	R\$	1.359,80
Investimento inicial já realizado	R\$	8.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	328,77
T.S. do lodo na saída da ETE	60,0 %	
Massa úmida transportada	t/dia	10
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	79
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	267,42
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	898,33
OPEX total	R\$/dia	1.725,82

9.2.4 Estratégia D

Secador Térmico Estratégia D		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	8,46
SST	kg/dia	5.988,89
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	9.981,48
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	17.077,91
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	16.224.013,48
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	18.868,53

ETIG Estratégia D		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	3.825,26
Energia Disponível	kWh/dia	24.441,08
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Lean Burn Engine EPA		
Potência produzida	kW	1000
Horas de trabalho diário	h	3
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	2,7
Eficiência geração de energia	%	38
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	0,996
Número de unidades calculado	Ncalc.	3,44
Número de unidades utilizadas	N	3
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	8.100,00
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	8.067,60
Custo de implantação por kW	R\$/kW	6.000,00
CHP CAPEX	R\$	18.000.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,038
CHP OPEX	R\$/dia	311,04
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,85
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	6.893,10
Secador Térmico		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	18.868,53
Demanda atendida por biogás	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	1.725,96
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,45
Custo com gás natural	R\$	2.865,07
Investimento inicial já realizado	R\$	8.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	328,77
T.S. do lodo na saída da ETE		60 %
Massa úmida transportada	t/dia	10
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	79
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	267,42
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	898,33
OPEX total	R\$/dia	-2.222,47

9.2.5 Estratégia E

Secador Térmico Estratégia E		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O evaporado	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	5,24
SST	kg/dia	5.988,89
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	6.654,32
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	20.297,17
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	19.282.309,87
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	22.425,33

ETIG Estratégia E		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	3.825,26
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	24.441,08
Secagem térmica do lodo a 90 %		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	22.425,33
Validade do cenário	Válido	
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Small Rich Burn Engine EPA		
Energia contida no biogás produzido aplicada na CHP	kWh/dia	3.846,87
Potência produzida	kW	30
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	28
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	1,7
Eficiência da unidade de CHP na geração de energia	%	47,60
Número de unidades calculado	Ncalc.	1,66
Número de unidades utilizadas	N	2,00
Energia contida no biogás produzido aplicada na CHP	kWh/dia	3.846,87
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	1.077,12
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	1.831,11
Custo de implantação por kW	R\$/kW	10.800,00
CHP CAPEX	R\$	648.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,07
CHP OPEX	R\$/dia	93,31
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,24
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	259,39
Secador Térmico		
Demanda atendida pela energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	1.831,11
Biogás remanescente	kWh/dia	20.594,22
Demanda atendida por Biogás	kWh/dia	20.594,22
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
Investimento inicial já realizado	R\$	8.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	328,77
T.S. do lodo na saída da ETE 90 %		
Massa úmida transportada	t/dia	7
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	79
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	178,28
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	598,89
OPEX total	R\$/dia	939,86

9.3 ETE Penha

9.3.1 Estratégia A

9.3.1.1 Estratégia A-I

ETE Penha Estratégia A-I		
T.S. do lodo na saída da ETE		22,0 %
Massa úmida transportada	t/dia	41
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	25
Valor da disposição no aterro	R\$/t	0
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	348,50
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	0,00
OPEX total	R\$/dia	348,50

9.3.1.2 Estratégia A-II

ETE Penha Estratégia A-II		
T.S. do lodo na saída da ETE		22,0 %
Massa úmida transportada	t/dia	41
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	65
Valor da disposição no aterro	R\$/t	160
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	911,46
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	6.639,68
OPEX total	R\$/dia	7.551,14

9.3.2 Estratégia B

Secador Térmico Estratégia B		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	7,99
SST	kg/dia	9.129,56
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	10.143,95
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	30.941,33
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	29.394.261,62
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	34.185,53

ETE Penha Estratégia B		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	6.259,80
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	39.996,37
Secagem térmica do lodo a 90 %		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	34.185,53
Demanda atendida por Biogás	kWh/dia	39.996,37
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
Custo de implantação	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE 90 %		
Massa úmida transportada	t/dia	10
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	65
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	222,80
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	912,96
OPEX total	R\$/dia	1.628,91

9.3.3 Estratégia C

Secador Térmico Estratégia C		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	12,89
SST	kg/dia	9.129,56
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	15.215,93
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	26.033,84
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	24.732.145,68
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	28.763,49

ETE Penha Estratégia C		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	6.259,80
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	39.996,37
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Rich Burn Engine EPA		
Potência produzida	kW	100
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	29
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	1,612
Número de unidades calculado	Ncalc.	5,37
Número de unidades utilizadas	N	5,00
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	10.800,00
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	17.409,60
Custo de implantação por kW	R\$/kW	8.640,00
CHP CAPEX	R\$	4.320.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,06
CHP OPEX	R\$/dia	648,00
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,24
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	2.550,09
Secagem térmica do lodo a	60,0 %	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	28.763,49
Demanda atendida pela energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	17.409,60
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	11.353,89
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	1.038,57
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,58
Custo com gás natural	R\$	1.784,39
Custo de implantação	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE	60,0 %	
Massa úmida transportada	t/dia	15
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	65
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	334,20
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	1.369,43
OPEX total	R\$/dia	2.079,09

9.3.4 Estratégia D

Secador Térmico Estratégia D		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	12,89
SST	kg/dia	9.129,56
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	15.215,93
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	26.033,84
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	24.732.145,68
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	28.763,49

ETE Penha Estratégia D		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	6.259,80
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	39.996,37
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Lean Burrn Engine EPA		
Potência produzida	kW	1000
Horas de trabalho diário	h	3
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	2,7
Eficiência geração de energia	%	38
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	0,996
Número de unidades calculado	Ncalc.	5,63
Número de unidades utilizadas	N	6
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	15.198,62
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	15.137,83
Custo de implantação por kW	R\$/kW	6.000,00
CHP CAPEX	R\$	36.000.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,04
CHP OPEX	R\$/dia	622,08
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,85
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	12.934,03
Secagem térmica do lodo a 60 %		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	28.763,49
Demanda atendida por Biogás	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	2.631,08
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,45
Custo com gás natural	R\$	4.178,31
Custo de implantação	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE 60 %		
Massa úmida transportada	t/dia	15
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	65
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	334,20
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	1.369,43
OPEX total	R\$/dia	-5.936,85

9.3.5 Estratégia E

Secador Térmico Estratégia E		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	7,99
SST	kg/dia	9.129,56
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	10.143,95
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	30.941,33
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	29.394.261,62
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	34.185,53

ETE Penha Estratégia E		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	6.259,80
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	39.996,37
Secagem térmica do lodo a 90,00 %		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	34.185,53
Validade do cenário	Válido	
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Small Rich Burn Engine EPA		
Energia contida no biogás produzido aplicada na CHP	kWh/dia	11.089,40
Potência produzida	kW	30
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	28
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	1,7
Eficiência da unidade de CHP na geração de energia	%	47,60
Número de unidades calculado	Ncalc.	4,79
Número de unidades utilizadas	N	5,00
Energia contida no biogás produzido aplicada na CHP	kWh/dia	11.089,40
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	3.105,03
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	5.278,55
Custo de implantação por kW	R\$/kW	10.800,00
CHP CAPEX	R\$	1.620.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,07
CHP OPEX	R\$/dia	233,28
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,24
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	733,16
Secador Térmico		
Demanda atendida pela energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	5.278,55
Biogás remanescente	kWh/dia	28.906,97
Demanda atendida por Biogás	kWh/dia	28.906,97
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
Custo de implantação	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE 90,00		
Massa úmida transportada	t/dia	10
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	65
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	222,80
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	912,96
OPEX total	R\$/dia	1.129,03

9.3.6 Estratégia F

Secador Térmico Estratégia F		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	90
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	7,99
SST	kg/dia	9.129,56
p	kg/m ³	1.270,00
Massa úmida	kg/dia	10.143,95
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	30.941,33
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	29.394.261,62
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	34.185,53

ETE Penha Estratégia F		
Produção de biogás		
Vazão	m ³ /dia	6.259,80
Energia contida no biogás produzido	kWh/dia	39.996,37
Tecnologia de aproveitamento do biogás		
Motor a Combustão - Rich Burn Engine EPA		
Potência produzida	kW	100
Horas de trabalho diário	h	24
Fator de capacidade	%	90%
Horas úteis	h	21,6
Eficiência geração de energia	%	29
Geração de calor/ Kwh gerado	kWh/kWh	1,612
Número de unidades calculado	Ncalc.	5,37
Número de unidades utilizadas	N	5,00
Energia elétrica produzida pela CHP	kWh/dia	10.800,00
Energia térmica produzida pela CHP	kWh/dia	17.409,60
Custo de implantação por kW	R\$/kW	8.640,00
CHP CAPEX	R\$	4.320.000,00
Custos de manutenção por kWh	R\$/kWh	0,06
CHP OPEX	R\$/dia	648,00
Vantagens do uso da energia		
Valor da energia unitário	R\$/kWh	0,24
Receita da economia com energia elétrica	R\$/dia	2.550,09
T.S. do lodo na saída da ETE 22,0% para Alegria		
Massa úmida transportada	t/dia	41
Distancia à Alegria	km	15
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	207,41
Secagem térmica do lodo a 90 % em Alegria		
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	34.185,53
Demanda atendida pelo biogás da ETE Alegria Cenário 2	kWh/dia	40.840,96
Energia complementar suprida com gás natural	kWh/dia	0,00
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	0,00
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	3,73
Custo com gás natural	R\$	0,00
T.S. do lodo na saída da ETE 90 % de Alegria		
Massa úmida transportada	t/dia	10
Distancia de Alegria ao aterro	km	74
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	255,22
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	912,96
OPEX total	R\$/dia	-526,51

9.4 ETE Pavuna

9.4.1 Estratégia G

9.4.1.1 Estratégia G-I

Adição de CAL Estratégia G-1		
Premissas da unidade de tratamento		
Adição de CAL	% de SST	25
p da CAL	kg/m ³	961
Resultados - Sólido		
Cal consumida	kg/dia	10.798,20
SST	kg/dia	53.991,02
Massa de água	kg/dia	153.138,18
T.S.	%	26,07
p	kg/m ³	1.078,20
Vazão	m ³ /dia	192,11
Massa umida	kg/dia	207.129,20

ETE Pavuna cEstratégia G-I		
Estabilização do lodo		
Consumo de Cal diário	kg/dia	10.798,20
Custo da Cal unitário	R\$/kg	0,42
Custo da Cal diário	R\$/dia	4.535,25
T.S. do lodo na saída da ETE	26 %	
Massa úmida transportada	t/dia	207
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	22
Valor da disposição no aterro	R\$/t	0
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.542,28
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	0,00
OPEX total	R\$/dia	6.077,53

9.4.1.2 Estratégia G-II

Adição de CAL Estratégia G-II		
Premissas da unidade de tratamento		
Adição de CAL	% de SST	52
p da CAL	kg/m ³	961
Resultados - Sólido		
Cal consumida	kg/dia	22.460,27
SST	kg/dia	65.653,09
Massa de água	kg/dia	153.138,18
T.S.	%	30,01
p	kg/m ³	1.090,02
Vazão	m ³ /dia	200,72
Massa umida	kg/dia	218.791,26

ETE Pavuna Estratégia G-II		
Estabilização do lodo		
Consumo de Cal diário	kg/dia	22.460,27
Custo da Cal unitário	R\$/kg	0,42
Custo da Cal diário	R\$/dia	9.433,31
T.S. do lodo na saída da ETE	30 %	
Massa úmida transportada	t/dia	219
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	62
Valor da disposição no aterro	R\$/t	110
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	4.597,24
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	24.067,04
OPEX total	R\$/dia	38.097,59

9.4.2 Estratégia H

Adição de CAL Estratégia H		
Premissas da unidade de tratamento		
Adição de CAL	% de SST	25
p da CAL	kg/m ³	961
Resultados - Sólido		
Cal consumida	kg/dia	10.798,20
SST	kg/dia	53.991,02
Massa de água	kg/dia	153.138,18
T.S.	%	26,07
p	kg/m ³	1.078,20
Vazão	m ³ /dia	192,11
Massa úmida	kg/dia	207.129,20

Secador Térmico Estratégia H		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	76,26
SST	kg/dia	53.991,02
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	89.985,04
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	115.848,14
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	110.055.729,68
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	127.994,81

ETE Pavuna Estratégia H		
Estabilização do lodo		
Consumo de Cal diário	kg/dia	10.798,20
Custo da Cal unitário	R\$/kg	0,42
Custo da Cal diário	R\$/dia	4.535,25
Secagem térmica do lodo a	60 %	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	127.994,81
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	11.708,06
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,14
Custo com gás natural	R\$	15.875,13
Investimento inicial já realizado	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE	60 %	
Massa úmida transportada	t/dia	90
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	62
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.890,77
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	8.098,65
OPEX total	R\$/dia	30.892,94

9.4.3 Estratégia I

Secador Térmico Estratégia I		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	61,01
SST	kg/dia	43.192,82
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	71.988,03
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	123.168,61
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	117.010.182,62
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	136.082,84

ETE Pavuna Estratégia I		
Secagem térmica do lodo a		60 %
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	136.082,84
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	12.447,89
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,14
Custo com gás natural	R\$	16.719,72
Investimento inicial já realizado	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE		60 %
Massa úmida transportada	t/dia	72
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	62
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.512,61
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	6.478,92
OPEX total	R\$/dia	25.204,41

9.5 ETE Sarapui

9.5.1 Estratégia G

9.5.1.1 Estratégia G-I

Adição de CAL Estratégia G-1		
Premissas da unidade de tratamento		
Adição de CAL	% de SST	25
p da CAL	kg/m ³	961
Resultados - Sólido		
Cal consumida	kg/dia	10.798,20
SST	kg/dia	53.991,02
Massa de água	kg/dia	153.138,18
T.S.	%	26,07
p	kg/m ³	1.078,20
Vazão	m ³ /dia	192,11
Massa úmida	kg/dia	207.129,20

ETE Sarapui Estratégia G-I		
Estabilização do lodo		
Consumo de Cal diário	kg/dia	10.798,20
Custo da Cal unitário	R\$/kg	0,42
Custo da Cal diário	R\$/dia	4.535,25
T.S. do lodo na saída da ETE		26 %
Massa úmida transportada	t/dia	207
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	29
Valor da disposição no aterro	R\$/t	0
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	2.070,46
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	0,00
OPEX total	R\$/dia	6.605,71

9.5.1.2 *Estratégia G-II*

Adição de CAL Estratégia G-II		
Premissas da unidade de tratamento		
Adição de CAL	% de SST	52
p da CAL	kg/m ³	961
Resultados - Sólido		
Cal consumida	kg/dia	22.460,27
SST	kg/dia	65.653,09
Massa de água	kg/dia	153.138,18
T.S.	%	30,01
p	kg/m ³	1.090,02
Vazão	m ³ /dia	200,72
Massa umida	kg/dia	218.791,26

ETE Sarapui Estratégia G-II		
Estabilização do lodo		
Consumo de Cal diário	kg/dia	22.460,27
Custo da Cal unitário	R\$/kg	0,42
Custo da Cal diário	R\$/dia	9.433,31
T.S. do lodo na saída da ETE	30 %	
Massa úmida transportada	t/dia	219
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	60
Valor da disposição no aterro	R\$/t	110
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	4.426,15
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	24.067,04
OPEX total	R\$/dia	37.926,50

9.5.2 *Estratégia H*

Adição de CAL Estratégia H		
Premissas da unidade de tratamento		
Adição de CAL	% de SST	25
p da CAL	kg/m ³	961
Resultados - Sólido		
Cal consumida	kg/dia	10.798,20
SST	kg/dia	53.991,02
Massa de água	kg/dia	153.138,18
T.S.	%	26,07
p	kg/m ³	1.078,20
Vazão	m ³ /dia	192,11
Massa umida	kg/dia	207.129,20

Secador Térmico Estratégia H		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	76,26
SST	kg/dia	53.991,02
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	89.985,04
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	115.848,14
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	110.055.729,68
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	127.994,81

ETE Sarapui Estratégia H		
Estabilização do lodo		
Consumo de Cal diário	kg/dia	10.798,20
Custo da Cal unitário	R\$/kg	0,42
Custo da Cal diário	R\$/dia	4.535,25
Secagem térmica do lodo a	60 %	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	127.994,81
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	11.708,06
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,14
Custo com gás natural	R\$	15.875,13
Investimento inicial já realizado	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE	60 %	
Massa úmida transportada	t/dia	90
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	60
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.820,40
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	8.098,65
OPEX total	R\$/dia	30.822,57

9.5.3 Estratégia I

Secador Térmico Estratégia I		
Premissas da unidade de tratamento		
TS do lodo	%	60
Energia demandada	kcal /kgH ₂ O	950
Resultados - Sólido		
Vazão	m ³ /dia	61,01
SST	kg/dia	43.192,82
p	kg/m ³	1.180,00
Massa úmida	kg/dia	71.988,03
Energia demandada pelo Secador Térmico		
H ₂ O evaporado	kg/dia	123.168,61
Energia demandada pelo secador	kcal/dia	117.010.182,62
Energia demandada pelo secador	kWh/dia	136.082,84

ETE Sarapui Estratégia I		
Secagem térmica do lodo a	60 %	
Energia demandada pelo Secador Térmico	kWh/dia	136.082,84
Poder calorífico do GN	kWh/m ³	10,93
Consumo de GN	m ³ /dia	12.447,89
Valor da tarifa limite de GN	R\$/m ³	1,14
Custo com gás natural	R\$	16.719,72
Investimento inicial já realizado	R\$	12.000.000,00
Secador Térmico OPEX (1,5% ano)	R\$/dia	493,15
T.S. do lodo na saída da ETE		60 %
Massa úmida transportada	t/dia	72
Distância da ETE para o Aterro Sanitário	km	60
Valor da disposição no aterro	R\$/t	90
Velocidade média	km/h	50
Custo com transporte de lodo	R\$	1.456,32
Custo com disposição no aterro sanitário	R\$	6.478,92
OPEX total	R\$/dia	25.148,11