

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E LODO
EXCEDENTE DE REATORES UASB COMO
FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

André Pereira Rosa

Belo Horizonte

2013

**APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E LODO
EXCEDENTE DE REATORES UASB COMO FONTE
DE ENERGIA RENOVÁVEL EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO**

André Pereira Rosa

André Pereira Rosa

**APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E LODO
EXCEDENTE DE REATORES UASB COMO FONTE
DE ENERGIA RENOVÁVEL EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos
Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Tratamento de águas residuárias

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos
Chernicharo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

À minha esposa Natália, meu melhor pedaço. E ao fruto de amor que Deus nos confiou, apesar de agora morar no céu, nos amadureceu no amar e será sempre amado, é eterno

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom e fiel amigo. Que essas linhas sejam uma oração a Deus, que me ama incondicionalmente e me preenche com amor e dons. Obrigado por me amar e cuidar dos meus passos, me conduzir por caminhos retos e por soprar no meu interior desejos que só poderiam ser concretizados com a sua mão amiga. Que esta etapa vencida me ajude a dar bons frutos.

Ao professor Carlos Chernicharo, exemplo que levarei por toda a vida. Pelo seu empenho, zelo profissional e pessoal e por me ensinar muito além do que se espera de um orientador. Agradeço ainda a Adriana pelo seu carinho e agradável companhia.

Ao professor Gilberto Caldeira por todo o aprendizado ao longo desses anos de parceria. Obrigado pela confiança e por ser um dos grandes responsáveis pelo meu crescimento profissional.

À minha esposa Natália. Te agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, por partilhar a sua vida e por me amar incondicionalmente. Pelos momentos que vimos o nosso amor crescer desde a minha banca de mestrado e pela alegria de te ter como esposa nesse momento tão especial. Obrigado pelo seu colo amigo, seu olhar, compreensão e ternura. Sem você essa vitória não teria sido conquistada.

Aos meus amados pais (Júlio e Neomar) e a minha querida irmã (Beatriz) que dividem comigo meus sonhos, tornando-os seus. A vocês o meu eterno agradecimento.

Aos amigos da Fraternidade Pequena Via, por ter a minha defesa como uma data a ser sempre lembrada.

Aos professores Juan Conesa e Andres Fullana por tudo que me ensinaram em Alicante e pelo empenho e receptividade de todo o seu grupo de pesquisa (Julia Molto, Adriana Pineda, Maria Dolores, Agustin Lozano,

A todos os técnicos e profissionais que me contribuíram com as visitas técnicas durante o período do doutorado Sanduíche, em especial ao Nicolas d'Aprigny e Quico Martinez.

Ao Jorge Borges pela parceria duradoura e por sempre viabilizar tudo o que foi demandado ao longo das pesquisas na ETE *Laboreaux*.

Agradeço a todos os alunos de iniciação científica que contribuíram com o conhecimento, dedicação e amizade, sem eles este trabalho não teria sido possível: Diogo Carneiro, Felipe Maciel, Renan Veloso, Augusto Schmidt, Marina Oliveira e Renata Padilha.

Ao amigo Thibault Adnot pela amizade que perdura e pelos bons momentos vividos no Brasil.

Aos amigos de caminhada na pós-graduação, pela convivência e bons momentos vividos ao longo dessa trajetória. Um agradecimento especial a Grazielle, Aracele, Emanuel, Paulo Gustavo, Felipe e Uende.

A este departamento que contribuiu com o meu crescimento ao longo da trajetória desde o mestrado, a todos o meu agradecimento pela confiança em meu trabalho. Um agradecimento especial à Iara, Norma, Olívia e Cláudia.

Aos professores Marcos, Sílvia e Lisete por me ensinar bons valores ao longo do convívio de tantos anos, além da agradável companhia.

À Suzane pela paciência e amizade em todos os momentos ao longo destes anos e por sua dedicação.

À Lívia por todos os momentos de crescimento, amizade e convívio.

E a todos que de alguma forma contribuíram para que esse objetivo fosse alcançado.

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo avaliar o aproveitamento dos subprodutos biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. O objetivo 1 foi desenvolvido a partir de uma ampla revisão de literatura e visitas a ETEs que promovem a recuperação energética na Europa. No âmbito do objetivo 2, os trabalhos foram desenvolvidos na ETE *Laboreaux*, Itabira-MG através da caracterização do potencial energético do lodo e do biogás e a proposta de determinação de balanços de massa e energia, além do cálculo das reduções nas emissões de gases de efeito estufa por metodologia proposta pela UNFCCC para dois cenários (i): uso prioritário do biogás em câmara de combustão e o uso do excedente para a geração de eletricidade em motor de combustão interna (MCI) e (ii) uso prioritário do biogás em MCI visando a geração de eletricidade e o aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para a secagem térmica de lodo. Por fim, o último objetivo fez uso de modelagem matemática para a estimativa do balanço energético em ETEs com o uso dos subprodutos do tratamento anaeróbio como fonte de energia. Dentre os principais resultados, pode-se apontar que o lodo de esgoto apresenta viabilidades técnica e ambiental de seu emprego como fonte de energia, além de sua aplicação conjunta com o biogás gerado em reatores UASB, o uso dos processos térmicos (pirólise, gaseificação e combustão) são alternativas potencialmente mais vantajosas em ETEs de maior porte que possuem elevados gastos de transporte e destinação final. Em adição, o aproveitamento energético do lodo de forma individual, ou até mesmo em combinação com outros subprodutos gerados em ETEs, a exemplo do biogás, pode garantir a secagem do próprio lodo e favorecer o desenvolvimento e expansão do uso dos processos térmicos para a realidade brasileira. Para a ETE *Laboreaux* foi verificado que o potencial energético proveniente do biogás e lodo gerado em reatores UASB foi de 10.962 MJ.d⁻¹, e 7.518 MJ.d⁻¹, respectivamente. O suprimento de eletricidade foi de 22,2 e 57,6 % do consumo da estação para os cenários (i) e (ii), respectivamente. O cenário (i) se destacou pela eliminação do envio do lodo ao aterro sanitário, enquanto que o cenário (ii) apresentou elevado potencial energético de geração de eletricidade em benefício da ETE. Para o cenário (i) a redução das emissões de créditos de carbono com o aproveitamento do lodo até então enviado ao aterro sanitário (1.372 t.ano⁻¹ a 10% de umidade) foi de 12.691 t.CO₂e. No que se refere ao desenvolvimento do modelo matemático, os resultados indicam que o modelo permitiu uma estimativa mais realista da produção de lodo e do potencial energético total nas ETEs.

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the recovery of by-products biogas and excess sludge in UASB reactors as renewable energy in wastewater treatment plants (WWTP). The objective 1 was developed after an extensive literature review and visits to European WWTP that have energetic recovery. In the ambit of objective 2, the work was developed at *Laboreaux* STP, Itabira-MG through the energetic potential characterization of sludge and biogas and proposal of mass and energy balance, besides the calculation of greenhouse gases reduction for two scenarios (i): priority use of biogas for sludge thermal drying and the excess of biogas being used for power generation in an internal combustion engine (ICE); and (ii) primary use of biogas for power generation and the heat of the engine exhaust gases being used for sludge thermal drying. Finally, the last objective proposed a mathematical model to estimate the energetic balance in WWTP by the use of by-products in anaerobic treatment as source of energy. Among main results could be concluded that sludge has technical and environmental feasibility as source of energy, beyond its joint use with biogas from UASB reactors. In addition, thermo-chemical processes (pyrolysis, gasification and combustion) are potentially alternatives with many benefits mainly for large size WWTP that have high costs of transportation and final destination. In addition the energetic sludge recovery in a individual manner or even in association with other by-products from WWTP as biogas could guarantee sludge own drying and permit development and increasing of thermal processes for brazilian reality. For *Laboreaux* STP it was verified that the energetic potential for biogas and sludge from UASB reactors were $10,962 \text{ MJ.d}^{-1}$ and $7,518 \text{ MJ.d}^{-1}$, respectively. The electricity supply was 22.2% and 57.6 % for scenarios (i) and (ii), respectively. The scenario (i) stood out in sludge sending for landfill, while scenario (ii) presented high energetic potential for electricity generation for benefit of WWTP. For scenario (i) the credit carbon reduction with sludge recovery sent until now to landfill ($1,372 \text{ t.year}^{-1}$ and 10% of moisture) was $12,691 \text{ t.CO}_2\text{e}$. Concerning the mathematical model development, the results indicated the possibility of a realistic estimative of sludge production and total energetic potential in WWTP.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVI
INTRODUÇÃO.....	1
1 REVISÃO DA LITERATURA	3
1.1 REATORES UASB NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO	3
1.2 SUBPRODUTOS DO TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO.....	4
1.2.1 <i>Lodo</i>	4
1.2.1.1 Produção de lodo	4
1.2.1.2 Caracterização do lodo.....	6
1.2.1.3 Propriedades do lodo de esgoto doméstico	11
1.2.1.4 Destino final e processamento térmico do lodo excedente.....	14
1.2.2 <i>Biogás</i>	17
1.2.2.1 Produção de biogás	17
1.2.2.2 Caracterização e propriedades do biogás	17
1.2.2.3 Destino final e aproveitamento de biogás	19
1.3 PROCESSOS TERMOQUÍMICOS PARA O TRATAMENTO DE LODO.....	23
1.3.1 <i>Pirólise</i>	26
1.3.1.1 Aplicação da pirólise no tratamento do lodo	28
1.3.2 <i>Gaseificação</i>	31
1.3.2.1 Aplicação da gaseificação no tratamento do lodo.....	33
1.3.3 <i>Combustão</i>	38
1.3.3.1 Aplicação da combustão no tratamento do lodo	40
1.4 OS GASES DE EFEITO ESTUFA E AS EMISSÕES NO TRATAMENTO ANAERÓBIO	43
1.5 O STATUS DO MDL E AS ATIVIDADES DE PROJETO NO BRASIL.....	45
1.6 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LODO E BIOGÁS EM ETES	46
1.6.1 <i>Experiências internacionais</i>	47
1.6.1.1 ETE de Iraklio (Grécia).....	47
1.6.1.2 ETE de Samra (Jordânia)	48
1.6.1.3 ETE de Point Loma (Estados Unidos)	49
1.6.1.4 ETE San Fernando, Medellin, Colômbia	50
1.6.1.5 ETE Lancaster, Los Angeles, EUA	52
1.6.1.6 ETE Taunusstein.....	52
1.6.2 <i>Experiências nacionais</i>	53
1.6.2.1 ETE Arrudas (COPASA/MG).....	53
1.6.2.2 ETE Ouro Verde (SANEPAR, PR)	55
2 HIPÓTESES DE INVESTIGAÇÃO.....	57
2.1 ASPECTOS QUE FUNDAMENTAM A CONSOLIDAÇÃO DAS HIPÓTESES DE TRABALHO	58
2.2 ESTRUTURAÇÃO DA TESE	59
3 OBJETIVO.....	60
3.1 OBJETIVO GERAL.....	60
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	60
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
4.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	61
4.1.1 <i>ETE Laboreaux, Itabira</i>	61
4.1.2 <i>Universidade de Alicante</i>	62
5 ESTUDO DAS POSSIBILIDADES INDIVIDUAIS E CONJUNTAS DE EMPREGO DO LODO EXCEDENTE E DO BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA.....	63

5.1	INTRODUÇÃO.....	63
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	64
5.2.1	<i>Avaliação de aspectos e comparação de alternativas de aproveitamento energético do lodo</i> 64	
5.2.2	<i>Visitas técnicas a ETEs com aproveitamento do biogás e do lodo para a geração de energia térmica e/ou elétrica.</i>	65
5.2.3	<i>Alternativas conjuntas do aproveitamento energético do lodo e do biogás.</i>	65
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.3.1	<i>Características do lodo de relevância energética</i>	66
5.3.2	<i>Benefícios da recuperação energética do lodo.</i>	68
5.3.3	<i>Uso de processos térmicos no gerenciamento de lodo.</i>	69
5.3.4	<i>Visitas técnicas a ETEs com aproveitamento do biogás e do lodo para a geração de energia térmica e/ou elétrica.</i>	74
5.3.4.1	ETE Novelda, Monforte del Cid, Espanha.....	74
5.3.4.2	ETE Valorhin, Estrasburgo, França.....	75
5.3.4.3	ETE Rincón de León, Alicante, Espanha.....	77
5.3.4.4	ETE Pinedo, Valência, Espanha.....	79
5.3.4.5	Cenário atual e condições operacionais das ETEs visitadas.....	82
5.3.5	<i>Proposta de alternativas de recuperação energética de lodo e de biogás para a realidade brasileira.</i>	85
5.3.5.1	Alternativas para ETEs com baixo potencial de recuperação de metano e geração de lodo em reatores UASB.....	85
5.3.5.2	Alternativas para ETEs com elevado potencial de recuperação de metano e geração de lodo em reatores UASB.....	86
5.4	CONCLUSÕES.....	89
6	ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO E DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PELA PROPOSTA DE USO DO BIOGÁS E DE LODO COMO FONTE DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO DA ETE LABOREAUX.	91
6.1	INTRODUÇÃO.....	91
6.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	92
6.2.1	<i>Caracterização da ETE Laboreaux (Itabira-MG)</i>	92
6.2.2	<i>Caracterização do lodo.</i>	93
6.2.3	<i>Caracterização do biogás.</i>	94
6.2.4	<i>Cálculo do balanço energético da ETE Laboreaux</i>	94
6.2.4.1	Demanda energética da ETE Laboreaux.....	95
6.2.4.2	Potencial energético dos subprodutos da ETE Laboreaux.....	96
6.2.5	<i>Proposta integrada de aproveitamento energético de lodo e biogás.</i>	96
6.2.6	<i>Quantificação da redução nas emissões de GEE pelo uso do biogás e lodo como biocombustível.</i>	98
6.2.7	<i>Detalhamento das metodologias utilizadas para a estimativa das emissões evitadas...</i>	100
6.2.7.1	III-E: Geração de metano evitado pelo decaimento da biomassa através de processos de combustão, gaseificação e tratamento mecânico/térmico.	100
6.2.7.2	I-D. Geração de eletricidade renovável conectada à rede.....	104
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
6.3.1	<i>Potencial energético do biogás.</i>	107
6.3.1.1	Relações unitárias e aderência dos dados reais aos dados teóricos.....	108
6.3.2	<i>Potencial energético do lodo</i>	108
6.3.3	<i>Estudo de alternativas de aproveitamento energético do biogás e lodo</i>	112
6.3.3.1	Cenário 1 - Uso prioritário do biogás para secagem térmica do lodo.....	112
6.3.3.2	Cenário 2 - Uso prioritário do biogás para a geração de eletricidade.....	114
6.3.3.3	Comparação dos cenários.....	115
6.3.4	<i>Redução nas emissões de GEE com as atividades de projeto</i>	116
6.4	CONCLUSÕES.....	120

7	DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA A ESTIMATIVA DO BALANÇO ENERGÉTICO EM ETES OPERANDO COM REATORES UASB.....	122
7.1	INTRODUÇÃO.....	122
7.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	123
7.2.1	<i>Dados de entrada do modelo</i>	124
7.2.2	<i>Protocolo para o cálculo do balanço energético das ETES</i>	124
7.2.2.1	Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo.....	125
7.2.3	<i>Validação do modelo de Monte Carlo</i>	126
7.2.3.1	Estimativa do consumo energético e produção líquida de eletricidade para as ETES.....	127
7.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	129
7.3.1	<i>Simulação do potencial energético de ETES com população contribuinte de até 1.000.000 habitantes</i>	129
7.3.1.1	Potencial energético do biogás.....	129
7.3.1.2	Potencial energético do lodo.....	131
7.3.2	<i>Potencial energético global dos subprodutos da ETE</i>	132
7.3.3	<i>Consumo e produção líquida de energia nas ETES</i>	134
7.3.4	<i>Validação do modelo de Monte Carlo</i>	138
7.3.4.1	Validação do modelo – Reatores UASB ETE <i>Laboreaux</i> (Itabira/MG).....	138
7.3.4.2	Validação do modelo – Reatores UASB ETE Nova Contagem (Contagem/MG).....	140
7.4	CONCLUSÕES.....	141
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 0-1: TÓPICOS DE INTERESSE PARA POSSÍVEIS MELHORIAS EM REATORES UASB.	2
FIGURA 1-1: ROTAS DE CONVERSÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMA ANAERÓBIO (A) E SISTEMA AERÓBIO (B).	3
FIGURA 1-2: ROTAS DE CONVERSÃO DE DQO E FLUXOS DE METANO EM REATORES UASB.	4
FIGURA 1-3: RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO ELEMENTAR (AO CENTRO) E IMEDIATA (ACIMA) DE UM COMBUSTÍVEL, EXPRESSA EM DIVERSAS BASES.	7
FIGURA 1-4: DIAGRAMA DE VAN KREVELEN PARA DIFERENTES COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS.	11
FIGURA 1-5: DIAGRAMA DE COMBUSTÃO DE COQUE.	11
FIGURA 1-6: DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DA ÁGUA NO LODO DE ESGOTO.	12
FIGURA 1-7: OPÇÕES DE USO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA.	20
FIGURA 1-8: ROTAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA PARA LODO DE ETES.	24
FIGURA 1-9: ESQUEMA ILUSTRATIVO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS E TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA PARA BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS.	25
FIGURA 1-10: DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES SÓLIDAS, LÍQUIDAS E GASOSAS EM FUNÇÃO DA TAXA DE AQUECIMENTO, TEMPO DE RESIDÊNCIA E TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO DA BIOMASSA.	27
FIGURA 1-11: MECANISMOS PREDOMINANTES NO PROCESSO DE PIRÓLISE DO LODO DE ETE.	28
FIGURA 1-12: TIPOS DE GASEIFICADORES UTILIZADOS PARA BIOMASSA: (A) CONTRA-CORRENTE; (B) CO-CORRENTE.	32
FIGURA 1-13: ESTÁGIOS DO PROCESSO TERMOQUÍMICO DO LODO, COM ÊNFASE NA GASEIFICAÇÃO.	36
FIGURA 1-14: DISTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE POR PAÍS NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO.	44
FIGURA 1-15: FLUXOGRAMA DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS E LODO NA ETE DE IRAKLIO, GRÉCIA.	47
FIGURA 1-16: ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DA ETE DE SAMRA (JORDÂNIA).	49
FIGURA 1-17: DETALHE DO DIGESTOR DE LODO DA ETE DE POINT LOMA (EUA)	50
FIGURA 1-18: MOTOR ALIMENTADO POR BIOGÁS NA ETE DE POINT LOMA (EUA)	50
FIGURA 1-19: VISTA DOS BIODIGESTORES DA ETE SAN FERNANDO, COLÔMBIA.	50
FIGURA 1-20: VISTA PARCIAL O TRATAMENTO SECUNDÁRIO DA ETE SAN FERNANDO, COLÔMBIA.	50
FIGURA 1-21: ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DA ETE SAN FERNANDO, COLÔMBIA.	50
FIGURA 1-22: BALANÇO ENERGÉTICO DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA, ETE SAN FERNANDO, COLÔMBIA.	51
FIGURA 1-23: VISTA DOS BIODIGESTORES DA ETE TAUNUSSTEIN, ALEMANHA.	53
FIGURA 1-24: VISTA DO MOTOR DE COGERAÇÃO DA TAUNUSSTEIN, ALEMANHA.	53
FIGURA 1-25: ESQUEMA DO SISTEMA DE COGERAÇÃO DA ETE ARRUDAS, NA CIDADE DE BELO HORIZONTE.	54
FIGURA 1-26: DETALHE DE UMA MICROTURBINA INSTALADA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA NA ETE ARRUDAS.	54

FIGURA 1-27: SÉRIE DE MICROTURBINAS EM FUNCIONAMENTO NA ETE ARRUDAS.	54
FIGURA 1-28: GASÔMETROS PARA ARMAZENAMENTO DE BIOGÁS NA ETE ARRUDAS.	55
FIGURA 1-29: SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS NA ETE ARRUDAS.	55
FIGURA 4-1: FLUXOGRAMA DA ORGANIZAÇÃO DA TESE, EM FUNÇÃO DOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	61
FIGURA 4-2: VISTA GERAL DAS UNIDADES DA ETE <i>LABOREAUX</i> .	62
FIGURA 5-1: PODER CALORÍFICO INFERIOR DE DIVERSAS FONTES DE BIOMASSA, EM FUNÇÃO DA UMIDADE.	68
FIGURA 5-2: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE TRATAMENTO COM ÊNFASE NO GERENCIAMENTO DE LODO E BIOGÁS NA ETE NOVELDA, MONFORTE DEL CID.	74
FIGURA 5-3: VISTA GERAL DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DA ETE NOVELDA, MONFORT DEL CID.	75
FIGURA 5-4: CALDEIRA A BIOGÁS, ETE NOVELDA, MONFORT DEL CID.	75
FIGURA 5-5: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE TRATAMENTO COM ÊNFASE NO GERENCIAMENTO DE LODO E BIOGÁS NA ETE VALORHIN, ESTRASBURGO.	76
FIGURA 5-6: VISTA GERAL DO BIODIGESTOR DE LODO DA ETE VALORHIN, ESTRASBURGO.	77
FIGURA 5-7: ESTAÇÃO DE COGERAÇÃO POR MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA, ETE VALORHIN, ESTRASBURGO.	77
FIGURA 5-8: FORNO DE INCINERAÇÃO PARA LODO E BIOGÁS DA ETE VALORHIN, ESTRASBURGO.	77
FIGURA 5-9: DETALHE DOS PONTOS DE ALIMENTAÇÃO DE LODO E BIOGÁS NO FORNO DA ETE VALORHIN, ESTRASBURGO.	77
FIGURA 5-10: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE TRATAMENTO COM ÊNFASE NO GERENCIAMENTO DE LODO E BIOGÁS NA ETE RINCÓN DE LEÓN, ALICANTE.	78
FIGURA 5-11: VISTA GERAL DO BIODIGESTOR DE LODO DA ETE RINCÓN DE LEÓN, ALICANTE.	79
FIGURA 5-12: SEQUENCIA DE CALDEIRAS A BIOGÁS PARA O AQUECIMENTO DO LODO, ETE RINCÓN DE LEÓN, ALICANTE.	79
FIGURA 5-13: VISTA GERAL DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DA ETE RINCÓN DE LEÓN, ALICANTE.	79
FIGURA 5-14: GASÔMETROS PARA ARMAZENAMENTO DE BIOGÁS NA ETE RINCÓN DE LEÓN, ALICANTE.	79
FIGURA 5-15: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE TRATAMENTO COM ÊNFASE NO GERENCIAMENTO DE LODO E BIOGÁS NA ETE PINEDO 1, VALÊNCIA.	81
FIGURA 5-16: VISTA GERAL DO INCINERADOR QUE PROCESSAVA LODO DA ETE DE PINEDO 1, VALÊNCIA.	81
FIGURA 5-17: TORRE DE LAVAGEM DOS GASES GERADOS NO INCINERADOR DE LODO NA ETE DE PINEDO 1, VALÊNCIA.	81
FIGURA 5-18: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE TRATAMENTO COM ÊNFASE NO GERENCIAMENTO DE LODO E BIOGÁS NA ETE PINEDO 2, VALÊNCIA.	82
FIGURA 5-19: VISTA GERAL DO GASÔMETRO PARA ARMAZENAMENTO DE BIOGÁS NA ETE PINEDO 2, VALÊNCIA.	82
FIGURA 5-20: VISTA GERAL DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DA ETE PINEDO 2, VALÊNCIA.	82

FIGURA 5-21: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE POSSÍVEL ARRANJO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS E LODO EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO (PEQUENO PORTE).	86
FIGURA 5-23: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE POSSÍVEL ARRANJO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS E LODO GERADO EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO COM O USO DA GASEIFICAÇÃO (GRANDE PORTE)	88
FIGURA 5-24: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE POSSÍVEL ARRANJO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS E LODO GERADO EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO COM O USO DA COMBUSTÃO (GRANDE PORTE).	89
FIGURA 6-1: FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DAS ETAPAS RELACIONADAS COM O SISTEMA DE GERENCIAMENTO DO LODO E DO BIOGÁS NA ETE <i>LABOREAUX</i> .	92
FIGURA 6-2: CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS NA ETE <i>LABOREAUX</i> (JUL./2011 A MAI./2012). (A) CONCENTRAÇÕES DE DBO, (B) DQO E (C) SST.	93
FIGURA 6-3: ESQUEMA ILUSTRATIVO DA LOCALIZAÇÃO DAS EEE-1 E EEE-2 E SUAS ALTURAS GEOMÉTRICAS DE RECALQUE	95
FIGURA 6-4: DEMANDA DE ENERGIA DA ETE <i>LABOREAUX</i> PARA O PERÍODO DE OUT./2010 A OUT./2011.	96
FIGURA 6-5: CENÁRIOS PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS SUBPRODUTOS DA ETE <i>LABOREAUX</i> : (A) CENÁRIO 1 - USO DO BIOGÁS PARA A COMBUSTÃO E GERAÇÃO DE CALOR PARA A SECAGEM TÉRMICA DO LODO, COM O EXCESSO DO BIOGÁS UTILIZADO PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE; (B) CENÁRIO 2 - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE, A PARTIR DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI) UTILIZANDO BIOGÁS COMO COMBUSTÍVEL, COM O APROVEITAMENTO DO CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO DO MCI PARA A SECAGEM TÉRMICA DE LODO DESIDRATADO.	97
FIGURA 6-6: ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CENÁRIO 1 (USO PRIORITÁRIO DO BIOGÁS EM CÂMARA DE COMBUSTÃO VISANDO A GERAÇÃO DE CALOR PARA A SECAGEM TÉRMICA DO LODO DESIDRATADO E O EXCEDENTE DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE EM MCI) PARA A ETE <i>LABOREAUX</i> .	100
FIGURA 6-7: ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CENÁRIO 2 (USO PRIORITÁRIO DE BIOGÁS EM MCI VISANDO A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE E APROVEITAMENTO DO CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO DO MOTOR PARA A SECAGEM TÉRMICA DE LODO) PARA A ETE <i>LABOREAUX</i> .	100
FIGURA 6-8: COMPOSIÇÃO IMEDIATA DO LODO DESIDRATADO POR FILTRO PRENSA NA ETE <i>LABOREAUX</i> , EM BASE SECA.	110
FIGURA 6-9: COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO LODO DESIDRATADO POR FILTRO PRENSA NA ETE <i>LABOREAUX</i> , EM BASE SECA.	110
FIGURA 6-10: CORRELAÇÃO DAS RAZÕES ATÔMICAS DE H/C E O/C PARA O LODO DE FILTRO PRENSA DA ETE <i>LABOREAUX</i> E COMPARAÇÃO COM OUTROS AUTORES.	111
FIGURA 6-11: PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR, TEÓRICOS E REAIS, PARA O LODO DE FILTRO PRENSA DA ETE <i>LABOREAUX</i> .	111
FIGURA 6-12: DIAGRAMA DE COMBUSTÃO DO LODO DESIDRATADO DA ETE <i>LABOREAUX</i> , ITABIRA.	112
FIGURA 6-13: BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS PARA A SECAGEM TÉRMICA DO LODO DESIDRATADO NA ETE <i>LABOREAUX</i> – CENÁRIO 1.	113
FIGURA 6-14: BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE SEGUIDA DE SECAGEM TÉRMICA DO LODO COM OS GASES DE EXAUSTÃO NA ETE <i>LABOREAUX</i> – CENÁRIO 2.	115
FIGURA 6-15: REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE (T.CO ₂ E) PARA O CENÁRIO 1.	118

FIGURA 6-16: REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE (T.CO ₂ E) PARA O CENÁRIO 2-A.	119
FIGURA 6-17: REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE (T.CO ₂ E) PARA O CENÁRIO 2-B.	119
FIGURA 7-1: CENÁRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM ETES, COM O BOMBEAMENTO DE ESGOTO NAS FAIXAS DE: 0 A 2 M (SITUAÇÃO 1), 5 A 7 M (SITUAÇÃO 2) E 14 A 16 M (SITUAÇÃO 3).	128
FIGURA 7-2: ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO TÍPICAMENTE DOMÉSTICO EM FUNÇÃO DE VAZÃO AFLUENTE DE ATÉ 2.500 L.S ⁻¹ .	130
FIGURA 7-3: ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO EM FUNÇÃO DE VAZÃO AFLUENTE DE ATÉ 2.500 L.S ⁻¹ .	130
FIGURA 7-4: ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO EM FUNÇÃO PARA POPULAÇÃO DE ATÉ 1 MILHÃO DE HABITANTES.	130
FIGURA 7-5: ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO APÓS A DESIDRATAÇÃO EM (A) FILTRO PRENSA E (B) CENTRÍFUGA.	131
FIGURA 7-6: BOX PLOT DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LODO E DAS UNIDADES DE DESIDRATAÇÃO.	132
FIGURA 7-7: POTENCIAL ENERGÉTICO TOTAL DE ETE COM ATÉ 1.000.000 HABITANTES COM O USO DE FILTRO PRENSA COMO UNIDADE DE DESIDRATAÇÃO.	133
FIGURA 7-8: POTENCIAL ENERGÉTICO TOTAL DE ETE COM ATÉ 1.000.000 HABITANTES COM O USO DE CENTRÍFUGA COMO UNIDADE DE DESIDRATAÇÃO.	133
FIGURA 7-9: POTÊNCIA REQUERIDA PELAS EEE PARA O BOMBEAMENTO DE ESGOTO NA (A) PIOR CENÁRIO; (B) CENÁRIO TÍPICO; E (C) MELHOR CENÁRIO.	134
FIGURA 7-10: RELAÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA PARA O BOMBEAMENTO DE ESGOTO E A PRODUÇÃO DE ENERGIA LÍQUIDA A PARTIR DO BIOGÁS: (A) PIOR CENÁRIO; (B) CENÁRIO TÍPICO; (C) MELHOR CENÁRIO.	135
FIGURA 7-11: ESTIMATIVA DA RELAÇÃO DE ENERGIA CONSUMIDA/GERADA EM ETES EM FUNÇÃO DA ALTURA DE BOMBEAMENTO DO ESGOTO EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS.	136
FIGURA 7-12: VARIAÇÃO DA ENERGIA DISPONÍVEL PARA AS ETES EM FUNÇÃO DO CENÁRIO ESTUDADO E DA FAIXA DE ALTURA DE BOMBEAMENTO DO ESGOTO NAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ESGOTO: (A) PIOR CENÁRIO; (B) CENÁRIO TÍPICO; (C) MELHOR CENÁRIO.	137
FIGURA 7-13: ESTIMATIVA DA ENERGIA DISPONÍVEL PARA OUTROS USOS A PARTIR DA VAZÃO AFLUENTE DAS ETES: (A) PIOR CENÁRIO; (B) CENÁRIO TÍPICO; (C) MELHOR CENÁRIO.	138
FIGURA 7-14: VALIDAÇÃO DO MODELO A PARTIR DOS DADOS DE MONITORAMENTO DA ETE <i>LABOREAUX</i> .	139
FIGURA 7-15: VALIDAÇÃO DO MODELO A PARTIR DOS DADOS DE MONITORAMENTO DA ETE NOVA CONTAGEM.	141

LISTA DE TABELAS

TABELA 1-1: CARACTERÍSTICA E QUANTIDADE DE LODO PRODUZIDO EM REATORES UASB E SEGUIDO DE PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO.	6
TABELA 1-2: RELAÇÕES ENTRE AS DIVERSAS BASES PARA UM COMBUSTÍVEL.	8
TABELA 1-3: COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA (BASE SECA).	8
TABELA 1-4: VALORES TÍPICOS PODER CALORÍFICO INFERIOR DA BIOMASSA (BASE SECA).	10
TABELA 1-5: PARCELAS COMPONENTES DO LODO E SUAS CARACTERÍSTICAS.	12
TABELA 1-6: FAIXAS DE DENSIDADES E MASSAS ESPECÍFICAS DE DIVERSOS TIPOS DE LODO.	13
TABELA 1-7: FAIXAS DE CAPTURA DE SÓLIDOS PARA A DIGESTÃO SECUNDÁRIA NO TRATAMENTO DE LODO.	14
TABELA 1-8: DADOS SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO.	17
TABELA 1-9: CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO TÍPICAS DO BIOGÁS.	18
TABELA 1-10: VALORES CALORÍFICOS MÍNIMOS DO BIOGÁS E DE OUTROS COMBUSTÍVEIS.	19
TABELA 1-11: DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS PARA O GERENCIAMENTO DO BIOGÁS.	21
TABELA 1-12: COMPARAÇÃO DOS PROCESSO DE PIRÓLISE.	28
TABELA 1-13: COMPARAÇÃO DO RENDIMENTO (%) PARA DIVERSOS TIPOS DE LODO EM UM PROCESSO DE CONVERSÃO A BAIXA TEMPERATURA.	30
TABELA 1-14: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ETAPAS ENVOLVIDAS NA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.	33
TABELA 1-15: DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE GASEIFICADORES DE LEITO FIXO PARA BIOMASSA.	35
TABELA 1-16: CARACTERÍSTICAS DAS ETES E DOS PROCESSOS RELACIONADOS À GASEIFICAÇÃO DO LODO PARA AS ETES DE BALINGEN E MANNHEIM.	37
TABELA 1-17: DISTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES DE CH ₄ NO BRASIL PARA DIVERSOS SETORES.	44
TABELA 1-18: DESCRIÇÃO DOS PROJETOS EM VALIDAÇÃO/APROVAÇÃO NO BRASIL.	46
TABELA 1-19: CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ETE DE SAMRA (JORDÂNIA).	48
TABELA 1-20: DADOS GERAÇÃO DE BIOGÁS E DO BALANÇO ENERGÉTICO DA ETE SAN FERNANDO, COLÔMBIA, ANO DE 2009.	51
TABELA 4-1: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ETE <i>LABOREAUX</i>	62
TABELA 5-1: CARACTERÍSTICAS DO LODO DESIDRATADO EM ETES, DE ACORDO COM DIVERSOS AUTORES.	67
TABELA 5-2: PRINCIPAIS POSSIBILIDADES E BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DO LODO GERADO EM ETES COM FINS ENERGÉTICOS.	69
TABELA 5-3: CLASSIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E PROCESSOS INTERVENIENTES.	70
TABELA 5-4: COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS TÉRMICOS PARA LODO SECUNDÁRIO DE ETES.	70
TABELA 5-5: ANÁLISE COMPARATIVA DAS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO TÉRMICO PARA LODO DE ETE (PIRÓLISE, GASEIFICAÇÃO E COMBUSTÃO). BALANÇO DE VANTAGENS E DESVANTAGENS.	72

TABELA 5-6: AVALIAÇÃO RELATIVA DAS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS DE PROCESSO TÉRMICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LODO ANAERÓBIO DESIDRATADO.....	73
TABELA 5-7: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ETES PINEDO 1 E PINEDO 2	80
TABELA 5-8: RESUMO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS, COM ÊNFASE NO GERENCIAMENTO DO LODO E DO BIOGÁS, NAS ETES VISITADAS	84
TABELA 6-1: PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DOS PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR TEÓRICOS PARA O LODO DA ETE <i>LABOREAUX</i>	94
TABELA 6-2: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ELEVATÓRIAS (EEE-1 E EEE-2) DA ETE <i>LABOREAUX</i>	95
TABELA 6-3: PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO TOTAL DA ETE <i>LABOREAUX</i>	96
TABELA 6-4: DADOS DE ENTRADA PARA A AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS SUBPRODUTOS DA ETE <i>LABOREAUX</i>	98
TABELA 6-5: CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE QUEIMA DO BIOGÁS EM SECADOR (CENÁRIO 1) E EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI, NOS CENÁRIOS 1 E 2). NO CENÁRIO 2 O SECADOR IRÁ APROVEITAR O CALOR RESIDUAL DOS GASES DE ESCAPAMENTO DO MCI.....	98
TABELA 6-6: ATIVIDADES DE PROJETO SUGERIDAS PARA A ETE <i>LABOREAUX</i> , DETALHAMENTO DO DESTINO DO LODO E APLICAÇÃO DO BIOGÁS E METODOLOGIAS DO UNFCCC UTILIZADAS.	99
TABELA 6-7: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS DE VAZÃO AFLUENTE, DQO DO ESGOTO E DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA ETE <i>LABOREAUX</i> NO PERÍODO OUT./2010 A OUT./2011.	107
TABELA 6-8: RELAÇÕES UNITÁRIAS DE PRODUÇÃO DE METANO, DE BIOGÁS E DE ENERGIA NOS REATORES UASB.	108
TABELA 6-9: DADOS DA MASSA DE LODO PENSADO ENVIADO PARA O ATERRO SANITÁRIO DA CIDADE DE ITABIRA-MG NO PERÍODO DE OUT/2010 A OUT/2011.	109
TABELA 6-10: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LODO DESIDRATADO GERADO NA ETE <i>LABOREAUX</i>	110
TABELA 6-11: COMPARAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO LODO DESIDRATADO DA ETE <i>LABOREAUX</i> COM OUTRAS FONTES DE BIOMASSA.	111
TABELA 6-12: BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA O CENÁRIO 1.	114
TABELA 6-13: BALANÇO DE MASSA PARA A SECAGEM TÉRMICA POR COMBUSTÃO DE BIOGÁS – CENÁRIO 1.	114
TABELA 6-14: BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA O CENÁRIO 2.	116
TABELA 6-15: RESUMO DOS CENÁRIOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO PARA A ETE <i>LABOREAUX</i>	116
TABELA 6-16: DADOS DE ENTRADA PARA A ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO ₂ E. (CENÁRIOS 1 E 2).	117
TABELA 6-17: REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE METANO (T.CO ₂ E.) PELO NÃO ENVIO DO LODO DESIDRATADO PARA O ATERRO SANITÁRIO, NAS TRÊS CONDIÇÕES AVALIADAS.....	117
TABELA 6-18: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENÁRIOS ESTUDADOS E A RECEITA BRUTA OBTIDA COM A VENDA DOS CRÉDITOS DE CARBONO.....	120
TABELA 7-1: DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PIOR E MELHOR CENÁRIOS PARA O MODELO MATEMÁTICO RELATIVOS AO LODO E BIOGÁS GERADOS EM REATORES UASB.	123
TABELA 7-2: DADOS DE ENTRADA PARA BIOGÁS E LODO CONSIDERADOS NO MODELO.....	125
TABELA 7-3: EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE LODO ANAERÓBIO NO REATOR UASB... ..	126

TABELA 7-4: DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS PARA A ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO E PRODUÇÃO LÍQUIDA DE ENERGIA NAS ETES	128
TABELA 7-5: RELAÇÕES UNITÁRIAS DE PRODUÇÃO DE METANO E DE ENERGIA EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO.....	129
TABELA 7-6: RESUMO COM AS INFORMAÇÕES SOBRE A REGRESSÃO LINEAR PARA DIVERSAS RELAÇÕES PROPOSTAS.	131
TABELA 7-7: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA DO LODO, EM MJ.D ⁻¹ , PARA DIFERENTES CENÁRIOS E CONDIÇÕES DE DESIDRATAÇÃO.....	132
TABELA 7-8: RESUMO COM AS INFORMAÇÕES SOBRE REGRESSÃO LINEAR PARA DIVERSAS RELAÇÕES PROPOSTAS REFERENTES AO LODO.	132
TABELA 7-9: REGRESSÃO LINEAR PARA O POTENCIAL ENERGÉTICO TOTAL DA ETE (MJ.D ⁻¹) EM FUNÇÃO DA POPULAÇÃO CONTRIBUINTE (HAB), PARA AS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DESIDRATAÇÃO.....	133
TABELA 7-10: RELAÇÕES ENTRE O POTENCIAL GERADO DO BIOGÁS E LODO, PARA DIFERENTES CENÁRIOS E CONDIÇÕES DE DESIDRATAÇÃO.	134
TABELA 7-11: ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA A RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELAS ELEVATÓRIAS DE ESGOTO E A ENERGIA ÚTIL GERADA PELO BIOGÁS.....	135
TABELA 7-12: REGRESSÃO LINEAR DA ALTURA DE BOMBEAMENTO DE 0 A 2 M E A RELAÇÃO ENERGIA CONSUMIDA/GERADA EM ETES, PARA OS TRÊS CENÁRIOS.....	136
TABELA 7-13: RESUMO COM AS INFORMAÇÕES SOBRE A REGRESSÃO LINEAR PARA DIFERENTES FAIXAS DE ALTURAS ENTRE A VAZÃO DE ESGOTO (L.S ⁻¹) E A ENERGIA DISPONÍVEL PARA AS ETES...	137
TABELA 7-14: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LODO DESIDRATADO GERADO NA ETE LABOREAUX UTILIZADOS PARA A VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	138
TABELA 7-15: RELAÇÕES UNITÁRIAS OBTIDAS A PARTIR DE DADOS REAIS DA CARACTERIZAÇÃO DO LODO E BIOGÁS NA ETE <i>LABOREAUX</i>	140
TABELA 7-16: ESTUDO DO PODER CALORÍFICO E DE RELAÇÕES UNITÁRIAS PARA DADOS MEDIDOS NA ETE <i>LABOREAUX</i> E SIMULADOS PELO MODELO DE MONTE CARLO.	140
TABELA 7-17: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LODO DESIDRATADO GERADO NA ETE NOVA CONTAGEM UTILIZADOS PARA A VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS

Instituições e conselhos	
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
CePTS	Centro de pesquisa e Treinamento em Saneamento
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPASA	Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais
COP	Conferência das Partes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Estado Do Paraná
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
USEPA	<i>United States Environment Protection Agency</i>
WEF	<i>Water Environment Federation</i>
Componentes associados ao tratamento de esgoto e energia	
CRE	Certificados de redução de emissões
COV	Carbono orgânico volátil
CO ₂ e.	CO ₂ equivalente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
DS	Decantados secundário
EEE	Estação elevatória de esgoto
ETE	Estação de tratamento de esgotos
FBP	Filtro biológico percolador
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
MCI	Motores de combustão interna
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
PAH	Hidrocarbonetos Poliaromáticos
PCI	Potencial calorífico inferior
PCS	Potencial calorífico superior
SV	Sólidos voláteis
SST	Sólidos em suspensão totais
ST	Sólidos totais
STV	Sólidos totais voláteis
TDH	Tempo de detenção Hidráulico
UASB	' <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> ' (Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta)

INTRODUÇÃO

Atualmente pode-se afirmar que os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo ou UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), empregados no tratamento de esgoto doméstico, já apresentam grande aplicação e certo estágio de maturidade tecnológica, em especial em países tropicais, com destaque para o Brasil. O diagnóstico do uso dos reatores UASB revela vários sistemas operando em escala plena por mais de 10 anos e atendendo equivalentes populacionais variando de 1.000 até cerca de 1 milhão de habitantes.

Esta alternativa de tratamento de baixo custo, reduzida demanda de área e consumo de eletricidade, dentre outros fatores, no Brasil, praticamente todas as análises de alternativas de tratamento do esgoto doméstico incluem os reatores UASB como uma das principais opções.

No entanto, apesar de suas vantagens, os reatores UASB apresentam ainda limitações não completamente solucionadas. Caso adequadas diretrizes para projeto, construção e operação não sejam disponibilizadas em curto espaço de tempo, a tecnologia pode ser desacreditada e a sua aplicação reduzida (CHERNICHARO e STUETZ, 2008). De forma paralela, o emprego dos reatores UASB apresenta potenciais ainda não explorados até o presente.

De acordo com a experiência brasileira, as melhorias possíveis a respeito do projeto e operação dos reatores de UASB tratando esgoto doméstico são relatadas nos tópicos apresentados na Figura 0-1, que foram agrupados como a seguir: pré-tratamento e bombeamento; biogás e gás residual; efluente líquido; lodo e o próprio reator. Observa-se ainda a presença de itens ainda não mencionados ou de relevância até alguns anos atrás. Um exemplo disso se refere ao aproveitamento energético do lodo, com vistas à produção de energia para a estação, garantindo também maior facilidade e menores custos no gerenciamento do lodo, pela redução de seu volume a ser disposto.

A mudança do paradigma sobre a forma de disposição do lodo tem sido revelada através da tendência crescente do uso de processos alternativos no gerenciamento de lodo de ETEs (Estações de tratamento de esgoto), dentre elas a combustão/incineração, pirólise e gaseificação e cocombustão (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

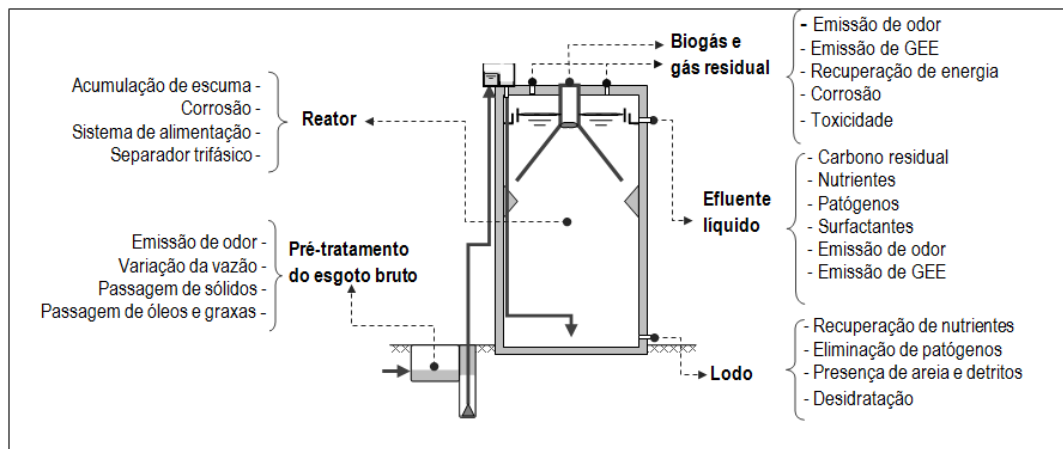


Figura 0-1: Tópicos de interesse para possíveis melhorias em reatores UASB.

Fonte: Chernicharo e Suetz (2008)

Diante deste contexto, observa-se uma nova área de pesquisa ainda a ser explorada com a recuperação energética do lodo, a qual pode ser atrelada com os estudos de aproveitamento do biogás para este mesmo fim, revelando inúmeras possibilidades de uso individual ou combinado, tendo como intuito a geração de energia ou calor em benefício da própria ETE ou o repasse a terceiros. O desenvolvimento da recuperação energética dos principais subprodutos gerados em reatores UASB tem o potencial de conferir às estações maior independência energética e vantagens no âmbito ambiental, social e econômico.

A necessidade de avanços na recuperação energética do lodo e do biogás, atrelado ao seu representativo potencial energético e constante produção nas ETEs justificam os estudos que propõe o uso destes materiais como fonte de energia térmica/elétrica. No Brasil, o lodo é geralmente encaminhado para aterro sanitário e o biogás queimado em flare.

Esta pesquisa busca contribuir com o estudo do aproveitamento energético dos subprodutos gerados em reatores UASB, a fim de demonstrar que estes podem se constituir em fonte de energia renovável para as estações de tratamento.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Reatores UASB no tratamento de esgoto doméstico

De forma geral, observa um aumento gradual no atendimento e acesso ao serviço de esgotamento sanitário no país. De acordo com os dados mais recentes da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), o percentual de domicílios com acesso à rede geral de esgoto é de 44%, sendo que apenas 28,5% dos municípios brasileiros com esgotamento por rede pública são atendidos por estações de tratamento de esgoto (IBGE, 2008). Os dados quando confrontados com a pesquisa realizada no ano de 2000 atestam uma melhora na situação do esgotamento sanitário, apesar de se observar um cenário aquém às condições adequadas de saneamento.

Diante dos dados apresentados, aliado ao quadro epidemiológico e ao perfil sócio-econômico das comunidades brasileiras, constata-se a necessidade por sistemas simplificados de tratamento dos esgotos. As variantes para o tratamento biológico de esgoto podem ser enquadrados, de forma geral, como sistemas aeróbios e anaeróbios.

O processo anaeróbio de tratamento de esgoto apresenta vantagens em relação ao sistema aeróbio. Destaca-se que no sistema anaeróbio o consumo de energia para a operação do sistema é reduzido, além da possibilidade de geração de energia pelo aproveitamento do biogás, concomitante à baixa geração do lodo, o qual já se encontra estabilizado. A Figura 1-1 apresenta as rotas de conversão para os sistemas anaeróbio e aeróbio a partir de uma abordagem mais ampla.

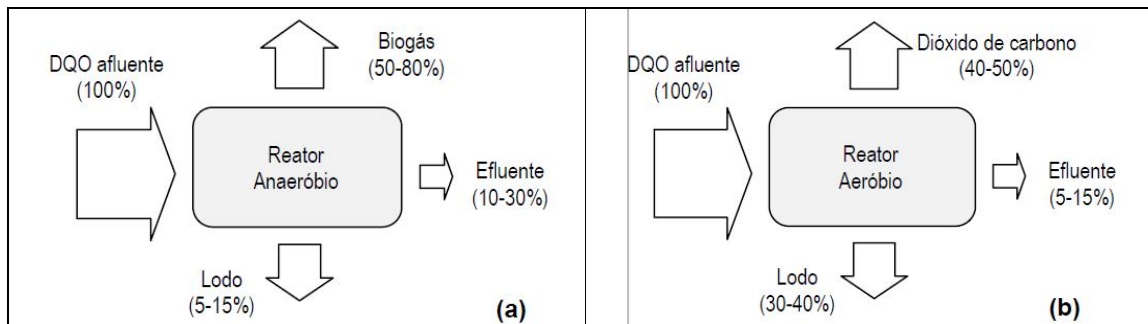


Figura 1-1: Rotas de conversão de matéria orgânica em sistema anaeróbio (a) e sistema aeróbio (b).

Fonte: Chernicharo (2007)

Entende-se que, atualmente, no Brasil, os sistemas anaeróbios encontram uma grande aplicabilidade. As diversas características favoráveis destes sistemas, como o baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos, aliadas às condições ambientais no

Brasil, onde há a predominância de elevadas temperaturas, têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos em posição de destaque, particularmente os reatores de manta de lodo (reatores UASB) (CHERNICHARO *et al.* 2001).

Os reatores UASB, como principais representantes da tecnologia de tratamento anaeróbio, participariam de um sistema de produção de recursos aproveitáveis para a sociedade, na medida em que os reatores anaeróbios removem grande quantidade da matéria orgânica afluyente e geram subprodutos utilizáveis, tais como o lodo excedente e o biogás (LOBATO, 2011).

1.2 Subprodutos do tratamento anaeróbio de esgoto

1.2.1 Lodo

1.2.1.1 Produção de lodo

A Figura 1-2 apresenta as principais parcelas geradas a partir da carga de DQO afluyente ao reator UASB, de forma simplificada, o balanço de massa apresenta a conversão de DQO a metano no biogás (1), perdas diversas (2, 3 e 4), conversão a sulfato (6), conversão a lodo (7) e DQO perdida no efluente final (5).

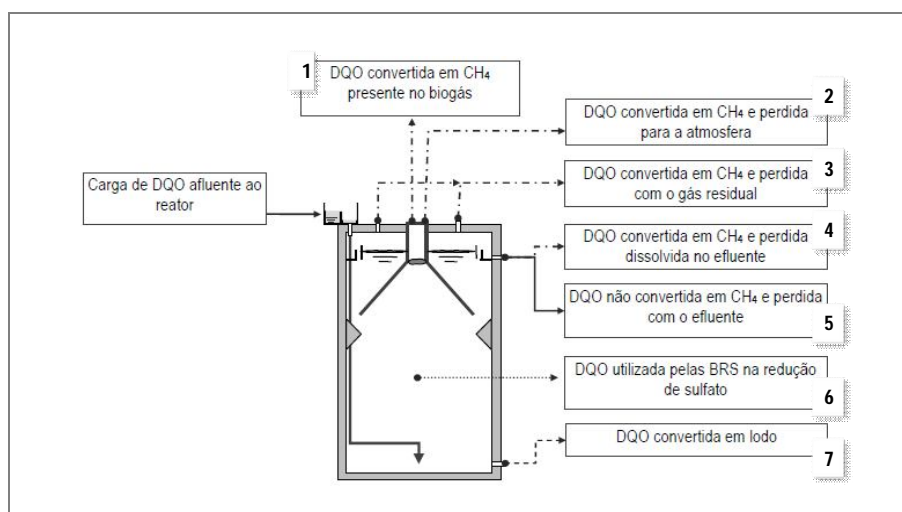


Figura 1-2: Rotas de conversão de DQO e fluxos de metano em reatores UASB.

A produção de lodo secundário (biológico) deve ser estimada tendo como base os coeficientes cinéticos e estequiométricos do processo de tratamento. De forma geral, o lodo gerado compõe-se das seguintes parcelas: (i) sólidos biológicos: produzidos no sistema às custas da remoção de matérias orgânica e (ii) sólidos inertes do esgoto bruto: sólidos não biodegradáveis, acumulados no sistema (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A massa de DQO convertida na forma de biomassa em reatores UASB pode ser estimada por meio das equações 1-1 e 1-2, de acordo com Chernicharo *et al.* (2001).

$$DQO_{lodo} = Y_{obs} \times DQO_{removida} \quad (1-1)$$

Em que:

DQO_{lodo} = massa diária de DQO convertida em lodo ($kgDQO_{lodo} \cdot d^{-1}$);

Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema ($kgDQO_{lodo} \cdot kgDQO_{removida}^{-1}$);

DQO_{remov} = massa diária de DQO removida no sistema ($kgDQO_{remov} \cdot d^{-1}$).

$$Y_{obs} = Y \times K \quad (1-2)$$

Em que:

Y = coeficiente de produção de sólidos em termos de DQO ($0,15 kgSVT^{-1} \cdot kgDQO_{remov}^{-1}$);

K = fator de conversão de STV em DQO ($1,42 kgDQO_{lodo} \cdot kgSVT^{-1}$).

Ressalta-se que a DQO convertida em lodo, calculada pela equação 1-1, pode ser dividida em duas parcelas: (i) DQO convertida em lodo e retida no sistema e (ii) DQO convertida em lodo e perdida junto ao efluente. De maneira geral a fração de DQO convertida em biomassa é expressa pela equação 1-3:

$$\%DQO_{convertidaembiomassa} = \frac{\text{Cargade DQO}_{convertidaem lodo} \text{ (kg)}}{\text{Cargade DQO}_{removida} \text{ (kg)}} \quad (1-3)$$

No que se refere à produção de lodo, a equação 1-4 ilustra o cálculo. O valor do coeficiente de produção de lodo, de acordo com Chernicharo (2007) está compreendido na faixa de 0,10 a 0,20 $kgSST \cdot kgDQO_{aplicada}^{-1}$.

$$P_{lodo} = Y \times DQO_{aplicada} \quad (1-4)$$

Em que:

P_{lodo} = Produção de lodo ($kgSST \cdot d^{-1}$);

Y = coeficiente de produção de lodo ($kgSST \cdot kgDQO_{aplicada}^{-1}$);

$DQO_{aplicada}$ = carga de DQO aplicada ($kgDQO_{aplicada} \cdot d^{-1}$).

A equação 1-5 apresenta o cálculo da produção volumétrica de lodo em um sistema, nota-se uma relação inversa entre a concentração de sólidos e o volume de lodo. Ressalta-se que essa relação é aplicável apenas à água livre, de mais fácil remoção.

$$Q_{\text{lodo}} = \frac{P_{\text{lodo}}}{C_{\text{lodo}} \times \gamma} \quad (1-5)$$

Em que:

Vazão de lodo = produção volumétrica de lodo ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

Q_{lodo} = produção de lodo ($\text{kgSST} \cdot \text{d}^{-1}$);

C = concentração do lodo (%);

γ = massa específica do lodo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

A Tabela 1-1 apresenta as principais características do lodo anaeróbico produzido e descartado da fase líquida enviado ao tratamento de lodo.

Tabela 1-1: Característica e quantidade de lodo produzido em reatores UASB e seguido de pós-tratamento aeróbio.

Unidade	kgSS.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	(%) sólidos secos	Massa de lodo (gSS.hab ⁻¹ .d ⁻¹)	Volume de lodo (L.hab ⁻¹ .d ⁻¹)
Reator UASB	0,12-0,18	3-6	12-18	0,2-0,6
UASB+pós-tratamento aeróbio¹				
Lodo anaeróbico (UASB)	0,12-0,18	3-4	12-18	0,3-0,6
Lodo aeróbio ²	0,08-0,14	3-4	8-14	0,2-0,5
Total	0,20-0,32	3-4	20-32	0,5-1,1

¹pós-tratamento aeróbio: lodos ativados, biofiltro aerado submerso e filtro biológico. ² após redução de massa e volume na digestão e adensamento que ocorrem no próprio reator.

Fonte: Adaptado de Von Sperling e Gonçalves (2001)

1.2.1.2 Caracterização do lodo

O lodo gerado em ETEs a partir de esgoto tipicamente doméstico é uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, além de microrganismos. Parte de seus constituintes, como a fração da matéria orgânica (da ordem de 60 %, em base seca) e nutrientes são valorizados para diversos usos, como a aplicação agrícola. As características do lodo permitem o seu uso para fins energéticos, o qual quando utilizado como fonte de energia apresenta poder calorífico superior compatível com o carvão fóssil (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

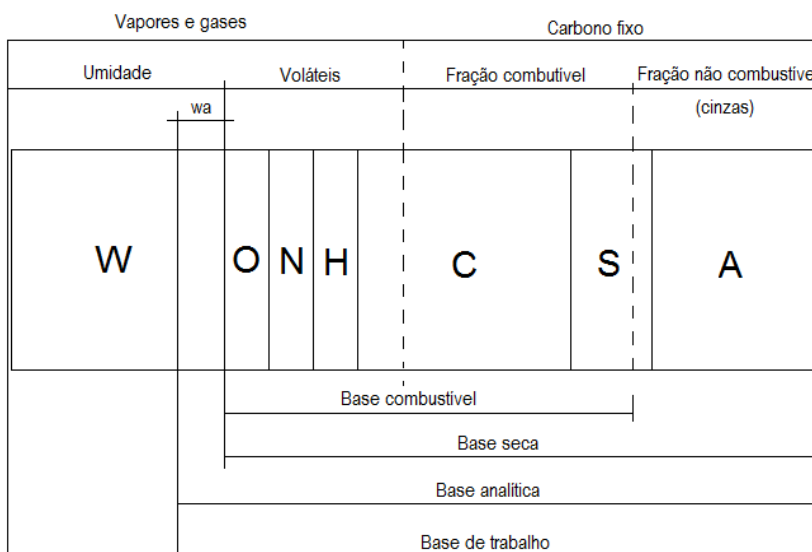
Com o objetivo de determinar o potencial de um combustível faz-se necessário o conhecimento de suas características químicas e térmicas fundamentais, sendo expressa através da composição elementar, composição imediata e do poder calorífico.

Composição imediata

Este conceito refere-se à constituição em porcentagem de massa das parcelas de carbono fixo, sólidos voláteis, umidade e cinzas que podem ser obtidas através de um ensaio térmico sob condições controladas.

A fração volátil desempenha uma importante função durante a ignição e nas etapas iniciais de combustão da biomassa (CORTEZ *et al.*, 2008), enquanto que as cinzas resultam como subproduto do processo de queima e o carbono fixo está diretamente relacionado com o potencial de combustão e de carbonização por pirólise.

No esquema a seguir (Figura 1-3) é apresentada a relação entre as composições imediata e elementar em um combustível.



(W) umidade, (O) oxigênio, (N) nitrogênio, (H) hidrogênio, (C) carbono, (S) enxofre, (A) cinzas, (wa) umidade da amostra nas condições de campo

Figura 1-3: Relação entre a composição elementar (ao centro) e imediata (acima) de um combustível, expressa em diversas bases.

Fonte: Cortez *et al.* (2008)

Os dados da composição imediata podem ser expressos de diversas formas, sendo a base analítica correspondente à análise sem a umidade externa (perdida até o transporte ao laboratório), a base seca exclui qualquer tipo de umidade e a base combustível considera apenas os principais componentes do material a ser oxidado, portanto, sem umidade e cinzas. A base de trabalho faz inferência à umidade natural do material, considerando além desta a composição elementar e cinzas. Soler e Lora (1991) *apud* Cortez *et al.* (2008) apresentam a relação para a devida conversão das bases que o combustível pode assumir (Tabela 1-2).

Tabela 1-2: Relações entre as diversas bases para um combustível.

Base de trabalho que se tem como dada	Base do combustível que se deseja obter		
	trabalho	seca	Combustível
trabalho	1	$(100 - W)/100$	$(100 - W^t - A^t)/100$
seca	$(100 - W)/100$	1	$(100 - A^s)/100$
combustível	$(100 - W^t - A^t)/100$	$(100 - A^s)/100$	1

(A) cinzas, (W) umidade, (t) trabalho, (s) seco

Fonte: Soler e Lora (1991) *apud* Cortez *et al.*(2008)**Composição elementar**

Esta composição retrata a constituição do material, em porcentagem de massa, dos elementos: carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), além dos constituintes umidade (W) e material residual (cinzas). Esta determinação é a característica técnica mais relevante dos combustíveis, por constituir a base para análises dos processos de combustão, tais como o cálculo dos volumes de ar, gases e entalpia, a fim de se obter o poder calorífico do combustível (CORTEZ *et al.*, 2008). Verifica-se que a maior contribuição, em porcentagem, é da parcela de carbono, hidrogênio e oxigênio. Na Tabela 1-3 é apresentada a composição elementar para alguns tipos de biomassa.

Tabela 1-3: Composição elementar da biomassa (base seca).

Tipo de biomassa	Composição elementar (%)					
	C	H	O	N	S	A
Pinus	49,3	6,0	44,4	0,06	0,03	0,30
Eucalipto	49,0	5,9	44,0	0,30	0,01	0,72
Casca de arroz	41,0	4,3	35,9	0,40	0,02	18,34
Bagaço de cana	44,8	5,4	39,6	0,38	0,01	9,79
Casca de coco	48,2	5,2	33,2	2,98	0,12	10,25
Sabugo de milho	46,6	5,9	45,5	0,47	0,01	1,40
Ramos de algodão	47,1	5,4	40,8	0,65	0,21	5,89

(C) carbono, (H) hidrogênio, (O) oxigênio, (N) nitrogênio, (S) enxofre, (A) cinzas

Fonte: Jenkins (1990) *apud* Cortez *et al.*(2008)

A biomassa é altamente oxigenada (30 a 40% em base seca, b.s.) comparada a combustíveis fósseis convencionais incluindo hidrocarbonetos líquidos e carvões. O constituinte majoritário da biomassa é o carbono (30 a 60% em b.s.) dependendo do teor de cinzas, seguido do hidrogênio (5 a 6% em b.s.), de nitrogênio, enxofre e cloro, esses usualmente presentes em teores inferiores a 1% em b.s (VIRMOND, 2007).

Poder calorífico

O poder calorífico corresponde à energia liberada na forma de calor após a combustão completa de um material combustível. O poder calorífico inferior (PCI) expressa a geração de energia, não se considerando o calor latente de condensação do vapor de água dos produtos da combustão; e o poder calorífico superior (PCS), quando o calor latente é incluído. De maneira

simplificada, pode-se dizer que o PCI refere-se ao calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis, enquanto que o PCS é em torno de 10 a 20 % mais elevado; como o calor de condensação da umidade dos gases é tecnicamente irrecuperável, parece ser preferível o uso do PCI (NOGUEIRA e LORA, 2003).

A determinação deste parâmetro pode ser teórica, através do conhecimento da análise elementar ou imediata do combustível ou dada de forma experimental com o uso de uma bomba calorimétrica. O poder calorífico é expresso, de forma mais usual, em kJ.kg^{-1} ou J.g^{-1} . A equação 1-6 faz referência à fórmula de Dulong e expressa o cálculo do PCS a partir da composição elementar de combustíveis. Durante a combustão do material, o carbono e o hidrogênio são oxidados liberando calor (reações exotérmicas) e formam o CO_2 e H_2O , a presença desses elementos contribui positivamente com o PCS, enquanto que o oxigênio possui uma influencia negativa (OBERNBERGER *et al.*, 2006).

$$PCS = [337,3 \times C + 1.418,9 \times (H - O/8) + 93,1 \times S + 23,3 \times N] / 1000 \quad (1-6)$$

Em que:

PCS = Poder calorífico superior, base seca (MJ.kg^{-1});

C = % de carbono no material, base seca;

H = % de hidrogênio no material, base seca;

O = % de oxigênio no material, base seca;

S = % de enxofre no material, base seca;

N = % de nitrogênio no material, base seca;

Na Tabela 1-4 são apresentados os valores de PCI para algumas fontes de biomassa. Entretanto, sabe-se que o valor quantitativo deste parâmetro pode variar de acordo com a sua composição imediata e teores de umidade da biomassa. Diante da variação de PCI com a umidade, Cortez *et al.* (2008) apresentam um modelo para a conversão do PCS (base seca) para o PCI (base de trabalho), como segue na equação 1-7.

Tabela 1-4: Valores típicos Poder calorífico inferior da biomassa (base seca).

Tipo de biomassa	Poder calorífico Inferior (PCI) MJ.kg ⁻¹
Lenha seca ao ar	8,2
Esterco	13,6
Casca de coco	16,7
Casca de café	13,4
Capim elefante	15,1
Bagaço de cana	17,3

Fonte: ONU (1987)

$$PCI_t = [(PCS_s - \lambda \times (r + 0,09 \times H_s)) \times (100 - W_t)] / 100 \quad (1-7)$$

Em que:

PCI_t = poder calorífico inferior, base de trabalho (MJ.kg⁻¹);PCS_s = poder calorífico superior, base seca (MJ.kg⁻¹);λ = calor latente da água (2,31 MJ.kg⁻¹ a 25 °C);r = W_t/(100-W_t);W_t = umidade na base de trabalho (%);H_s = % de hidrogênio, base seca.

De forma complementar, para a determinação das propriedades energéticas dos combustíveis, o diagrama de Van Krevelen (Figura 1-4) permite a inferência das características de combustão do material sólido em função de sua estrutura química. O diagrama evidencia a influência das razões atômicas das relações O:C e H:C sobre o poder calorífico. A comparação de biomassas com combustíveis sólidos mostra claramente que a maior proporção de oxigênio e de hidrogênio, comparado ao carbono, reduz o valor energético de dado combustível devido à menor quantidade de energia contida nas ligações C-O e C-H em relação às ligações C-C (MCKENDRY, 2002).

Associado a este fato, tem-se que a umidade (fonte de H e O) presente nos combustíveis é fator limitante na geração de energia útil, visto que a combustão ocorre exotermicamente, enquanto que a evaporação da água é uma reação endotérmica. O limite autotérmico para a maioria das biomassas combustíveis é próximo a 65% de umidade (massa de água por massa de combustível úmido). Acima desse ponto, energia insuficiente é liberada pela combustão para satisfazer a evaporação e a produção de calor (VIRMOND, 2007).

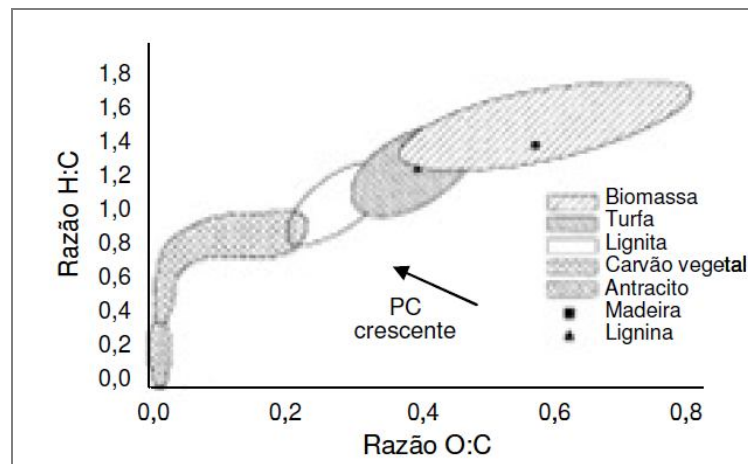


Figura 1-4: Diagrama de Van Krevelen para diferentes combustíveis sólidos.

Diagrama de Combustão

A partir da análise elementar de combustíveis é possível se construir um diagrama de combustão a fim de se expressar todas as possibilidades de combustão. O diagrama, também denominado diagrama de Ostwald é útil para conhecer o funcionamento de câmaras de combustão, assim como a relação combustível/comburente. A Figura 1-5 apresenta um diagrama de combustão de coque a partir da composição elementar.

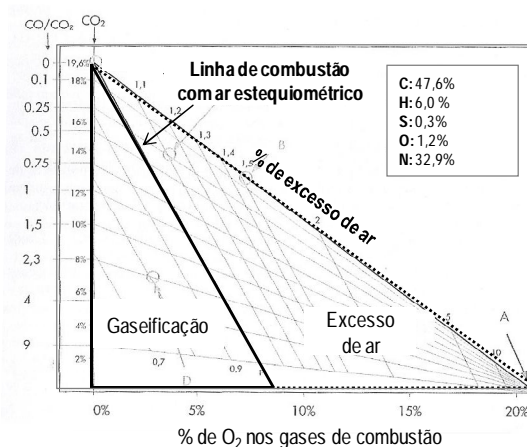


Figura 1-5: Diagrama de combustão de coque.

Fonte: Adaptado de Elias (2009)

1.2.1.3 Propriedades do lodo de esgoto doméstico

O lodo gerado em ETEs possui diversos pontos contribuintes, dentre eles o material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e eventualmente lodo químico. No que se refere a constituição do lodo, de forma geral, possui a presença de matéria orgânica e os principais contaminantes encontrados são os metais pesados, poluentes orgânicos e microrganismos patogênicos (SILVA *et al.*, 2001).

A composição do lodo primário e secundário em uma ETE, possui como composição nutrientes (N e P) e matéria carbonácea (presença de carbono com potencial energético), além de elementos menos representativos. A Tabela 1-5 apresenta os principais componentes do lodo de esgoto com suas características e a Figura 1-6 ilustra a distribuição típica da água no lodo.

Tabela 1-5: Parcelas componentes do lodo e suas características.

Parcela	Característica	Porcentagem do total de umidade
Água livre	Parcela que está incorporada às partículas de lodo, sendo removida por processo de separação por meio da gravidade.	70-75%
Água intersticial	Presente no interior dos flocos e sólidos ou ainda nas capilaridades da torta desaguada, passível de remoção pela atuação de forças mecânicas	20-25%
Água superficial	Acumula-se na superfície das partículas sólidas pelos processos de adsorção e adesão.	1%
Água intracelular e química	Presente na composição do lodo.	1%

Fonte: Adaptado de Tsang e Vesilind (1990) e Chen *et al.* (2006).

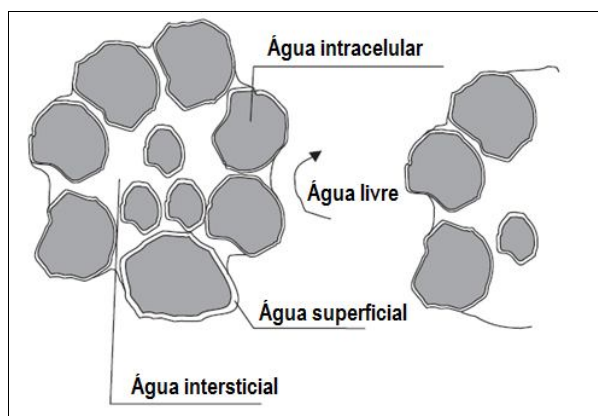


Figura 1-6: Distribuição típica da água no lodo de esgoto.

Fonte: Chen *et al.* (2006)

Em adição, para a análise das características do lodo, assim como o cálculo de sua produção em massa e volume, faz-se necessário o uso de relações fundamentais, sendo as principais, descritas a seguir:

Relação entre teor de sólidos e umidade

A equação 1-8 apresenta a relação entre o teor de sólidos e umidade. A umidade do lodo influencia nas propriedades mecânicas do lodo e nas suas condições de manuseio e disposição final.

$$Umidade(\%) = 100 - \text{Sólidos secos}(\%) \quad (1-8)$$

Densidade do lodo

A densidade do lodo é de fundamental importância para a determinação do volume do material gerado nas unidades de gerenciamento do lodo. A Tabela 1-6 apresenta as densidades e as massas específicas dos sólidos e do lodo.

Tabela 1-6: Faixas de densidades e massas específicas de diversos tipos de lodo.

Tipo de lodo	Relação SV/ST	% Sólidos secos	Densidade
Lodo primário	0,75-0,80	2-6	1,02-1,03
Lodo secundário anaeróbio	0,55-0,60	3-6	1,02-1,03
Lodo misto adensado	0,75-0,80	4-8	1,02-1,03
Lodo misto digerido	0,60-0,65	3-6	1,03
Lodo misto desidratado	0,60-0,65	20-40	1,05-1,08

Fonte: Andreoli *et al.* (2001)

Captura de sólidos

No tratamento de esgoto, em que se observa a operação unitária de separação sólido-líquido (ex: adensamento, desidratação), uma parcela dos sólidos fica retida na fração líquida (drenado, filtrado ou sobrenadante) da unidade de separação e parte segue para o tratamento do lodo. A incorporação dos sólidos ao lodo é denominada *captura de sólidos* e retrata a eficiência da incorporação dos sólidos ao lodo que seguirá para as etapas subsequentes do processamento (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A equação 1-9 apresenta o cálculo da captura de sólidos e a Tabela 1-7 apresenta faixas de captura de sólidos no tratamento do lodo secundário e misto.

$$\text{CargaSS}_{\text{efluente}} = \text{Captura}_{\text{sólidos}} \times \text{CargaSS}_{\text{afluente}} \quad (1-9)$$

Em que:

$\text{Carga SS}_{\text{efluente}}$ = carga de sólidos efluente ($\text{kgSS} \cdot \text{d}^{-1}$);

$\text{Captura}_{\text{sólidos}}$ = captura de sólidos (%);

$\text{Carga SS}_{\text{afluente}}$ = carga de sólidos afluentes ($\text{kgSS} \cdot \text{d}^{-1}$).

Tabela 1-7: Faixas de captura de sólidos para a digestão secundária no tratamento de lodo.

Tipo de lodo	Digestão secundária	Desidratação	
	Captura (%)	Processo	Captura (%)
Lodo secundário	90 – 95	Leito de secagem	90 – 98
		Filtro prensa	90 – 98
		Centrífuga	90 – 95
		Filtros de correias	90 – 95
Lodo misto	90 – 95	Leito de secagem	90 – 98
		Filtro prensa	90 – 98
		Centrífuga	90 – 95
		Filtros de correias	90 – 95

Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (2001)

1.2.1.4 Destino final e processamento térmico do lodo excedente

Fernandes *et al.* (2001) propõem que os estudos de alternativas para gerenciamento e disposição final do lodo devem ser precedidos de estudos das características do esgoto, das tecnologias de tratamento disponíveis, das taxas de produção de lodo, da legislação ambiental e dos tipos de solos e agricultura regional. Apenas após a realização desses estudos é que se deve definir a alternativa de disposição final, devendo esta atender, de forma conjunta, a critérios ambientais, técnicos e econômicos.

Entretanto, observa-se, de forma geral, que a escolha do gerenciamento do lodo leva em consideração apenas interesses e possibilidades dos responsáveis pelo gerenciamento do lodo nas unidades de tratamento. Dentre as principais alternativas para o tratamento do lodo, destacam-se os processos térmicos, em que o processamento térmico do lodo ocorre pela destruição química dos polímeros a elevadas temperaturas, sob condições controladas de temperatura, pressão, teor de oxigênio, tempo de reação, dentre outros fatores. Dentre as rotas de tratamento e destino final de lodo para o ano de 2005, para os 27 países integrantes da União Européia, obteve-se a contribuição do uso agrícola (41%), incineração (19%), aterro sanitário (17%), compostagem (12%) e outras aplicações (12%) (UE, 2011).

De acordo com Werle e Wilk (2010), na Europa, o gerenciamento de lodo de ETE tem como seqüência decrescente de prioridades a redução na geração, minimização, reciclagem e por fim o aproveitamento térmico e envio para aterro sanitário. Atualmente a alternativa mais empregada para o gerenciamento do lodo de ETE, no Brasil, é o seu envio para aterros sanitários. Nesse contexto, destacam-se os elevados gastos no transporte e o desperdício do potencial dos nutrientes e/ou energético do lodo desidratado.

Até então, na União Europeia, grande quantidade de lodo de ETE tem sido utilizado para fins agrícolas, entretanto alguns fatores limitam essa aplicação sobre o solo (metais pesados,

patógenos e poluentes orgânicos). Diante da insegurança sanitária deste fim, alternativas têm sido avaliadas, apesar de todas apresentarem ressalvas. O envio para aterros sanitários foi refutado devido às diretrizes de gerenciamento de resíduos e ao elevado custo. Diante desta realidade tecnologias alternativas ganham cada vez mais destaque como formas de tratamento térmico para lodo de ETE (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

Os processos térmicos mais comuns são a pirólise, gaseificação e combustão/incineração. A incineração se distingue da combustão por ter como principal objetivo o tratamento de um lodo que não possa ser queimado de forma segura devido à presença efetiva ou potencial de precursores de poluentes não convencionais (especialmente metais e/ou dioxinas e furanos) nas emissões atmosféricas ou nas cinzas, sendo a geração de energia um objetivo secundário. Já a combustão tem como principal finalidade a obtenção de energia pela queima, quando esta puder ser realizada de forma segura sem necessidades especiais de prevenção e/ou controle dos poluentes não convencionais (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008). Em todos os tratamentos térmicos pode-se obter uma expressiva redução do volume/massa de resíduos finais, prevenção de odores e eliminação da biodegradabilidade e potencial de formação de metano e choroume.

O tratamento de lodo de ETE deve ser precedido das etapas de desidratação e secagem do lodo (WERLE e WILK, 2010). Para a determinação do potencial de uso de lodo de ETEs como combustível em processos térmicos faz-se necessário o conhecimento da composição elementar e dos principais componentes presentes.

Estima-se que nos 12 países mais antigos da União Européia, o uso dos processos térmicos no gerenciamento do lodo de ETEs, com fins energéticos, terá um acréscimo de 100% até o ano de 2020, correspondendo a uma participação de 37% das formas de destino final (KELESSIDIS e STASINAKIS, 2012).

A aplicabilidade do uso de processos térmicos como disposição final de lodo de ETE é dado em função do seu poder calorífico e de sua composição imediata. O poder calorífico superior (PCS, base seca) para lodos de ETEs são da ordem de 17 MJ.kg^{-1} para lodo bruto, 15 MJ.kg^{-1} para lodo ativado e 11 MJ.kg^{-1} para lodo digerido por processos aeróbios, anaeróbios ou pelo uso de cal (WERLE e WILK, 2010).

Dentre as principais alternativas históricas para o destino final do lodo, podem-se elencar:

Disposição oceânica

Esta forma de disposição, muito empregada há algumas décadas, não tem sido praticada, em virtude principalmente das regulamentações no controle da poluição oceânica. Dentre os poucos casos dessa prática, noticia-se os EUA, sendo que na Europa esta prática foi banida.

Aterro sanitário

Para este destino avalia-se que a baixa resistência física do material compromete a estabilidade do aterro. Com o objetivo de maior controle dos riscos estruturais ao aterro se requer que o material esteja bem estabilizado e desidratado, contribuindo assim com a redução das emissões de odor, gás (CH₄ e CO₂) e percolado (WERTHER e OGADA, 1999).

Com o intuito de controlar os passivos ambientais envolvidos na disposição de lodo de ETE em aterro sanitário, alguns países se adiantam em medidas mais restritivas e que normatizam sobre as condições físicas do material a ser disposto. Na Alemanha, o lodo deve ter no mínimo 35% de sólidos e um reduzido teor de orgânico, o que condiciona a disposição apenas das cinzas produzidas na incineração do lodo.

De acordo com legislação específica (Directiva 99/31/EC), na União Européia fica proibida a disposição de lodo de ETE em regiões oceânicas e envio para aterros sanitários, embora de 35 a 45% desse resíduo ainda seja encaminhado a essa unidade final de disposição (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

Uso agrícola

A aplicação do lodo com vistas ao reuso agrícola agrega benefícios ao solo devido ao efeito fertilizante pela presença de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e matéria orgânica (FONTS *et al.*, 2012). Outra vantagem deste uso relaciona-se à economia de energia na produção de fertilizante. Em adição, o uso agrícola do lodo recebe resistências devido a fatores sociais e limitações técnicas (DAVIS, 1996), além da maior taxa de produção de lodo em relação à quantidade demandada a este tipo de uso.

Outro ponto que limita esta aplicação refere-se a presença de elementos como metais pesados. De acordo com Poletschny (1998) *apud* Werther e Ogada (1997), em uma coleta de 6.800 amostras de lodo de tratamento doméstico de diferentes pontos na Alemanha, observou-se que a concentração de metais pesados superou os valores médios para as condições dos solos sem tal aplicação, o que indica um potencial de biomagnificação dos elementos. Para a realidade

européia, legislação específica aplica-se com a determinação de limites máximos de metais pesados no lodo e na taxa de aplicação para o uso agrícola.

Mediante monitoramento, o uso agrícola deve ser priorizado quando há demanda pelo uso do lodo nas proximidades da ETE ou em condições de viabilidade econômica, para os outros casos, as alternativas acima mencionadas devem ser consideradas.

1.2.2 Biogás

1.2.2.1 Produção de biogás

O biogás possui elevado potencial de geração de energia. De acordo com Metcalf e Eddy (2003), para o tratamento anaeróbio de esgoto doméstico e a digestão anaeróbia de lodo aeróbio estima-se uma produção de biogás de $0,4 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kg DQO}^{-1}_{\text{removida}}$ e $0,75 \text{ CH}_4 \cdot \text{kg SSV}^{-1}_{\text{removida}}$. Lobato (2011) através do desenvolvimento de um modelo para estimativa do balanço de massa da DQO em reatores UASB obteve valores da produção de metano na faixa de $0,11$ a $0,19 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kg DQO}^{-1}_{\text{removida}}$.

Ainda, de acordo Elias e Cadavid (2005), a quantidade de gases produzidos pela digestão de lodo de ETEs para biogás e metano corresponde a $0,43 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ e $0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de matéria seca, respectivamente.

O biogás gerado em ETEs pode ser gerado em reatores anaeróbios, com especial destaque para o reator UASB, e de digestores de lodo aeróbio, como identifica-se nos lodos ativados. A Tabela 1-8 apresenta dados da produção de biogás a partir do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB.

Tabela 1-8: Dados sobre a produção de biogás em reatores UASB tratando esgoto doméstico.

Referência	TDH (h)	Temperatura (°C)	C.O.V (kgDBO.m ³ .d ⁻¹)	Eficiência de remoção de DBO (%)	Produção de biogás (m ³ .kgDBOap ⁻¹)	Metano (%)
Grin <i>et al.</i> (1983) ^a	0,3-1	20	0,04	70-75	0,12-0,16	-
Lettinga <i>et al.</i> (1980) ^a	0,3	9,5-10	-	-	0,17-0,24	30-55
Bogte <i>et al.</i> (1993)	-	>12	-	60	300 ^b	-
Soto <i>et al.</i> (1995) ^a	4,6	20	3	53-76	-	-
Khan (1995)	-	-	-	75,3	0,15	75-80

^aapud Tauseef *et al.* (2013), ^b em L.d⁻¹.

1.2.2.2 Caracterização e propriedades do biogás

O biogás é uma mistura de gases produzidos durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica. Sua composição é variável, dependendo do tipo e concentração da matéria orgânica

a ser digerida, das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato (NOYOLA *et al.*, 2006). É composto, em sua maior parte, por dois gases: o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂).

Segundo Noyola *et al.* (2006), o biogás de reatores que tratam esgoto doméstico apresenta uma composição de metano de 70 a 80%, nitrogênio de 10 a 25%, o que é devido a parcela de N₂ dissolvida no esgoto doméstico e dióxido de carbono de 5 a 10%. No caso de aterros sanitários, a concentração de metano no biogás é usualmente da ordem de 50%, enquanto as tecnologias mais avançadas de tratamento de resíduos podem produzir biogás com concentrações bem mais elevadas, da ordem de 60 e 80%.

Em adição, o metano destaca-se por ser um gás incolor, inodoro e insolúvel, de baixa densidade. A Tabela 1-9 apresenta a composição típica do biogás produzido nos processos de tratamento de esgoto e aterros sanitários.

Tabela 1-9: Características e composição típicas do biogás.

Parâmetro	Gás de aterro	Biogás (digestor anaeróbio)
Poder calorífico inferior (MJ.Nm ⁻³)	16	23
Metano (% vol)	35-65	53-70
Dióxido de carbono (% vol)	15-50	30-47
Nitrogênio (% vol)	5-40	-
Ácido sulfídrico (ppm)	<100	<1.000
Amônio (ppm)	5	<100

¹Produzido a partir de matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. ² Produzido a partir de matéria orgânica de resíduos agropecuários em digestor anaeróbio.

Fonte: Persson *et al.* (2006)

Sob o ponto de vista térmico, o biogás classifica-se pouco acima dos gases combustíveis de poder calorífico médio e, com a remoção do CO₂, o mesmo se aproximaria dos gases de alto poder calorífico. Em termos de DQO, a geração do biogás compreende de 50 a 70 % da rota de conversão da matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007). De acordo com a Tabela 1-10 o potencial calorífico do metano (35,9 MJ.m⁻³) é apenas 10% inferior ao do gás natural (39,0 MJ.m⁻³), enquanto o do biogás com 60% de metano (21,5 MJ.m⁻³) é 45% inferior ao do gás natural (NOYOLA *et al.*, 2006).

Tabela 1-10: Valores caloríficos mínimos do biogás e de outros combustíveis.

Combustível	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	Equivalência volumétrica ao metano
Gás natural		39,0	10,8	1,1
Metano	50,0	35,9	10,0	1,0
Biogás purificado (90% CH ₄)	45,0	32,3	9,0	0,9
Biogás típico (60% CH ₄)	30,0	21,5	6,0	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Metanol	19,9	15.900	4.415,4	442,9
Etanol	26,9	21.400	5.942,8	596,1
Gasolina	45,0	33.300	9.247,4	927,6
Diesel	42,1	34.500	9.580,7	961,0

Nm³: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 273 K e 1 atm; 1 kJ = 0,2388 kcal; 1 kJ = 0,2777 Wh

Fonte: Adaptado de Constant *et al.*(1989) *apud* Noyola *et al.* (2006)

Para o ano de 2010 foi estimada uma emissão global antropogênica de metano de 6.875 Mt.CO₂e (equivalente), a contribuição do Brasil foi de 416,3 Mt.CO₂e. Dentre os setores emissores, o tratamento de esgoto anaeróbio contribui com as emissões de 594,0 e 23,3 MtCO₂e, para o total mundial e o Brasil, respectivamente (USEPA, 2006).

1.2.2.3 Destino final e aproveitamento de biogás

Ao se tratar da recuperação e aproveitamento do biogás duas situações possíveis podem ser vislumbradas. O primeiro cenário consiste na queima direta do biogás, como acontece em aquecedores, fogões e caldeiras, e o segundo diz respeito à conversão de biogás em eletricidade, sendo ainda praticável a cogeração, geração conjunta de energia elétrica e térmica. A Tabela 1-11 ilustra as principais alternativas para gerenciamento do biogás, com destaque para as alternativas de aproveitamento energético conjunto com o lodo.

De acordo com Elias e Cadavid (2005), mediante a cogeração se consegue aumentar o aproveitamento energético, evitar o uso de combustível primário, minimizar o impacto ambiental, melhorar o rendimento energético, vender o excedente de eletricidade e recuperar o investimento em um prazo máximo de cinco anos.

A Figura 1-7 apresenta as principais opções de uso do biogás como fonte de energia (VOLSCHAN, 2010). De acordo com o fluxograma, algumas linhas de aplicação podem ser destacadas:

- (i) Uso do lodo desidratado com cerca de 25% de sólidos como bio-sólido classe B ou geração de calor e produção de vapor em caldeiras;

(ii) Emprego da secagem térmica do lodo desidratado, com o uso do biogás como fonte de energia térmica, com o intuito de seu aproveitamento como biossólido classe A, com cerca de 90% de teor de sólidos. Vislumbra-se o uso do biogás como agente de secagem do lodo;

(iii) Queima do lodo desidratado ou retirado do secador térmico e do biogás em um incinerador. Os gases gerados podem alimentar caldeiras e o vapor gerado pelo aquecimento move turbinas, produzindo energia elétrica;

(iv) Gases gerados no processo de incineração podem ser usados como fonte de energia térmica no aquecimento de digestores, permitindo que a digestão aconteça na fase termofílica (50 a 60 °C);

(v) Aproveitamento do biogás em qualquer estágio para geração de energia elétrica, após a devida purificação.

De forma complementar às alternativas supracitadas Venkatesh e Elmi (2013) apontam ainda outros usos e formas de aproveitamento para o biogás, a saber: aquecimento de água e geração de vapor de água, purificação do biogás como fonte de combustível de automóveis e distribuição de biogás sem purificação para terceiros com fins energéticos.

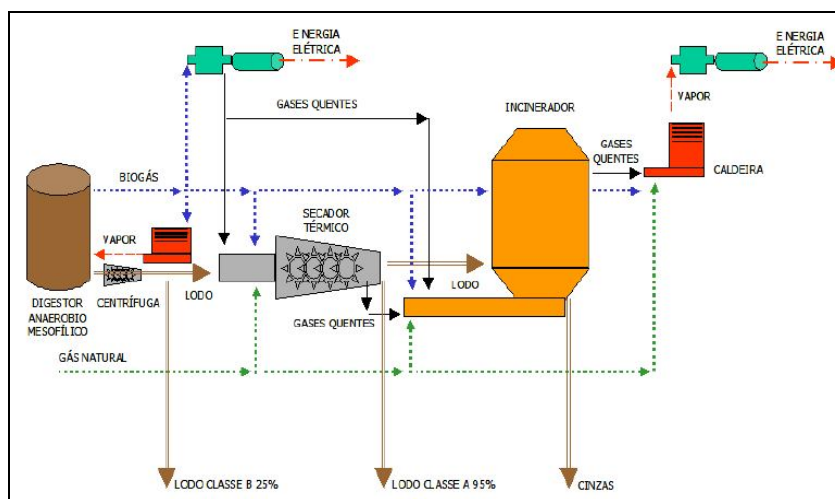


Figura 1-7: Opções de uso do biogás como fonte de energia.

Fonte: Volschan (2010)

Tabela 1-11: Descrição das principais alternativas para o gerenciamento do biogás.

Alternativa	Tipos/classificação	Descrição
Combustão direta, sem recuperação de energia	Queimadores abertos	<ul style="list-style-type: none"> • Constituição básica de um queimador acoplado a um defletor de vento para proteger a chama. O controle de gás é rudimentar, não existe isolamento térmico, a mistura é pobre, o que resulta na combustão incompleta do biogás e perda de calor na queima.
	Queimadores fechados	<ul style="list-style-type: none"> • São instalações permanentes, não podendo ser transportadas para outro local. • A combustão ocorre sob condições controladas, garantindo a destruição quase completa do biogás. Os níveis de fumaça, chama e ruído são praticamente imperceptíveis.
Combustão direta, com recuperação de calor	Caldeiras	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência de energia de um combustível para a água ou outro fluido contido no interior de uma câmara fechada, e daí até o ponto de utilização final.
	Secadores térmicos	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de remoção umidade. O biogás quando queimado pode ser fonte de energia térmica para o aquecimento de materiais como o lodo, permitindo a secagem térmica.
Geração combinada ou simples de eletricidade e calor	Motores de combustão interna	<ul style="list-style-type: none"> • Nos motores de combustão interna (MCI), a queima de combustível e ar no interior da câmara de combustão gera uma reação exotérmica, com a formação de gases à elevada temperatura e pressão.
	Turbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento de fluxo contínuo que desenvolve chama estável durante a combustão. Este mecanismo permite a utilização de vários combustíveis e também proporciona uma combustão mais limpa.
	Micro-turbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Os gases aquecidos em alta pressão são expandidos através das pás de uma turbina, fazendo com que esta gire em alta velocidade. O processo é responsável por fornecer a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico.

Fonte: Adaptado de IEA (2000) e Lobato (2011).

Apesar dos diversos usos possíveis, atualmente o biogás é utilizado principalmente para a geração de eletricidade (cerca de 2/3 da quantidade total, metade obtida em plantas de cogeração) e para a produção de calor (1/3 restante) (TRICASE e LOMBARDI, 2008). Estações de tratamento de esgoto possuem o potencial de garantir a geração de parcela da eletricidade demandada para o seu funcionamento, assim como o fornecimento integral de energia elétrica para ETEs que sejam centrais de gerenciamento e digestão de lodo Schwarzenbeck *et al.* (2008) descrevem a experiência da ETE da cidade de Grevesmühlen que recebe a contribuição de esgoto sanitário de um equivalente populacional de 40.000 habitantes, em que os digestores da ETE recebem ainda o lodo de outras comunidades. No ano de 2006 a produção de eletricidade a partir do biogás foi de 113% da energia consumida na ETE.

A geração de energia térmica é empregada, em especial, em países que apresentam temperaturas ambientes baixas, em que o calor é utilizado para a manutenção da temperatura de reatores. O calor proveniente do biogás pode ainda ser utilizado na higienização de lodo.

Borges (2004) e Lobato (2011) demonstraram que o uso do biogás gerado em reatores UASB possibilitou a total higienização do lodo para esse fim em testes com duração de 7 horas. Lobato (2011) verificou que o tempo de exposição de 1,5 h, à temperatura da ordem de 60°C, foi suficiente para a total inativação dos ovos de *Ascaris suum*, a qual pôde ser comprovada pelas eficiências de inativação nos diferentes tempos de exposição.

No que se refere ao emprego do biogás como fonte de combustível veicular, embora ainda limitado, esse uso tem apresentado interesse crescente em diversos países em função do seu grande potencial e dos diversos benefícios ambientais, especialmente a ausência de emissões de monóxido de carbono e nitrogênio. No final de 2005 existiam apenas 1.600 estações de fornecimento de biogás na Europa, entretanto, previa-se a operação ao final de 2006 de 1.000 estações na Alemanha, 100 na Suíça e mais de 50 na Áustria (PERSSON *et al.*, 2006).

Na geração de eletricidade pelo uso do biogás, Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha são os países industrializados com maior capacidade instalada. A Alemanha encontra-se em uma posição de destaque por produzir 40% do biogás da União Européia, com geração de eletricidade em 7.470 plantas de conversão e capacidade total instalada de 2.290MW (Federal Environment Agency, 2010).

De acordo com Salomon e Lora (2009), o Brasil tem um potencial considerável de geração de eletricidade a partir do biogás obtido pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, que poderia suprir a demanda de energia em locais com altas taxas de produção do mesmo. Entretanto, de acordo com os autores, os principais limitantes do uso do biogás como fonte energética relacionam-se aos elevados investimentos, baixos investimentos governamentais em programas para a conversão de biogás a energia e as dificuldades de pequenas unidades que produzem biogás em comercializar créditos de carbono.

Para Salomon e Lora (2009), as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são: (i) geração descentralizada, com a geração de energia próxima da fonte consumidora, (ii) possibilidade de lucro adicional devido à produção de energia e comercialização com companhias energéticas, (iii) redução no consumo de energia pela planta produtora, (iv) potencial de uso de processos para a cogeração de eletricidade e calor e (v) redução das emissões de metano para a atmosfera.

No Brasil, o fato da população encontrar-se concentrada em grandes centros urbanos contribui para o significativo potencial de produção de biogás em aterros sanitários e estações de

tratamento de efluentes. Nos aterros sanitários, o potencial de produção de metano pode chegar a 15,8 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, enquanto nas estações de tratamento de efluentes este potencial é de até 7,3 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, considerando a universalização dos serviços de coleta e tratamento de efluentes e disposição dos resíduos sólidos urbanos (ZANETTE, 2009). O potencial de geração de biogás nas estações de tratamento de esgoto ainda não é amplamente explorado, o biogás na maioria das vezes é diretamente queimado em *flare* ou em alguns casos é utilizado em caldeiras (BRUNO *et al.*, 2009).

Em estações de tratamento de efluentes e aterros sanitários, os projetos de aproveitamento do biogás para geração de eletricidade são geralmente viáveis quando a população atendida pelos mesmos é de pelo menos 200.000 habitantes, sendo este limite menor quando é possível o aproveitamento do calor ou quando são utilizados processos anaeróbios para o tratamento dos efluentes (ZANETTE, 2009).

Stillwell *et al.* (2010) ao estudarem 41 ETEs operando com digestão anaeróbia e 5 ETEs que realizavam a incineração do lodo desidratado nos EUA verificaram que o biogás coletado no tratamento e utilizado como fonte de energia contribuiu com a redução do consumo de eletricidade de 2,6 a 27%. Em adição, o emprego da combustão do lodo, com a finalidade de geração de energia elétrica, em combinação com o tratamento anaeróbio permitiram a redução no consumo de eletricidade de 4,7 a 83%.

1.3 Processos termoquímicos para o tratamento de lodo

Durante as últimas décadas os processos térmicos têm sido considerados um dos principais meios para a geração de energia e valorização dos subprodutos obtidos a partir dos resíduos da biomassa. O lodo de esgoto seco gerado nas ETEs pode ser considerado como uma forma de biomassa, em virtude da fração orgânica e de seu elevado poder calorífico. Apesar da elevada umidade, a conversão do lodo através de processos termoquímicos pode garantir a autossuficiência energética dos processos de conversão, a exemplo da pirólise, gaseificação e combustão (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

A Figura 1-8 apresenta de forma esquemática os diversos processos de conversão energética para lodo gerado em ETEs. Tem-se como principal meta das conversões energéticas a redução da matéria orgânica a CO_2 e H_2O .

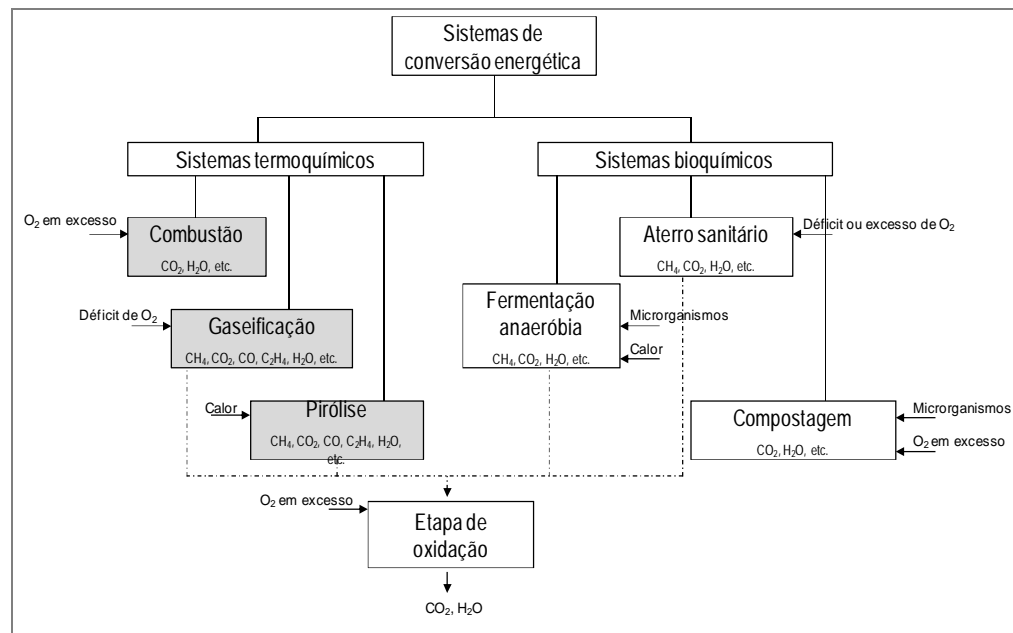


Figura 1-8: Rotas de conversão energética para lodo de ETEs.

Fonte: Elias (2009)

Muitos autores têm estudado alternativas de tratamento e disposição de lodo de ETEs, embora não se observe um posicionamento claro sobre o método mais adequado para tal. As propostas convergem para o posicionamento de que a recuperação energética do subproduto irá predominar sobre o uso agrícola e disposição em aterros sanitários (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008; WERTHER e OGADA, 1999; RULKENS, 2007).

Vale ressaltar que do ponto da gestão do lodo, a incineração é a considerada uma alternativa final de tratamento, enquanto que a digestão, pirólise e gaseificação são processos de conversão intermediários, visto que o subproduto gasoso obtido necessita ser valorizado energeticamente (ELIAS, 2009).

De forma geral, os tratamentos termoquímicos são classificados de acordo com uma faixa de temperatura e os resultados obtidos. Para os de baixa temperatura (abaixo de 300 °C), o efeito esperado é o da secagem ou desinfecção do resíduo. Os tratamentos de média temperatura (400 – 1.400 °C) tem como foco a redução de peso e volume, como ocorre na gaseificação, combustão e pirólise. Para faixas de temperatura compreendidas acima da faixa de 2.000 °C a 3.000 °C, os processos são classificados como de elevada temperatura, como ocorre com as tecnologias a plasma, ceramização e vitrificação (GARCIA *et al.*, 2005).

Como já destacado anteriormente, os processos térmicos como forma de tratamento do lodo de estações de tratamento de esgoto têm ganhado cada vez mais destaque. Estes processos implicam na decomposição dos componentes orgânicos do lodo a altas temperaturas. Para o

processo de combustão há a oxidação total e a liberação da energia na forma de calor e a geração de biocombustíveis intermediários a partir da oxidação parcial dos componentes orgânicos, como ocorre nos processos de gaseificação e pirólise. A Figura 1-9 apresenta um fluxograma com os principais processos e formas de conversão de energia.

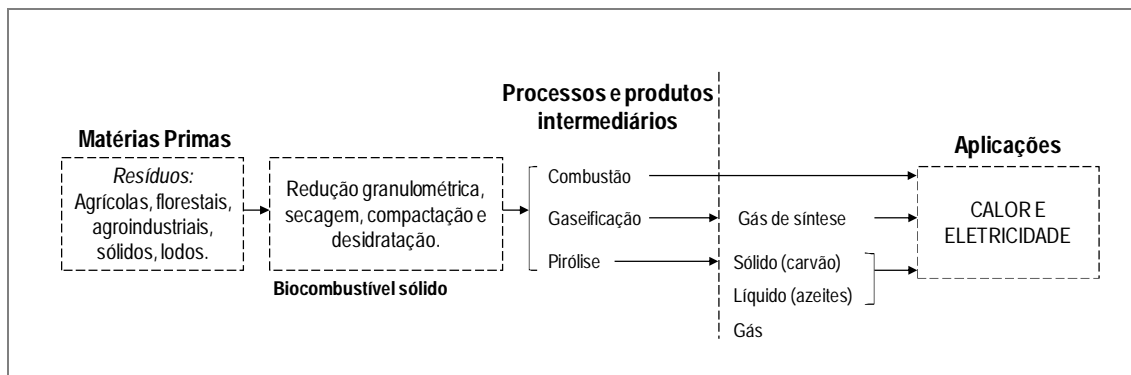


Figura 1-9: Esquema ilustrativo dos principais processos e tecnologias de conversão de energia para biocombustíveis sólidos.

De acordo com Judex *et al.* (2012) o tratamento térmico do lodo pela gaseificação ou pirólise e subsequente queima do material em ETEs tem sido cada vez mais atrativo em função de dois fatores: (i) a energia disponível no lodo é elevada ($7-12 \text{ MJ.kg}^{-1}$, base seca), e o seu aproveitamento diminui a dependência de fontes externas; (ii) o tratamento do lodo fora dos limites da ETE é elevado, da ordem de $50-120 \text{ €t}^{-1}$, em base seca.

O lodo de esgoto, como a maioria dos rejeitos orgânicos, é rico em material volátil e pode, portanto, ser convertido em fonte de energia utilizável. A recuperação de energia de lodo de esgoto e resíduos sólidos tem se focado em processos termoquímicos como a combustão direta, gaseificação e pirólise (SANCHEZ *et al.*, 2009)

A utilização térmica do lodo é indiscutivelmente promissora e eficiente, e passa a ser efetiva quando a insegurança sanitária do uso deste resíduo é verificada para o uso agrícola (BUWAL, 2005), ou ainda quando há dificuldade de oferta do lodo para atividades agrícolas, em função de limitações de logística. Como resposta a este cenário observa-se o desenvolvimento de métodos térmicos que corroborem com o gerenciamento dos resíduos (WERLE e WILK, 2010).

Para Rulkens (2007) as opções de recuperação de energia proveniente de lodo de ETEs se dividem em nove grupos: (i) digestão anaeróbia de lodo; (ii) produção de biocombustíveis a partir de lodo; (iii) produção direta de eletricidade pelo emprego de células de combustível microbiana; (iv) incineração de lodo com recuperação de energia; (v) co-incineração de lodo

em termelétrica; (vi) gaseificação e pirólise de lodo; (vii) uso de lodo como fonte energética e matéria prima na produção de cimento Portland e materiais de construção; (viii) oxidação supercrítica da água; e (ix) tratamento hidrotérmico do lodo.

De acordo com Stasta *et al.* (2006) o crescimento no tratamento térmico de lodo de ETE nos países europeus é evidente, sendo que este resíduo é considerado potencial para uso como fonte de energia. Os limites de emissão permissíveis no tratamento térmico do resíduo são classificados de acordo com o processo térmico adotado. A seguir são apresentadas as características e aplicações dos principais processos de tratamento térmico do lodo de ETEs, a saber: pirólise, gaseificação e combustão.

1.3.1 Pirólise

A pirólise é um processo de degradação térmica das moléculas químicas de um combustível em atmosfera inerte (MANARA e ZABANIOTOU, 2012). A decomposição térmica ocorre para a matéria orgânica, na ausência de oxigênio, gerando como subprodutos da reação gases, hidrocarbonetos condensáveis e resíduo carbonoso (carvão).

Dentre as tecnologias de conversão térmica da biomassa, a pirólise é considerada a mais promissora dada a grande flexibilidade do processo que permite ser conduzido na direção de favorecer a obtenção de diferentes subprodutos (líquido, sólido ou gasoso). A possibilidade de produzir especialidades químicas e produtos de maior valor agregado fazem desse processo uma opção muito atraente diante das iniciativas atuais de busca de novas fontes renováveis para a produção de energia limpa (GÓMEZ, 2002).

Dentre os processos termoquímicos, a pirólise tem recebido crescente atenção nos últimos anos como rota aceitável para a disposição de rejeitos. A principal razão para isso é que em processos de pirólise as condições podem ser otimizadas para maximizar a produção de carvões, óleos ou gases, dependendo do produto necessário (SANCHEZ *et al.*, 2009).

Como um dos processos de decomposição térmica, a pirólise, de forma mais específica, gera carvão sólido, água, componentes orgânicos solúveis (ex.: metanol e ácido acético), substâncias orgânicas insolúveis, estas denominadas de bio-óleo, além de gases não condensáveis (H_2 , CH_4 , CO , CO_2) (CHUNBAO e LANCASTER, 2011). O óleo produzido possui composição elementar semelhante ao óleo diesel (FURNESS *et al.*, 2000). A faixa de temperatura para o processo varia de 150 a 900 °C (CARRASCO, 2009).

Os produtos obtidos durante a pirólise (gases, líquidos e sólidos) são gerados em proporções diferentes, dependendo dos parâmetros considerados como, por exemplo, a temperatura final do processo, pressão de operação do reator, o tempo de residência das fases sólidas, líquidas e gasosas dentro do reator, o tempo de aquecimento e a taxa de aquecimento das partículas de biomassa, o ambiente gasoso e as propriedades iniciais da biomassa. Destes, a temperatura é o parâmetro de maior relevância (TRINH *et al.*, 2013). O principal objetivo no processo de pirólise é a obtenção de produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que aquelas da biomassa inicial (VIEIRA, 2011).

De maneira geral, com um aumento de temperatura no processo ocorre um aumento proporcional no teor de carbono e uma redução dos níveis de oxigênio e hidrogênio (LUENGO *et al.*, 2011).

No que se refere a taxa de aquecimento, quando há um aumento muito rápido da temperatura na pirólise, as reações químicas favorecem a formação de frações voláteis (gás e líquido), em contrapartida com o aquecimento gradual as reações favorecem a formação de frações sólidas (carvão) (LUENGO *et al.*, 2011; MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

A Figura 1-10 apresenta o efeito da taxa de aquecimento e a temperatura na proporção das diferentes frações formadas durante a pirólise.

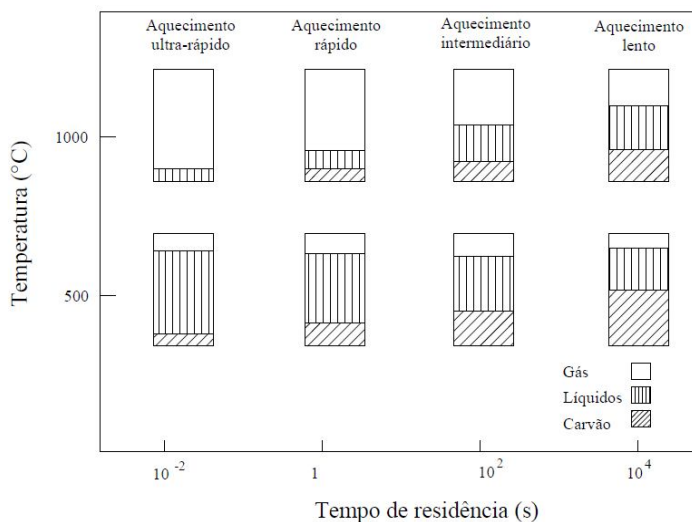


Figura 1-10: Distribuição das frações sólidas, líquidas e gasosas em função da taxa de aquecimento, tempo de residência e temperatura de processamento da biomassa.

Fonte: Mezerette e Girard (1991)

Do ponto de vista operacional, os processos de pirólise se enquadram em três grandes grupos, a saber: pirólise convencional, pirólise rápida (*fast* pirólise) e pirólise instantânea (*flash* pirólise). A Tabela 1-12 apresenta a comparação destes processos de pirólise.

Tabela 1-12: Comparação dos processo de pirólise

Processo	Convencional	Rápida	Instantânea
Temperatura (°C)	300 - 700	400 - 1.000	800 - 1.000
Taxa de aquecimento (°C/s)	0,1 - 1	100 - 200	≥ 1.000
Tempo de residência do sólido	600 - 6.000	0,5 - 5	< 0,5
Tempo de residência dos gases	5	< 2	< 0,5
Produtos principais	Carvão e condensáveis	A 500°C, condensáveis	Gases e hidrocarbonetos

Fonte: Adaptado de Sánchez (2003)

Todos os produtos da pirólise tem um uso potencial. Por exemplo, o carvão pode ser queimado como combustível ou descartado (uma vez que os metais pesados são fixados dentro da matriz carbonácea), podendo ainda ser aprimorado para carvão ativado. Gases podem ser usados como combustíveis, enquanto óleos podem servir tanto como combustível ou material bruto para substâncias químicas (SANCHEZ *et al.*, 2009).

1.3.1.1 Aplicação da pirólise no tratamento do lodo

Diante da possibilidade de aproveitamento energético de lodo de esgoto em processo de pirólise, podem ser utilizados os subprodutos como óleo, gases e carvão, como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à indústria petroquímica, por exemplo (KARAYILDIRIM *et al.*, 2006, SANCHEZ *et al.*, 2009, MANARA e ZABANIOTOU, 2012). O carvão produzido apresenta geralmente um elevado poder calorífico, da ordem de 30 MJ.kg⁻¹, possibilitando o seu uso na geração de calor e eletricidade, ou a sua conversão em carvão ativado, após processamento adequado (CHUNBAO e LANCASTER, 2011). A Figura 1-11 apresenta um esquema dos mecanismos predominantes no processo de pirólise do lodo de ETE.

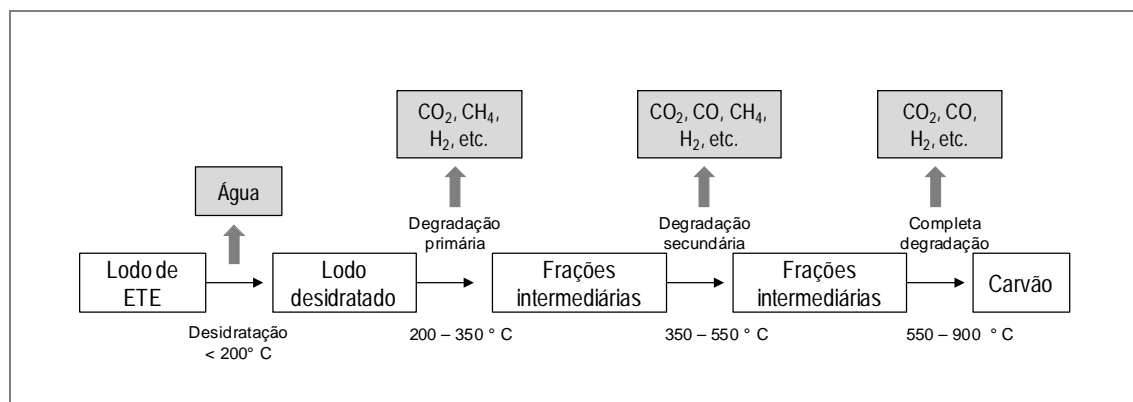


Figura 1-11: Mecanismos predominantes no processo de pirólise do lodo de ETE.

Fonte: Adaptado de Manara e Zabaniotou (2012)

Dentre os subprodutos, o líquido gerado da pirólise de lodo de ETE apresenta elevado poder calorífico ($25,1 \text{ MJ.m}^{-3}$) e baixa viscosidade (SATO *et al.*, 2003 *apud* MANARA e ZABANIOTOU, 2012, ELIAS, 2009). O líquido, azeite pirolítico, pode ser utilizado em uma turbina integrada em um ciclo combinado. A capacidade de desvincular as unidades de produção do biocombustível da unidade de geração de eletricidade perfaz uma das vantagens do uso do combustível líquido (ELIAS e VELO, 2005).

A fração sólida apresenta elevada concentração de metais pesados e menor potencial de lixiviação destes quando comparado com a combustão do lodo (HWANG *et al.*, 2007), o poder calorífico é da ordem de $20,9 \text{ MJ.m}^{-3}$. Assim como o subproduto sólido, a parcela gasosa possui poder calorífico comparável com de outros combustíveis. A faixa de energia obtida a partir dos gases varia de 3,8 a $15,9 \text{ MJ.m}^{-3}$ (ELIAS, 2009), sendo superior aos valores obtidos para o gás de síntese da gaseificação.

De acordo com Kim e Parker (2008), a pirólise de lodo é um processo térmico inovador e contribuiu para o gerenciamento do lodo e de energia. Estudos em escala piloto e bancada indicam que aproximadamente metade da matéria orgânica na constituição do lodo pode ser convertida, via pirólise, em bioenergia útil (óleo ou gás), e que o residual de matéria orgânica fica predominantemente contido nos resíduos pirolíticos (carvão) na forma estabilizada. A utilidade versátil de seus produtos faz a pirólise um processo mais sustentável e benéfico comparado à gaseificação e incineração (CAO e PAWLOWSKI, 2012).

Estudos apontam para um enriquecimento da fração gasosa quando de uma elevada concentração de cinzas no lodo. Fonts *et al.* (2009) determinaram que o teor de cinzas tem grande influência na pirólise de lodo de esgoto do tipo anaeróbio. Segundo dados da pesquisa, o teor de cinzas da biomassa favoreceu um aumento do rendimento da fração gasosa e a diminuição do percentual da fração líquida nas condições operacionais estudadas (reator de leito fluidizado, temperatura do leito de 550°C , gás de arraste nitrogênio). A conclusão de que a concentração de gás H_2 na fração gasosa era maior para elevadas concentrações de cinzas, diante do efeito catalítico das mesmas, também foi reportada por Domínguez *et al.* (2006).

No que se refere o comportamento da temperatura com a geração de poluentes no processo de pirólise, Conesa *et al.* (2009) afirmam que a geração de metano e de compostos clorados é maior com o aumento da temperatura. Em contrapartida, a pirólise de lodo de esgoto a baixa temperaturas ($< 500^\circ\text{C}$) contribui para a geração de óleo e a redução na evaporação de metais pesados. Para a faixa de temperatura de $500\text{-}600^\circ\text{C}$, os metais no lodo (exceto mercúrio e o

cádmio) podem ser complexados na matriz sólida, não sendo emitidos como forma de emissões gasosas (CHUNBAO e LANCASTER, 2011; KARAYILDIRIM *et al.*, 2006).

Lutz *et al.* (2000) ao estudarem a pirólise de lodo para um sistema de batelada a 380°C, com tempo de retenção de 3 horas em atmosfera de nitrogênio, realizaram testes com os seguintes materiais: (i) lodo doméstico do sistema de lodos ativados; (ii) lodo doméstico de digestor anaeróbico e (iii) lodo de uma indústria de verniz. A Tabela 1-13 apresenta a distribuição da formação dos subprodutos de acordo com Lutz *et al.* (2000). Observou-se que o lodo anaeróbico apresentou uma maior composição de carvão (69,4%) dentre as fontes estudadas. No que se refere o subproduto líquido, o óleo gerado a partir da pirólise do lodo digerido apresentou baixa concentração de ácidos graxos (3%), não apresentando um aproveitamento viável economicamente. De forma qualitativa, a distribuição da formação dos subprodutos está de acordo com a reportada por Manara e Zabaniotou (2012) e Trinh *et al.* (2013).

De acordo com os autores, o rendimento de conversão do lodo anaeróbico a gás foi da ordem de 9,4%, de forma complementar, Chang *et al.* (2000) apresentam um poder calorífico de 2,6 MJ.Nm⁻³ para a fase gasosa de pirólise de lodo de esgoto com concentração de gases de 19%. Werle e Wilk (2010) relatam que a fração gasosa do processo de pirólise é constituída de hidrogênio, metano, monóxido carbono e dióxido de carbono, atingindo um poder calorífico da mistura gasosa de cerca de 15MJ.Nm⁻³.

Quando avaliada a influência das emissões de compostos semivoláteis e PAH (Hidrocarbonetos Poliaromáticos), Fullana (2001) observaram que as emissões são menores para lodos digeridos anaerobiamente e aerobiamente em comparação com lodos gerados em processos físico-químicos.

Tabela 1-13: Comparação do rendimento (%) para diversos tipos de lodo em um processo de conversão a baixa temperatura.

Tipo de lodo	Distribuição da formação de subprodutos			
	Óleo	Carvão	Água	Gás
Lodo ativado	31,4	50,1	6,8	11,7
Lodo digerido	11,0	69,4	10,2	9,4
Lodo industrial	14,2	68,0	10,2	7,7

Fonte: Lutz *et al.* (2000)

Estudos realizados por Fonts *et al.* (2009) demonstraram a influência das diversas características do lodo no processo de pirólise em leito fluidizado. Os resultados indicaram um incremento na formação do subproduto líquido (óleo) quando o lodo apresentou maiores teores de cinzas e reduzidas concentrações de sólidos voláteis em sua constituição. A

otimização da produção da fração líquida através da pirólise é de grande interesse nos países desenvolvidos, devido à elevada densidade energética e potencial para substituir combustíveis líquidos derivados do petróleo, o que se observa com os processos pirolíticos rápido e instantâneo.

De acordo com Mafra *et al.* (2011) a pirólise de lodo de reator UASB foi realizada a vácuo em bancada com a variação da temperatura de 300-600 °C durante o período de 1 hora. Como resultado da pirólise convencional obteve-se o óleo combustível, indicando o seu potencial de ser utilizado como biocombustível na geração de energia, assim como na indústria química como insumo.

Ao se estudar a sustentabilidade energética de diferentes rotas alternativas de conversão para recuperação de energia de lodo de esgoto, Cao e Pawlowski (2012) demonstraram uma maior eficiência energética do aproveitamento do lodo digerido anaerobiamente seguido de pirólise do lodo quando comparado com a pirólise direta do lodo bruto, sem a etapa de digestão.

1.3.2 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico que converte o combustível sólido ou líquido em combustível gasoso. A operação é realizada em ambiente parcialmente oxidativo, sob temperaturas elevadas compreendidas entre 800 °C e 1000 °C (GÓMEZ, 1996) e com o uso de reatores pressurizados ou atmosféricos. Ao contrário da combustão, neste processo a quantidade de ar aplicada está abaixo dos níveis estequiométricos.

Os principais fatores intervenientes no processo relacionam-se à natureza do material, velocidade de aquecimento, tempo de contato e temperatura (GARCIA *et al.*, 2005). De acordo com Elias (2009) o tamanho da partícula da alimentação pode ser de até 50mm, sendo influenciado pelo reator e natureza do material.

O principal produto da gaseificação é uma mistura dos gases combustíveis com fração não condensável: monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e metano (CH₄), além dos gases não combustíveis, como o dióxido de carbono (CO₂), vapor d'água (H₂O) e nitrogênio (N₂). Os outros produtos gerados na gaseificação são as cinzas residuais, carvão e o alcatrão (BRIDGWATER, 2003).

Dentro do contexto de declínio no uso do lodo na agricultura e limitações legais, a gaseificação se apresenta como uma proposta de pesquisa e alternativa tecnológica (GROß *et*

al., 2008). O gás combustível produzido tem como principais aplicações a produção direta de calor em fornos ou caldeiras, a produção de energia mecânica em motores ou a geração de eletricidade em turbinas (GÓMEZ, 1996).

Dentre os tipos de gaseificadores podem-se destacar os de leito fixo e os leito fluidizado ou leito circulante. Segundo Maniatis (2002), 77,5 % dos projetos de gaseificadores eram do tipo de leito fixo, 20 % são do tipo fluidizado ou circulante e 2,5 % de outros tipos. O gaseificador de leito fixo pode ainda ser classificado de acordo com a relação entre o fluxo da alimentação do combustível e de gases (contra-corrente ou co-corrente). A Tabela 1-15 apresenta as principais características, vantagens e desvantagens destas configurações para leito fixo. A Figura 1-12 ilustra os diferentes modelos de operação dos gaseificadores de leito fixo em função do fluxo de alimentação. A Tabela 1-14 apresenta as principais etapas envolvidas no processo de gaseificação, evidenciando que este processo térmico constitui-se de elevada complexidade.

No que se refere os gaseificadores de leito fluidizado, de acordo com GROß *et al.* (2008) atualmente não existe nenhuma tecnologia de gaseificação que processe todos os tipos de biomassa, entretanto gaseificadores de leito fluidizado possuem o potencial de tratar diferentes tipos de biomassa.

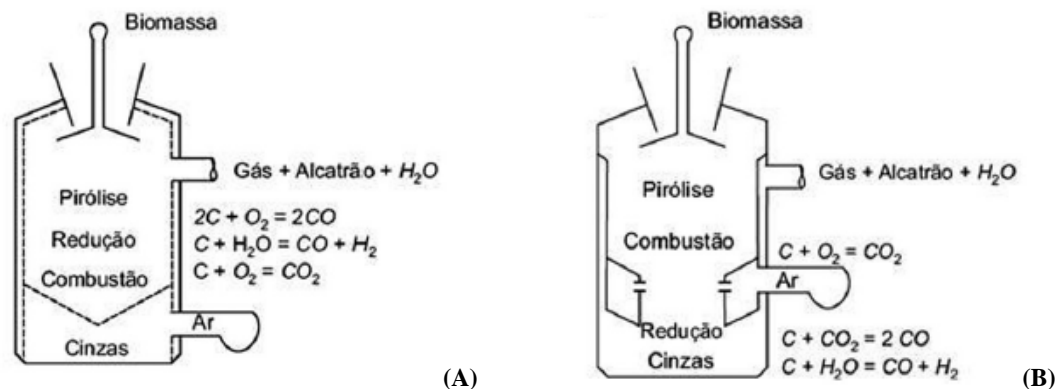


Figura 1-12: Tipos de gaseificadores utilizados para biomassa: (A) contra-corrente; (B) co-corrente.

Fonte: Ramos *et al.* (2011)

Tabela 1-14: Principais características das etapas envolvidas na gaseificação de biomassa.

Etapa	Descrição	Principais equações
Zona de combustão	Ocorre a liberação de calor com as reações de combustão, que será utilizado posteriormente nas reações de pirólise e redução.	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ Na presença de H_2 $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O (g)$
Zona de redução	Ocorrência de reações químicas, em ambiente com pouco oxigênio, que transformam os produtos de pirólise, especialmente o carbono, nos gases combustíveis (CO , H_2 , CH_4) e em cinzas residuais.	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$ $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$ $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ $C + H_2 \rightarrow CH_4$
Zona de pirólise	Na faixa de $280^\circ C$ a $450^\circ C$, a biomassa e o vapor d'água são decompostos na ausência de O_2 , formando gases condensáveis (CO , CO_2 , H_2 e CH_4), condensáveis (alcatrão) e produto sólido	Biomassa + Calor \rightarrow Coque + Gases + Alcatrão + Condensáveis
Zona de secagem	A umidade da biomassa, com umidade usual na faixa de 10-30% é reduzida através do aporte dos gases quentes gerados na combustão.	$H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$

Fonte: Adaptado de Rajvanshi (1986) e Bridgwater (2003).

Caso o agente oxidante utilizado no processo seja ar, o gás produzido se denomina gás pobre e seu poder calorífico é em torno de 25% do gás natural. Se o oxigênio estiver enriquecido, o poder calorífico aumenta devido à ausência de N_2 , podendo alcançar até 40% do PCI do gás natural (GARCIA *et al.*, 2005).

1.3.2.1 Aplicação da gaseificação no tratamento do lodo

O emprego de matérias-primas de fácil aquisição e baixo custo oferecem vantagens no processo de gaseificação, o qual possui eficiência relacionada com as condições físicas do combustível utilizado. Dentro deste contexto, destaca-se o lodo gerado em ETEs, o qual tem sido utilizado de forma crescente, em especial nos países da Europa, como fonte de energia e redução dos volumes produzidos (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

No que se refere ao uso do lodo de ETE como matéria prima para a gaseificação são evidentes os potenciais de uso e suas vantagens, em especial pelo uso do gás liberado na gaseificação em benefício da produção de energia elétrica, assim como o uso do calor liberado para a secagem do lodo (AZNAR, 1998 e MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

De acordo com Elias e Velo (2005) quando o lodo possui elevada fração orgânica parece ser mais indicado o uso do processo de gaseificação, do contrário, com maior representação da matéria inorgânica, sugere-se o processo de pirólise.

Do ponto de vista das emissões ambientais, a gaseificação contribui para a destruição de compostos orgânicos refratários, como o clorobenzeno e eficiência de remoção de PCBs de até 99,9999% (MARRERO *et al.*, 2003). Seggiani *et al.* (2012) destacam ainda que a gaseificação do lodo é considerada um tecnologia com baixo impacto ambiental, por limitar as emissões de SO_x, NO_x, metais pesados, cinzas volantes e reduzir a geração de dioxinas e furanos em virtude da atmosfera redutora, contrária à condição oxidativa do processo de combustão. Em contrapartida, estas condições favorecem a geração de H₂S, NH₃, HCl e HF, devido à presença do enxofre, nitrogênio, cloro e flúor na composição do lodo (ARJHARN *et al.*, 2013).

No que se refere a gaseificação do lodo, a maioria dos gaseificadores em funcionamento operam por leito fluidizado, sendo que a elevada umidade é a principal condição que afeta negativamente o desenvolvimento do processo (ELIAS, 2009).

O lodo de ETE é considerado como sendo uma das matérias-primas com maior potencial para a produção do gás hidrogênio no mundo, destaca-se ainda os resíduos sólidos urbanos (DOGRU *et al.*, 2002). Os gases gerados em uma etapa final da gaseificação (H₂, CO e CH₄) são oxidados a CO₂ e H₂, sendo o CO₂ considerado neutro devido à sua origem biogênica. A mistura gasosa pode, então, ser convertida em células de combustível para a produção de eletricidade. Ciclos de elevada eficiência de turbinas a gás em associação com a gaseificação são atrativas do ponto de vista de geração de eletricidade, enquanto que motores de combustão interna são mais apropriados para ETEs de pequeno porte (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

A gaseificação do lodo ocorre com a conversão da matéria orgânica em gás combustível de elevada eficiência e cinzas. Durante a gaseificação, o lodo de ETE perde umidade, o material seco é então pirolisado, gerando como produto gases condensados e não condensados, além de resíduos minerais (MARRERO *et al.*, 2003). A Figura 1-13 apresenta um esquema que detalha as etapas do processo de gaseificação do lodo.

Tabela 1-15: Descrição das características, vantagens e desvantagens dos principais tipos de gaseificadores de leito fixo para biomassa.

Tipo	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Contra-corrente	<ul style="list-style-type: none"> O combustível é alimentado pelo topo (através de uma válvula rotativa ou porta de alimentação) e desce em contra-corrente ao ar ou oxigênio (também misturado com vapor d'água ou CO₂), introduzido pela grelha, localizada na base do gaseificador. 	<ul style="list-style-type: none"> Simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com elevado teor de água e material inorgânico, como lodo residual do tratamento de esgoto; Potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha (a menos que vapor d'água seja injetado na grelha) capaz de fundir metais e escória (gaseificação com cinza fundida). 	<ul style="list-style-type: none"> O gás gerado normalmente contém de 10 a 20 % do alcatrão gerado na pirólise do combustível, com uma concentração da ordem de 100 g/Nm³. O alcatrões, no entanto, tem uma boa queima em processos de combustão direta; No caso de aplicações em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás de síntese, o alcatrão deverá ser removido; A grelha pode ser submetida a temperaturas muito elevadas, a não ser que vapor d'água ou CO₂ sejam injetado com o ar ou oxigênio; A granulometria do combustível alimentado tem de ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito (no caso do gaseificador atmosférico) ou formação de canais preferenciais.
Co-corrente	<ul style="list-style-type: none"> Esta configuração permite que o ar e o gás tenham a mesma direção do combustível aplicado ao processo térmico. 	<ul style="list-style-type: none"> Consumem entre 99 a 99,9 % do alcatrão; desta forma o gás gerado pode ser transportado em tubulações e utilizados em motores com um mínimo de limpeza; Os materiais inorgânicos ficam retidos na matriz de carvão e cinza retirada pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quente; O gás (quando limpo) pode ser utilizado em motores de linha, sem maiores modificações; Os gaseificadores de topo aberto apresentam poucos problemas em casos de explosão. 	<ul style="list-style-type: none"> O combustível tem de apresentar baixa umidade (<20 %) e granulometria uniforme. O gás sai do gaseificador a temperaturas elevadas (em geral 700 °C); desta forma esta energia é perdida, a menos que haja algum aproveitamento (para preaquecimento do ar, secagem do combustível etc.). Tipicamente 4 a 7 % do carbono do combustível não é convertido, saindo com as cinzas pelo fundo do gaseificador. A potência de pico de motores com ignição a vela é reduzida em 30 a 40 %, a menos que ele seja turbinado.

Fonte: Cenbio (2002)

A gaseificação e a pirólise do lodo apresentam geralmente maior eficiência que o processo de combustão, além de permitir a cogeração de calor e eletricidade. Os gastos operacionais destes processos são semelhantes, sendo que a principal diferença entre estes é a valoração do subprodutos e os impactos ambientais. Pelo fato da gaseificação produzir um gás com baixo grau de contaminação, o torna mais atrativo que a pirólise para instalação na própria ETE (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

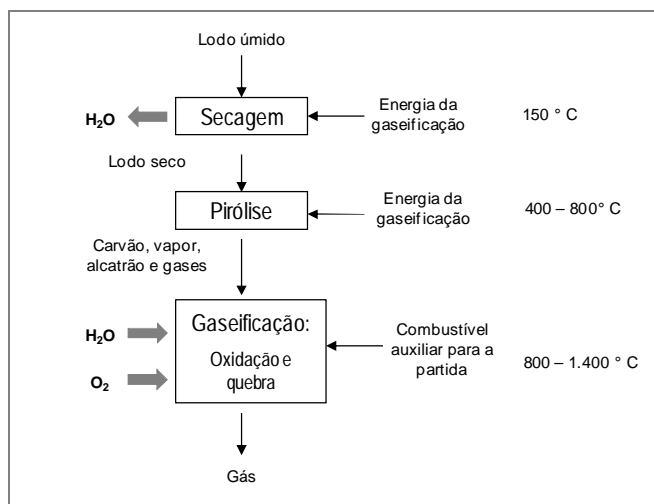


Figura 1-13: Estágios do processo termoquímico do lodo, com ênfase na gaseificação.

Fonte: Adaptado de Furness *et al.* (2000)

De acordo com testes desenvolvidos por Dogru *et al.* (2002), o potencial energético gerado no processo de gaseificação de lodo de ETE em uma unidade experimental co-corrente de 5kWe foi estimado em 4MJ.m^{-3} , sendo esta energia suficiente para alimentar o processo. O combustível gasoso produzido apresentou potencial de ser utilizado como fonte térmica para a secagem do lodo, sendo passível de ser empregado em regiões rurais ou em locais onde esse material seja gerado em elevada quantidade.

Ao gaseificar lodo de esgoto com intuito de aproveitamento energético do *syngas*, Arjhar *et al.* (2013) avaliaram que para a melhor das condições estudadas, a vazão do *syngas* ($180\text{ N m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) foi suficiente para gerar um potência elétrica de 47 kW. Os principais elementos gerados na gaseificação foram o CO (13,2%), H₂ (14,9%), N₂ (53,1%) e CO₂ (17,0%). O poder calorífico inferior do *syngas* foi de $4,20\text{ MJ.N}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$. A eficiência elétrica, do gaseificador, e do motor foram de 12,7 %, 56,3 % e 22,6 %, respectivamente. Os autores concluíram que o lodo de esgoto pode ser usado para gerar eletricidade em escala piloto pela modalidade co-corrente.

Apesar dos avanços da gaseificação há ainda um reduzido número de ETEs que promovem a gaseificação do lodo com fins energéticos. Judex *et al.* (2012) ao realizarem estudos em ETEs em escala de demonstração obtiveram resultados favoráveis que subsidiam outras pesquisas e incentivam o emprego deste processo térmico para tal fim. A ETE possui o aproveitamento energético do gás de síntese para a geração de calor (queima em câmara de combustão) e de eletricidade (motor de combustão interna).

A Tabela 1-16 apresenta as características das duas ETEs localizadas na Alemanha que realizam a gaseificação de lodo desidratado e seco, assim como as características do lodo e do gás de síntese produzidos. O estudo aponta que apesar do baixo poder calorífico gerado com a queima do *syngas* houve uma boa condição de queima do gás na câmara de combustão e no motor de combustão interna. A pesquisa ainda aponta para os benefícios obtidos com a geração de calor e eletricidade com a mistura do biogás coletado, a partir da fermentação do lodo e do *syngas* (JUDEX *et al.*, 2012).

Tabela 1-16: Características das ETEs e dos processos relacionados à gaseificação do lodo para as ETEs de Balingen e Mannheim.

	Unidade	ETE Balingen	ETE Mannheim
Características da ETE			
População equivalente	hab.	250.000	600.000
Geração de lodo ¹	t.ano ⁻¹	1.955	5.000
Temperatura de gaseificação	°C	850	850-900
Potência instalada	W	720	1,5M
Tipo de secador	-	correias	rotativo
Características do lodo			
PCI ¹	MJ.kg ⁻¹	7-10	11-13
Cinzas ¹	%	57	39,5
C ¹	%	16,9	30,0
H ¹	%	3,3	4,4
O ¹	%	19,8	20,8
N ¹	%	2,3	4,2
S ¹	%	0,7	1,1
Densidade da partícula	kg.m ⁻³	1.200	1.300
Densidade aparente	kg.m ⁻³	540	590
Tamanho de partícula	mm	1-7	1-4
Composição do gás de síntese			
CO	% vol.	8,1	13,8
H ₂	% vol.	13,1	13,3
CH ₄	% vol.	2,1	4,2
CO ₂	% vol.	16,7	13,0
N ₂	% vol.	n.a	n.a
PCI	MJ.m ⁻³	3,2	4,7

¹ base seca; n.a: não avaliado. Fonte: Judex *et al.* (2012)

De acordo com Ptasinkski *et al.* (2007) e Furness *et al.*, 2000, a gaseificação apresenta uma baixa eficiência energética para o lodo bruto, somente se tornando favorável com a desidratação do material.

No que se refere às desvantagens do emprego da gaseificação para lodo de ETE, algumas dificuldades e limitações podem ser observadas (FERRASSE *et al.*, 2003):

- Lodo com elevada concentração de nitrogênio pode gerar NH_3 ou HCN , estes precursores de NO_x ;
- Elevado teor de cinzas;
- Variação na composição química do lodo, acarretando em dificuldades para padronização de parâmetros e de controle do processo;
- Necessidade de adição de outros materiais a fim de reduzir a umidade final do material a ser gaseificado.

Em adição, a presença do alcatrão no gás produzido é indesejável não somente pela redução na eficiência da gaseificação, mas também pelo fato de dificultar a limpeza do *syngas* gerando a obstrução de tubos e linhas dos equipamentos (REZAIYAN e CHEREMISINOFF, 2005 *apud* CHUNBAO e LANCASTER, 2011).

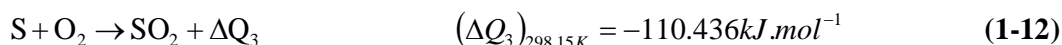
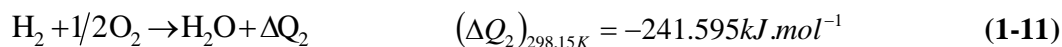
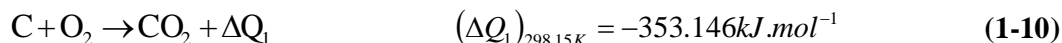
Uma limitação nos gaseificadores é a umidade da biomassa que deve ser inferior a 20% o que justifica uma etapa de secagem como pré-tratamento, apesar dos gastos com esta unidade corresponderem de 25% a 47% dos custos com o gaseificador (FERRASSE *et al.*, 2003), onerosos, especialmente, para pequenas ETEs. Em contrapartida Beenackers (1999) fez uso de lodo de ETE com umidade da ordem de 50% em um gaseificador contra corrente sem a etapa de secagem. De acordo com Ferrasse *et al.* (2003) há uma reduzida quantidade de trabalhos de gaseificação de lodo, tanto para os de leito fixo como fluidizado.

Além dos aspectos relativos ao uso do lodo, o seu emprego em associação com outras fontes de biomassa nos processos de pirólise e gaseificação contribuem para produção de um combustível com melhores propriedades energéticas e condições ambientais das emissões atmosféricas (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

1.3.3 Combustão

O processo de combustão é uma dos processos térmicos mais antigos da humanidade. Atualmente, a maior parte da energia consumida no mundo é fornecida pelo processo de combustão (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

O processo de combustão é caracterizado por reações exotérmicas rápidas entre combustível e agentes oxidantes, acompanhada de liberação de calor. De forma geral, os elementos químicos responsáveis pela liberação de calor na combustão são: carbono, hidrogênio, e em alguns casos, o enxofre (ELIAS, 2005). As equações 1-10 a 1-12 apresentam as principais reações da combustão:



A combustão ocorre em apenas uma etapa, enquanto que a pirólise e a gaseificação são realizadas em dois momentos, em um primeiro, a gaseificação e/ou vaporização, seguida da oxidação (ELIAS e VELO, 2005).

O termo combustão completa é usado para descrever a reação ideal de combustão, quando todo o carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO₂), todo o hidrogênio para água (H₂O) e todo o enxofre para dióxido de enxofre (SO₂). Essas substâncias (CO₂, H₂O, SO₂ e CO, em alguns casos) compreendem os “gases residuais” da combustão (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

A energia liberada no processo de combustão normalmente é quantificada pelo poder calorífico de um combustível, o qual é definido como a quantidade de calor despreendido pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível. Através do aproveitamento do calor residual, o processo se transforma em um de alta qualidade. Este é o princípio básico da cogeração: produção combinada de eletricidade e calor. O calor excedente pode ser aproveitado, por exemplo, em um processo que requeira baixa qualidade de calor, como ocorre na secagem ou calefação, tendo-se assim o aumento no rendimento energético do sistema, para níveis próximos de 80% (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

A eficiência da combustão está intimamente relacionada com o elevado teor de carbono fixo e hidrogênio no material, além de seu poder calorífico superior. Em detrimento, maiores concentrações de nitrogênio e enxofre podem acarretar na liberação dos subprodutos NO_x e SO₂, outros gases corrosivos também podem ser formados, como o CO os COV (compostos orgânicos voláteis), além de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares. Mediante a elevada

concentração de cloro tem-se ainda o potencial de formação de HCl, dioxinas e furanos e outras espécies de organoclorados (BORGES, 2008).

Vale ressaltar que as características do lodo de origem influenciam o comportamento de sua degradação térmica. De acordo com estudo comparativo realizado por Font *et al.* (2001) entre combustão e pirólise de lodo de ETE observou-se que para o lodo anaeróbio, a presença de oxigênio (combustão) acelera a decomposição do lodo quando comparada com a pirólise. De forma complementar, os autores avaliaram que as curvas de decomposição se apresentavam semelhantes para os dois processos térmicos mediante digestão anaeróbia do lodo.

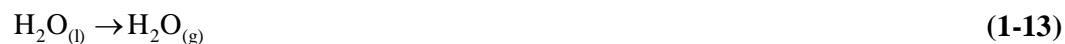
Para o processo de combustão avalia-se que a geração de PAH é minimizada com o aumento da temperatura, tendência contrária ao que ocorre com a geração do metano para condições de presença de oxigênio próxima da relação estequiométrica (CONESA *et al.*, 2009).

De acordo com Conesa *et al.* (2009), a geração de alguns compostos decresce com o aumento da taxa de oxigênio no processo térmico, principalmente hidrocarbonetos voláteis (metano, etano e benzeno), os quais são consumidos na presença do oxigênio.

Em contrapartida, compostos oxidados (álcool, ácidos orgânicos e furanos) atingem a sua máxima formação diante de elevada quantidade de oxigênio. O acréscimo na formação de compostos intermediários (óxidos de carbono e hidrocarbonetos voláteis) também é proporcional ao aumento dos níveis de oxigênio nos processos térmicos (CONESA *et al.*, 2009).

1.3.3.1 Aplicação da combustão no tratamento do lodo

No processo de queima do lodo, a água é completamente evaporada e o material orgânico é oxidado em altas temperaturas à CO₂ e H₂O, como apresentado nas equações 1-13 (evaporação) e 1-14 (oxidação e combustão).



O calor liberado nas reações exotérmicas produz vapor de água, que ao ser encaminhado a turbinas gera eletricidade. De forma alternativa, o vapor de água pode ser utilizado para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, devido ao aproveitamento do calor gerado (CHUNBAO e LANCASTER, 2011).

No que se refere a aplicação do processo de queima para o tratamento de resíduos sólidos, duas terminologias são apontadas, a combustão e a incineração. Estes se diferem pelo fato de que o termo “incineração” é aplicado quando se tem o objetivo principal de redução do volume do resíduos, e a geração de energia pode ou não ocorrer, mas quando promovida tem caráter secundário. Em contrapartida, o termo combustão é empregado quando o objetivo principal é o uso de um combustível para geração de energia (GOMEZ RICO, 2008). Dentro desta realidade destacam a possibilidade de uso de resíduos, como os de primeira e segunda geração. A energia gerada pela queima pode ser aproveitada para a geração de energia elétrica ou térmica.

A combustão de lodo pode ocorrer em plantas específicas (monocombustão) ou em plantas que promovam a combustão com outras fontes (cocombustão). Uma das principais desvantagens do aproveitamento energético na monocombustão é o elevado custo das instalações, o que condiciona serem de grande porte, a fim de atender a geração de lodo para populações de 200 a 800 mil habitantes. Para a viabilidade do processamento térmico do lodo é comum a operação com outros resíduos, em especial os resíduos sólidos urbanos (FULLANA, 2001).

De acordo com Cartmell (2006), para a análise de diferentes cenários de cocombustão do lodo de esgoto, os resultados indicaram que o lodo pode ser considerado como combustível, visto que o material, em todos os casos estudados, apresentou geração de energia líquida. Entretanto, os autores apontam para a necessidade de definição legal, ainda não existente, que oficialize essa classificação, permitindo um aprimoramento no gerenciamento de lodo de esgoto e suas possibilidades de uso. Em adição, Wzorek (2012) indica que a fração de componentes orgânicos justifica a indicação do lodo de esgoto como combustível. Em consonância, Werther e Ogada (1999) afirmam que o lodo primário contém 3-5% de matéria seca em que substâncias orgânicas correspondem a 55-70%.

Dentro deste contexto, o lodo gerado em estações de tratamento de esgoto pode ser empregado com o intuito primeiro de fonte de energia e, portanto, classificado como combustível. Apesar disso, muitos autores não reconhecem o uso de lodo de ETE como uma fonte de combustível, visto que depois da desidratação o material apresenta um teor de umidade da ordem de 75%, em concordância, avalia-se ainda a presença da parcela inerte que pode prejudicar o aproveitamento térmico, a qual é mais evidente em lodos que foram digeridos anaerobiamente, visto a redução da parcela de voláteis ao longo do processo de estabilização da matéria orgânica (GARCIA *et al.*, 2005).

Apesar do lodo apresentar um poder calorífico inferior a outras fontes de biomassa, a substituição dos combustíveis fósseis pelo lodo evita as emissões de CO₂ (FONTS *et al.*, 2012). As principais alternativas para o aproveitamento energético do lodo relacionam-se com a queima do material em ETEs, o uso do subproduto como fonte de energia em cimenteiras e a cocombustão do lodo com outras fontes de biomassa (STASTA *et al.*, 2006). Esta última ganhando cada vez mais importância (FONTS *et al.*, 2012).

No que se refere a possibilidade de cogeração, a combustão de lodo com o desdobramento na geração de vapor e eletricidade é uma alternativa muito difundida na Europa (MONTE *et al.*, 2008).

A combustão de lodo de esgoto possui como vantagem a elevada redução de sólidos e potencial de recuperação energética, além de produção de um resíduo estável (cinzas) e com baixa demanda de área para sua disposição. Como desvantagens são apontados os elevados investimentos de capital e custos operacionais, dificuldade de operação e emissões atmosféricas que podem limitar o uso de áreas restritas (USEPA, 2003).

O comportamento da combustão para o lodo através de análise termogravimétrica indica, em meio oxidante, a sua primeira perda de massa significativa (24,7 %) nas temperaturas entre 160 e 360 °C, e a segunda e principal perda (26,9 %), entre as temperaturas de 360 e 645 °C. A composição do lodo de esgoto indica, de forma geral, um baixa concentração de nitrogênio e enxofre. De acordo com Borges (2008), a emissão dos gases NO, NO₂ e SO₂ com a combustão do lodo foi considerada reduzida, próxima de zero.

Como fonte de combustível alternativo, o lodo de esgoto pode ser empregado em processos de cocombustão, um exemplo desta aplicação é a fabricação do cimento. A proporção máxima indicada de lodo durante a produção corresponde a 5% da capacidade do forno de cimento. Em adição, as cinzas geradas da incineração de lodo de ETE podem ser dispostas em aterros sanitários, serem utilizadas para a melhoria de propriedades de materiais de construção e na fabricação de tijolos (KÄÄNTE *et al.*, 2004 *apud* FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

De acordo com Conesa *et al.* (2009), a geração de PCDD/F é considerada maior para a combustão do lodo em comparação à sua pirólise, em virtude da maior presença de oxigênio. Embora a baixa concentração de oxigênio e a presença de metais catalisadores, especialmente o ferro, possam garantir a presença de dioxinas e furanos.

A fim de se reduzir as emissões de compostos tóxicos, algumas alternativas podem ser utilizadas, tal como o controle da temperatura na queima, como proposto em directiva europeia, através do aumento da temperatura a 850°C por um intervalo de pelo menos dois segundos e o incremento para 1100°C quando da presença de substâncias orgânicas halogenadas, minimizando a formação de dioxinas (MONTE *et al.*, 2008).

A indústria de fabricação de cimento contribui com 5% da emissão global de CO₂, sendo que, deste montante, 40% refere-se a combustíveis empregados para a produção de energia. A substituição total ou parcial dos combustíveis convencionais pelos alternativos, tal como lodo de ETEs, contribui diretamente com a eficiência energética da planta. Todavia, a troca de combustível pode agregar a emissão de outros gases além do CO₂, como o CH₄ e o N₂O, mas estes podem ser controlados pelas altas temperaturas nos fornos e eficiência na combustão (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

De acordo com Rodrigues *et al.* (2013) a combustão da fração orgânica do lodo somente ocorre em temperaturas acima de 200°C. Ao estudar a viabilidade do lodo com fonte de combustível complementar em cimenteiras, avaliou-se que a umidade foi reduzida de 75% para 7%, e o poder calorífico inferior do lodo (8,3 MJ.kg⁻¹) o classificaria com um fonte de combustível viável para tal fim.

A principal limitação de uso do lodo como fonte de energia está relacionada com a eficiência da etapa de desidratação, visto que materiais com maior umidade apresentam uma redução no potencial energético no processo de combustão. O processo de secagem térmica de lodo após a unidade de desidratação agrega vantagens na redução do volume do lodo e potencializa o valor energético do material. Garcia *et al.* (2005) apontam que para a garantia de uma adequada combustão e a não aderência do material nos equipamentos, a umidade do lodo deve ser reduzida a pelo menos 50%.

Após o processo de secagem é evidente a necessidade de atendimento ao limite de autocombustão, a fim de não se ter a queima instantânea do lodo após a secagem térmica, assim, como a garantia que a temperatura máxima da combustão seja inferior à fusão das cinzas (GARCIA *et al.*, 2005).

1.4 Os gases de efeito estufa e as emissões no tratamento anaeróbio

De acordo com IPCC (2007), mais da metade do fluxo atual de CH₄ é resultado de atividades antrópicas, tais como a agricultura, utilização de combustíveis fósseis e decomposição de

resíduos. Os gases quando liberados para a atmosfera contribuem com o aumento da temperatura global por intensificar o efeito estufa.

A Figura 1-14 apresenta a porcentagem dos GEE emitidos por país no tratamento de esgoto sanitário. Observa-se que as emissões do Brasil correspondem a 4% do total mundial, a expansão e aprimoramento nos sistemas de tratamento e um maior controle das perdas garantiriam um melhor desempenho.

A Tabela 1-17 apresenta a distribuição das emissões de CH₄ no Brasil para diversos setores. Avalia-se que a contribuição nas emissões de metano no setor de esgotamento sanitário corresponde a 2,1% do valor das emissões estimadas para o ano de 2005. O aumento das emissões de 1990 para 2005, da ordem de 50%, indica um aumento efetivo nas emissões de GEE neste setor.

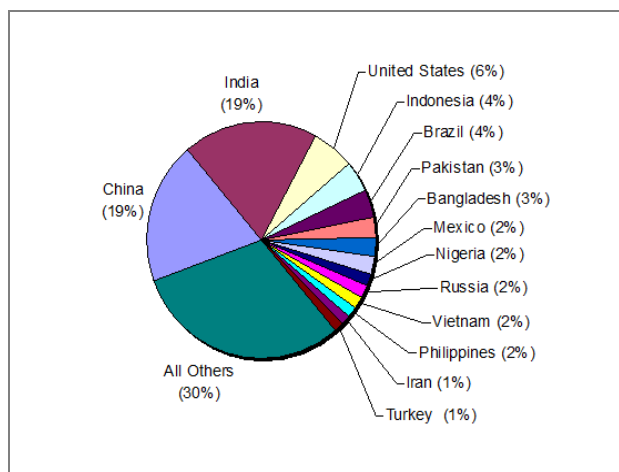


Figura 1-14: Distribuição das emissões de GEE por país no tratamento de esgoto sanitário. Fonte: USEPA (2006)

Tabela 1-17: Distribuição das emissões de CH₄ no Brasil para diversos setores.

Setor	1990	1994	2000	2005	Varição	Part.	Part.
	Gg				1990/2005	1990	2005
					%		
Energia	425	379	416	546	28	3,3	1,9
Processos Industriais (Indústria Química)	3	3	4	4	59	0,0	0,0
Agropecuária	9.651	10.337	10.894	13.158	36	75,2	70,5
Mudança no Uso da Terra e Florestas	1.615	1.805	2.762	2.843	76	12,6	15,2
Tratamento de Resíduos	1.146	1.333	1.739	2.113	84	8,9	11,3
Resíduo	758	913	1.177	1.482	95	5,9	7,9
Esgoto	388	420	562	631	63	3,0	3,4
Industrial	126	129	203	238	89	1,0	1,3
Doméstico	262	290	359	393	50	2,0	2,1

Fonte: MCT (2009)

De acordo com IPCC (2007), as principais contribuições na geração de GEE no tratamento de esgoto doméstico e industrial são devidas aos reatores anaeróbios (reatores de alta taxa e lagoas) e digestores de lodo. Destaca-se que uma ampla gama de tecnologias ambientalmente efetivas estão disponíveis para mitigar as emissões e fornecer benefícios para saúde pública, proteção ambiental e ao desenvolvimento sustentável. Para o tratamento de esgoto, a mitigação das emissões, especialmente CH₄, relacionam-se com a melhoria nas práticas de coleta e recuperação do biogás gerado.

1.5 O status do MDL e as atividades de projeto no Brasil

O processo natural denominado efeito estufa oferece condições apropriadas para a sobrevivência dos seres vivos no planeta Terra. Entretanto, as concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera aumentaram drasticamente nos últimos séculos, acarretando também um aumento de temperatura, no período de 1850 a 2005, em torno de 0,76 °C (IPCC, 2007).

Dentro desta realidade, no ano de 1992, na cidade do Rio de Janeiro, 150 países assinaram um acordo multilateral intitulado Convenção Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas ou UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) com vistas à redução de emissões de gases de efeito estufa com base nas emissões do ano de 1990.

A partir de então têm sido realizadas conferências das partes (COP) buscando-se a determinação de metas de redução e normatização para tal fim. A convenção e os governos nacionais contam ainda com o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) criado no ano de 1988 com a função de apoio através de trabalhos científicos.

Na terceira reunião (COP 3), os 165 países participantes assinaram o Protocolo de Quioto, o qual previa a redução das emissões de GEE em pelo menos 5 % dos níveis de 1990 entre 2008 e 2012. Os países foram subdivididos em dois grupos: Anexo I (países desenvolvidos com metas de redução de 5,2 % dos GEE tendo como ano base as emissões de 1990) e Anexo II (países em desenvolvimento, sem obrigatoriedade na redução de emissões) (UNFCCC, 1997). Entretanto, o protocolo apenas entrou em vigor no primeiro semestre de 2005. Dentre os mecanismos de flexibilidade definidos no Protocolo de Quioto a serem utilizados para o cumprimento dos compromissos da Convenção, pode-se destacar o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), o qual prevê a geração e a comercialização dos certificados de redução de emissões (CRE) para projetos que reduzam as emissões de GEE quando comparadas às suas emissões na ausência do projeto (linha de base).

O Brasil ocupava em 2011 o terceiro lugar em número de projetos registrados, com 184 projetos (7%), sendo que em primeiro lugar encontra-se a Índia com 614 (43%) e, em segundo, a China com 1.190 projetos (22%) (UNFCCC, 2011a).

Em termos do potencial de reduções de emissões associadas aos projetos no ciclo do MDL, o Brasil também ocupava a terceira posição em 2011, sendo responsável pela redução de 398.867.673 t.CO₂e⁻¹, o que corresponde a 5% do total mundial, para o primeiro período de obtenção de créditos¹. A China ocupa o primeiro lugar, com 3.724.718.500 t.CO₂e⁻¹ a serem reduzidas (47%), seguida pela Índia com 1.914.957.607 de t.CO₂e⁻¹ (24%) de emissões projetadas para o primeiro período de obtenção de créditos (UNFCCC, 2011a). No que se refere à redução das emissões de gases de efeito estufa, por tipo de gás, nota-se que, em termos de número de atividades de projeto, o gás carbônico (CO₂) é atualmente o mais relevante (66%), seguido pelo metano (CH₄) – 33% e pelo óxido nitroso (N₂O) – 1,1%.

A Tabela 1-18 demonstra que o maior número de projetos brasileiros é desenvolvido na área de geração de energia e suinocultura, os quais representam a maioria das atividades de projeto (67% somados). Os escopos que mais reduzirão emissões de CO₂ e são os de energia renovável, aterro sanitário e redução de N₂O, totalizando 70% do total de emissões de CO₂e a serem reduzidas (UNFCCC, 2011a).

Tabela 1-18: Descrição dos projetos em validação/aprovação no Brasil.

Projetos em Validação/Aprovação	Número de projetos	Redução anual de emissão	Redução de de emissão ¹	Número de projetos	Redução anual de emissão	Redução de emissão ¹
Energia renovável	245	20.112.215	150.195.413	51,4%	39,8%	37,6%
Aterro Sanitário	36	11.460.635	85.141.298	7,5%	22,7%	21,3%
Redução de N ₂ O	5	6.373.896	44.617.272	1,0%	12,6%	11,2%
Suinocultura	76	4.222.884	39.282.569	15,9%	8,4%	9,8%
Troca de combustível fóssil	46	3.329.139	27.958.720	9,6%	6,6%	7,0%
Eficiência Energética	30	2.180.709	20.928.010	6,3%	4,3%	5,2%
Processos industriais	14	1.002.940	7.449.083	2,9%	2,0%	1,9%
Resíduos	19	706.602	5.588.778	4,0%	1,4%	1,4%
Emissões fugitivas	4	720.068	5.721.011	0,8%	1,4%	1,4%

¹Dados para o primeiro período de obtenção dos créditos.

Fonte: UNFCCC (2011a)

1.6 Aproveitamento energético de lodo e biogás em ETEs

Nos itens subsequentes são apresentados alguns estudos de caso para o aproveitamento energético dos subprodutos biogás e lodo gerados em diversas estações de tratamento de esgoto. As ETEs listadas foram escolhidas por apresentarem fontes confiáveis e experiências

¹ (os projetos são renováveis por no máximo três períodos de 7 anos dando um total de 21 anos)

de sucesso na recuperação energética de seus subprodutos. Em consonância, sabe-se que o número de estações de tratamento que priorizam medidas energéticas cresce rapidamente (FRIJNS *et al.*, 2013).

1.6.1 Experiências internacionais

1.6.1.1 ETE de Iraklio (Grécia)

A unidade de tratamento de esgoto de Iraklio é a primeira ETE na Grécia com a proposta de aproveitamento energético dos subprodutos lodo e biogás. Em 1998 foi instalado o primeiro gerador de eletricidade com uma capacidade de 193,6 kW, após esta experiência bem sucedida outras quatro estações foram beneficiadas, representando uma capacidade de geração de 8.200 kW (TSAGARAKIS, 2007). A Figura 1-15 apresenta um fluxograma das unidades envolvidas no aproveitamento energético da ETE de Iraklio, Grécia.

O digestor de lodo recebe o lodo primário e secundário. A recuperação do biogás ocorre na própria ETE, sendo a produção de biogás direcionada para a manutenção da temperatura da unidade de digestão (aproximadamente 35°C) e para a geração de eletricidade em um sistema de cogeração (TSAGARAKIS e PAPADOGIANNIS, 2006).

Nesta ETE, a linha de produção de biogás é composta de um reservatório de 400 m³ para armazenamento do biogás, a capacidade do motor é de 242 kVA (193,6 kW) e capacidade de queima na tocha de 185 m³.h⁻¹. Durante o período de produção de energia pelo uso do biogás, julho de 1998 a dezembro de 2003, ocorreu a produção de energia para 78% dos dias, sendo a média de produção de 2.039 kWh, com desvio padrão de 1124,2 (TSAGARAKIS e PAPADOGIANNIS, 2006).

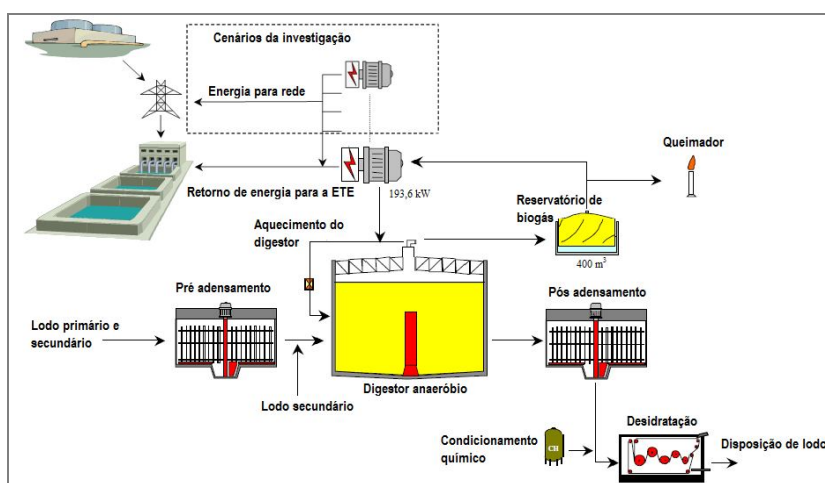


Figura 1-15: Fluxograma do aproveitamento do biogás e lodo na ETE de Iraklio, Grécia.
Fonte: Adaptado de Tsagarakis (2007)

De acordo com os autores, a produção média de energia proveniente da conversão do biogás gerado em biodigestores anaeróbios de lodo correspondeu a 15,9% (1582 kWh.d⁻¹) da energia total demandada pela ETE de Iraklio, considerando-se o pleno funcionamento do gerador instalado. Em adição, através do uso de um *random resampling* fez-se a estimativa da produção da energia pela instalação de outros geradores na ETE. Para o caso mais favorável, uso de 6 geradores, estimou-se que a média de energia produzida alcançaria 6.220 kWh.d⁻¹, com um suprimento de energia para a estação de Iraklio da ordem de 64,6% (TSAGARAKIS, 2007).

1.6.1.2 ETE de Samra (Jordânia)

A ETE de Samra é uma referência no tratamento de esgoto no oriente médio, além de ter sido concebida para geração de energia proveniente do lodo e do biogás. A Figura 1-16 apresenta um fluxograma do processo de tratamento de esgoto. Após um pré-tratamento na unidade de Aim Ghaza, o efluente é encaminhado para a ETE Samra, e gera eletricidade com o uso de turbinas, devido a um desnível de 100 metros. A ETE opera por lodos ativados e foi projetada para as vazões de 267.000 e 420.000 m³.d⁻¹ e populações de 2,3 e 3,3 milhões, para os anos de 2015 e 2025, respectivamente (DEGRÉMONT JORDAN, 2008).

A Tabela 1-19 apresenta o potencial de geração de energia elétrica para a ETE. O potencial energético estimado é de 8.825 MW, o qual pode ser convertido em calor para a manutenção da temperatura dos quatro digestores a 35°C, ou ainda gerar eletricidade para suprimento da estação ou agregada à rede de distribuição (DEGRÉMONT JORDAN, 2008).

O biogás produzido nos digestores é armazenado, após sua purificação, em dois gasômetros com capacidade unitária de 5.000 m³. O lodo primário e secundário adensados são misturados e digeridos em quatro digestores com capacidade unitária de 15.900m³. Na sequência, o lodo estabilizado é encaminhado para 25 leitos de secagem e o material seco apresenta em média 30% de sólidos. Além do aproveitamento energético, a ETE ainda faz o aproveitamento do efluente tratado para a irrigação (DEGRÉMONT JORDAN, 2008).

Tabela 1-19: Capacidade de geração de energia na ETE de Samra (Jordânia).

Unidade/Etapa	Equipamento de conversão	Potencial de produção (MW)
Desnível na chegada no esgoto	Turbinas	1.710
Desnível após a desinfecção	Turbinas	1.640
Gás gerado nos digestores	Geradores	5.375
	Total	8.725

Fonte: Degrémont Jordan (2008)

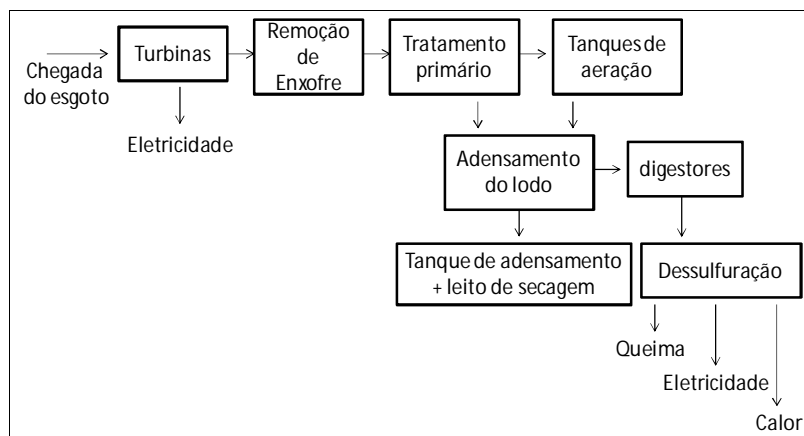


Figura 1-16: Esquema ilustrativo do processo de tratamento da ETE de Samra (Jordânia).

1.6.1.3 ETE de Point Loma (Estados Unidos)

A ETE foi inaugurada no ano de 1963 e localiza-se perto da cidade de São Diego, Califórnia. Sua capacidade de tratamento é de $647.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, atendendo uma população de aproximadamente 2,2 milhões de habitantes (MEYER e BOWMAN, 2007).

O lodo removido do processo de tratamento é estabilizado em digestores anaeróbios (Figura 1-17). O metano recuperado gera eletricidade através do processo de cogeração, garantindo autossuficiência energética a ETE.

A conversão à eletricidade ocorre através de dois motores de combustão interna com capacidade unitária de 2,3 MW (Figura 1-18), considerando-se uma eficiência de 36% dos MCI, estima-se uma capacidade geração de eletricidade da ordem de 4,6MW para fim de plano (MEYER e BOWMAN, 2007).

O calor produzido pela operação dos motores também é utilizado para a manutenção da temperatura dos digestores. No ano de 2000 a cidade de São Diego economizou mais de \$ 3 milhões com a redução dos custos energéticos, além de receber \$ 1,4 milhões com a venda de eletricidade à rede de distribuição (FEMP, 2004).

Em adição, a energia potencial gerada por um desnível de 28 metros na chegada do esgoto sanitário no emissário, contribui para a geração de eletricidade que é vendida à rede de distribuição. O lodo digerido é encaminhado para disposição final ou utilizado como condicionador de solo e material de cobertura de aterros sanitários.



Figura 1-17: Detalhe do digester de lodo da ETE de Point Loma (EUA)
 Fonte: FEMP (2004)



Figura 1-18: Motor alimentado por biogás na ETE de Point Loma (EUA)
 Fonte: FEMP (2004)

1.6.1.4 ETE San Fernando, Medellin, Colômbia

A ETE San Fernando entrou em operação no ano de 2000 e em uma primeira etapa atende a uma capacidade de $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ com fim de plano de $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. O tratamento secundário é realizado por lodos ativados, com a digestão anaeróbia do lodo e geração de energia pelo aproveitamento do biogás (Figura 1-19 e Figura 1-20). A Figura 1-21 apresenta uma fluxograma do processo de tratamento da ETE San Fernando.



Figura 1-19: Vista dos biodigestores da ETE San Fernando, Colômbia.
 Fonte: EPM (2007)

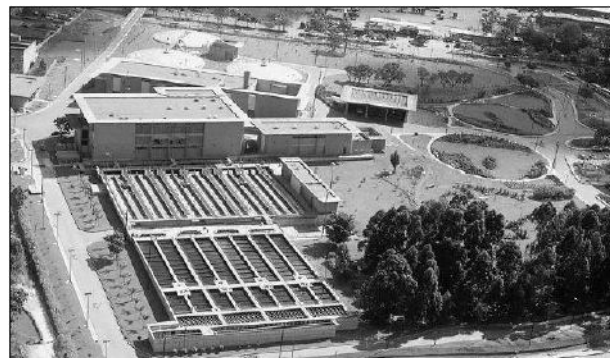


Figura 1-20: Vista parcial o tratamento secundário da ETE San Fernando, Colômbia.
 Fonte: EPM (2007)

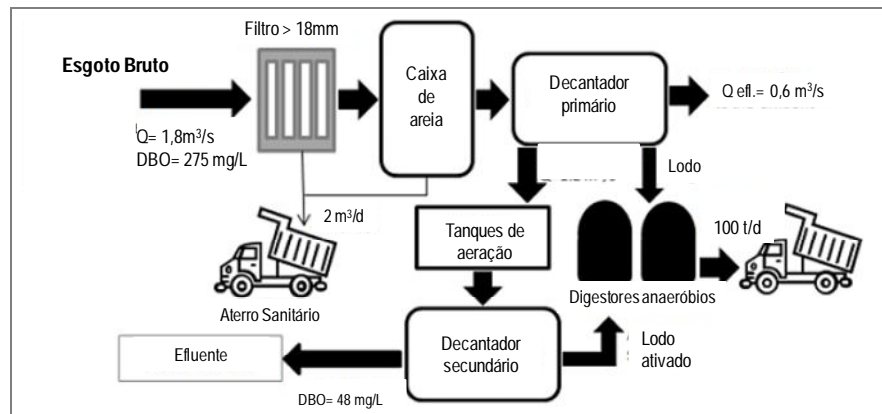


Figura 1-21: Ilustração do processo de tratamento da ETE San Fernando, Colômbia.
 Fonte: Dugand (2010)

Na estação são utilizados motores de combustão interna para a geração de energia. A Figura 1-22 apresenta o balanço energético destes equipamentos (EPM, 2007).

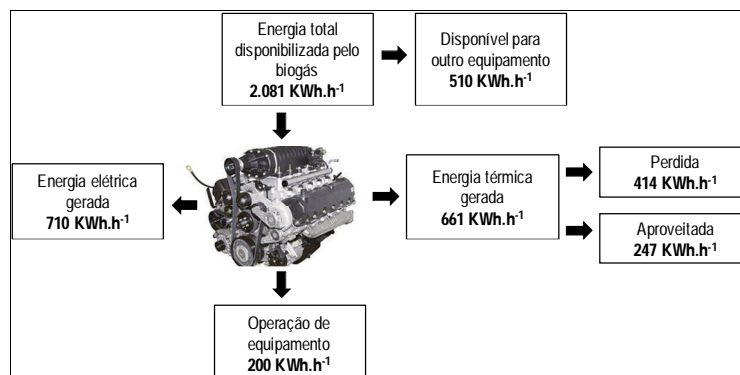


Figura 1-22: Balanço energético do motor de combustão interna, ETE San Fernando, Colômbia.

Fonte: Dugand (2010)

A ETE possui dois digestores com volume unitário de 8.700 m³. O biogás produzido é capaz de atender a 28,8% da demanda de energia da planta de tratamento (18.000 MWh.ano⁻¹). O biogás gerado em excesso ou não utilizado é queimado em *flare*. A Tabela 1-20 apresenta os dados da caracterização do biogás e do balanço energético para o ano de 2009 (DUGAND, 2010). Dentro dos projetos de valorização energética dos subprodutos gerados na estação, a companhia de saneamento responsável (EPM) estuda a possibilidade de aproveitamento energético do lodo digerido pela gaseificação do material, tendo como intuito a geração de *syngas*, para tanto, maiores estudos da caracterização e das propriedades do lodo tem sido realizados (EPM, 2007).

Tabela 1-20: Dados geração de biogás e do balanço energético da ETE San Fernando, Colômbia, ano de 2009.

Mês	Produção de biogás m ³	Composição de CH ₄ %	Geração de eletricidade kWh	Consumo de eletricidade kWh	Suprimento de eletricidade %
Jan.	369.584	64,4	488.000	1.540.429	31,6
Fev.	398.479	65,0	406.000	1.445.729	28,0
Mar.	397.296	65,3	472.000	1.581.667	29,8
Abr.	397.296	66,2	435.000	1.518.562	28,6
Mai.	373.242	65,0	449.000	1.515.610	29,6
Jun.	346.248	65,5	116.000	1.423.380	8,1
Jul.	354.933	65,9	532.000	1.570.266	33,8
Ago.	341.320	66,6	514.000	1.524.583	33,7
Set.	277.295	67,5	409.000	1.535.647	26,6
Out.	325.881	67,2	499.000	1.614.274	30,9
Nov.	348.550	66,7	492.000	1.556.813	31,6
Dez.	347.704	66,2	523.000	1.590.786	32,8
Total	4.263.565	-	5.335.000	18.417.744	-
Média	355.297	65,9	444.583	1.534.812	28,8

Fonte: Dugand (2010)

1.6.1.5 ETE Lancaster, Los Angeles, EUA

A ETE Lancaster trata aproximadamente $56.700 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. O nível de tratamento secundário constitui-se de lagoas de aeração. A biomassa aeróbia removida é estabilizada em digestores anaeróbios gerando um volume de biogás por dia de 5.720 m^3 .

Cerca de 60% da vazão de biogás alimentam o sistema de conversão à eletricidade, em adição, os gases de escape das microturbinas promovem o aquecimento do lodo nos digestores anaeróbios. A estação opera com o potencial de expansão da geração de energia. A capacidade de geração de eletricidade da microturbinas é de 180 kW, com uma eficiência de conversão de eletricidade da ordem de 30%, um período de funcionamento de $6.122 \text{ horas} \cdot \text{ano}^{-1}$ e um fluxo de alimentação de $105 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (WERF, 2010)

1.6.1.6 ETE Taunusstein

Dentre os países que promovem o aproveitamento energético do biogás destaca-se a Alemanha. O país, para o ano de 2006, apresenava 778 ETEs que realizavam a recuperação deste subproduto para a geração de energia para um equivalente populacional de 72 milhões de habitantes (HIPERWATT, 2011).²

A utilização da produção de biogás proveniente de diversas fontes na Alemanha ocorre principalmente para a geração de energia elétrica (75%), produção de calor (15%), seguido de queima (6%) e usos públicos externos às ETEs (3%) (HIPERWATT, 2011).

Atualmente para ETEs a produção elétrica e calorífica a partir do biogás corresponde a $11,5 \text{ kWh} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e $22,0 \text{ kWh} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, respectivamente. A prática das companhias de saneamento da Alemanha apontam que o aproveitamento do biogás é economicamente viável para ETEs com população acima de 30.000 hab (PROBIOGÁS, 2013).

A ETE Taunusstein está em operação há 50 anos e atende a uma população de 50.000 habitantes. A vazão para o período seco e chuvoso é de $150 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ e $450 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$. O sistema de tratamento é de lodos ativados com a digestão anaeróbia do lodo.

Nas duas unidades de digestão (Figura 1-23) a produção de biogás é da ordem de $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ com concentração média de 64% metano. O biogás é aproveitado na estação para a geração

² Palestra ministrada pelo prof. Dr.-Ing. M. Barjenbruch do HIPERWATT (High Performance Energy Recovering Wastewater Treatment Technology) intitulada “ Geração e Aproveitamento de Biogás nas ETEs” no 1º. Seminário Internacional sobre Sustentabilidade em Estações de Tratamento de Esgotos.

de eletricidade em dois conjuntos moto-gerador (Figura 1-24) de 50 kW garantindo uma produção de 1.500 kWh_{elétricos}/dia. O calor liberado no motor é aproveitado para manter a temperatura do digestor em 37°C e para o aquecimento dos ambientes internos da estação. O lodo após a etapa de desidratação em filtro prensa é incinerado (PROBIOGÁS, 2013).

Estima-se que 1/3 da energia demandada pela ETE Taunusstein é produzida a partir do biogás proveniente dos digestores de lodo.



Figura 1-23: Vista dos biodigestores da ETE Taunusstein, Alemanha.

Fonte: Lobato (2013)



Figura 1-24: Vista do motor de cogeração da Taunusstein, Alemanha.

Fonte: Lobato (2013)

1.6.2 Experiências nacionais

1.6.2.1 ETE Arrudas (COPASA/MG)

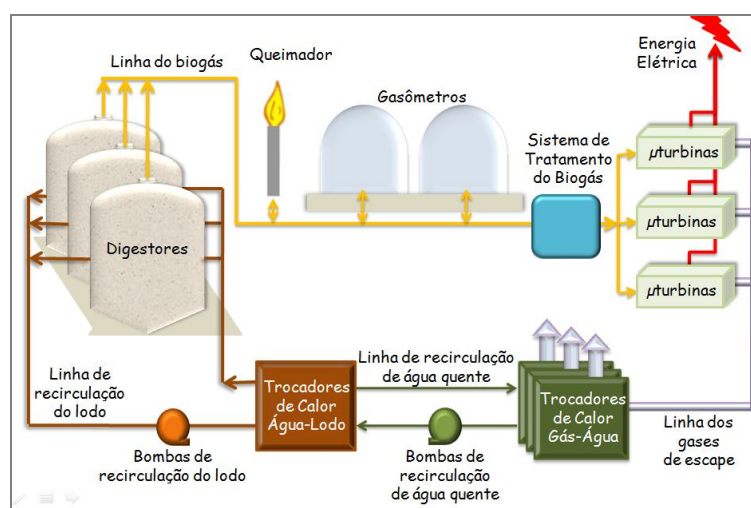
A ETE Arrudas, a maior estação de tratamento do estado de Minas Gerais, possui capacidade de tratar 2,25 m³.s⁻¹, dos quais já foram atingidos 2,0m³.s⁻¹ até abril de 2011 (COPASA, 2012³). A ETE recebe e trata esgoto da bacia do ribeirão Arrudas, abrangendo a coleta de esgoto das cidades de Contagem e Belo Horizonte. O processo de tratamento é de lodo ativado convencional.

A ETE Arrudas é a maior consumidora de energia da COPASA e representa a unidade com a maior produção de biogás da companhia de saneamento. Na estação o maior gasto energético se refere aos reatores de lodos ativados, 63% da demanda, seguido do tratamento primário e gerenciamento de lodo (20%). Diante do potencial de geração de energia da estação e a elevada demanda de energia foram realizados estudos no ano de 2008 para o aproveitamento energético do biogás. A produção média mensal estimada foi da ordem de 461.000 N.m⁻³ de biogás, com composição de 67% de CH₄ e 30% de CO₂, com poder calorífico de 24.800 kJ.m⁻³ (COPASA, 2012).

³ Dados obtidos em visitas técnicas e palestra da companhia de saneamento.

Durante os estudos das alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético do biogás, a caldeira a biogás e a secagem térmica do lodo representaram as opções do ponto de vista econômico, entretanto as variáveis técnica, ambiental e econômica apontaram a cogeração de energia pela instalação de microturbinas (Figura 1-25). A Figura 1-26 apresenta o detalhe de uma microturbina e a Figura 1-27, o sistema de microturbinas em funcionamento. A potência avaliada foi da ordem de 2,4 MW em estudos preliminares (COPASA, 2012).

Com um investimento da ordem de R\$ 64 milhões, o sistema de cogeração da ETE Arrudas representará uma economia de até R\$ 2,7 milhões por ano. O sistema foi inaugurado em abril de 2012 (COPASA, 2012).



Fonte: COPASA (2012)

Figura 1-25: Esquema do sistema de cogeração da ETE Arrudas, na cidade de Belo Horizonte.

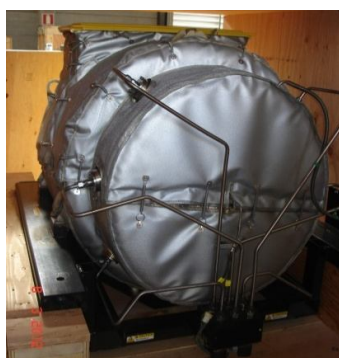


Figura 1-26: Detalhe de uma microturbina instalada para geração de energia na ETE Arrudas.

Fonte: Autor



Figura 1-27: Série de microturbinas em funcionamento na ETE Arrudas.

Fonte: Autor

O biogás gerado durante a digestão do lodo é armazenado em dois gasômetros com capacidade total de 6.400 m³ (Figura 1-28). Após o tratamento do biogás (Figura 1-29), com o

intuito de remover siloxanos e compostos de enxofre, o biogás alimenta 5 microturbinas com capacidade unitária de produção de 200kW e eficiência de conversão de 28 %. Atualmente, a unidade de cogeração possui em atuação 5 turbinas com geração de 160kW.h⁻¹. Os gases de escape são encaminhados para trocadores de calor, onde ocorre o aquecimento do lodo dos quatro digestores, estes com um diâmetro de 27,0 m, altura de 18,3 m e tempo de detenção de 25,3 dias (COPASA, 2012).



Figura 1-28: Gasômetros para armazenamento de biogás na ETE Arrudas.

Fonte: Autor



Figura 1-29: Sistema de purificação do biogás na ETE Arrudas.

Fonte: Autor

Com o aproveitamento energético do biogás, os benefícios esperados para a estação relacionam-se com a (i) redução de despesas com energia; (ii) aumento da produção do biogás; (iii) redução da produção de lodo; (iv) acréscimo na eficiência do tratamento de esgoto; (v) redução de emissões de GEE; (vi) aumento da sustentabilidade energética da planta (COPASA, 2012).

A experiência pioneira em Minas Gerais têm como perspectivas futuras: (i) o desenvolvimento tecnológico; (ii) melhoria da concepção de projeto (iii) mudança na cultura de aproveitamento energético e (iv) redução dos custos em futuras instalações (COPASA, 2012).

1.6.2.2 ETE Ouro Verde (SANEPAR, PR)

A SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) é a maior consumidora de energia no Paraná, sendo este o segundo maior custo operacional da companhia de saneamento. A SANEPAR possui uma grande experiência no uso do biogás, especialmente como fonte de energia elétrica. Na década de 80 a companhia de saneamento foi pioneira no Brasil ao fornecer biogás de ETEs para frota veicular, assim como o fornecimento de biogás para aquecimento de residências. Atualmente atua em estudos e ampliação de sistemas de

conversão de biogás a eletricidade para benefício das ETEs e venda à rede de distribuição, assim como a secagem de lodo a partir do biogás.

A ETE Ouro Verde localiza-se em Foz do Iguaçu, Paraná, e opera com uma vazão média atual de operação de $40\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ para um equivalente populacional de 35.000 habitantes, com previsão de atendimento no fim de plano de $70\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. O tratamento ocorre por um reator RALF, com a produção de biogás da ordem de $50\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ e composição de metano de 67% (SANEPAR, 2013⁴).

O biogás é aproveitado para a geração de eletricidade para consumo da própria estação, assim como venda para a rede de distribuição. No ano de 2009 o valor médio da venda de energia à rede de distribuição foi de R\$ 140,00. MWh^{-1} (SANEPAR, 2013). A combustão do biogás na estação ocorre em um grupo moto-gerador GET Modelo GVW 25 -Potência 25 kVA.

O balanço energético atual da ETE compreende o consumo médio de $1.200\text{kWh}\cdot\text{ano}^{-1}$, e geração estimada de energia de $3.600\text{kWh}\cdot\text{ano}^{-1}$, além de uma expectativa de excedente na produção para os próximos anos de $2.400\text{kWh}\cdot\text{ano}^{-1}$ (SANEPAR, 2013).

⁴ Dados obtidos de palestra ministrada pelo Engº. Péricles Sócrates Weber (Sanepar) no 1º. Seminário Internacional sobre Sustentabilidade em Estações de Tratamento de Esgotos.

2 HIPÓTESES DE INVESTIGAÇÃO

A partir de uma análise da literatura e o estudo das lacunas do conhecimento, a presente tese propõe as seguintes hipóteses:

Hipótese 1

As novas alternativas tecnológicas (gaseificação, pirólise e combustão) utilizadas para a geração de energia a partir da biomassa apresentam viabilidade técnica para o lodo de ETEs. Em adição, estas alternativas apresentam compatibilidade de aproveitamento energético em conjunto com o biogás.

Hipótese 2

O aproveitamento dos subprodutos de uma ETE, lodo e biogás, é capaz de atender a demanda local de eletricidade e calor, de propiciar a redução das emissões de GEE, e de agregar vantagens dos pontos de vista energético, ambiental e econômico.

Hipótese 3

É possível desenvolver um modelo matemático simplificado que permita estimar o balanço energético de ETEs de diferentes portes.

2.1 Aspectos que fundamentam a consolidação das hipóteses de trabalho

A hipótese 1 foi fundamentada a partir do entendimento de que há um grau de maturidade no emprego de processos térmicos (gaseificação, pirólise e combustão) para biomassa, de forma geral, embora sejam ainda incipientes os estudos para o lodo de ETEs. Em adição, entende-se que ambos os subprodutos gerados nas estações de tratamento de esgoto doméstico pela variante anaeróbia (lodo excedente e biogás) ainda não têm sido avaliados como fontes energéticas potenciais e o emprego conjunto destes é limitado.

No que se refere a hipótese 2, identifica-se a tendência em ETEs com tratamento anaeróbio da perda do potencial energético do biogás e lodo excedente, sendo recorrente o envio do lodo desidratado para aterros sanitário e o desperdício do potencial de conversão do biogás a eletricidade. Estudos de autossuficiência energética em ETEs buscam reverter esta tendência que gera impactos ambientais e gastos excessivos no gerenciamento dos subprodutos.

A hipótese 3 é justificada pela limitação de ferramentas e modelos matemáticos que permitam a determinação do potencial energético dos subprodutos em benefício de ETEs, em concepção ou em funcionamento, assim como da energia elétrica demanda para a operação destas pela variante de reatores UASB. Um maior conhecimento da energia livre proveniente do lodo e biogás contribui na tomada de decisão e justifica os investimentos no gerenciamento integrado dos mesmos, além de potencializar benefícios ambientais, sociais e econômicos às ETEs.

2.2 Estruturação da Tese

De posse das hipóteses, apresenta-se a seguir a estruturação da tese:

Hipótese 1: ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO DO LODO E BIOGÁS

Aspectos avaliados

- Verificação, com o apoio da revisão de literatura, da aplicabilidade das tecnologias de aproveitamento energético de biomassa quando utilizadas com lodo de ETEs.
- Análise comparativa avaliando as vantagens e desvantagens dos processo térmicos para o tratamento do lodo.
- Concepção de fluxogramas/configurações em função do porte e da aplicabilidade de cada tecnologia, em associação com o biogás.

Resultados esperados

- O lodo desidratado apresenta características adequadas para ser utilizado em tecnologias de aproveitamento energético já consolidadas para biomassa.
- A análise comparativa dos processo térmicos permitirá apontar as tecnologias mais adequadas para o tratamento do lodo.

Hipótese 2: POTENCIAL ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS E REDUÇÃO NAS EMISSÕES DE GEE

Aspectos avaliados

- Caracterização do lodo (composição imediata, elemental) e biogás e seus poderes caloríficos, com o intuito de calcular o potencial energético disponível para a ETE estudada.
- Determinação de balanços de massa e energia para a ETE monitorada, a partir do potencial energético dos subprodutos e a demanda energética para a operação da ETE para dois cenários distintos.
- Cálculo das reduções nas emissões de GEE a partir de intervenções propostas no gerenciamento dos subprodutos para dois cenários distintos.

Resultados esperados

- O biogás gerado na ETE monitorada supre grande parte da eletricidade demandada pela estação.
- O biogás é o principal produto para a geração de energia.
- O lodo possui propriedades energéticas que o caracterizam como fonte alternativa de combustível.
- Há uma efetiva redução nas emissões de GEE considerando-se as intervenções sugeridas, para ambos os cenários estudados.

Hipótese 3: MODELO MATEMÁTICO PARA O BALANÇO ENERGÉTICO DE ETEs

Aspectos avaliados

- Determinação do potencial energético de ETEs em função do poder calorífico dos subprodutos lodo e biogás. O estudo considera diferentes condições de operação das ETEs, assim como distintas formas de desidratação para o lodo.
- Estimativa do consumo de eletricidade em ETEs, a partir de diferentes demandas de bombeamento de esgoto na chegada da ETE.
- Cálculo do balanço energético para ETEs de diferentes portes pela consideração do potencial energético e do consumo de eletricidade nas estações.

Resultados esperados

- Desenvolvimento do modelo matemático para a determinação do balanço energético em ETEs de diferentes portes.
- O modelo matemático proposto pode ser utilizado como ferramenta para a estimativa do balanço energético de ETEs.
- ETEs com elevado equivalente populacional e baixo desnível entre o interceptor de chegada e a aplicação de esgoto no topo dos reatores UASB possuem maior geração de energia disponível.

3 OBJETIVOS

3.1 *Objetivo geral*

Avaliar o aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto.

3.2 *Objetivos específicos*

- Estudar as possibilidades individuais e conjuntas de emprego do lodo excedente e do biogás como fonte energética.
- Avaliar o potencial energético e de redução nas emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*.
- Avaliar o emprego de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em torno de três hipóteses, as quais possuem associação com seus respectivos objetivos específicos. A Figura 4-1 ilustra a organização da tese, apresentando os objetivos, formas de desenvolvimento e áreas de estudo, quando de sua aplicação.

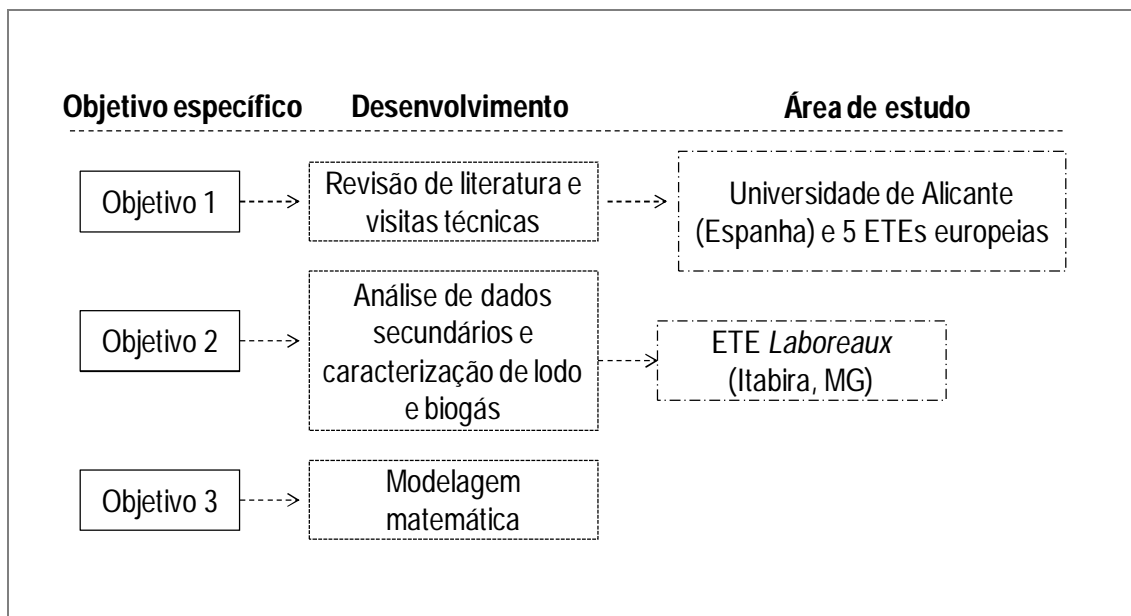


Figura 4-1: Fluxograma da organização da tese, em função dos objetivos específicos.

4.1 Descrição das áreas de estudo

4.1.1 ETE Laboreaux, Itabira.

A estação escolhida para o estudo de caso foi a ETE *Laboreaux*, em Itabira - Minas Gerais, dimensionada para atendimento de uma população de 123.000 habitantes ($313 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), a ser atingida em 2029, com uma primeira etapa de implantação dimensionada para a população de 70.000 habitantes ($170 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$).

Essa estação apresenta fluxograma simplificado, compreendendo unidades de tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), unidades de tratamento biológico anaeróbio e aeróbio em seqüência (reator UASB, filtro biológico percolador - FBP e decantador secundário). A Tabela 4-1 apresenta as principais características da ETE *Laboreaux*.

O biogás gerado nos reatores UASB é atualmente queimado antes de ser lançado para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético. O lodo dos decantadores secundários é recirculado para os reatores UASB, onde é adensado e estabilizado, seguindo, após o descarte,

para a etapa de desidratação, realizada por filtro-prensa e, por fim, para o aterro sanitário da cidade de Itabira. Na unidade existem ainda 4 leitos de secagem com área total de 600 m², utilizados em caso de problemas operacionais do filtro prensa. A Figura 4-2 mostra uma vista geral das unidades da ETE *Laboreaux*.

Tabela 4-1: Principais características da ETE *Laboreaux*.

Características	Reatores UASB	Filtros biológicos percoladores (FBP)	Decantadores secundários
População (hab.)		70.000 (123.000)	
Vazão (m ³ .s ⁻¹)		0,170 (0,313)	
Número de unidades	8 (16)	2 (4)	2 (4)
Tipo	Retangular	Circular	Circular
Dimensões (m)	21,7 × 6,2	D = 22,5	D = 20,0
Área (m ²)	134,5	397,6	314,0
Profundidade útil (m)	4,5	2,5	3,0
Volume útil (m ³)	605,4	994,0	942,0
Desidratação do lodo		Filtro-prensa	

() Valores indicados em parênteses referem-se ao fim de plano.



Figura 4-2: Vista geral das unidades da ETE *Laboreaux*.

4.1.2 Universidade de Alicante

Após a submissão e obtenção de bolsa de doutorado Sanduíche concedida pelo CNPq (Conselho Nacional Científico e Tecnológico), uma parte do doutorado foi desenvolvida em um período de 4 meses no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Alicante, Alicante, Espanha. O objetivo do intercâmbio foi vivenciar a ampla experiência do grupo de pesquisa no emprego do lodo biológico de ETEs em processos térmicos. Em adição, visitas técnicas foram agendadas com o intuito de se conhecer as principais tecnologias de aproveitamento energético do lodo e biogás gerado em algumas ETEs, no total, cinco estações foram visitadas.

5 ESTUDO DAS POSSIBILIDADES INDIVIDUAIS E CONJUNTAS DE EMPREGO DO LODO EXCEDENTE E DO BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA

5.1 Introdução

Atualmente, o interesse no aproveitamento energético do lodo de esgoto tem crescido, em função da possibilidade de geração de energia e a preocupação ambiental relacionada com o envio de lodo para aterros sanitários causando a emissão de GEE, geração de lixiviado em aterros e contaminação do solo, água e ar, enquanto que a disposição do lodo no solo pode trazer problemas devido à contaminação por metais pesados e patógenos (CAO e PAWLOWSKI, 2012).

O gerenciamento do lodo de ETEs tem sido um problema de difícil solução nos países industrializados e em desenvolvimento, visto que esta parcela gerada corresponde a uma reduzida parcela do volume de esgoto tratado, enquanto que seu manejo pode corresponder até 50% dos custos operacionais (SPINOSA *et al.* 2011).

Atualmente a alternativa mais empregada para o gerenciamento do lodo de ETE, no Brasil, é o seu envio para aterros sanitários. Dentro deste contexto, destacam-se os elevados gastos no transporte e o desperdício do potencial energético do lodo desidratado. Em adição, apesar das vantagens associadas ao uso agrícola, muitas vezes o material não é aproveitado no condicionamento do solo, em função da rejeição popular e distância entre ETEs e áreas agrícolas.

Vale ressaltar que outras alternativas de gerenciamento de lodo têm tido aplicação crescente, principalmente nos EUA e em alguns países da Europa. Destaca-se a Alemanha que no ano de 2009, encaminhou 52,3% do lodo de ETEs para processos térmicos (JUDEX *et al.* 2012).

Destaca-se que o lodo de esgoto é uma importante matéria-prima para processos térmicos, como a gaseificação, pirólise e combustão, os quais permitem a redução do volume de lodo e a produção de energia para diversos usos (TRINH *et al.*, 2013, FULLANA *et al.*, 2003). Estes processos já são amplamente aplicados no tratamento térmico de diversas fontes de biomassa e passam a ser indicados e potencializados para lodo de ETEs. Destaca-se ainda o potencial de uso do lodo no co-processamento com outras formas de biomassa, o que contribui com a redução dos problemas relacionados com a elevada umidade, e elementos inorgânicos e tóxicos (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

Avalia-se que o estudo e escolha de alternativas mais interessantes do ponto de vista do gerenciamento de lodo podem garantir a autossuficiência energética de uma ETE, além da possibilidade de utilização do excesso de energia para ser repassada e vendida à rede de distribuição, a depender de estudos sobre a qualidade da energia gerada (HOUDKOVÁ *et al.*, 2008).

Os processos térmicos apresentam diferenças quanto aos benefícios que podem gerar nas estações de tratamento. O processo de gaseificação de lodo gera como subproduto o *syngas*, o qual apresenta elevado potencial energético e pode ser convertido em energia elétrica e calor. A pirólise apresenta vantagens relacionadas com a geração de subprodutos que podem ser utilizados na forma de combustível nas fases sólida, líquida e gasosa. A combustão do lodo promove a secagem térmica do subproduto sólido, além da geração de gases de exaustão com elevada temperatura. Vale ressaltar que para os três processos térmicos, as condições iniciais de umidade do lodo e as propriedades físicas do material devem ser adequadas para que estas alternativas apresentem viabilidade técnica. A aplicabilidade à realidade brasileira está condicionada à quantidade de lodo gerado e às especificidades locais, sendo potencialmente mais vantajosas em ETEs de maior porte que possuem elevados gastos de transporte e destinação final.

Nesse contexto, o biogás, outro subproduto produzido em ETEs, seja pelo tratamento secundário por via anaeróbia, seja pela digestão de lodo gerado em sistemas aeróbios, pode ser aproveitado conjuntamente com o lodo para fins energéticos.

Este objetivo específico é fundamentado no estudo e na comparação das vantagens e desvantagens dos processos térmicos no gerenciamento do lodo de esgoto, assim como a proposição de arranjos para o aproveitamento do biogás e lodo excedente de reatores UASB para ETEs de diferentes portes, adaptados para a realidade brasileira.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Avaliação de aspectos e comparação de alternativas de aproveitamento energético do lodo

Este objetivo específico foi desenvolvido em grande parte durante o período de doutorado Sanduíche na Universidade de Alicante (Espanha) ao longo de quatro meses, com bolsa concedida pelo CNPq (Conselho Nacional Científico e Tecnológico). Os estudos foram conduzidos no departamento de Engenharia Química, sob a orientação dos professores Dr. Juan Conesa e Dr. Andres Fullana.

Para os estudos das alternativas de aproveitamento energético do lodo fez-se uso de um levantamento bibliográfico elencando-se os principais benefícios (diretos e indiretos) da recuperação e utilização do lodo em ETEs.

Com o intuito de se avaliar as principais alternativas de tratamento térmico do lodo (pirólise, gaseificação e combustão) realizou-se um balanço das vantagens e desvantagens do emprego das três alternativas no processamento térmico do lodo de ETEs.

No período de quatro meses, realizou-se, ainda, o levantamento, discussão e comparação de aspectos relativos aos processos térmicos para lodo de ETE, a saber: aspecto econômico, operacional, aplicação à realidade brasileira, maturidade de pesquisas e grau tecnológico, assim como alguns aspectos ambientais. A conclusão e finalização da avaliação qualitativa comparativa foi realizada através de reuniões com os professores orientadores, os quais apontaram os principais itens a serem comparados, em função da ampla experiência e prática que possuem na área. As informações foram ainda confrontadas e sintetizadas com as respostas de outros especialistas, o produto final é apresentado na forma de uma tabela comparativa.

5.2.2 Visitas técnicas a ETEs com aproveitamento do biogás e do lodo para a geração de energia térmica e/ou elétrica.

A fim de complementar a revisão de literatura e a experiência adquirida junto aos professores orientadores, foram planejadas visitas técnicas com o intuito de identificar as principais tecnologias e alternativas no gerenciamento de biogás e lodo em ETEs. Várias estações foram contactadas, sendo que o agendamento e visitação ocorreram em quatro estações.

As visitas foram conduzidas por técnicos e responsáveis pela operação das estações, os quais foram questionados sobre os seguintes pontos: (i) alternativas de destino do biogás; (ii) composição e produção de biogás; (iii) alternativas de destino do lodo; (iv) demanda de eletricidade da estação; e (v) suprimento da eletricidade e calor a partir do aproveitamento do subprodutos biogás e lodo nas dependências da ETE.

5.2.3 Alternativas conjuntas do aproveitamento energético do lodo e do biogás

As alternativas de aproveitamento energético conjunto do biogás e do lodo são apresentadas na forma de fluxogramas com as possíveis configurações e arranjos para o gerenciamento dos subprodutos gerados no reator UASB, a serem organizados em dois tipos de cenários: (i) ETEs de pequeno porte e (ii) ETEs de grande porte. O objetivo principal é apresentar e

discutir as possíveis configurações no gerenciamento do biogás e lodo nas ETEs de acordo com o porte da estação. O estudo das alternativas de aproveitamento dos subprodutos do tratamento foi realizado para reatores UASB, visto que no Brasil praticamente todas as análises de alternativas de tratamento incluem este tipo de reator.

O desenvolvimento desta etapa ocorreu através de revisão de literatura, além dos conhecimentos adquiridos nas visitas técnicas realizadas durante a estadia do doutorado Sanduíche. A escolha das ETEs e o contato com as companhias de saneamento levaram em conta a realização da cogeração e o aproveitamento energético do lodo e do biogás e/ou o aproveitamento energético do lodo pelo uso de um dos processos térmicos estudados (pirólise, gaseificação e combustão).

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Características do lodo de relevância energética

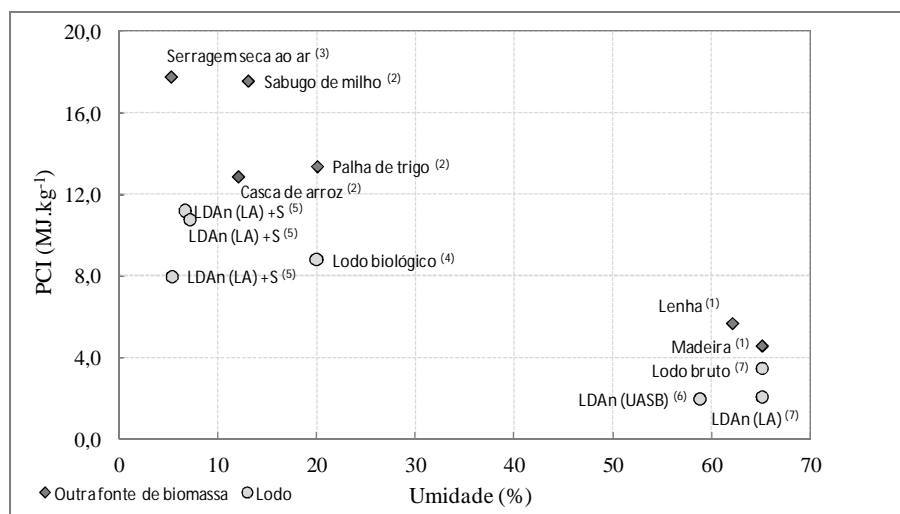
O lodo de esgoto tipicamente doméstico é uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, além de microrganismos. Parte de seus constituintes, como a fração da matéria orgânica (da ordem de 60 %, em base seca) e nutrientes são valorizados para diversos usos, como a aplicação agrícola. Com o objetivo de determinar o potencial de um combustível faz-se necessário o conhecimento de suas características químicas e térmicas fundamentais, sendo expressa através da composição elementar, composição imediata e do poder calorífico. Na Tabela 5-1 são apresentados diversos resultados de caracterização de lodos de esgoto, de interesse para estudos de aproveitamento energético. Em linhas gerais, elevados teores de hidrogênio e carbono, assim como reduzida constituição de água e oxigênio, são fatores que contribuem para aumentar o poder calorífico do lodo (OBERNBERGER *et al.*, 2006). Em relação à composição imediata, elevados teores de carbono fixo apresentam relação direta com o potencial de combustão.

Tabela 5-1: Características do lodo desidratado em ETEs, de acordo com diversos autores.

Origem do lodo	Composição elementar (%), b.s					Composição imediata (%), b.s				Potencial energético (MJ.kg ⁻¹), b.s		Fonte
	C	H	N	S	O	SV	SF ^a	A	w	PCS	PCI	
Lodo desidratado (seco ou processado termicamente)												
LDAn	36,4	5,9	5,2	1,0	19,0	59,8	7,5	32,5	6,4	17,11	13,55	Ajrharn <i>et al.</i> (2013)
LB+S	30,2	3,7	4,3	1,0	6,4	38	7,9	54,4	7,3	10,9	-	Trinh <i>et al.</i> (2013)
LDAn (LA)+S	23,1-39,9	3,8-5,9	2,5-7,9	0,8-1,0	18,8-23,5	38,3-66,8	0,9-19,7	22,6-52,0	1,5-7,1	-	-	Fonts <i>et al.</i> (2012)
LDAn (LA)+S	37,4	5,3	6,6	0,9	17,3	59,2	8,4	32,4	6,8	16,5	-	Otero <i>et al.</i> (2010)
LDAn (LA) + S	28,5	4,3	4,1	0,8	19,5	50,4	6,8	42,8	6,7	12,3 ^c	11,2 ^c	Fonts <i>et al.</i> (2009)
	23,1	3,1	3,2	0,9	14,7	40,4	4,6	54,9	5,3	8,9 ^c	8 ^c	
	27,7	4,4	3,2	0,8	19,7	50,2	5,7	44,1	7,1	11,9 ^c	10,8 ^c	
UASB+LAe	27,5	4,3	4,4	0,9	15,3	43,3	-	47,6	9,1	20,1	18,6	Borges (2008)
-	17,4	6,7	3,8	-	20,3	-	-	51,8	31,7	-	-	Ginoris (2010)
-	32,8	4,5	4,4	1,7	18,9	-	-	37,5	20	9,9 ^c	8,8 ^c	Faaij <i>et al.</i> (1997)
-	25,6	4,4	4,6	1,1	22,0	-	-	42,4	15	14 ^c	-	Groß (2008)
-	22,7	3,3	3,1	1,6	13,3	44,5	-	55,9	3,9	9,5	-	Otero <i>et al.</i> (2008)
Lodo desidratado												
LP	51,5 ^b	7 ^b	4,5 ^b	1,5 ^b	35,5 ^b	65	-	-	-	15,1	-	Manara e Zabaniotou (2012)
LDAn	49 ^b	7,7 ^b	6,2 ^b	2,1 ^b	35 ^b	50	-	-	-	10,8	-	
-	20,6	3,1	1,6	1,2	21,0	46,3	1,3	52,4	84,1	7,67	-	Xu <i>et al.</i> (2012)
LDAe	19,8	3,6	2,1	-	20,5	42,9	3,8	53,3	58,7	8,7 ^c	2,0 ^c	Rosa <i>et al.</i> (2011)
-	36,4	5,5	3,6	-	25,5	60,1	10,9	29	-	17,5	-	Courtaud <i>et al.</i> (2010)
LDAn (LA)	29,2	4,7	2,9	<1,0	-	-	-	-	72,8	11,5	-	
LDAn (LA)	33,6	5,1	5,4	<1,0	-	-	-	-	77,7	12,6	-	Font <i>et al.</i> (2001)
LDAn (LA)	33,6	5,2	4,2	<1,0	-	-	-	-	80,4	13,7	-	
LB	40,8	4,4	5,7	0,0	16,8	67,6	-	32,4	65	16,5	3,5 ^c	Houdkova (2008)
LDAn (LA)	30,8	4,1	3,6	1,1	9,6	49,2	-	50,8	65	12,2	2,1 ^c	

Legenda: LDAn: Lodo digerido anaerobiamente, LDAe: Lodo digerido aerobiamente LA: Lodos ativados, LAe: lagoa aerada, S: Secagem, LP: Lodo primário, LB: Lodo bruto. SV: Sólidos voláteis, SF: Sólidos fixos, A: cinzas, w: umidade, PCS: Poder calorífico superior, PCI: Poder calorífico inferior, N.d: não detectado, (-) não analisado, b,s: base seca, ^a carbono fixo, ^b base combustível (livre de cinzas), ^c base de trabalho.

Todavia, em estudos de aproveitamento energético de lodos de ETE, torna-se muito importante conhecer também o poder calorífico inferior do lodo, em função dos teores de umidade em que é gerado, base de trabalho (b.t), conforme ilustrado na Figura 5-1, a qual também mostra o PCI (b.t) de outras fontes de biomassa. Nesse sentido, lodos submetidos a processos térmicos ou de secagem garantem elevados poderes caloríficos, inclusive superiores ao da madeira como indicado por Faaij *et al.* (1997) e Fonts *et al.* (2009). Também lodos com elevados graus de desidratação podem ser considerados fontes potenciais de combustível, conforme resultados de caracterização de lodo de reator UASB, desidratado em filtro prensa, reportados por Rosa *et al.* (2011), que indicaram teor médio de umidade de 58,7% e PCS e PCI de 8,7 e 2,0 MJ.kg⁻¹ (b.t), respectivamente. Em consonância, Houdkova *et al.* (2008) obtiveram resultados de PCI (b.t) de 2,1 MJ.kg⁻¹ (lodo digerido) e 3,5 MJ.kg⁻¹ (lodo bruto), para lodo com umidade de 65,0%. No entanto, ao se comparar o PCI (b.t) com diferentes fontes de biomassa, avalia-se que o lodo apresenta menor potencial de geração de energia para umidade semelhante.



Legenda: LDAn: lodo digerido anaerobiamente, LA: lodos ativados, S: secagem. **Fonte:** (1) Nogueira e Lora (2003), (2) Lopes *et al.* (2001), (3) Pinheiro *et al.* (2005), (4) FAAJ *et al.* (1997), (5) Fontes *et al.* (2009), (6) Rosa *et al.* (2011), (7) Houdkova (2008).

Figura 5-1: Poder calorífico inferior de diversas fontes de biomassa, em função da umidade.

5.3.2 Benefícios da recuperação energética do lodo

A Tabela 5-2 apresenta os principais benefícios da recuperação energética do lodo obtido em ETEs. De maneira geral, o uso do lodo pode conferir benefícios diretos, tais como a redução do volume do material a ser enviado a aterros sanitários (principal destino na realidade brasileira), assim como a geração de energia pelo aproveitamento do potencial energético desse subproduto do tratamento anaeróbico. Os benefícios podem estar relacionados aos aspectos ambiental, econômico e social.

No que se refere aos benefícios indiretos do uso do lodo, pode-se destacar os gastos no transporte do material até o destino final, assim como a redução das emissões de GEE quando da não disposição deste resíduo em aterros sanitários, especialmente em unidades onde o biogás gerado da degradação anaeróbia é queimado em *flare* ou emitido sem a sua queima. Diante da redução das emissões de GEE para a atmosfera, após a proposição de uma alternativa tecnológica, as ETEs podem obter benefícios econômicos e climáticos com a geração e comercialização de créditos de carbono.

Em adição, destaca-se o potencial de geração de energia térmica e elétrica diante do processamento térmico do lodo, como ocorre na pirólise, gaseificação e combustão, dentre outros. O uso do lodo para a geração de energia elétrica ainda está limitado à viabilidade econômica, para tanto, a quantidade de material a ser processado e o domínio da tecnologia não devem ser limitantes. Um exemplo deste processo de conversão de lodo à eletricidade ocorre em gaseificadores devido à produção do gás de síntese (*syngas*) e geração de eletricidade. As limitações desta alternativa estão relacionadas com a baixa eficiência global

de conversão e da necessidade de maiores estudos sobre as propriedades físicas adequadas do lodo, tais como a umidade e a granulometria, a fim de que o tratamento térmico alcance melhores condições de operação e agregue vantagem econômica.

Sabe-se também que o emprego do lodo é limitado devido à insegurança sanitária pela presença de organismos patogênicos. O processamento térmico do lodo, com ou sem geração de energia, potencialmente recuperada para a ETE, pode garantir a inertização do lodo e trazer benefícios diretos e indiretos em diversos níveis, dentre os quais destaca-se o uso do material como insumo agrícola e fertilizante.

Tabela 5-2: Principais possibilidades e benefícios da utilização do lodo gerado em ETEs com fins energéticos.

Benefício direto	Benefício Indireto	Tipo de benefício
Redução do volume de material a ser enviado ao aterro sanitário.	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos gastos com transporte de lodo ao aterro. • Redução da geração e emissão de gases de efeito estufa pelo não aterramento e degradação do lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Econômico. • Ambiental/Climático.
Fonte de energia térmica devido à sua queima	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de uso em processos de aquecimento e higienização. • Redução do volume de resíduo final. 	<ul style="list-style-type: none"> • Econômico/Ambiental. • Econômico/Ambiental.
Suprimento de eletricidade devido ao uso do vapor e <i>syngas</i> gerado no processamento térmico do lodo	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos gastos com eletricidade na ETE ou em outras unidades. • Agregação de energia renovável na matriz energética brasileira. 	<ul style="list-style-type: none"> • Econômico. • Ambiental/Climático.
Inertização do lodo após tratamento térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade do uso do lodo na agricultura, reduzindo a utilização de recursos naturais. • Possibilidade de fomento da agricultura familiar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiental/Econômico. • Social.

5.3.3 Uso de processos térmicos no gerenciamento de lodo

O lodo de esgoto pode ser considerado uma importante matéria-prima para processos térmicos, como pirólise, gaseificação e combustão, os quais permitem a redução do volume de lodo e a produção de energia para diversos usos (TRINH *et al.*, 2013, FYTILI e ZABANIOTOU, 2008). Estes processos já são amplamente aplicados no tratamento térmico de diversas fontes de biomassa e passam a ser indicados e potencializados para lodo de ETE (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008). Destaca-se ainda o potencial de uso do lodo no coprocessamento com outras formas de biomassa, possibilitando a redução dos problemas relacionados com elevada umidade e com elementos inorgânicos e tóxicos (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

No que se referem os processos térmicos, a combustão perfaz os demais processos, sendo o estágio mais avançado de oxidação. A Tabela 5-3 ilustra a classificação dos tratamentos térmicos e seus processos intervenientes. As principais características dos processos térmicos pirólise, gaseificação e combustão são apresentadas na Tabela 5-4. Nota-se que as reações são influenciadas basicamente pela variação da temperatura e pelo nível de oxigênio, influenciando por sua vez na distribuição dos subprodutos gerados.

Na Tabela 5-5 estão destacadas as principais vantagens e desvantagens do uso do lodo nesses processos. Algumas das vantagens da gaseificação relacionam-se com a geração de um gás de síntese (*syngas*) com elevado potencial energético que pode ser convertido em energia elétrica e utilizado em benefício da ETE, ou até mesmo alimentar a rede de distribuição quando a energia gerada apresenta qualidade compatível. Para a pirólise, avalia-se a produção de três subprodutos combustíveis (gás, carvão e óleo).

Tabela 5-3: Classificação dos tratamentos térmicos e processos intervenientes.

Etapas	Método de tratamento		
	Pirólise	Gaseificação	Combustão
Etapa 1	Secagem	Secagem	Secagem
Etapa 2	Pirólise	Pirólise	Pirólise
Etapa 3	-	Gaseificação	Gaseificação
Etapa 4	-	-	Oxidação

Fonte: Garcia *et al.* (2005)

Tabela 5-4: Comparação dos processos térmicos para lodo secundário de ETEs.

Parâmetro de comparação	Pirólise	Gaseificação	Combustão
Requerimento de secagem prévia	Sim ¹	Sim	Não
Temperatura de operação (°C)	400-800	800-1.400	850-950 ²
Pressão para operação	Ambiente ou ligeiramente inferior/superior ³	Ambiente	Ambiente
Condições de reação	Ausência de oxigênio	Deficiência de oxigênio, possível adição de H ₂ O, CO ₂	Ar
Subprodutos típicos (%)	Gás (até 50), Carvão (até 40), Óleo (até 40)	Syngas (até 90), Carvão (até 30), Óleo (até 5)	Cinzas (até 30), Gases de exaustão (até 90)
Produtos gasosos	CH ₄ , H ₂ O, álcoois, aldeídos, fenóis etc.	CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, NO _x etc.	N ₂ , O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , NO _x etc.
Quantidade dos gases produzidos	Variável ⁴	Muito alta	Muito alta
Utilidade dos gases	Cogeração	Cogeração	-
Utilidade dos líquidos	Cogeração	-	-
Utilidade dos sólidos	Cogeração, Agricultura	Agricultura	Agricultura

¹Requerimento de 150°C para um nível de 25% de sólidos. ²Temperatura mínima, a máxima depende de condições de chama. ³Depende do principal produto final almejado (vapores ou sólidos). ⁴ Depende da pressão e velocidade de aquecimento do substrato (rápida ou lenta).

Fonte: Adaptado de Chunbao e Lancaster (2011), Garcia *et al.* (2005)

A Tabela 5-6 apresenta uma análise comparativa dos processos térmicos de pirólise, gaseificação e combustão aplicados, quando aplicados ao tratamento e aproveitamento energético de lodo de ETE. Os principais aspectos considerados na análise foram relacionados com a questão econômica, operacional, desenvolvimento tecnológico e aplicabilidade à realidade brasileira, além do caráter ambiental. Ressalta-se que a avaliação é qualitativa e teve como premissa a operação típica e característica dos processos térmicos dentro dos limites da ETE, no que se referem os parâmetros operacionais convencionais.

O processo da combustão é mais difundido e consolidado, apresentando maior simplicidade operacional, menores exigências de preparo do lodo, e aplicabilidade a ETEs de diferentes portes. Entretanto, o controle ambiental das unidades que promovem a combustão do lodo deve ser rigoroso, em função do potencial de geração de poluentes, tais como a dioxina e furanos policlorados, SO_x, NO_x e metais pesados.

A gaseificação do lodo, quando utilizada para a geração de eletricidade e calor, apresenta compatibilidade técnica e econômica com combustão direta, devido ao uso do *syngas*, o qual pode ser aproveitado nas dependências da ETE ou transportado para outras unidades consumidoras adjacentes (fornecimento a longas distâncias não recomendável, devido à elevada toxicidade do monóxido de carbono, seu principal constituinte).

Assim como a gaseificação, a pirólise requer o preparo do lodo para o processo térmico. A pirólise é uma alternativa que apresenta flexibilidade no uso dos subprodutos líquidos, sólidos e gasosos, interna e externamente à ETE, assim como o menor potencial de geração de poluentes tóxicos. Esta tecnologia está em crescente desenvolvimento e aplicação prática para fins de aproveitamento energético do lodo.

Tabela 5-5: Análise comparativa das principais alternativas de tratamento térmico para lodo de ETE (pirólise, gaseificação e combustão). Balanço de vantagens e desvantagens.

Alternativa	Vantagens	Desvantagens
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> • Processo não demanda queima. • Processo flexível e versátil • Produção de uma elevada quantidade de óleo, o qual pode ser utilizado em vários processos químicos ou cogeração. • Redução de volume do lodo da ordem de 90% e geração de material inerte. • Exclusão da formação de subprodutos tóxicos (dioxinas), em virtude da operação em baixas temperaturas e atmosfera redutora. • Formação dos produtos finais (gás, carvão e óleo), os quais apresentam potencial de serem aproveitados na forma de combustível. • Elevada taxa de conversão dos subprodutos a energia. • Moderado poder calorífico dos gases gerados na pirólise, da ordem de 15 MJ/m³. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo operacional e de manutenção • Elevado custo de tratamento dos efluentes gasosos e líquidos • Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com potencial concentração dos metais pesados originalmente presentes no substrato. • Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo. • Baixa maturidade tecnológica. • Menor liberação de energia no próprio processo, poder calorífico continua significativo nos subprodutos,
Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de energia e redução dos volumes de resíduos produzidos. • Produção de gás após a gaseificação do lodo com moderada a boa qualidade e inflamabilidade, o qual pode dar suporte a processos de secagem do próprio lodo. • Potencial de geração de energia elétrica a partir do gás em benefício da estação de tratamento. • Elevado rendimento na conversão à eletricidade. • Reduzida emissão de poluentes. • Produção de resíduo sólido inerte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados. • Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo. • Tecnologia complexa e pouco disponível comercialmente • O alcatrão formado durante o processo de gaseificação, se não completamente queimado, pode limitar as aplicações do syngas.
Combustão	<ul style="list-style-type: none"> • A co-combustão de lodo e combustível convencional possui menor investimento. • recuperação de energia (elétrica e/ou vapor d'água), permitir a redução de custos operacionais. • Dispensável, em muitos casos, a secagem do lodo, havendo somente a necessidade da etapa de desidratação do material. • Elevada redução do volume do lodo, em torno de 90%. • Remoção de praticamente todos os componentes orgânicos. • Possibilidade de utilização das cinzas resultantes do processo. • Alta taxa de liberação do poder calorífico, e potencial de aproveitamento energético. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado de implantação e operação. • Geração de uma fração sólida que inclui substância inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados. • Potencial de geração de compostos como NO_x, SO_x, HCl, HF, assim como a geração de metais pesados, dioxinas e furanos. • A combustão direta do lodo pode caracterizar incineração • Demanda prévia de desidratação do lodo. • Elevados custos para o controle ambiental, devido à limpeza dos gases.

Fonte: Feam (2012), Johnson (1996), Werther e Ogada (1999), Ndaji et al. (1999), Stasta et al. (2006), Monte et al. (2008), Garcia et al. (2005)

Do ponto de vista econômico, a geração de energia elétrica ou calor através dos processos térmicos apresenta custos elevados para instalação e operação das plantas, e a energia obtida será geralmente mais cara do que o consumo de energia provida externamente. Assim sendo, a produção e uso ou exportação de energia (mais cara do que a convencional) somente será viável em um contexto em que houver: (i) subsídios pelos benefícios ambientais relacionados à geração de energia de origem renovável, em detrimento do consumo das energias convencionais, e (ii) quando os custos considerados para a destinação dos resíduos na situação atual (por exemplo para dispor em aterros sanitários) internalizarem de forma adequada os custos necessários para implantar e manter aterros com condições adequadas em termos de segurança ambiental, tratamento de gases, chorume etc., de forma a permitir uma comparação econômica equilibrada entre as duas alternativas.

Tabela 5-6: Avaliação relativa das principais alternativas de processo térmico para geração de energia a partir do lodo anaeróbio desidratado.

Aspecto Avaliado	Item	Alternativa		
		Pirólise	Gaseificação	Combustão
Aspecto econômico	Custo de instalação (US\$.kg ⁻¹)	++	+++	+
	Custo de operação/manutenção (US\$.kg ⁻¹)	++	+++	+
Aspecto energético ²	Energia gerada na forma de calor (MJ.kg ⁻¹) ¹	+	++	+++
	Energia gerada na forma de eletricidade (MJ.kg ⁻¹) ¹	+	+++	++
	Potencial de geração de subprodutos sólidos	+++	+	++
	Potencial de geração de subprodutos líquidos	+++	++	+
	Potencial de geração de subprodutos gasosos	+	+++	++
Aspecto operacional	Exigências na preparação/adequação do lodo para aplicação ao processo térmico	+	++	+++
	Possibilidade de uso dos subprodutos nas dependências da própria ETE/instalação	+++	+++	+++
	Possibilidade de uso dos subprodutos fora das dependências da ETE/instalação	+++	++	+
	Necessidade prévia de secagem e adensamento do lodo	++	+	+++
	Aproveitamento das cinzas como condicionador de solos	+++	++	+
	Redução de volume do material sólido após o processamento térmico (%)	+	++	+++
Aplicação à realidade brasileira	Simplicidade operacional	+	++	+++
	Aplicabilidade em ETEs de pequeno porte	+	++	+++
	Aplicabilidade em ETEs de médio e grande porte	+++	+++	+++
Aspecto relacionado à pesquisa e tecnologia	Aplicação em escala real para o tratamento térmico de lodo	+	++	+++
	Nível de desenvolvimento de pesquisas aplicadas	+	++	+++
	Avanço tecnológico e consolidação do estado da arte para o gerenciamento do lodo	+	++	+++
Aspecto ambiental ²	Potencial de geração de resíduos perigosos	++	+++	++
	Potencial de geração de efluentes líquidos	+	++	+++
	Potencial de emissão atmosférica de dioxinas e furanos	+++	++	+
	Potencial de emissão atmosférica de SO _x e NO _x	+++	++	++
	Potencial de emissão atmosférica de metais pesados	+++	++	+

+++ : maior favorável + : menos favorável, ++ : nota intermediária. ¹por massa de lodo, em base seca, ²no processo térmico em si

5.3.4 Visitas técnicas a ETEs com aproveitamento do biogás e do lodo para a geração de energia térmica e/ou elétrica.

Na sequência são apresentadas as principais características de ETEs visitadas na Europa, assim como as alternativas e fluxogramas do aproveitamento energético do lodo e do biogás. Apesar do amplo uso de sistemas aeróbios de tratamento (lodos ativados), a estabilização do lodo em biodigestores e a captação do biogás nessas unidades produzem os mesmos subprodutos obtidos em reatores UASB, amplamente empregados na realidade brasileira.

5.3.4.1 ETE Novelda, Monforte del Cid, Espanha

A ETE Novelda trata esgoto de uma população de aproximadamente 29.000 habitantes, com vazão média de $3.524 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. O tratamento é dado por lodos ativados convencional, em que o lodo removido do sistema é espessado por gravidade, digerido anaerobiamente e desidratado por centrífugas. A Figura 5-2 apresenta um esquema ilustrativo do processo de tratamento da ETE.

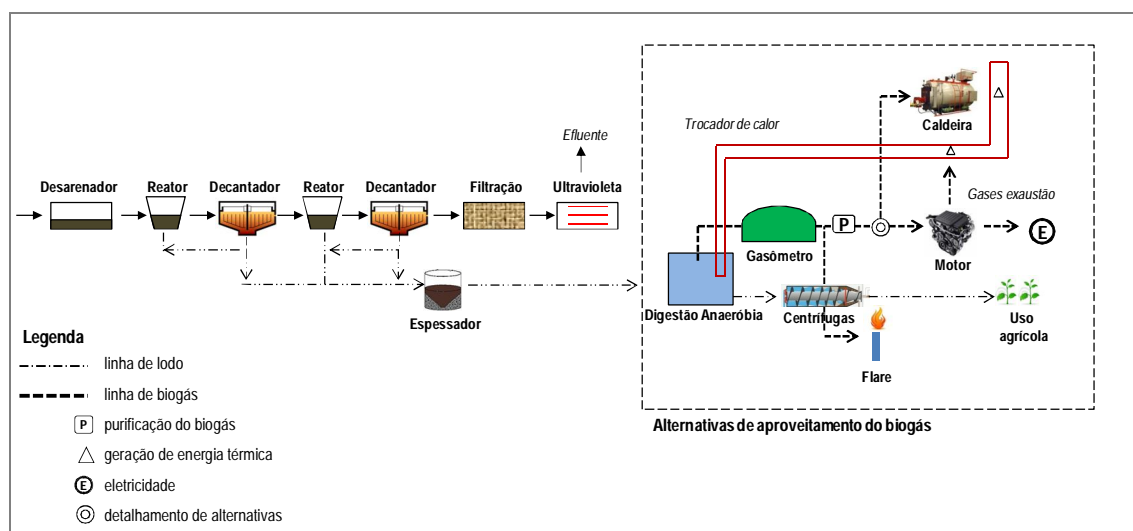


Figura 5-2: Representação esquemática do sistema de tratamento com ênfase no gerenciamento de lodo e biogás na ETE Novelda, Monforte del Cid.

Para se manter a temperatura no processo de digestão (35 a $38 \text{ }^\circ\text{C}$), o lodo é aquecido pelo contato indireto com um sistema fechado de água em um trocador de calor. O aquecimento da água pode ser dado: (i) pelo aproveitamento do calor liberado pelo motor de combustão interna (MCI) (Figura 5-3) proveniente do circuito de refrigeração interna e dos gases de exaustão; (ii) pela queima direta do biogás em uma caldeira para aquecer o circuito interno de água e, por conseguinte o lodo. (iii) queima do biogás em flare. O biogás gerado na digestão possui composição típica de CH_4 (70%), H_2S (0,4%), CO_2 (24%), N_2 (4%) e H_2 (1%).

A caldeira (Figura 5-4) utilizada é da marca Vulcano Sadeca (modelo 300 C) e possui como especificações um volume de 460 litros, consumo nominal de biogás de $55 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e potência nominal de 375 kW.

A produção diária de biogás está em torno de $450 \text{ Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, o MCI possui uma taxa de conversão de $1,8 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$ a partir do biogás consumido. O MCI possui potência nominal de 120 kW. A demanda de eletricidade da planta é de $3.000 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$, sendo que o suprimento de eletricidade pela recuperação do biogás encontra-se na faixa de 20-30%.



Figura 5-3: Vista geral do motor de combustão interna da ETE Novelda, Monfort del Cid.

Fonte: Autor



Figura 5-4: Caldeira a biogás, ETE Novelda, Monfort del Cid.

Fonte: Autor

O lodo após ser espessado, digerido e desidratado em centrífugas é encaminhado para aplicação agrícola no solo. O uso do material como condicionante é monitorado através de análises periódicas no lodo e do solo que irá recebê-lo.

5.3.4.2 ETE Valorhin, Estrasburgo, França

A ETE Valorhin trata o esgoto sanitário de uma população equivalente de aproximadamente 1 milhão de habitantes (vazão média de $170.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) através do sistema de lodos ativados. O biogás é coletado de dois digestores e utilizado para (i) produção de eletricidade a partir de um motor de combustão interna; (ii) queima conjunta com o lodo no processo de incineração; (iii) queima do biogás em flare, alternativa esta empregada somente em situações de segurança. Em adição, uma planta de biometanização está em fase de concepção e será construída para aproveitar o biogás para a geração de energia.

A energia residual nos gases de exaustão do MCI é empregado para o aquecimento das unidades de digestão. Para o ano de 2012 a energia contida no biogás coletado dos digestores foi da ordem de $12-14 \text{ GWh} \cdot \text{ano}^{-1}$, sendo que $5 \text{ GWh} \cdot \text{ano}^{-1}$ foram utilizados para aquecimento

do digester. A Figura 5-5 apresenta uma representação esquemática do sistema de tratamento na ETE Valorhin, com ênfase nas linhas de gerenciamento de lodo e biogás.

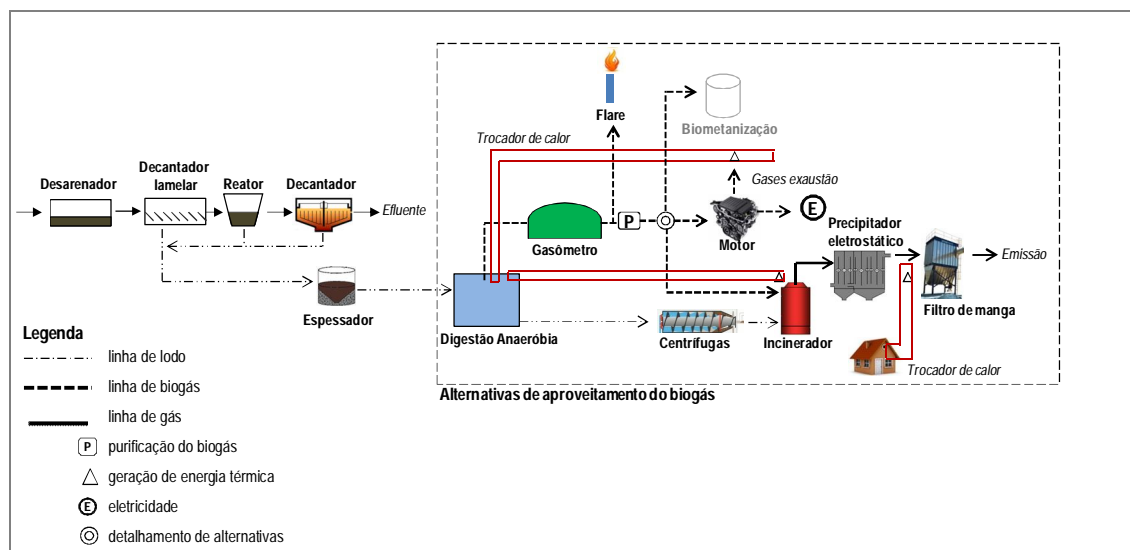


Figura 5-5: Representação esquemática do sistema de tratamento com ênfase no gerenciamento de lodo e biogás na ETE Valorhin, Estrasburgo.

O lodo primário e secundário é estabilizado em dois digestores, a proporção da massa de lodo encaminhado para digestão pode variar, influenciando a geração de biogás e umidade final do lodo desidratado nas centrífugas. Para a situação mais favorável, a produção total de biogás nos digestores é da ordem de $350 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e o teor de sólidos do lodo centrifugado de 20%. Para este cenário, a remoção da carga orgânica nos digestores é de 55% com uma relação de produção de biogás de $0,9 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kgDBO}_{\text{removida}}$. A vazão média de biogás gerada nos biodigestores é de $210 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e a concentração típica de CH_4 próxima a 62%. A taxa de aplicação do biogás no forno (incinerador de lodo) e no motor de combustão interna é de $100 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e $110 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente.

As potências térmica e elétrica do sistema de cogeração são de 2,1MW e 626 kW, respectivamente, indicando uma produção anual de eletricidade de 2.300 MWh, a qual é vendida para a rede de distribuição. A Figura 5-6 e Figura 5-7 apresentam o biodigestor e a unidade de cogeração de energia por motor de combustão interna.

Conforme supracitado, uma das alternativas de gerenciamento é a da queima do biogás conjuntamente com o lodo recolhido das quatro centrífugas da ETE. A combustão ocorre em um forno (Figura 5-8 e Figura 5-9) com capacidade máxima de aplicação de $10 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ e de $70\text{-}100 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para lodo e biogás, respectivamente. O lodo utilizado no incinerador, digerido e

centrifugado, é proveniente dos níveis de tratamento primário e secundário e após a desidratação possui teor de sólidos típico de 27%.

As emissões atmosféricas do forno são encaminhadas para um eletrofiltro, seguido de um filtro de manga. O calor é recuperado no processo, através de trocadores de calor, sendo aproveitado para aquecimento das instalações da própria ETE, como a manutenção da temperatura dos biodigestores e aquecimento interno das instalações.



Figura 5-6: Vista geral do biodigestor de lodo da ETE Valorhin, Estrasburgo.
Fonte: Autor



Figura 5-7: Estação de cogeração por motor de combustão interna, ETE Valorhin, Estrasburgo.
Fonte: Autor



Figura 5-8: Forno de incineração para lodo e biogás da ETE Valorhin, Estrasburgo.
Fonte: Autor

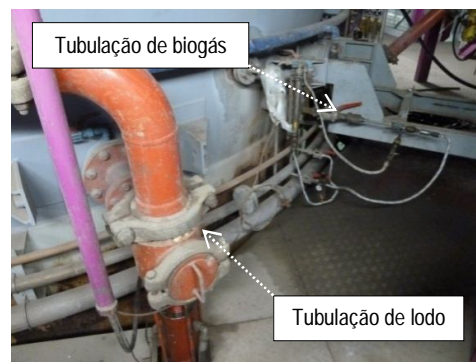


Figura 5-9: Detalhe dos pontos de alimentação de lodo e biogás no forno da ETE Valorhin, Estrasburgo.
Fonte: Autor

5.3.4.3 ETE Rincón de León, Alicante, Espanha

A ETE Rincón de León possui uma vazão de fim de plano de $75.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, atualmente trata uma vazão média de $55.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, com um equivalente populacional de 432.819 habitantes. O tratamento secundário é realizado por lodos ativados convencional, a Figura 5-10 ilustra as unidades de tratamento.

A ETE possui dois biodigestores (Figura 5-11) com a capacidade unitária de 5.000 m^3 em que o lodo aplicado diariamente é da ordem de $750 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, com 2% de teor de sólidos. A produção

de biogás é de $600\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ e possui uma concentração típica de CO_2 (36%), CH_4 (64%) e H_2S (0-200 ppm). Com o intuito de minimizar a geração de H_2S na digestão anaeróbia há a aplicação de cloreto férrico no lodo, garantindo uma geração deste constituinte no biogás abaixo de 500 ppm, valor máximo indicado pelo fabricante do sistema motogerador para o não comprometimento da operação do equipamento.

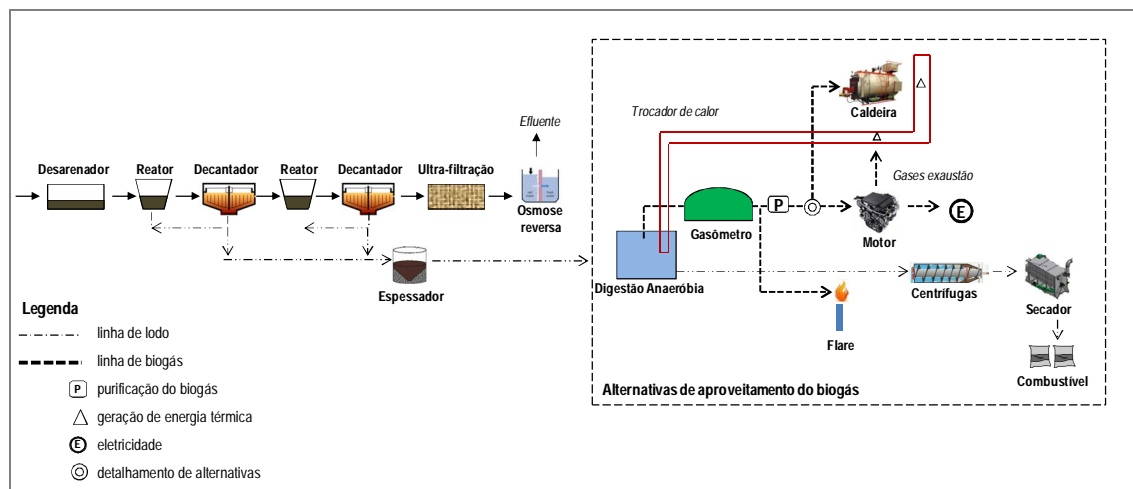


Figura 5-10: Representação esquemática do sistema de tratamento com ênfase no gerenciamento de lodo e biogás na ETE Rincón de León, Alicante.

Após coletado, o biogás pode ser utilizado para (i) manutenção da temperatura do lodo a 33°C através de caldeiras e dissipação por um sistema de trocadores de calor (Figura 5-12); (ii) aplicação em um motor de combustão interna (Figura 5-13) para a geração de eletricidade, em que os gases de exaustão são aproveitados para o aquecimento do lodo, também por trocadores de calor; (iii) queima do biogás em *flare* como medida de segurança para a ETE.

Na sequencia da digestão, o lodo é desidratado em três centrífugas e possui uma concentração de sólidos em torno de 21%, sendo posteriormente secado por uma empresa terceirizada e utilizado como fonte de combustível em uma cimenteira.

Mensalmente, a eletricidade produzida pelo uso do biogás no sistema de cogeração é capaz de suprir de 30-40% da demanda da ETE. O motor de combustão interna tem a especificação de 500kW e gera aproximadamente $200.000\text{ kWh} \cdot \text{ano}^{-1}$ de energia elétrica. A relação entre o consumo de eletricidade por esgoto tratado é de $0,45\text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$ de esgoto. Inicialmente, a energia elétrica produzida pelo sistema de cogeração alimentaria a rede de distribuição, entretanto devido a problemas relativos à sua qualidade, esta é utilizada somente nas dependências da ETE.

O biogás é armazenado a alta pressão em dois gasômetros em operação com capacidade unitária de 300 m³. A Figura 5-14 apresenta os gasômetros da ETE Rincón de León.



Figura 5-11: Vista geral do biodigestor de lodo da ETE Rincón de León, Alicante.
Fonte: Autor



Figura 5-12: Sequencia de caldeiras para o aquecimento do lodo, ETE Rincón de León, Alicante.
Fonte: Autor



Figura 5-13: Vista geral do motor de combustão interna da ETE Rincón de León, Alicante.
Fonte: Autor



Figura 5-14: Gasômetros para armazenamento de biogás na ETE Rincón de León, Alicante.
Fonte: Autor

5.3.4.4 ETE Pinedo, Valência, Espanha

A cidade de Valência, Espanha, possui duas estações de tratamento de esgoto (Pinedo 1 e Pinedo 2), esta última construída em 1990 para complementar o tratamento de Pinedo 1. A Tabela 5-7 apresenta os principais dados de operação das ETEs.

O biogás coletado dos digestores de Pinedo 1 e 2 é aproveitado para (i) a manutenção da temperatura do lodo a 35-39°C com uso de caldeiras e dissipação por um sistema de trocadores de calor; (ii) geração de eletricidade através de um motor de combustão interna; e (iii) queima do biogás em *flare* como medida de segurança para a ETE. O aproveitamento do calor nos gases de exaustão, apesar de ser uma alternativa prevista no projeto da ETE de Pinedo 1 não ocorre.

Tabela 5-7: Principais características das ETEs Pinedo 1 e Pinedo 2

Item	Pinedo 1	Pinedo 2
Sistema de tratamento	Lodos ativados convencional	
Vazão média de projeto (m ³ .d ⁻¹)	124.800	200.000
Vazão média (m ³ .d ⁻¹) ¹	100.602	242.580
População atendida	351.198	942.774
Potência total instalada (kW)	3.378	9.333
Eficiência do tratamento		
Sólidos em Suspensão (SS) (%)	91	92
DBO (%)	94	90
DQO (%)	90	88
Sistema de cogeração		
Motores de combustão interna (und.)		
Capacidade de 500 kWh	4	-
Capacidade de 1.000 kWh	1	1
Capacidade do gasômetro (m ³)	5.000	
Vazão de biogás (m ³ .d ⁻¹)	10.000-11.000	
Suprimento de eletricidade à ETE (%)	30	50

¹ dados de 2011

Fonte: EPSAR (2012)

ETE Pinedo 1

Na ETE de Pinedo 1 há a presença de dois digestores que recebem o lodo espessado do sistema de lodos ativados. O biogás produzido na digestão anaeróbia possui uma concentração média de 65% de CH₄ e 0-200ppm de H₂S. A Figura 5-15 ilustra o sistema de tratamento na ETE Pinedo 1. A aplicação de Fe₂Cl₃ no lodo primário (antes do espessamento) produz uma baixa concentração de H₂S no biogás gerado na digestão, o que favorece a operação do motor de combustão interna do sistema de cogeração.

O lodo proveniente da desidratação em Pinedo 1 foi incinerado até o ano de 2010. A quantidade de lodo processada em Pinedo 1 no ano de 2007 foi da ordem de 22.056 t., o que corresponde a 5 % da geração de lodo do ano (EPSAR, 2010)⁵. O calor contido nos gases era utilizado como fonte de energia térmica para o aquecimento dos digestores de lodo. As emissões gasosas produzidas no incinerador (Figura 5-16) atendiam os exigências da legislação ambiental, em que o sistema de tratamento dos gases é composto de um precipitador eletrostático e uma torre de lavagem dos gases por Ca (OH)₂ (Figura 5-17). As cinzas coletadas no sistema de tratamento de gases eram integradas ao gerenciamento de resíduos sólidos perigosos da ETE.

⁵Dado informado pelo responsável técnico da estação de Pinedo 1 e 2 durante visita técnica.

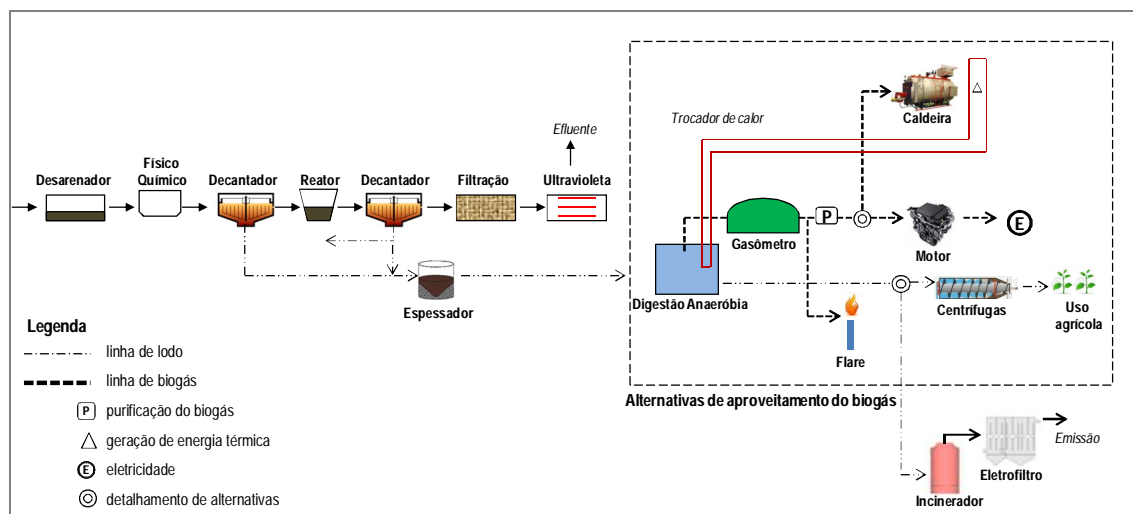


Figura 5-15: Representação esquemática do sistema de tratamento com ênfase no gerenciamento de lodo e biogás na ETE Pinedo 1, Valência.



Figura 5-16: Vista geral do incinerador que processava lodo da ETE de Pinedo 1, Valência.
Fonte: Autor



Figura 5-17: Torre de lavagem dos gases gerados no incinerador de lodo na ETE de Pinedo 1, Valência.
Fonte: Autor

ETE Pinedo 2

A ETE de Pinedo 2 apresenta o fluxograma do tratamento representado na Figura 5-18. A unidade foi construída para aumentar a capacidade de tratamento da ETE Pinedo 1. O lodo após desidratado é aplicado na agricultura. Para esta planta de tratamento, avalia-se que o fornecimento de eletricidade às dependências da estação, a partir do uso de biogás em motores de combustão interna, é da ordem de 50%, enquanto que Pinedo 1 possui um suprimento de 30%. As Figura 5-19 e Figura 5-20 identificam o gasômetro e um dos motores de combustão interna utilizados no sistema de cogeração.

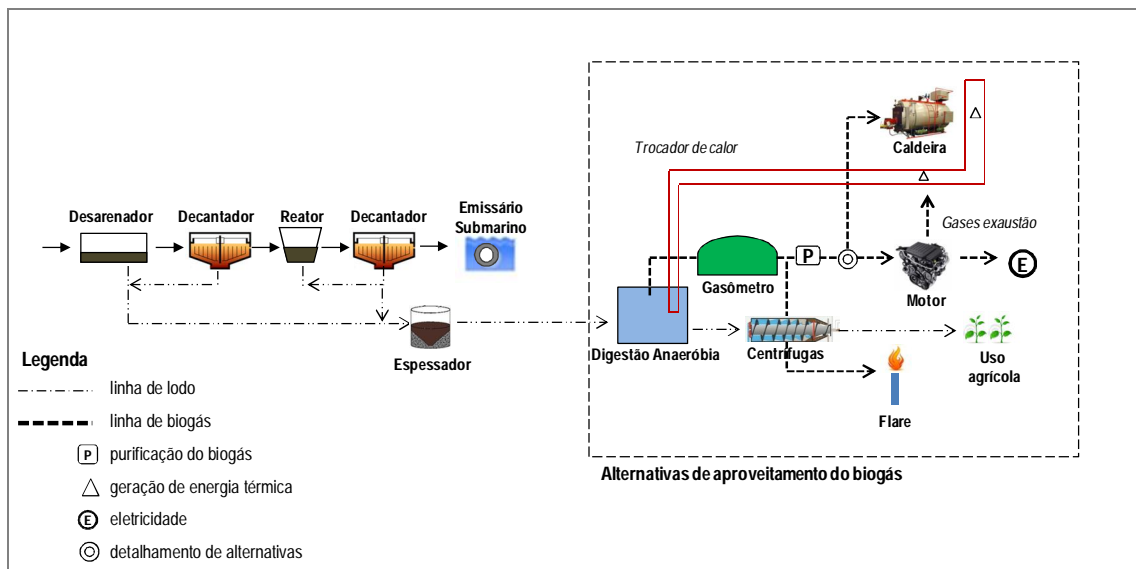


Figura 5-18: Representação esquemática do sistema de tratamento com ênfase no gerenciamento de lodo e biogás na ETE Pinedo 2, Valência.



Figura 5-19: Vista geral do gasômetro para armazenamento de biogás na ETE Pinedo 2, Valência.

Fonte: Autor



Figura 5-20: Vista geral do motor de combustão interna da ETE Pinedo 2, Valência.

Fonte: Autor

5.3.4.5 Cenário atual e condições operacionais das ETEs visitadas

Para a realidade europeia, o sistema de tratamento de lodos ativados é muito difundido, em decorrência há a necessidade de digestão do lodo por via anaeróbia. O processo de estabilização do lodo permite a recuperação energética do biogás, considerando-se a observação das ETEs visitadas, as principais alternativas encontradas, de forma geral, relacionam-se com a:

Aspectos relacionados à recuperação do biogás

- Aplicação do biogás em motores de combustão interna a fim de geração de eletricidade para uso nas próprias dependências da ETE;
- Queima do biogás em caldeiras para o aquecimento de um circuito interno de água com vistas à manutenção da temperatura mesofílica no interior dos digestores anaeróbios;

- Queima do biogás em flare, os quais são empregados como última alternativa, relacionada à segurança da estação em casos de excedente de produção ou consumo deficitário pelas alternativas supracitadas.

Aspectos relacionados à recuperação do lodo

- Reduzido aproveitamento energético do lodo pelos processos termoquímicos, especialmente pela pirólise e gaseificação;
- Aproveitamento do lodo como fonte de energia (combustível) alternativa após o processo de secagem térmica;
- Principal destino do lodo para o uso agrícola, em virtude dos incentivos na comunidade europeia, elevado controle das condições sanitárias, além de regulamentações restritivas quanto ao envio deste material para aterros sanitários.

Aspectos relacionados à recuperação conjunta do lodo e do biogás

- As soluções que integram o uso conjunto do lodo e do biogás relacionam-se com o aproveitamento do calor gerado na combustão do biogás, através de motores de combustão interna e caldeiras e para a manutenção da temperatura dos digestores anaeróbios de lodo.

Vale ressaltar que os aspectos elencados anteriormente não representam uma tendência recorrente, fato observado nas discussões e reuniões com o grupo de pesquisa da Universidade de Alicante, artigos técnicos consultados e verificado junto às companhias de saneamento (sites, folders, visitas técnicas, dentre outros).

A Figura 5-8 apresenta de forma resumida as principais características das ETEs visitadas, com ênfase no aproveitamento energético dos subprodutos gerados na digestão anaeróbia, a saber: lodo e biogás.

Tabela 5-8: Resumo das condições operacionais, com ênfase no gerenciamento do lodo e do biogás, nas ETEs visitadas

Item	Unidades de tratamento				
	ETE Novelda	ETE Valorhin	ETE Rincón de León	ETE Pinedo 1	ETE Pinedo 2
Local de instalação	Monforte del Cid, Espanha	Estrasburgo, França	Alicante, Espanha	Valência, Espanha	Valência, Espanha
Sistema de tratamento	L.A.C	A.P	L.A.C	L.A.C	L.A.C
População atendida (hab.)	29.839	1.000.000	372.222	351.198	942.774
Vazão média de esgoto sanitário (m ³ .d ⁻¹)	3.524	170.000	55.000	100.602	242.580
ASPECTOS RELATIVOS AO GERENCIAMENTO DO BIOGÁS					
Alternativas de aproveitamento de biogás	▪ Caldeira	▪ Queima combinada com o lodo desidratado	▪ Caldeira	▪ Caldeira	▪ Caldeira
	▪ Motor de combustão interna	▪ Motor de combustão interna	▪ Motor de combustão interna	▪ Motor de combustão interna	▪ Motor de combustão interna
	▪ Queima do excesso (flare)	▪ Queima do excesso (flare)	▪ Queima do excesso (flare)	▪ Queima do excesso (flare)	▪ Queima do excesso (flare)
Composição do biogás	CH ₄ (70%), H ₂ S (0,4%), CO ₂ (24%), N ₂ (4%) e H ₂ (1%).	CH ₄ próxima a 62%.	CO ₂ (36%), CH ₄ (64%) e H ₂ S (0-200 ppm).	65% de CH ₄ e 0-200ppm de H ₂ S	
Potência instalada (kW elétricos)	261	2.100	460	1.936	
Produção de biogás (Nm ³ .d ⁻¹)	450	210	600	10.000 - 11.000	
Energia gerada (kWh.d ⁻¹)	940	-	4.070	24.269	
Consumo de energia (kWh.d ⁻¹)	3.000	-	11.629 ¹	-	-
Suprimento de energia da ETE (%)	20 - 30	-	30 - 40	30	50
ASPECTOS RELATIVOS AO GERENCIAMENTO DO LODO					
Alternativas de aproveitamento energético do lodo	-	Geração de calor pela combustão do lodo	Secagem térmica para enriquecimento do lodo como combustível	-	-
Destino final	Uso agrícola	-	-	Uso agrícola	Uso agrícola

Legenda: L.A.C: Lodos ativados convencional, A.P: lodos ativados aeração prolongada. ¹Valor estimado

5.3.5 Proposta de alternativas de recuperação energética de lodo e de biogás para a realidade brasileira

A proposição de alternativas de recuperação energética, individual ou conjunta, dos subprodutos do tratamento anaeróbico (lodo e biogás) é apresentada nos itens seguintes. Com o intuito de permitir uma melhor classificação e análise das diferentes realidades para o cenário brasileiro foram propostas alternativas para os diferentes portes das ETEs, em função do potencial de recuperação de metano no biogás e da quantidade de lodo obtido dos reatores UASB.

De acordo com a norma brasileira NBR 12.709 (ABNT, 2011) uma ETE pode ser considerada de grande porte quando recebe contribuições de esgoto sanitário acima de $250 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, o que corresponde a um equivalente populacional da ordem de 100.000 habitantes. Além da consideração da vazão afluyente e população contribuinte, o potencial energético dos subprodutos lodo e biogás também podem ser considerados para esta classificação.

5.3.5.1 Alternativas para ETEs com baixo potencial de recuperação de metano e geração de lodo em reatores UASB

Para reatores anaeróbios com baixa capacidade de produção e recuperação de metano, a exemplo dos sistemas de menor porte, ou que apresentem maiores teores de sulfato no afluyente e elevadas perdas de metano dissolvido no efluente, é pouco provável que a utilização de equipamentos para geração combinada de eletricidade e calor encontre viabilidade econômica. Nesses casos, a principal alternativa que se apresenta refere-se à combustão direta com recuperação de energia térmica (LOBATO, 2011).

Para esta situação, a energia que poderia ser recuperada a partir dos subprodutos lodo e biogás não justificaria os elevados investimentos dos equipamentos para a cogeração, devido ao baixo potencial dos subprodutos, atrelada à eficiência dos equipamentos de conversão.

A Figura 5-21 apresenta um fluxograma possível para o aproveitamento do biogás e do lodo em ETEs de pequeno porte ou com baixo potencial energético dos subprodutos. Propõe-se a alternativa de secagem térmica do lodo pela queima direta do biogás. Após a secagem, o lodo apresenta um maior poder calorífico e passa a ter melhores condições para ser utilizado como fonte de energia ou encaminhado até mesmo para aterros sanitários. Nesta última alternativa, apesar de não ser a opção mais adequada, tem-se uma redução dos gastos com transporte do lodo e maior facilidade de carregamento e retirada do material dos caminhões transportadores.

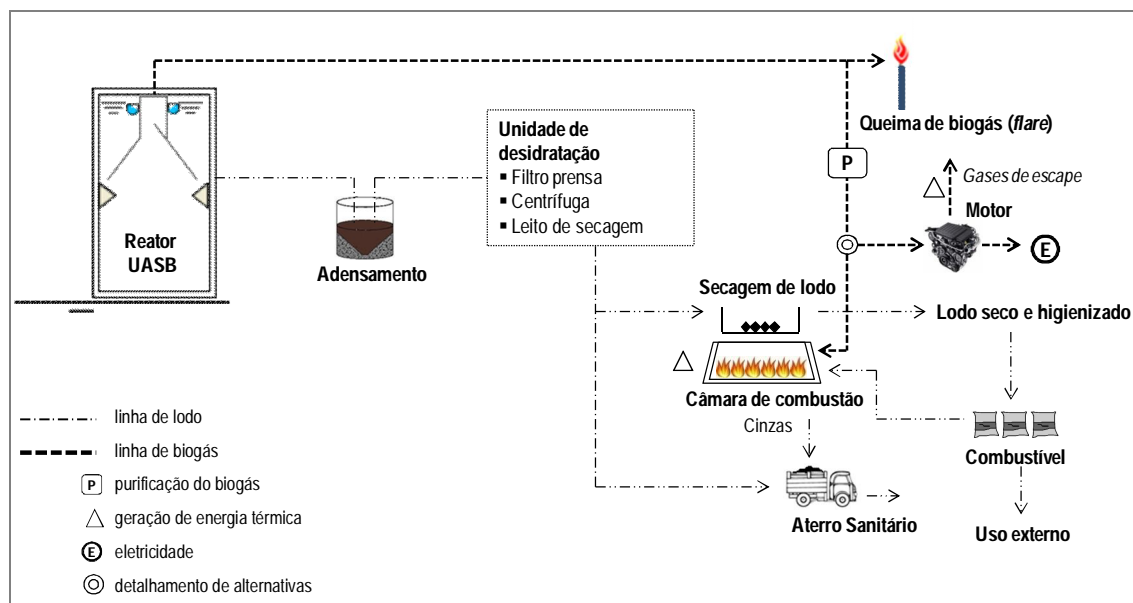


Figura 5-21: Representação esquemática de possível arranjo para aproveitamento energético de biogás e lodo em reatores UASB tratando esgoto doméstico (pequeno porte).

5.3.5.2 Alternativas para ETEs com elevado potencial de recuperação de metano e geração de lodo em reatores UASB.

Estações de tratamento de grande porte (vazão de esgoto acima de 250 L.s^{-1}) associado a um elevado potencial de recuperação de metano e geração de lodo em reatores UASB podem contribuir para a geração de energia na própria estação na forma de eletricidade e/ou energia térmica.

Como já citado, os processos térmicos de tratamento de lodo de esgoto têm ganhado crescente destaque pelos benefícios diretos e indiretos à estação. A seguir são apresentadas proposições de alternativas de reaproveitamento energético do lodo com a opção pelos processos de pirólise, gaseificação e combustão. Apesar da crescente aplicação do emprego destas alternativas em ETEs, ainda em expansão em países com nível tecnológico mais elevado, os processos incorporados se justificam pelo seu potencial de aplicação e perspectivas futuras de uso.

A Figura 5-22 apresenta a proposta de uso de um reator pirolítico no tratamento do lodo, neste processo tem-se o potencial de geração de produtos combustíveis nas três fases, o material sólido como carvão vegetal e a fração gasosa que quando condensada gera a parcela líquida, a qual pode ser utilizada em um motor de combustão interna para a geração de eletricidade. A fração não condensada pode ser fonte de energia térmica, em que o biogás pode ser utilizado como combustível alternativo e o calor gerado aproveitado no processo de secagem. De forma semelhante aos demais sistemas, as cinzas geradas no processo podem ser encaminhadas para

o aterro sanitário, entretanto, devido à maior composição de carbono no material residual, destaca-se o potencial da disposição das cinzas no solo.

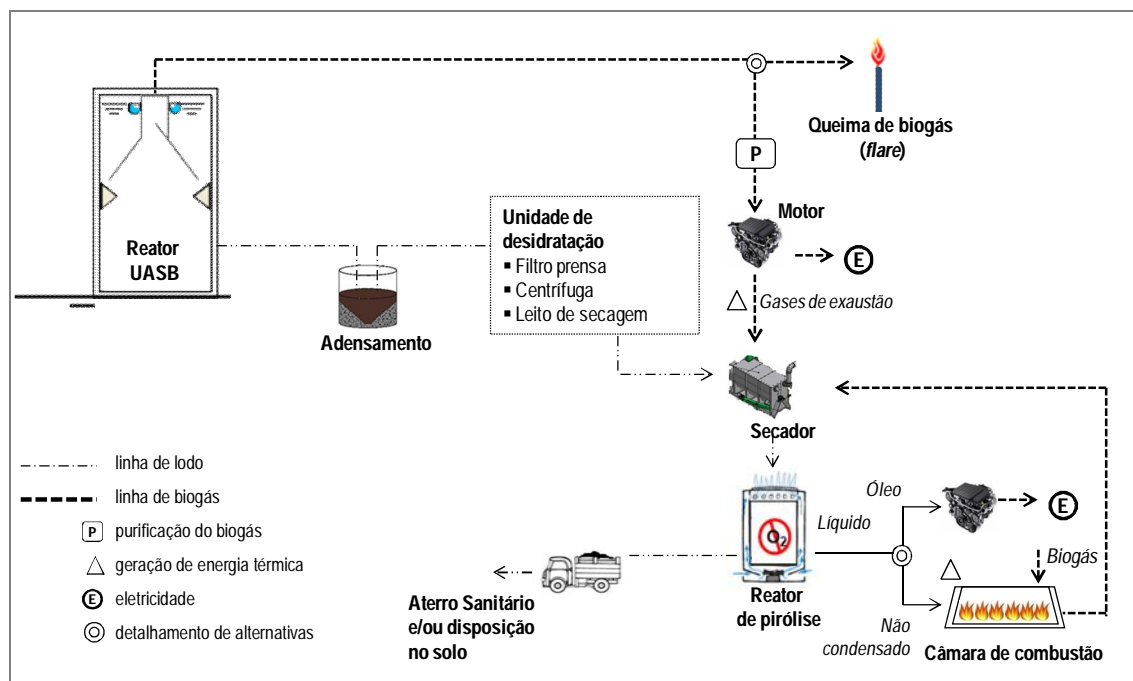


Figura 5-22: Representação esquemática de possível arranjo para aproveitamento energético do biogás e lodo gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico com o uso da pirólise (grande porte).

Na Figura 5-23 avalia-se a opção pela cogeração de energia elétrica pelo uso do biogás e a secagem do lodo desidratado sendo feita pelo uso dos gases de exaustão do motor de combustão interna. Avalia-se ainda a alternativa de geração de eletricidade pelo uso da gaseificação e o encaminhamento das cinzas do processo a aterro sanitário.

Diante da condição de maior dificuldade de armazenamento e transporte do *syngas* gerado no processo de gaseificação, pressupõe-se que o sistema de cogeração fosse instalado na própria ETE, favorecendo o aproveitamento dos gases de exaustão dos dois motores com a finalidade de secagem térmica. A eletricidade gerada poderia ser utilizada nas próprias dependências da planta de tratamento, ou encaminhada para a rede de distribuição, quando atendidos os requisitos de qualidade de energia gerada.

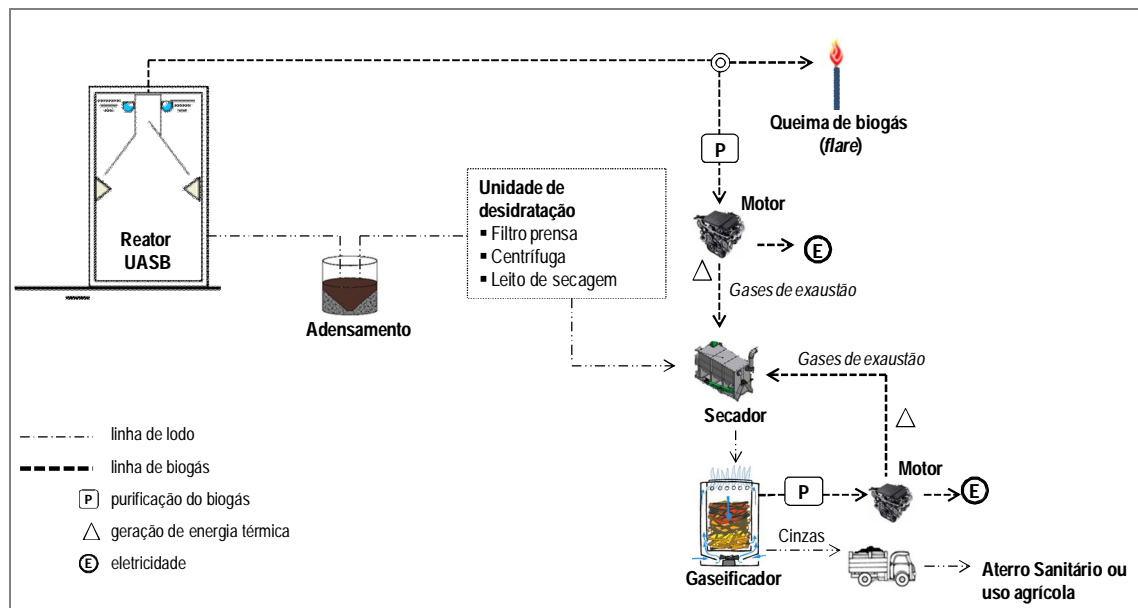


Figura 5-23: Representação esquemática de possível arranjo para aproveitamento energético do biogás e lodo gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico com o uso da gaseificação (grande porte)

Assim como apresentado no fluxograma relativo às alternativas da pirólise (Figura 5-22), a cogeração pode ser implementada como etapa anterior à gaseificação do lodo, o qual foi seco através dos gases de exaustão do motor. Ressalta-se a necessidade de adequação do lodo seco a características físicas e mecânicas a fim de permitir uma adequada gaseificação e pirólise do material.

A Figura 5-24 apresenta um sistema combinado de gerenciamento de lodo e biogás, em que as alternativas consorciadas não necessariamente sejam aplicadas de forma simultânea. Para este fluxograma, a câmara de combustão pode operar com o uso do biogás ou do lodo como combustível, o calor liberado da combustão, pode então ser utilizado na secagem térmica do lodo, o qual após seco e higienizado voltaria a ser utilizado como fonte de energia para o próprio sistema. Faz-se ainda possível o aquecimento de água que possui contato direto com o calor gerado na câmara de combustão, garantindo a produção de vapor d'água e a alimentação de uma turbina, sendo possível a produção de energia elétrica a partir dessa operação, ou até mesmo o uso do calor para a secagem do lodo.

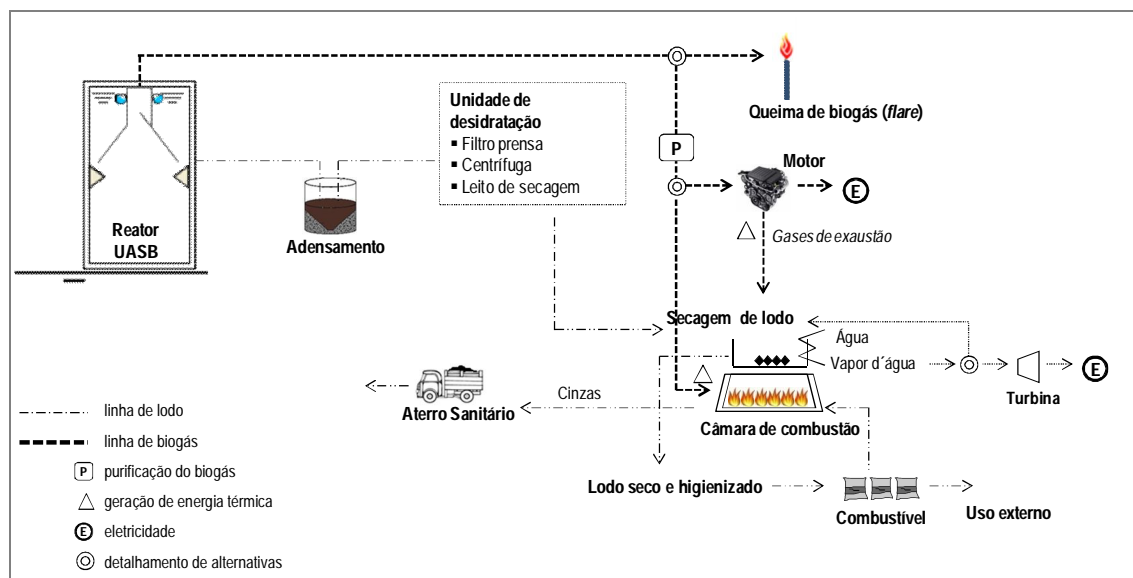


Figura 5-24: Representação esquemática de possível arranjo para aproveitamento energético do biogás e lodo gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico com o uso da combustão (grande porte).

Caso o lodo seja usado como fonte de energia na própria estação, as cinzas geradas no processo de queima podem ser encaminhadas ao aterro sanitário, reduzindo substancialmente o volume do resíduo transportado, quando comparado com a não recuperação energética do lodo na própria ETE.

5.4 Conclusões

Com os estudos realizados pode-se concluir que:

- Os processos térmicos de pirólise, gaseificação e combustão, até então empregados para outras fontes de biomassa, têm sido utilizados de forma crescente para o gerenciamento de lodo desidratado em ETEs.
- A aplicabilidade dos processos térmicos à realidade brasileira está condicionada à quantidade de lodo gerado e às especificidades locais, sendo potencialmente mais vantajosas em ETEs de maior porte que possuem elevados gastos de transporte e destinação final. Nesse contexto, a combustão apresenta maior avanço tecnológico, além de maior simplicidade operacional e aplicação em ETEs de diferentes portes. Destacam-se a pirólise e a gaseificação como tecnologias que têm sido empregadas e aprimoradas de forma crescente, embora a aplicação em escalas comerciais ainda seja restrita para lodo de ETEs. Entretanto, o controle ambiental das unidades que promovem a combustão do lodo deve ser rigoroso, em função do potencial de geração de poluentes, tais como a dioxinas e

furanos, SO_x, NO_x e metais pesados, fator que contribui para os elevados custos de operação e implantação.

- O aproveitamento energético do lodo de forma individual, ou até mesmo em combinação com outros subprodutos gerados em ETEs, a exemplo do biogás, pode garantir a secagem do próprio lodo e favorecer o desenvolvimento e expansão do uso dos processos térmicos para a realidade brasileira.
- O uso do lodo de esgoto como fonte de energia apresenta vantagens, tais como a redução do volume final a ser transportado, geração de energia na forma térmica e elétrica, inertização do lodo quando do emprego de processos térmicos. Os benefícios têm alcance ambiental, social e econômico.
- Apesar das alternativas térmicas de aproveitamento energético do lodo nota-se o uso mais restrito da pirólise e gaseificação, em detrimento de uma maior aplicação da combustão para fins energéticos ou até mesmo da redução de volume do resíduo.
- Os processos térmicos de pirólise, gaseificação e combustão têm o potencial de agregar vantagens pela geração de eletricidade e energia térmica a ETEs de grande porte. A operação otimizada destas tecnologias depende de fatores técnicos e econômicos como a especificação, a operação dos equipamentos e das características do lodo biogás.
- De forma geral, as ETEs europeias possuem a recuperação em estágio avançado dos subprodutos gerados (lodo e biogás) para fins de recuperação energética (geração de eletricidade e calor) e agrícola, enquanto que as companhias de saneamento brasileiras não aproveitam, especialmente, o potencial energético dos subprodutos, os quais são considerados dispendiosos e geram passivos ambientais.

6 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO E DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PELA PROPOSTA DE USO DO BIOGÁS E DE LODO COMO FONTE DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO DA ETE LABOREAUX

6.1 Introdução

Em decorrência do incremento das unidades de tratamento de esgoto doméstico, operando através de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB), identifica-se uma geração crescente dos principais subprodutos deste processo: biogás e lodo.

O lodo caracterizado, até então, como um resíduo passível de aterramento se torna fonte de energia após a desidratação, evidenciando a mudança do paradigma para o seu destino final (COURTAUD *et al.*, 2010). No que tange o biogás, o potencial energético deste subproduto confere a principal justificativa para o aproveitamento desta parcela na transformação em outras formas de energia.

A determinação do potencial energético destes subprodutos contribui para a sua valorização, incentivando, de certa maneira, os gestores das companhias de saneamento na identificação do potencial e de tomadas de decisão que priorizem usos mais nobres do biogás e do lodo. Em adição, é cada vez mais evidente que propostas de novas configurações e soluções para o aproveitamento do biogás e lodo possam gerar créditos de carbono dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, partindo-se do pressuposto que a nova atividade de projeto contribui com a redução das emissões de GEE.

Caso o projeto venha a ser registrado na UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), a quantidade anual de emissões reduzidas de GEE será estimada na forma de créditos de carbono, os quais podem ser comercializados no mercado, na forma de certificados, trazendo benefícios financeiros à companhia de saneamento que propõe a atividade de projeto.

Este objetivo específico tem como foco a determinação do potencial energético dos subprodutos através de balanços de massa e energia para dois cenários que promovam o uso do lodo e do biogás, além da estimativa das reduções das emissões de GEE, ambos realizados na forma de estudo de caso na ETE *Laboreaux*.

6.2 Material e Métodos

Como já descrito anteriormente, o estudo de caso foi desenvolvido na ETE *Laboreaux* (Itabira, MG). A seguir são apresentadas algumas considerações sobre a caracterização do subprodutos lodo e biogás e o detalhamento das metodologias do UNFCCC utilizadas para a estimativa das emissões evitadas com a proposta de duas atividades de projeto propostas.

6.2.1 Caracterização da ETE *Laboreaux* (Itabira-MG)

A ETE *Laboreaux* localiza-se na cidade de Itabira-MG e trata o esgoto doméstico através de oito reatores UASB seguido de dois filtros biológicos percoladores. No tópico 4.1.1 são apresentados os principais dados de projeto da estação e das unidades do tratamento. A Figura 6-1 apresenta um esquema ilustrativo com as principais unidades constituintes da ETE *Laboreaux*. A Figura 6-2 apresenta dados do monitoramento de DBO, DQO e SST ao longo da estação, com rotina estabelecida para o filtro-prensa e recirculação automatizada de lodo aeróbio para o período de monitoramento de Julho de 2011 a Maio de 2012. Observa-se um desempenho satisfatório da estação para o período avaliado, visto o atendimento dos padrões legais para DBO e DQO no efluente dos reatores UASB.

A rotina operacional para o descarte de lodo excedente dos reatores UASB foi definida levando em consideração a produção diária de lodo de $19 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ do fundo por reator. Em adição, em situações de paralisações do filtro prensa, o protocolo de descarte de lodo excedente continua a ser executado, no entanto, ao invés do lodo inferior, o lodo superior é descartado para os leitos de secagem.

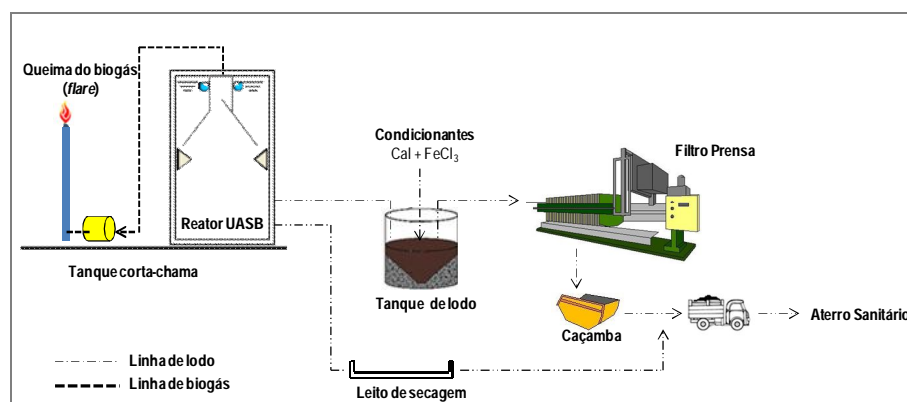


Figura 6-1: Fluxograma esquemático das etapas relacionadas com o sistema de gerenciamento do lodo e do biogás na ETE *Laboreaux*.

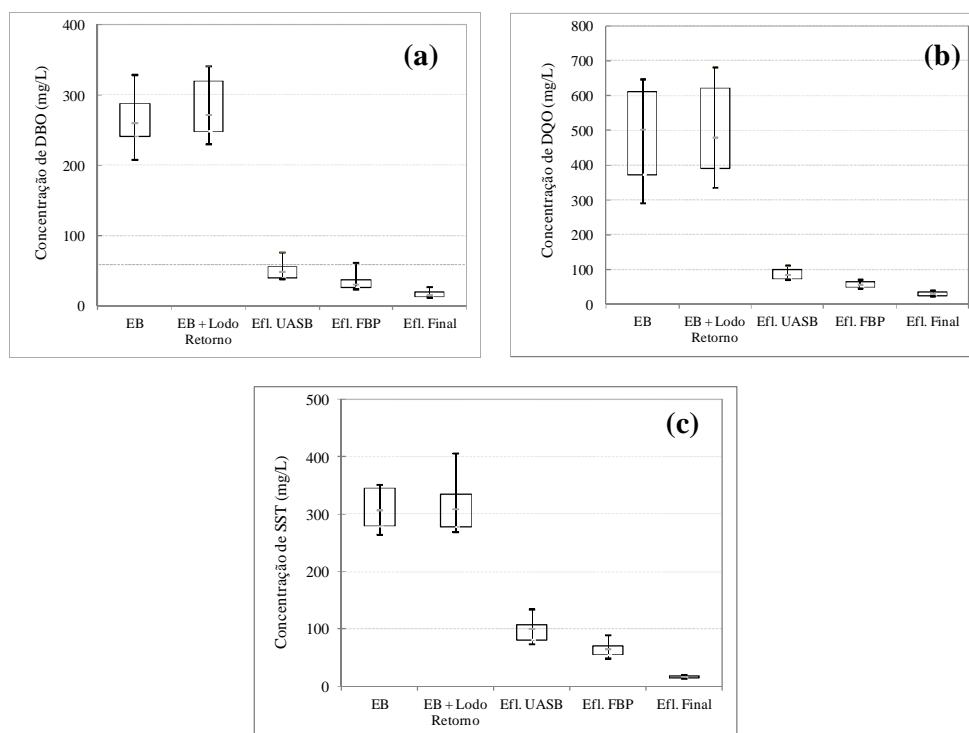


Figura 6-2: Caracterização de parâmetros físicos na ETE *Laboreaux* (Jul./2011 a Mai./2012). (a) Concentrações de DBO, (b) DQO e (c) SST.

6.2.2 Caracterização do lodo

O monitoramento da taxa de produção de lodo ocorreu no período de outubro de 2010 a outubro de 2011. O lodo foi quantificado pela pesagem do caminhão transportador após o carregamento de cada caçamba de estocagem do lodo desidratado, antes do envio para o aterro sanitário da cidade de Itabira. O monitoramento para a caracterização do lodo foi realizada de abril de 2011 a junho de 2012, a amostragem do lodo foi realizada quinzenalmente, consistindo da coleta de três pedaços de placas de lodo desidratado no filtro-prensa, as quais eram maceradas e misturadas para a realização das análises de interesse: umidade, poder calorífico superior, composições elementar e imediata. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

A determinação da umidade foi feita de acordo com os procedimentos estabelecidos no Standard Methods (APHA/WEF, 2005), a composição elementar (CHNO) foi determinada em Analisador CHNS modelo 2400, Série II, Perkin Elmer e a composição imediata (sólidos fixos, voláteis e cinzas) de acordo com a Norma Brasileira - NBR 8112 (ABNT, 1986). O poder calorífico superior real (PCS) do lodo, base seca (b.s.) foi determinado em laboratório com o uso de uma bomba calorimétrica adiabática (PARR 2081). Os poderes caloríficos superior (PCS_s) e inferior (PCI_t) teóricos, foram determinados de acordo com as equações

propostas pela fórmula de Dulong e por Cortez *et al.* (2008), respectivamente, como apresentado na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Procedimento de cálculo para a determinação dos poder calorífico superior e inferior teóricos para o lodo da ETE *Laboreaux*.

Parcelas	Equações	Observações
Poder Calorífico Superior (PCS) teórico	$PCS_s = [337,3 \times C + 1.418,9 \times (H - O/8) + 93,1 \times S + 23,3 \times N] / 1.000$	PCS _s = Poder calorífico superior, (MJ.kg ⁻¹), b.s. C = Teor de carbono (%), b.s. H = Teor de hidrogênio (%), b.s. O = Teor de oxigênio (%), b.s. S = Teor de enxofre (%), b.s. N = Teor de nitrogênio (%), b.s.
Poder Calorífico Inferior (PCI) teórico	$PCI_t = [(PCS_s - \lambda \times (r + 0,09 \times H_s)) \times (100 - W_t) / 100]$ $r = \frac{W_t}{(100 - W_t)}$	PCI _t = Poder calorífico inferior (MJ.kg ⁻¹), b.t. PCS _s = Poder calorífico superior (MJ.kg ⁻¹), b.s. λ = calor latente da água (2,31 MJ.kg ⁻¹ a 25°C) r = Razão entre teor de sólidos e teor de umidade no lodo desidratado H = Teor de hidrogênio (%), b.s. W _t = Teor de sólidos no lodo desidratado (%), b.t.

Legenda: b.s.: base seca, b.t.: base de trabalho (umidade real da amostra após a coleta). Os dados da composição elemental são apresentados em % de massa.

6.2.3 Caracterização do biogás

A produção volumétrica de biogás foi realizada diariamente, também no período de outubro de 2010 a outubro de 2011. A medição foi feita por meio de um medidor mássico de vazão (modelo 640S-FRQ-2734) posicionado na linha de gás em um ponto anterior ao queimador (*flare*). A vazão medida de biogás foi considerada à pressão atmosférica padrão (1 bar) e temperatura ambiente média (25°C).

Nesse mesmo período, amostras de biogás foram coletadas em duplicata por meio de seringas plásticas equipadas com válvulas de três vias, em um ponto anterior ao queimador de gases. A caracterização do biogás com vistas à verificação do seu potencial energético foi realizada por cromatografia (cromatógrafo Perkin Elmer, detector TCD, fluxo de 17 mL/min com gás de arraste: hélio, coluna empacotada carbowax), sendo determinados os percentuais de CH₄, CO₂ e gases de mistura. A composição do biogás foi analisada, em média, duas vezes ao mês.

6.2.4 Cálculo do balanço energético da ETE *Laboreaux*

A partir dos dados operacionais da ETE, da caracterização do biogás e do lodo, e dos dados operacionais da ETE, foram determinadas as relações unitárias da produção de metano, de biogás e de energia nos reatores UASB. O cálculo do balanço energético corresponde à diferença entre a demanda energética na estação e o potencial energético dos subprodutos biogás e lodo. A **demand energética** relaciona-se ao consumo de eletricidade na estação para a manutenção das atividades de operação do sistema de tratamento, essencialmente estações elevatórias de esgoto (EEE), operação do filtro prensa, fornecimento de eletricidade

aos equipamentos de laboratório e iluminação. O **potencial energético** associa-se à energia máxima que poderia ser gerada com o aproveitamento energético do biogás. O lodo desidratado em filtro prensa foi considerado inadequado para fins energéticos (pelo excessivo conteúdo de umidade), a fim de viabilizar o seu potencial combustível propõe-se sua secagem até a umidade de 10%, por se tratar de um teor de umidade que garantiria o uso irrestrito do material em processos termoquímicos, além de ser indicado para processos mecânicos como a briquetagem.

6.2.4.1 Demanda energética da ETE Laboreaux

A quase totalidade de demanda de energia na ETE *Laboreaux* está relacionada à operação de duas estações elevatórias de esgoto (EEE-1 e EEE-2) existentes na entrada da estação de tratamento. A primeira EEE bombeia o esgoto bruto, proveniente do emissário de chegada, após passar por uma unidade de gradeamento médio, alimentando os desarenadores da estação. A segunda EEE possibilita o encaminhamento do esgoto tratado em nível preliminar para a caixa distribuidora de vazão (CDV-1), que alimenta os oito reatores UASB da estação. As duas estações elevatórias são constituídas por poço de sucção, conjuntos motobombas e linha de recalque, representando os equipamentos de maior consumo energético na ETE. A Tabela 6-2 apresenta o resumo das principais características de projeto das EEE-1 e EEE-2. A Figura 6-3 apresenta um desenho esquemático da localização das EEE-1 e EEE-2 e suas alturas de recalque.

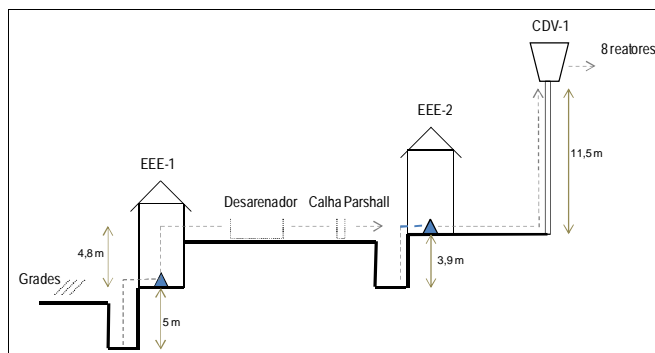


Figura 6-3: Esquema ilustrativo da localização das EEE-1 e EEE-2 e suas alturas geométricas de recalque

Tabela 6-2: Principais características das elevatórias (EEE-1 e EEE-2) da ETE *Laboreaux*.

Características	EEE-1	EEE-2
n° de bombas	04	04
Tipo	Re autoescorvante	Re autoescorvante
Modelo	Gresco X-T 10	Gresco X-T 10
Rotação de trabalho (rpm)	950-1.000	1.075-1.130
Altura manométrica (mca)	9,8	15,4
Potência instalada (kW)	89,5	111,8

A demanda energética da ETE *Laboreaux* foi calculada a partir de dados de consumo ativo de energia fornecidos pelo SAAE - Itabira para os meses de outubro de 2010 a outubro de 2011 e consideram todos os gastos energéticos na estação (iluminação, consumo administrativo e laboratorial, operação do filtro prensa, bombas, e demais equipamentos), conforme mostrado na Figura 6-4. A média de consumo de energia elétrica na ETE nesse período foi de 1.586 kWh.d⁻¹ (5.709 MJ.d⁻¹).

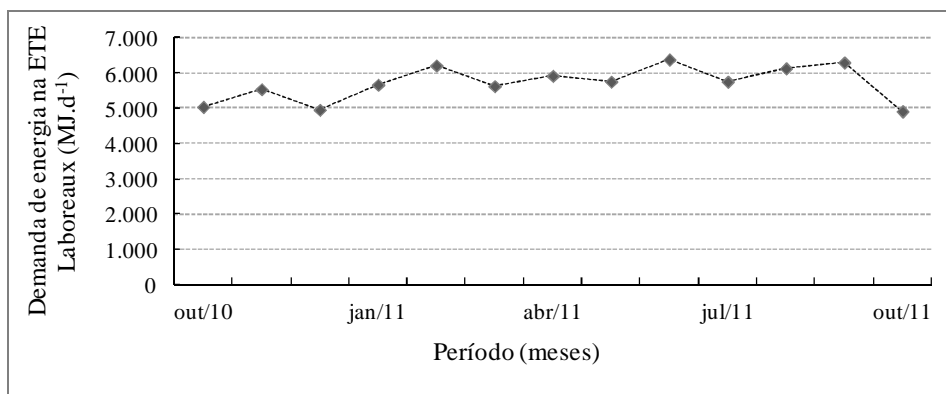


Figura 6-4: Demanda de energia da ETE *Laboreaux* para o período de out./2010 a out./2011.

6.2.4.2 Potencial energético dos subprodutos da ETE *Laboreaux*

O potencial energético na ETE *Laboreaux* corresponde à somatória dos potenciais energéticos dos subprodutos do tratamento do esgoto: lodo e biogás. Na Tabela 6-3 são apresentadas as parcelas e as respectivas equações de cálculo do potencial energético da ETE.

Tabela 6-3: Procedimento para o cálculo do potencial energético total da ETE *Laboreaux*.

Parcelas	Equações	Observações
Potencial energético total dos subprodutos da ETE	$PE_{Total} = PE_{Biogás} + PE_{Lodo}$	PE _{Total} = Potencial energético total (MJ.d ⁻¹) PE _{Biogás} = Potencial energético do biogás (MJ.d ⁻¹) PE _{Lodo} = Potencial energético do lodo (MJ.d ⁻¹)
Potencial energético do biogás	$PE_{Biogás} = Q_{Biogás} \times C_{CH4} \times E_{CH4}$	Q _{Biogás} = Produção medida de biogás (Nm ³ .d ⁻¹) C _{CH4} = Concentração de metano no biogás (%) E _{CH4} = Poder calorífico inferior da combustão do metano (35,9 MJ.Nm ⁻³)
Potencial energético do lodo	$PE_{Lodo} = P_{Lodo} \times PCI_t$	P _{Lodo} = Produção de lodo desidratado (kg.d ⁻¹) PCI _t = Poder calorífico inferior do lodo (MJ.kg ⁻¹), b.t.

b.t.: base de trabalho.

6.2.5 Proposta integrada de aproveitamento energético de lodo e biogás

Dois cenários de aproveitamento energético dos subprodutos foram considerados no presente estudo, conforme detalhamento a seguir e ilustrado na Figura 6-5. A Tabela 6-4 apresenta os dados de entrada utilizados em ambos os cenários, a fim de se determinar os balanços de massa e energia. Os mesmos cenários são estudados na sequencia na estimativa da redução de emissões de GEE, conforme descrito no item 6.2.6.

- **Cenário 1:** uso prioritário do biogás em câmara de combustão visando a geração de calor para a secagem térmica do lodo desidratado e o excedente de biogás para geração de eletricidade em motor de combustão interna (MCI).
- **Cenário 2:** uso prioritário do biogás em MCI visando a geração de eletricidade e aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para a secagem térmica de lodo.

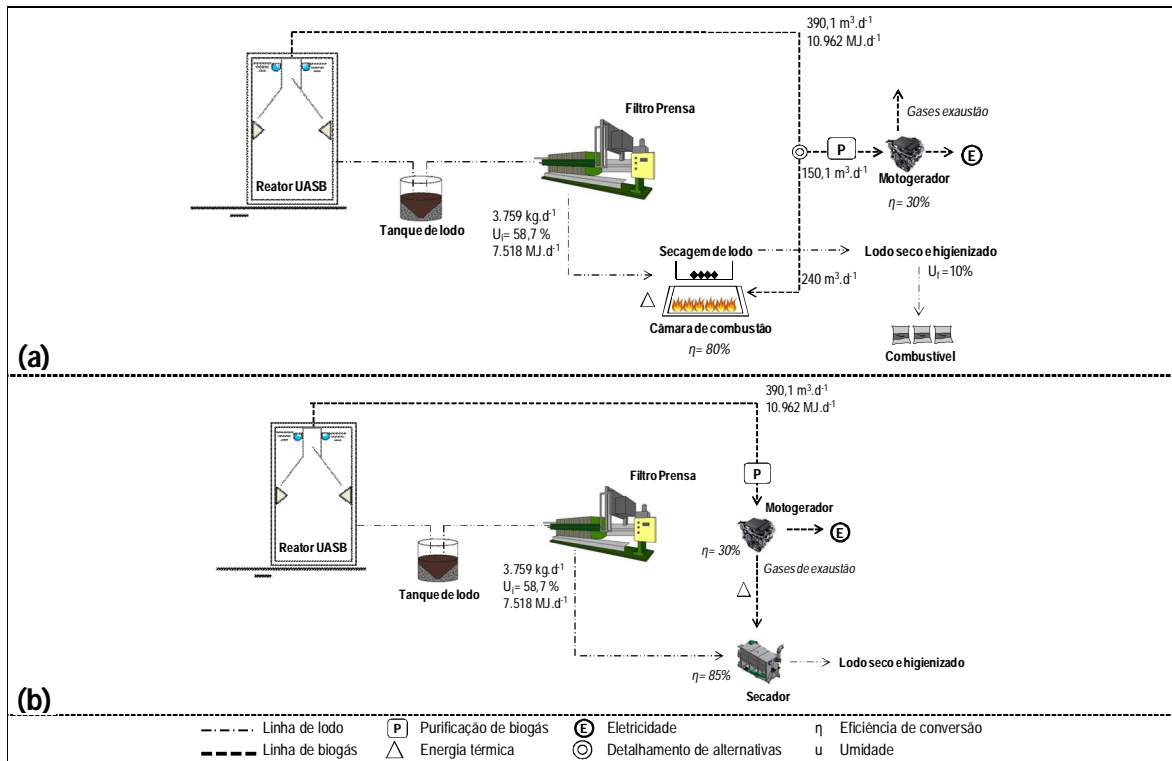


Figura 6-5: Cenários para a recuperação energética dos subprodutos da ETE *Laboreaux*. (a) Cenário 1 - uso do biogás para a combustão e geração de calor para a secagem térmica do lodo, com o excesso do biogás utilizado para a geração de eletricidade; (b) Cenário 2 - geração de eletricidade, a partir de um motor de combustão interna (MCI) utilizando biogás como combustível, com o aproveitamento do calor dos gases de exaustão do MCI para a secagem térmica de lodo desidratado.

O software CHEMCAD® foi utilizado como ferramenta para a simulação dos processos de combustão (queima direta do biogás na câmara de combustão e no MCI). Para ambos os cenários, a combustão do biogás foi considerada adiabática com total oxidação do metano e excesso de oxigênio de 5% ($\lambda=1,05$). Outros dados considerados nas simulações são apresentados na Tabela 6-5.

Tabela 6-4: Dados de entrada para a avaliação dos cenários de recuperação energética dos subprodutos da ETE *Laboreaux*.

Item	Valor	Item	Valor
Lodo desidratado (filtro prensa)		Biogás (reator UASB)	
Produção (kg.d ⁻¹)	3.759	Fluxo total (m ³ .d ⁻¹)	390,1
Umidade (%)	58,7	CH ₄ (%)	78,2
Poder calorífico superior (PCS _s), MJ.kg ⁻¹	8,7	CO ₂ (%)	6,7
Poder calorífico inferior (PCI _i), MJ.kg ⁻¹	2,0	Outros constituintes (%)	15,1
Potencial energético (MJ.d ⁻¹)	7.518	Potencial energético volumétrico (MJ.m ⁻³) ^a	28,1
		Potencial energético (MJ.d ⁻¹)	10.962
Características dos equipamentos ¹		Características da ETE <i>Laboreaux</i>	
Eficiência elétrica do MCI (%)	30	Demanda de eletricidade (MJ.d ⁻¹)	5.709
Eficiência do secador térmico a biogás (%) ^b	80		
Eficiência do secador a gás de escapeamento (%) ^b	85		
Calor nos gases de exaustão (%) ^c	25		
Umidade do lodo após a secagem (%)	10,0		

¹Valores considerados a partir de manuais técnicos de equipamentos. ^aCalculado a partir de 35,9 MJ.Nm⁻³ (Noyola *et al.*, 2006) e da composição de metano. ^beficiência global do equipamento para realizar a evaporação da água, considerando-se as perdas, como por radiação e convecção. ^crelação entre o calor contido nos gases de exaustão e a energia total do combustível (biogás) consumido pelo MCI, de acordo com Arteaga (2010).

Tabela 6-5: Características do processo de queima do biogás em secador (Cenário 1) e em motores de combustão interna (MCI, nos Cenários 1 e 2). No Cenário 2 o secador irá aproveitar o calor residual dos gases de escapeamento do MCI.

Dados	Unidade	Valor			
		Cenário 1		Cenário 2	
		Secador	MCI 1	Secador	MCI 2
Biogás					
Vazão (para T = 25°C e P = 1 bar)	m ³ .d ⁻¹	240	150,1	-	390,1
Fração de CH ₄	%	-	78	-	78
Ar					
Vazão (para λ = 1,05, T = 25°C e P = 1 bar)	m ³ .d ⁻¹	3,14	3,83	-	6,97
Fração de O ₂	%	21	21	-	21
Fração de N ₂	%	79	79	-	79
Condições de queima					
Temperatura dos gases de combustão ^a	°C	900	-	-	-
Temperatura dos gases de escapeamento do MCI	°C	-	500	500 ^b	500
Temperatura após as trocas de calor em secador	°C	105	-	105	-
Excesso de ar (λ)	fração	1,05	1,05	-	1,05

^a Temperatura calculada a partir da combustão do biogás e geração de calor nos gases resultantes, usados para a secagem. ^b No cenário 2 os gases de escapeamento do MCI (500°C) irão alimentar o secador.

6.2.6 Quantificação da redução nas emissões de GEE pelo uso do biogás e lodo como biocombustível

Esta etapa tem como objetivo apresentar e comparar a redução dos GEE para os dois cenários propostos de aproveitamento energético dos subprodutos lodo e biogás para a ETE *Laboreaux*.

As metodologias para os cenários propostos considerando-se suas últimas versões são:

- **III-E:** *Avoidance of methane production from decay of biomass through controlled combustion, gasification or mechanical/thermal treatment*, traduzida por “Produção de metano evitado pelo decaimento da biomassa através de processos de combustão, gaseificação e tratamento mecânico/térmico”, versão 16.0, escopo setorial 13 (UNFCCC, 2009).
- **I-D:** *Grid connected renewable electricity generation*, traduzida por “Geração de eletricidade renovável conectada à rede”. versão 17, escopo setorial 01 (UNFCCC, 2011b).

A Tabela 6-6 apresenta as três situações propostas, as rotas sugeridas para o destino final do lodo e a aplicação do biogás na ETE, além das metodologias do UNFCCC aplicadas a cada caso. A atividade de linha de base corresponde à situação atual da ETE *Laboreaux*, a qual já foi demonstrada na Figura 6-1. As Figura 6-6 e Figura 6-7 apresentam as atividades de projeto já descritas no item 6.2.5, com as indicações das metodologias. Este estudo contemplou apenas os estudos das reduções das emissões de GEE para os limites da ETE *Laboreaux* o que indicou o uso das metodologias III-E e I-D, entretanto cabe ressaltar a possibilidade de obtenção de créditos de carbono pelo uso do lodo a 10% de umidade em novos projetos fora dos limites da ETE, pela substituição de combustíveis fósseis, o que não consta no escopo deste trabalho.

A estimativa da redução das emissões de GEE foi calculada na forma de dióxido de carbono equivalente (CO₂e.). Destaca-se que a variável econômica não é abordada com detalhes neste estudo, apenas se propondo uma comparação entre os dois cenários quanto à redução no montante de CO₂e. emitido ao ambiente em um período de 10 anos.

Tabela 6-6: Atividades de projeto sugeridas para a ETE *Laboreaux*, detalhamento do destino do lodo e aplicação do biogás e metodologias do UNFCCC utilizadas.

Atividade de projeto	Destino do lodo	Aplicação do biogás	Metodologias aplicadas
1	Uso externo como combustível	Queima direta e geração de eletricidade	
2-a	Aterro sanitário após secagem prévia		III-E e I-D
2-b	Uso externo como combustível e envio para aterro sanitário	Geração de eletricidade	

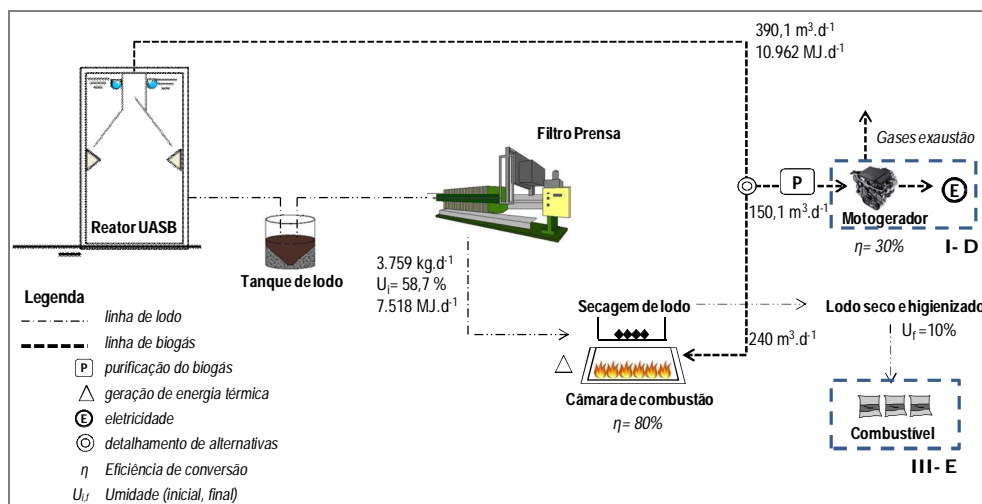


Figura 6-6: Ilustração esquemática do Cenário 1 (uso prioritário do biogás em câmara de combustão visando a geração de calor para a secagem térmica do lodo desidratado e o excedente de biogás para geração de eletricidade em MCI) para a ETE *Laboreaux*.

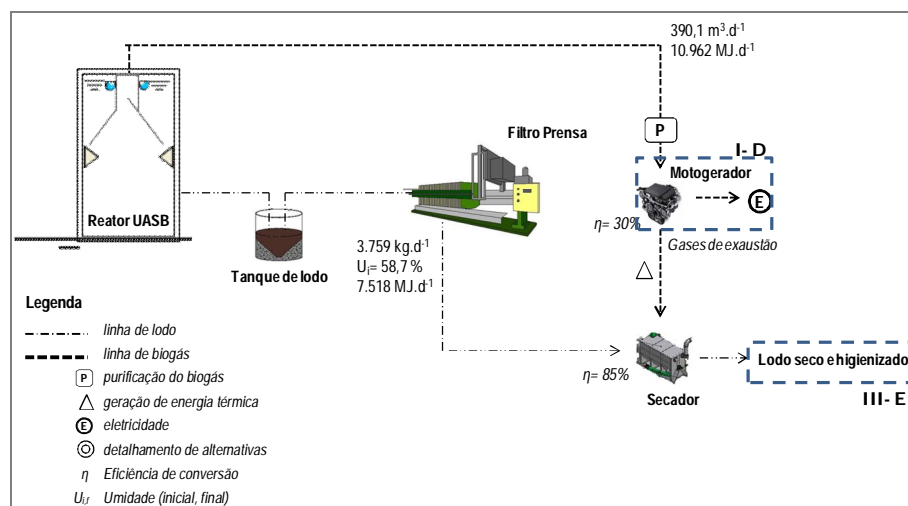


Figura 6-7: Ilustração esquemática do cenário 2 (uso prioritário de biogás em MCI visando a geração de eletricidade e aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para a secagem térmica de lodo) para a ETE *Laboreaux*.

6.2.7 Detalhamento das metodologias utilizadas para a estimativa das emissões evitadas

6.2.7.1 III-E: Geração de metano evitado pelo decaimento da biomassa através de processos de combustão, gaseificação e tratamento mecânico/térmico.

Tecnologias previstas

O uso dessa metodologia é prevista diante de algumas condições que devem ser observadas no projeto, sendo as mais relevantes:

- (a) Aplicável a projetos que evitem emissões de GEE, que fariam, na ausência do projeto, a destinação dos resíduos para aterros sanitários e teriam a degradação da matéria orgânica

- dada através do processo anaeróbio, não havendo a recuperação do metano gerado no aterro;
- (b) As reduções da geração de GEE devem ocorrer através de projetos que façam uso da combustão, gaseificação e tratamento mecânico/térmico;
 - (c) Conhecimento da localização e características do aterro sanitário que recebem os resíduos com vistas à estimativa das emissões de metano;
 - (d) Somente aplicável para projetos que tenham uma redução efetiva de emissões de GEE menor ou igual a 60 k t. CO₂e. ano⁻¹.

Limite de projeto

As fronteiras do projeto correspondem ao local físico e geográfico, em que:

- (a) Os resíduos sólidos teriam sido dispostos ou já estejam depositados e a emissão de metano evitada ocorra na ausência da atividade de projeto proposta;
- (b) Nas quais ocorra o tratamento da biomassa por meio de combustão controlada, gaseificação ou tratamento mecânico/térmico;
- (c) Os resíduos finais do processo de combustão serão depositados, no caso da aplicação da combustão controlada;
- (d) E nos itinerários entre elas, nas quais ocorra o transporte dos resíduos e a combustão dos resíduos e/ou dos resíduos da gaseificação e do processo de tratamento mecânico/térmico.

Linha de base

A linha de base corresponde a um cenário já existente, em que há a geração do resíduo e o mesmo é disposto em aterro sanitário, havendo, pelo processo anaeróbio, a degradação da matéria orgânica e a geração de subprodutos, como o gás metano. Esse cenário é o que ocorreria na ausência da atividade de projeto.

As emissões para a linha de base em um aterro sanitário utilizam o modelo de degradação da matéria orgânica de primeira ordem detalhada na ferramenta metodológica intitulada “*Emissions from solid waste disposal sites*”, versão 6.0.1 (UNFCCC, 2011c), a mais recente aprovada pela UNFCCC e que permite o cálculo acumulado da quantidade de CO₂e., gerado com a disposição de um determinado resíduo em um aterro sanitário, ao longo de um determinado período.

O cálculo da quantidade de metano gerado em condições de ausência do projeto foi realizado para um período de 10 anos. Na equação 6-1 é apresentado o cálculo das emissões de CO₂e. para a linha de base em um ano “y” durante a vigência do projeto:

$$BE_y = BE_{CH_4,SWDS,y} \quad (6-1)$$

Em que:

BE_y = Geração de metano para a linha de base no ano “y” (t CO₂e.);

BE_{CH₄,SWDS,y} = Potencial anual de geração de metano pelos resíduos aterrados, desde o início do projeto até o ano “y”.

A quantidade de metano que seria gerado na ausência do projeto, tendo como disposição final o aterro sanitário (BE_{CH₄,SWDS,y}), é calculado através de um modelo multi-fase, sendo que o decaimento considerado para a matéria orgânica é de primeira ordem. O modelo proposto faz a diferenciação dos diferentes tipos de resíduos (j), com as suas respectivas taxas de decaimento (kj) e diferentes frações de degradação da matéria orgânica (DOC_j). O modelo calcula a quantidade de metano gerado em cada ano “y” ao longo de todo o período proposto para o projeto MDL, considerando-se a geração deste gás para cada ano, nas células do aterro, para as quantidades de resíduos que teriam sido acumuladas nos anos anteriores.

De acordo com a ferramenta proposta, a geração de metano (BE_{CH₄,SWDS,y}) no aterro sanitário é dado pela equação 6-2. Os valores dos coeficientes foram adotados de acordo com UNFCCC (2006).

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \varphi \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj(y-x)} \cdot (1 - e^{-kj}) \quad (6-2)$$

Em que:

BE_{CH₄,SWDS,y} = Emissão de metano evitado no ano “y” (t CO₂e.);

φ = Fator de correção do modelo que busca contabilizar as incertezas;

f = Fração do metano capturado no aterro sanitário queimado ou utilizado de outras formas. O valor adotado é zero (0), pois o aterro sanitário avaliado não faz aproveitamento dos gases gerados;

GWP_{CH₄} = Potencial de aquecimento global do metano (*Global warming potencial*). Valor adotado de 21, de acordo com a definição adotada para os projetos MDL;

OX = Fator de oxidação que reflete a quantidade de metano que é oxidado pelo solo ou outra camada de cobertura no aterro sanitário. Neste específico caso, considerou-se ausência de oxidação pela parcela de cobertura, sendo essa variável avaliada com valor igual a zero;

F = Concentração do metano, em volume, em relação ao gás total gerado no aterro sanitário. O valor default recomendado por UNFCCC (2006) é de 50%;

DOC_f = Fração da matéria orgânica degradável (*degradable organic carbon*) passível de decomposição, presente no resíduo. O valor default recomendado por UNFCCC (2006) é de 0,5;

MCF = Fator de correção do metano (*methane correction factor*). Descreve o grau de anaerobiose do aterro. O valor adotado é de 0,8, dado em função da profundidade da disposição do material e das condições de gerenciamento do aterro;

W_{j,x} = Quantidade de material orgânico presente no resíduo tipo *j* que seria disposto no aterro sanitário em um dado ano “*x*”, desde o início do projeto. No caso avaliado, considerou-se apenas um tipo de resíduo gerado (lodo de esgoto) e o valor adotado, com base nos dados de geração média anual da ETE *Laboreaux*;

DOC_j = Fração de carbono orgânico degradável, em peso, presente no resíduo tipo *j*. Pela metodologia o valor de DOC_j é calculado para lodo de esgoto como sendo: DOC_j (% lodo úmido) = 5.(% matéria seca/10).

k_j = Taxa de decaimento para o resíduo tipo *j*. Essa variável é dada em função da precipitação média anual no aterro sanitário e do potencial de degradabilidade do resíduo. De acordo com os valores propostos por UNFCCC (2006), frente a um clima tropical e índice de pluviosidade médio para Itabira de 1.407 mm (ITABIRA, 2011), o valor da taxa de decaimento mais adequado corresponde a 0,40;

j = Índice do tipo de resíduo. Neste caso, o resíduo foi considerado homogêneo (apenas lodo secundário de ETE);

x = Ano durante o período de projeto, variando de (*x*=1), início do projeto, até (*x*=*y*);

y = Cada um dos anos durante o projeto em que ocorreriam as emissões calculadas pelo modelo.

Vazamento

Esta parcela é considerada quando há a transferência dos equipamentos da tecnologia de combustão, gaseificação ou tratamento térmico/mecânico para outro local, ocorrendo efeitos

em outros locais fora das fronteiras consideradas. Para este caso específico esta parcela não foi considerada.

Emissões provenientes da atividade de projeto

Nesse caso específico, a atividade de projeto compreende o tratamento térmico do lodo desidratado e produzido diariamente no filtro prensa, entretanto, devem ser consideradas eventuais emissões de GEE provenientes dessa atividade, podendo ser:

- (a) Emissões de CO₂ relacionadas com a combustão e gaseificação de resíduos que contenham carbono gerado a partir de resíduos não biogênicos, como plástico, borracha e outros derivados de petróleo, além de combustíveis fósseis usados para a combustão, gaseificação ou tratamento mecânico/térmico;
- (b) Emissões de CO₂ devido ao uso adicional de combustíveis fósseis para o transporte do resíduo para a nova unidade de tratamento, e dessa até a área de disposição;
- (c) Emissões de CO₂ relativas ao consumo de eletricidade e/ou combustíveis fósseis pela atividade de projeto, incluindo equipamentos exigidos por lei para o controle ambiental da poluição.

A redução das emissões para cada um dos 10 anos propostos de projeto podem ser estimadas de acordo com a equação 6-3, sendo as emissões reduzidas (evitadas) pela atividade de projeto dadas em função da diferença entre as emissões da linha de base e a soma das emissões do projeto e de vazamento.

$$ER_y = BE_y - (PE_y + Vazamento_y) \quad (6-3)$$

Em que:

ER_y = redução nas emissões no ano y (t. CO₂.ano⁻¹);

BE_y = linha de base nas emissões no ano y (t. CO₂.ano⁻¹);

PE_y = emissões na atividade de projeto no ano y (t. CO₂.ano⁻¹);

Vazamento_y = emissões decorrente de perdas e vazamentos (t. CO₂.ano⁻¹).

6.2.7.2 I-D. Geração de eletricidade renovável conectada à rede

Tecnologia/medida

Esta categoria compreende as unidades de geração de energia renovável, como fotovoltaica, hidrelétrica, de marés/ondas, eólica, geotérmica e de biomassa renovável que:

- (a) Forneçam eletricidade para uma rede nacional ou regional, ou
- (b) Forneçam eletricidade para uma instalação consumidora conhecida por uma rede nacional/regional através de um acordo contratual, como wheeling.

Esta metodologia poderá ser aplicada às atividades de projeto que: (a) envolvam a instalação de uma nova usina de energia no local onde não havia uma usina de energia renovável funcionando antes da implementação da atividade do projeto (usina nova); (b) envolva acréscimo na capacidade; (c) envolva modernização de usina(s) existente(s); ou (d) envolva a substituição de usina(s) existente(s).

Se a nova unidade acrescentada tiver componentes renováveis e não renováveis (por exemplo, uma unidade eólica/a diesel), o limite de elegibilidade de 15 MW para a atividade de projeto de pequena escala no âmbito do MDL aplicar-se-á somente ao componente renovável. Se a unidade acrescentada também usar combustíveis fósseis, a capacidade de toda a unidade não deverá exceder o limite de 15 MW.

No caso das atividades de projeto que envolvam o acréscimo de unidades de geração de energia renovável em uma usina existente de geração de energia renovável, a capacidade adicional das unidades acrescentadas pelo projeto deve ser inferior a 15 MW e deve ser fisicamente distinta das unidades existentes.

No caso de modernização ou substituição, para que se qualifique como projeto de pequena escala, a produção total da unidade modernizada ou substituída não deve ultrapassar o limite de 15 MW.

Limite de projeto

O limite de projeto inclui a unidade de energia e todas as fontes de geração de energia conectadas fisicamente ao sistema elétrico que a unidade de energia do MDL está conectada.

Linha de base

O cenário da linha de base é a eletricidade fornecida à rede pela atividade de projeto que, do contrário, teria sido gerada pela operação de usinas de energia conectadas à rede e pelo acréscimo de novas fontes geradoras.

As emissões de linha de base são o produto da linha da energia elétrica ($EG_{BL,y}$) expressa em MWh de eletricidade produzida na unidade de geração de energia renovável multiplicado pelo fator de emissão da rede, como apresentado na equação 6-4.

$$BE_y = EG_{BL,y} \times EF_{CO_2,grid,y} \quad (6-4)$$

Em que:

BE_y = Emissões de linha de base no ano y (t. CO₂);

$EG_{BL,y}$ = Quantidade de eletricidade líquida fornecida à rede como resultado da implementação da atividade de projeto de pequena escala no âmbito do MDL no ano y (MWh);

$EF_{CO_2,grid,y}$ = Fator de emissão de CO₂ da rede no ano y (t. CO₂.MWh⁻¹).

O fator de emissão pode ser calculado de forma clara e conservadora através de uma das alternativas:

- (a) Uma margem combinada (CM), consistindo da combinação da margem operacional (OM) e da margem de construção (BM), de acordo com os procedimentos prescritos na “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema elétrico”, ou
- (b) A média ponderada das emissões (em t. CO₂.kWh⁻¹) da matriz de geração atual. Devem ser usados os dados do ano em que ocorra a geração do projeto.

Para o presente estudo o fator de emissão de operação e construção foi obtido a partir de dados obtidos no Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT, 2012) tendo como referência o período de outubro de 2010 a outubro de 2011. A equação 6-5 apresenta o cálculo para o fator de emissão. O peso do fator de emissão considerado foi de 50% para ambos os fatores. De acordo com a equação 6-5, o fator de emissão de CO₂ da rede para o período estudado foi de 0,305.

$$EF_{CO_2,grid,y} = EF_{grid,OM,y} \times W_{OM} + EF_{grid,BM,y} \times W_{BM} \quad (6-5)$$

Em que:

$EF_{CO_2,grid,y}$ = Fator de emissão de CO₂ da rede no ano y (t. CO₂.MWh⁻¹);

$EF_{grid,OM,y}$ = Fator de emissão de CO₂ da margem de operação (OM) para a geração de energia em um sistema interligado no ano y. O fator corresponde a 0,457;

W_{OM} = peso do fator de emissão da OM (%). O valor adotado foi de 0,5;

$EF_{grid,BM,y}$ = Fator de emissão de CO₂ da margem de construção (BM) para geração de energia em um sistema interligado no ano y. O fator corresponde a 0,153;

W_{BM} = peso do fator de emissão da BM (%). O valor adotado foi de 0,5.

A redução das emissões são calculadas de acordo com a equação 6-6. Foram desconsideradas as emissões na atividade de projeto e as perdas no projeto.

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (6-6)$$

Em que:

ER_y = redução nas emissões no ano y (t. CO₂.ano⁻¹);

BE_y = linha de base nas emissões no ano y (t. CO₂.ano⁻¹);

PE_y = emissões na atividade de projeto no ano y (t. CO₂.ano⁻¹);

LE_y = emissões decorrente de perdas e vazamentos (t. CO₂.ano⁻¹).

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Potencial energético do biogás

Algumas estatísticas descritivas referentes aos dados de vazão e DQO do esgoto bruto afluente à ETE, e de vazão e composição de biogás gerado nos reatores UASB, durante o período de monitoramento da estação (outubro de 2010 a outubro de 2011), são apresentadas na Tabela 6-7.

Tabela 6-7: Estatística descritiva dos dados de vazão afluente, DQO do esgoto e de produção de biogás na ETE *Laboreaux* no período out./2010 a out./2011.

Estatísticas	Vazão de esgoto (m ³ .d ⁻¹)	DQO _{afluente} (mg.L ⁻¹)	DQO _{efluente} (mg.L ⁻¹)	Vazão de biogás (m ³ .d ⁻¹)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	Outros (%)
Média	6.750,6	537,7	145,2	390,1	78,2	6,7	15,1
N° de dados	396	110	104	396	22	22	22
Mediana	6.526,6	553,0	123,5	432,5	79,4	6,8	13,1
Mínimo	4.438,8	118,0	42,0	126,7	70,3	4,4	6,0
Máximo	12.101,4	1.341,0	429,0	584,0	82,5	8,7	17,1
σ	1.195,7	49,8	77,4	165,2	2,7	1,3	3,7

σ (desvio padrão em relação ao valor médio). * porcentagem em volume

No período de monitoramento, a vazão de esgoto afluente à estação apresentou um valor médio de 6.751 m³.d⁻¹ (78 L.s⁻¹) e a produção volumétrica de biogás gerado nos reatores UASB um valor médio de 390,1 Nm³.d⁻¹. A composição média de biogás nesse mesmo período foi de 78,2 % de CH₄, 6,7 % de CO₂ e uma mistura de outros constituintes de 15,1 %. Observa-se uma contribuição de metano (78,2%) dentro da faixa reportada por Noyola

(2006), de 70 a 80%. A partir das características do biogás, estima-se um potencial de energia da ordem de 10.962 MJ.d⁻¹.

6.3.1.1 Relações unitárias e aderência dos dados reais aos dados teóricos

A partir dos dados de monitoramento foram calculadas as relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia para a ETE *Laboreaux* no período em questão (2010 e 2011), as quais podem fornecer subsídios quando da avaliação da alternativa mais viável para a conversão energética do biogás (Tabela 6-8). Como base de referência são apresentadas também as faixas de relações unitárias previstas pelo modelo de Lobato *et al.* (2012).

Tabela 6-8: Relações unitárias de produção de metano, de biogás e de energia nos reatores UASB.

Relações unitárias	Unidades	Valores	
		Medidos	Simulados*
Volume de metano por volume de esgoto tratado	m ³ CH ₄ .m ⁻³ esgoto tratado	0,06	0,07-0,14
Volume de metano por DQO removida	m ³ CH ₄ .kg ⁻¹ DQO _{removida}	0,17	0,11-0,19
Volume de biogás por volume de esgoto tratado	m ³ biogás.m ⁻³ esgoto tratado	0,07	0,06-0,10
Volume de biogás por DQO removida	m ³ biogás.kg ⁻¹ DQO _{removida}	0,21	0,16-0,24
Potencial de produção de energia por volume esgoto tratado	MJ.m ⁻³ esgoto tratado	2,0	1,5-2,9
Potencial de produção de energia por DQO removida	MJ.kg ⁻¹ DQO _{removida}	6,0	4,1-7,0
Potencial de produção de energia por volume de biogás produzido	MJ.m ⁻³ biogás	28,1	25,1-28,7

(*) Faixa indicada por Lobato *et al.* (2012)

Avalia-se que todas as relações unitárias calculadas para a ETE *Laboreaux* estão de acordo com as faixas estimadas por Lobato *et al.* (2012), que desenvolveram um modelo para o balanço de massa da conversão da DQO, e do potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Nesse modelo foram consideradas todas as parcelas envolvidas na digestão anaeróbia, inclusive possíveis perdas, a saber: (i) parcela da DQO inicial que é convertida a metano presente no biogás; (ii) parcela da DQO inicial convertida a metano que escapa dissolvido no efluente do reator anaeróbio e junto ao gás residual (perdas); (iii) parcela da DQO devida à redução de sulfato; (iv) parcela da DQO que é convertida em lodo e (v) parcela da DQO que permanece no efluente final.

6.3.2 **Potencial energético do lodo**

Como já especificado anteriormente, o lodo gerado na ETE *Laboreaux* é desidratado em um filtro prensa e segue para aterro sanitário. Durante o período de monitoramento, o filtro prensa operou por 226 dias e produziu 849,5 t. de lodo desidratado (3.758 kg.d⁻¹) (Tabela 6-9), destinados ao aterro municipal. Para efeito de cálculo, a parcela de lodo desidratado no leito de secagem, diante de problemas operacionais do filtro prensa (março de 2011) não foi considerada.

A Tabela 6-10 apresenta a estatística descritiva para a caracterização do lodo gerado na unidade de desaguamento por filtro prensa na ETE *Laboreaux*. De forma complementar, os gráficos box-plot (Figura 6-8 e Figura 6-9) apresentam a variabilidade dos resultados de composição imediata e elementar do lodo prensado, respectivamente. Identifica-se um potencial energético do lodo da ordem de 7.518 MJ.d^{-1} a partir do material com umidade de 58,7%.

O elevado teor de cinzas pode ser explicado pelo uso do cal e do cloreto férrico para a melhoria do processo de desidratação mecânica por filtro prensa, cogita-se ainda a contribuição mineral na rede de esgoto em virtude da influência das atividades mineradoras da cidade de Itabira.

Tabela 6-9: Dados da massa de lodo prensado enviado para o aterro sanitário da cidade de Itabira-MG no período de out/2010 a out/2011.

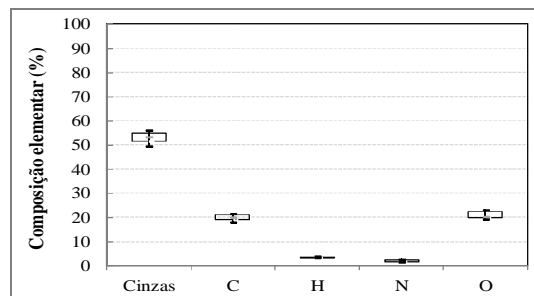
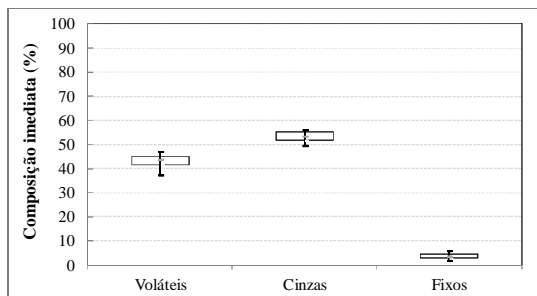
Mês	Lodo gerado			
	Massa (t.)	n° prensadas	kg/prensada	Desvio padrão
out/10	43,1	48	897,3	59,0
nov/10	73,9	82	901,6	43,5
dez/10	83,6	94	889,5	28,9
jan/11	58,9	65	905,5	25,6
fev/11	61,5	68	904,4	26,0
mar/11	7,4	8	925,0	91,9
abr/11	63,9	70	912,4	32,4
maí/11	69,8	113	617,5	37,4
jun/11	98,9	121	816,9	34,6
jul/11	74,5	112	665,2	30,4
ago/11	59,9	122	490,9	23,0
set/11	75,4	111	679,4	26,2
out/11	78,8	113	697,7	27,7
TOTAL	849,5	1.127	-	-

Em comparação com outros tipos de biomassa, os valores de carbono (C = 43,0%) e hidrogênio (H = 7,8%) do lodo caracterizado nesse estudo, em base combustível (desconsideradas as cinzas), apresentaram-se inferiores aos do eucalipto (C = 49,3%; H = 5,9%), casca de arroz (C = 53,7%; H = 5,8%), bagaço de cana (C = 49,3%; H = 5,9%) conforme reportado por Jenkins (1990) *apud* Cortez *et al.* (2008). Ao se comparar com outros tipos de lodo biológico, observa-se que os valores de carbono e nitrogênio se encontram abaixo dos valores de caracterização de lodo reportados por Groß (2008) e Fonts *et al.* (2009), entretanto o teor de hidrogênio é elevado quando comparado a Groß (2008), Fonts *et al.* (2009), Courtland *et al.* (2010). A Tabela 6-11 apresenta a comparação com outras caracterizações de lodo reportadas em literatura, em base combustível.

Tabela 6-10: Estatística descritiva dos resultados de caracterização do lodo desidratado gerado na ETE *Laboreaux*.

Estatística	Composição imediata % em massa (b.s)			Umidade %	Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)				Composição elementar, % em massa (b.s)				
	Voláteis	Cinzas	Fixos		Teórico		Real		C	H	N	O*	Cinzas**
					PCS (b.s)	PCI (b.t)	PCS (b.s)	PCI (b.t)					
Média	42,9	53,3	3,8	58,7	7,4	1,7	8,7	2,0	19,8	3,6	2,1	20,5	54,0
Nº dados	31	31	31	29	27	27	26	24	19	19	19	19	19
Mediana	43,7	53,3	3,6	58,2	7,4	1,5	8,6	1,9	19,6	3,5	2,0	20,0	53,9
σ	4,0	3,1	1,9	5,9	0,9	1,4	1,2	0,8	1,6	0,3	0,5	2,0	3,2

b.s: base seca, b.t: base de trabalho. PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), σ (desvio padrão em relação ao valor médio). *Determinado por diferença. **Considerados os dados medidos de cinzas para os dias que houve caracterização de composição elementar.



□ Média □ 25% - 75% | 10% - 90%

Figura 6-8: Composição imediata do lodo desidratado por filtro prensa na ETE *Laboreaux*, em base seca.

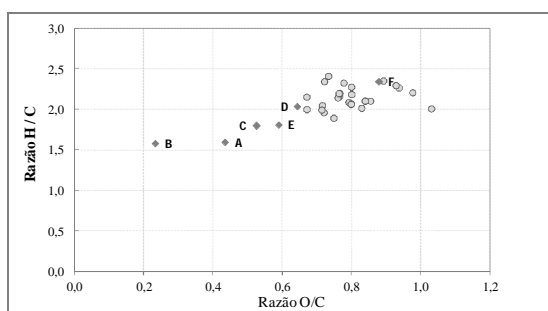
Figura 6-9: Composição elementar do lodo desidratado por filtro prensa na ETE *Laboreaux*, em base seca.

O diagrama de van Krevelen, concebido para a análise do nível de carbonificação de diferentes tipos de combustível (VAN KREVELEN e SCHUYER, 1957), avalia as propriedades energéticas dos combustíveis livre de água e cinzas. A Figura 6-10 evidencia que a relação H/C é compatível com a caracterização de lodo biológico desidratado em outras pesquisas, enquanto que a razão O/C é significativamente maior. Uma possível explicação é o fato de que o reator UASB na ETE *Laboreaux* recebe o lodo secundário gerado a partir dos filtros biológicos percoladores (aeróbios). O lodo apresenta características similares às reportadas por Judex *et al.* (2012) para a ETE de Balingen (Alemanha), a qual possui recuperação energética dos subprodutos lodo e biogás, com a cogeração de energia em um MCI, a partir da mistura do biogás da digestão anaeróbia e do *syngas* gerado na gaseificação do lodo.

No que se refere aos resultados de potencial energético do lodo, nota-se, em linhas gerais, que os valores medidos em laboratório são ligeiramente superiores aos estimados pela equação de Dulong (Figura 6-11). O PCI_{real} (base de trabalho – b.t.) do lodo da ETE *Laboreaux* (2,0 MJ.kg⁻¹ a uma umidade de 58,7%) é inferior ao reportado por Fontes *et al.* (2009), de 7,7 MJ.kg⁻¹ a uma umidade de 5,3%, o que evidencia a influência da secagem sobre o poder calorífico.

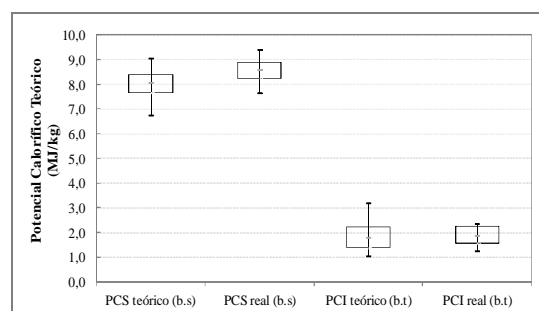
Tabela 6-11: Comparação entre a composição elementar do lodo desidratado da ETE Laboreaux com outras fontes de biomassa.

Características	Tipo de biomassa	Composição elementar (%), base combustível				Fonte	
		C	H	N	O		
Outras fontes de biomassa	Eucalipto	49,3	5,9	0,3	44,3	Jenkins (1990) <i>apud</i> Cortez <i>et al.</i> (2008)	
	Casca de coco	53,7	5,8	3,3	37,0		
	Bagaço de cana	49,3	5,9	0,5	43,9		
Lodo biológico	Lodo estabilizado anaerobiamente	62,7	8,3	7,4	19,5	Houdkova (2008)	
	-	36,2	14,0	7,8	42,1	Ginoris (2010)	
	-	-	7,7	5,1	35,9	Courtland <i>et al.</i> (2010)	
	-	44,5	7,6	8,0	38,2	Groß (2008)	
	Lodo anaeróbio com tratamento térmico	Lodo anaeróbio com tratamento térmico	47,4	7,2	6,8	37,3	Fonts <i>et al.</i> (2009)
			48,1	6,5	6,7	36,9	
			46,9	7,5	5,4	37,1	
	Lodo anaeróbio desidratado	43,0	7,8	4,6	44,6	Lodo ETE Laboreaux	



Fonte: (A) Dogru *et al.* (2002); (B) Houdkova (2008); (C) Courtland *et al.* (2010); (D) GROß *et al.* (2008); (E) Fonts *et al.* (2009); (F) Judex *et al.* (2012).

Figura 6-10: Correlação das razões atômicas de H/C e O/C para o lodo de filtro prensa da ETE Laboreaux e comparação com outros autores.



□ Média □ 25% - 75% ▮ 10% - 90%

Figura 6-11: Poder calorífico superior e inferior, teóricos e reais, para o lodo de filtro prensa da ETE Laboreaux.

Considerando a secagem do lodo para umidade final de 10% e teor de hidrogênio de 3,6%, o PCI_{real} (b.t.) do lodo seco final corresponderia a $4,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Este seria o valor energético do lodo para uso em geração térmica (caldeiras, aquecedores, etc.) ou em termelétricas. No caso de ETes, a baixa demanda interna por energia térmica não justifica a queima do lodo para uso próprio, e a quantidade de lodo gerado não viabiliza a geração termelétrica. No entanto, o lodo seco poderá ser destinado a usuários comerciais ou industriais locais ou regionais, para substituir lenha ou carvão, e neste caso, mesmo que não haja retorno financeiro, a simples destinação energética do lodo representa uma economia, pois deixaria de ser transportado e disposto em aterro.

A Figura 6-12 apresenta o diagrama de combustão para o lodo da ETE Laboreaux. Os gases da combustão apresentariam uma fração máxima de CO_2 a partir da combustão estequiométrica do lodo correspondente a 18,7 % (ponto A), o qual seria maior quando mais

elevada for a concentração de carbono no lodo. A máxima concentração de CO_2 também corresponde ao ponto da máxima temperatura de queima do combustível. Em um outro extremo (ponto C) a fração de oxigênio nos gases de combustão com diluição infinita de oxigênio (ar ambiente) corresponde a 20,9%.

Caso não houvesse a constituição de oxigênio no lodo para uma combustão estequiométrica com todo o carbono se oxidando a CO , a quantidade máxima de O_2 nos gases corresponderia a 9,4% (ponto B).

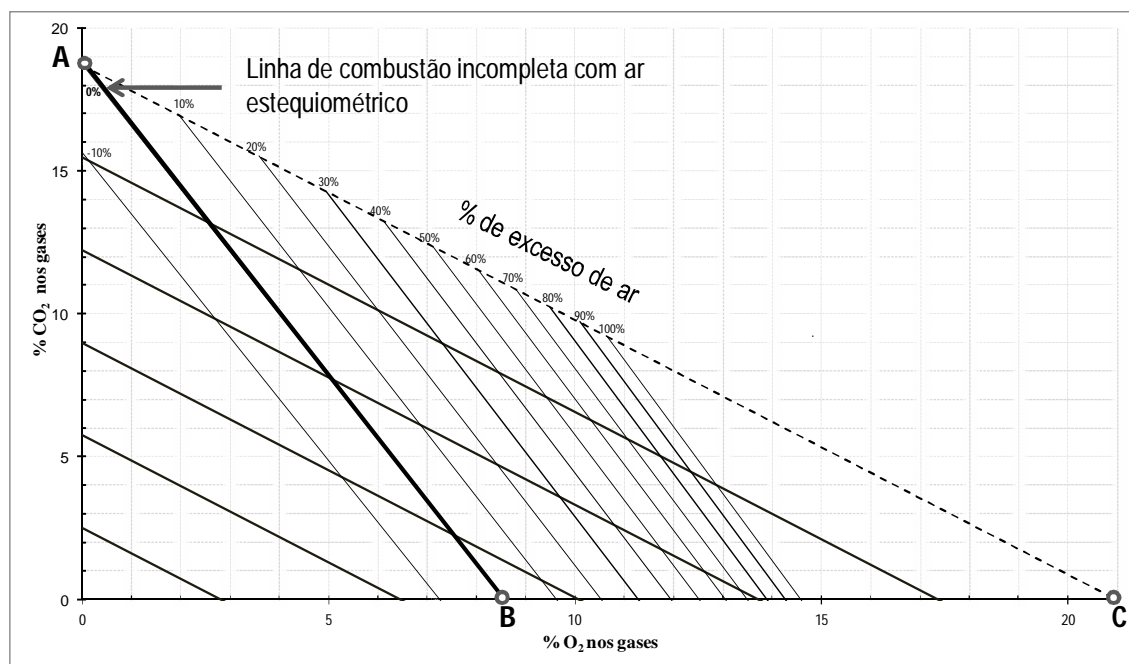


Figura 6-12: Diagrama de combustão do lodo desidratado da ETE *Laboreaux*, Itabira.

6.3.3 Estudo de alternativas de aproveitamento energético do biogás e lodo

6.3.3.1 Cenário 1 - Uso prioritário do biogás para secagem térmica do lodo

Nesta alternativa o objetivo principal é o de promover a secagem térmica do lodo através do uso do biogás como fonte de calor e, de forma secundária, a geração de eletricidade, com o excedente de energia não empregado na secagem, para benefício da ETE.

A Figura 6-13 apresenta um balanço de massa e energia para o cenário 1. Pode-se observar que o processo de evaporação demanda 61,5 % da vazão do biogás produzido na ETE, com o remanescente (38,5 %) empregado na geração de eletricidade.

A Tabela 6-12 apresenta o balanço energético para o cenário avaliado, assim como os dados relevantes das condições de entrada e saída do processo.

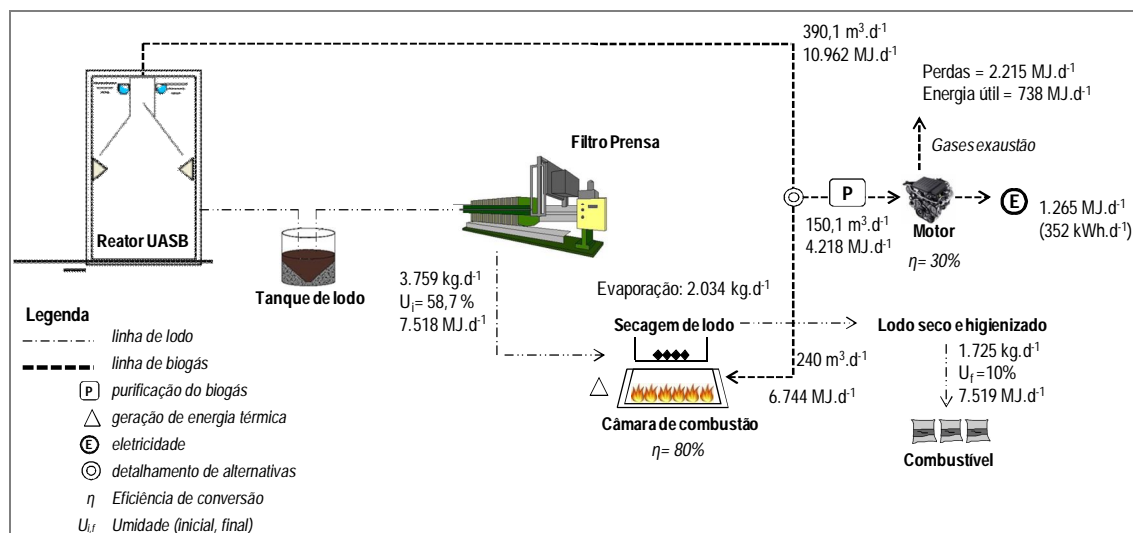


Figura 6-13: Balanço de massa e energia para o aproveitamento energético do biogás para a secagem térmica do lodo desidratado na ETE *Laboreaux* – Cenário 1.

A partir do potencial energético total do biogás (4.218 MJ.d⁻¹) e de um rendimento de conversão no conjunto motogerador de 30%, a energia elétrica gerada (1.265 MJ.d⁻¹) é suficiente para suprir 22,2% da demanda de eletricidade da estação (5.709 MJ.d⁻¹). O calor gerado no MCI pode eventualmente ser empregado para outros usos, mas este aproveitamento não foi contemplado na concepção proposta.

O lodo a 10% de umidade pode ser considerado um potencial combustível, entretanto esse uso requer geralmente um processamento mecânico adicional (peletização, briquetagem). Como a demanda por energia térmica na ETE é pequena, e a geração termelétrica com o emprego do lodo seco não é economicamente atrativa, considera-se que o melhor uso energético do lodo seco seria o seu fornecimento a potenciais usuários consumidores deste combustível. Mesmo que gerando pouca ou nenhuma receita (caso venha a ser doado), a simples entrega do resíduo como subproduto já representa um barateamento na operação da ETE, pela economia nos custos de transporte e disposição final do lodo em aterro sanitário.

Considerando o lodo seco (10% de umidade), a massa de material produzido no secador seria de 1.725 kg.d⁻¹, com um poder calorífico inferior equivalente (b.t.) de 4,36MJ.kg⁻¹. Esse lodo poderia fornecer 7.519 MJ.d⁻¹ caso utilizado como combustível por terceiros, eliminando totalmente a produção de rejeito final a ser destinado a aterro sanitário. A Tabela 6-13 apresenta o detalhamento do balanço de massa na secagem térmica do lodo a partir da queima de 240 m³.d⁻¹ de biogás na câmara de combustão.

Tabela 6-12: Balanço de massa e energia para o Cenário 1.

Item	Produtos Iniciais			Perdas (MJ.d ⁻¹)	Produtos finais		
	Fluxo	Poder calorífico	Potencial energético (MJ.d ⁻¹)		Fluxo	Poder calorífico	Potencial energético (MJ.d ⁻¹)
Produtos recebidos da ETE							
Lodo (58,7% umidade)	3.759 kg.d ⁻¹	2,0 MJ.kg ⁻¹	7.518	-	-	-	-
Biogás	390,1 m ³ .d ⁻¹	28,1MJ/m ³	10.962	-	-	-	-
Subtotal	-	-	18.480	-	-	-	-
Balanço no motor de combustão Interna (MCI)							
Biogás consumido	150,1 m ³ .d ⁻¹	28,1 MJ.m ⁻³	4.218	-	-	-	-
Energia elétrica gerada (η=30%)	-	-	-	-	-	-	1.265
Perdas no sistema ^a	-	-	-	2.952	-	-	-
Subtotal	-	-	4.218	2.952	-	-	1.265
Balanço no secador térmico de lodos							
Biogás consumido	240,0 m ³ .d ⁻¹	28,1 MJ.m ⁻³	6.744	-	-	-	-
Lodo desidratado alimentado	3.759 kg.d ⁻¹	2,0 MJ.kg ⁻¹	7.518	-	-	-	-
Lodo seco final (10% umidade)	-	-	-	-	1.725 kg.d ⁻¹	4,36 MJ.kg ⁻¹	7.519 ^c
Evaporação da água (η=80%)	-	-	-	5.411 ^d	-	-	-
Perdas no sistema ^b	-	-	-	1.074 ^e	-	-	-
Calor residual na secagem	-	-	-	259 ^c	-	-	-
Subtotal	-	-	14.262	6.744	-	-	7.519^c
TOTAL	-	-	18.480	9.696	-	-	8.784

Energia disponível para uso próprio ou de terceiros. ^a Perdas por convecção/radiação e por calor residual nos gases de escape. ^b Perdas por insuficiência e calor residual nos gases de exaustão na câmara de combustão. ^c Valor calculado por diferença. ^d A partir do calor específico do lodo de 0,385 kcal.kg⁻¹.°C⁻¹, calor específico de vapor de água de 2,1 kcal.kg⁻¹.°C⁻¹ e calor de vaporização da água de 540 kcal.kg⁻¹ para promover a secagem térmica do lodo de 57,8% a 10% de umidade. ^{d+e} Valor calculado pelo aplicativo CHEMCAD[®].

Tabela 6-13: Balanço de massa para a secagem térmica por combustão de biogás – Cenário 1.

Componente	Entrada (kg.d ⁻¹)	Saída (kg.d ⁻¹)
Lodo	3.759	1.725
Biogás (CH ₄ e CO ₂)	237 ^b	-
Água evaporada	-	2.034 ^a
Ar (O ₂ e N ₂)	567 ^b	31 ^b
Gases de exaustão (CO ₂ , O ₂ , H ₂ O e N ₂)	-	773 ^b
TOTAL	4.563	4.563

^a Valor calculado para a remoção de água de 58,7 a 10% de umidade. ^b Valor calculado pelo aplicativo CHEMCAD[®].

6.3.3.2 Cenário 2 - Uso prioritário do biogás para a geração de eletricidade

O cenário 2, ilustrado na Figura 6-14, tem como objetivo principal a produção de eletricidade para a ETE a partir do uso de todo o biogás produzido nos reatores UASB, seguido da secagem do lodo desidratado pelo calor contido nos gases de exaustão do MCI. A Tabela 6-14 apresenta o balanço de massa e energia detalhados. Neste cenário seria possível a geração de 3.289 MJ.d⁻¹ de eletricidade, o que corresponde a um suprimento de 57,6% da demanda da ETE.

Considerando que a energia na forma de calor nos gases de exaustão (2.000 MJ.d⁻¹) não é suficiente para a evaporação de toda água no lodo desidratado (3.759 kg.d⁻¹) para se atingir a umidade final de 10%, duas alternativas para o gerenciamento do lodo são consideradas: **Alternativa 1:** secagem térmica de todo lodo desidratado até uma umidade final mínima

possível; e **Alternativa 2**: secagem térmica de fração do lodo até uma umidade final de 10% e o envio do restante do material desidratado (umidade de 58,7%) para aterro sanitário.

Para a alternativa 1 a umidade mínima possível é de 52,7%, o lodo possui um elevado teor de umidade para ser aproveitado para fins energético. Entretanto, nessa alternativa o secador promove a redução de massa e volume do lodo a ser enviado ao aterro sanitário.

Para a alternativa 2 o secador é capaz de processar 937 kg.d^{-1} do lodo desidratado (que representa 24,9% do lodo produzido nos filtros prensa), para gerar 430 kg.d^{-1} de lodo seco a 10% de umidade, que pode ser usado como combustível por terceiros. O restante do lodo não tratado (2.822 kg.d^{-1}) seria destinado ao aterro.

Assim, em termos de massa, a Alternativa 1 corresponde a uma redução de 13,5% da massa de lodos destinada ao aterro, e a Alternativa 2 corresponde a uma redução maior (24,9%). Considerando-se uma massa específica de 1.020 e 1.050 kg.m^{-3} para a umidade do lodo de 58,7% e 52,7%, respectivamente, tem-se uma redução de volume de 15,9 % para a Alternativa 1 e 24,9 % para a Alternativa 2. A redução de volume é importante devido aos custos de transporte e disposição final, que são proporcionais à massa e ao volume.

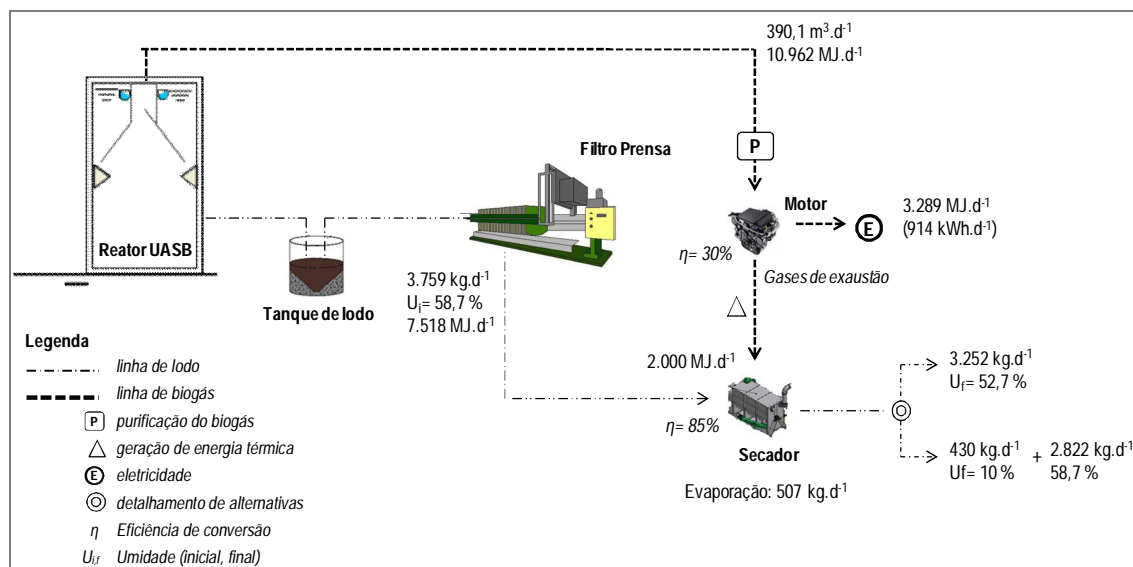


Figura 6-14: Balanço de massa e energia para o aproveitamento energético do biogás para a geração de eletricidade seguida de secagem térmica do lodo com os gases de exaustão na ETE *Laboreaux* – Cenário 2.

6.3.3.3 Comparação dos cenários

A Tabela 6-15 apresenta um resumo do balanço de energia para ambos cenários. Com os resultados, pode-se apreender que o Cenário 1 apresenta um desempenho para secagem e

conversão do lodo em subproduto energético, podendo eliminar completamente a geração de rejeitos a serem dispostos em aterro. Em contrapartida apresenta um menor percentual de suprimento de energia elétrica. A decisão sobre qual o cenário mais atrativo deve ser feita a partir de análise econômica (análise dos investimentos necessários para cada configuração, e os retornos auferidos), a qual extrapola o escopo deste trabalho.

Tabela 6-14: Balanço de massa e energia para o Cenário 2.

Item	Produtos Iniciais			Perdas (MJ.d ⁻¹)	Produtos finais		
	Fluxo	Poder calorífico	Potencial energético (MJ.d ⁻¹)		Fluxo	Poder calorífico	Potencial energético (MJ.d ⁻¹)
Produtos recebidos da ETE							
Lodo (58,7% umidade)	3.759 kg.d ⁻¹	2,0 MJ.kg ⁻¹	7.518	-	-	-	-
Biogás	390,1 m ³ .d ⁻¹	28,1MJ/m ³	10.962	-	-	-	-
Subtotal	-	-	18.480	-	-	-	-
Balanço no motor de combustão Interna (MCI)							
Biogás consumido	390,1 m ³ .d ⁻¹	28,1 MJ.m ³	10.962	-	-	-	-
Energia elétrica gerada (η=30%)	-	-	-	-	-	-	3.289 ^a
Calor residual nos gases de escape	-	-	-	7.673 ^a	-	-	-
Subtotal	-	-	10.962	7.673	-	-	3.289
Balanço no secador de lodos usando gases do MCI – Alternativa 1							
Lodo desidratado processado	3.759 kg.d ⁻¹	2,0 MJ.kg ⁻¹	7.518	-	-	-	-
Lodo final (52,7% umidade) ^b	-	-	-	-	3.252 kg.d ⁻¹	2,31	7.518 ^a
Evaporação da água (η=80%)	-	-	-	1.700 ^c	-	-	-
Perdas por ineficiência no secador	-	-	-	300 ^c	-	-	-
Perdas no gás de escapamento	-	-	-	5.673	-	-	-
Subtotal	-	-	7.518	7.673	-	-	-
TOTAL	-	-	18.480	7.673	-	-	10.807
Balanço no secador de lodos usando gases do MCI – Alternativa 2							
Lodo desidratado processado	3.759 kg.d ⁻¹	2,0 MJ.kg ⁻¹	7.518	-	-	-	-
Lodo enviado para aterro (58,7%) ^b	-	-	-	-	2.822 kg.d ⁻¹	2,0	5.644
Lodo energético (10% umidade)	-	-	-	-	430 kg.d ⁻¹	4,36 MJ.kg ⁻¹	1.874 ^e
Evaporação da água (η=80%)	-	-	-	1.700 ^c	-	-	-
Perdas por ineficiência no secador	-	-	-	300 ^d	-	-	-
Perdas no gás de escapamento	-	-	-	5.673	-	-	-
subtotal	-	-	7.518	7.673	-	-	7.518
TOTAL	-	-	18.480	7.673	-	-	10.807

^aEnergia útil: disponível para uso em benefício da ETE. ^a Os calor residual dos gases do MCI será usado como fonte de energia para secagem do lodo. ^b O lodo com 52,7% de umidade não foi considerado passível de uso energético, e deverá ser destinado ao aterro sanitário. A secagem tem a finalidade de reduzir massa e volume do lodo. ^c A partir do calor específico do lodo de 0,385 kcal.kg⁻¹.°C⁻¹, calor específico de vapor de água de 2,1 kcal.kg⁻¹.°C⁻¹ e calor de vaporização da água de 540 kcal.kg⁻¹. A eficiência do secador de lodo corresponde a 1.700/2.000. ^{c+d} Valor calculado pelo aplicativo CHEMCAD[®] como o calor total disponível para a secagem térmica de lodo. ^e Valor calculado por diferença.

Tabela 6-15: Resumo dos cenários para aproveitamento energético para a ETE *Laboreaux*.

Itens	Situação atual	Cenário 1	Cenário 2	
			Alternativa 1	Alternativa 2
Geração de lodo/rejeito para disposição em aterro (kg.d ⁻¹)	3.759	-	3.252	2.822
Redução do rejeito em relação à situação atual (% , massa)	-	100	13,5	24,9
Geração de lodo seco biocombustível (10% umidade) (kg.d ⁻¹)	-	1.725	-	430
Eletricidade gerada (MJ.d ⁻¹)	-	1.265	3.289	3.289
Suprimento de eletricidade para a ETE (%)	-	22,2	57,6	57,6

6.3.4 Redução nas emissões de GEE com as atividades de projeto

As atividades de projeto 1 e 2, ou intituladas Cenários 1 e 2, são propostas de intervenção da linha de base (cenário atual) na ETE *Laboreaux*. As intervenções propostas trariam diversos

benefícios no que tange o aproveitamento energético dos subprodutos gerados nos reatores UASB. A Tabela 6-16 apresenta os dados considerados para a estimativa das emissões de CO₂e. evitado para os cenários 1 e 2 devido ao tratamento térmico do lodo e o seu não envio ao aterro sanitário (metodologia III-E). A partir do calor liberado nos gases de exaustão para o cenário 2 identificou-se ainda duas condições de gerenciamento de lodo: **2-a**: secagem do lodo a umidade de 52,7% e envio para aterro sanitário; e **2-b**: secagem de parcela do lodo a umidade de 10% e envio do remanescente do lodo para aterro sanitário.

Tabela 6-16: Dados de entrada para a estimativa das emissões de CO₂e. (Cenários 1 e 2).

Item	Unidade	Linha de base	Cenário 1	Cenário 2-a	Cenário 2-b
φ	-	1,0	0,75	0,75	0,75
f	-	0	0	0	0
GWP _{CH4}	-	21	21	21	21
OX	-	0,1	0,1	0,1	0,1
F	%	0,5	0,5	0,5	0,5
DOC _f	%	0,5	0,5	0,5	0,5
MCF	%	0,8	0,8	0,8	0,8
$W_{j,x}$	t/ano ⁻¹	1.372 (3.759x365)	0,0	1.187 (3.252x365)	1.030 (2.822x365)
DOC _j	%	0,20	0,05	0,24	0,20
k_j	-	0,4	0,4	0,4	0,4

Para a estimativa da redução das emissões de GEE utilizou-se a equação 7-5, sendo o resultado expresso pela diferença entre as emissões da linha de base (BE_y) e a soma das emissões do projeto (PE_y) e do vazamento. Não foram consideradas emissões provenientes da aplicação do projeto e de vazamento, sendo a redução das emissões correspondente somente à linha de base. Com o uso do modelo multi-fase, pôde-se calcular as emissões evitadas em equivalente de CO₂ para 10 anos de projeto de créditos de carbono (Tabela 6-17).

Tabela 6-17: Redução das emissões de metano (t.CO₂e.) pelo não envio do lodo desidratado para o aterro sanitário, nas três condições avaliadas.

Ano	Metano evitado (t. CO ₂ e.)								
	Cenário 1			Cenário 2-a			Cenário 2-b		
	Linha de base	Projeto	Redução	Linha de base	Projeto	Redução	Linha de base	Projeto	Redução
1	507	0	507	507	394	112	507	285	221
2	846	0	846	846	659	187	846	476	370
3	1.074	0	1.074	1.074	836	238	1.074	605	469
4	1.226	0	1.226	1.226	955	271	1.226	691	536
5	1.329	0	1.329	1.329	1.035	294	1.329	748	581
6	1.397	0	1.397	1.397	1.088	309	1.397	787	611
7	1.443	0	1.443	1.443	1.124	319	1.443	813	631
8	1.474	0	1.474	1.474	1.148	326	1.474	830	644
9	1.495	0	1.495	1.495	1.164	331	1.495	842	653
10	1.508	0	1.508	1.508	1.175	334	1.508	849	659

Caso as emissões da linha de projeto tivessem sido consideradas em sua totalidade haveria uma redução ainda maior das emissões de GEE, visto a minimização do consumo de combustíveis fósseis para o transporte do lodo ao aterro sanitário.

O cálculo da redução das emissões para a metodologia I-D (*Grid connected renewable electricity generation*) apontou para uma redução anual de 39,2 t.CO₂e. (cenário 2-a) e 101,8 t.CO₂e. (cenário 2-b), a partir de um fator de emissão de CO₂ na rede de distribuição de 0,305 t.CO₂. MWh⁻¹ e do potencial de geração de energia líquida para a rede correspondente à 128,5 e 333,6 MWh.ano⁻¹, respectivamente.

As Figura 6-15, Figura 6-16 e Figura 6-17 apresentam as reduções acumuladas das emissões de GEE (t.CO₂e.) a partir da aplicação das metodologias III-E e I-D para os cenários 1, 2-a e 2-b, respectivamente. Em linhas gerais, avalia-se que o cenário 1 possui uma maior redução global nas emissões de GEE em função do uso do lodo desidratado e seco como combustível, dispensando o envio do material para o aterro sanitário e a degradação do mesmo pela via anaeróbia. Em contrapartida, o cenário 2 por empregar o biogás prioritariamente para a geração de eletricidade, indica uma maior redução nas emissões pela metodologia I-D. Dentre os seus sub cenários, avalia-se que o 2-b apresenta um melhor resultado no que pesem as emissões de GEE, decorrente do envio de uma menor quantidade de lodo para o aterro sanitário.

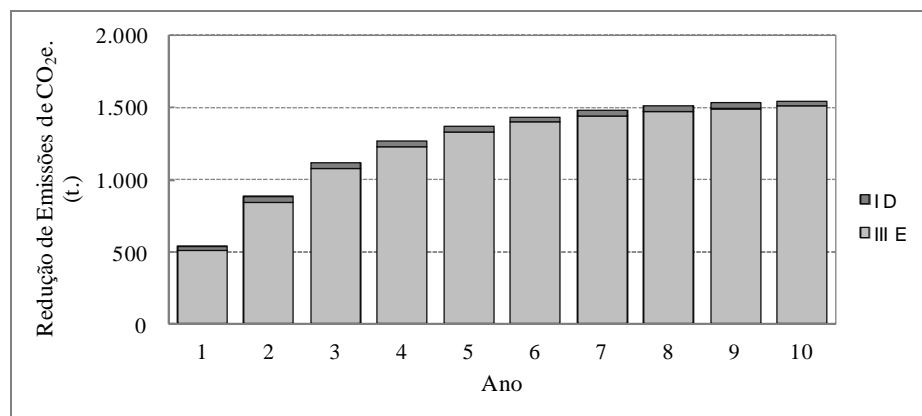


Figura 6-15: Redução das emissões de GEE (t.CO₂e) para o Cenário 1.

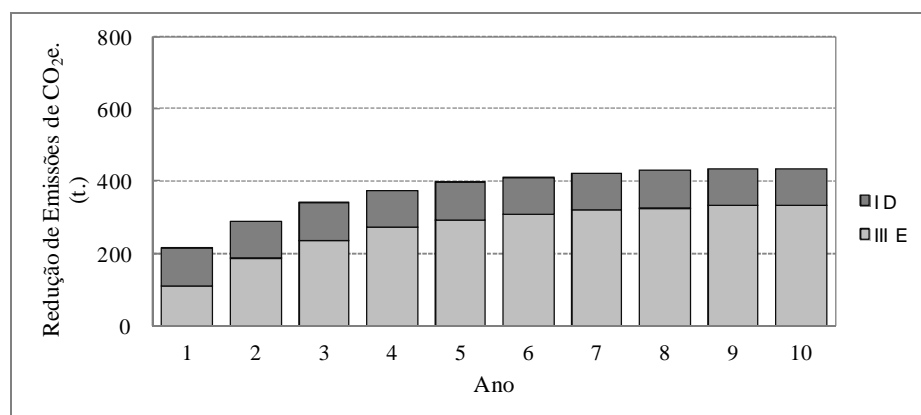


Figura 6-16: Redução das emissões de GEE (t.CO₂e) para o Cenário 2-a.

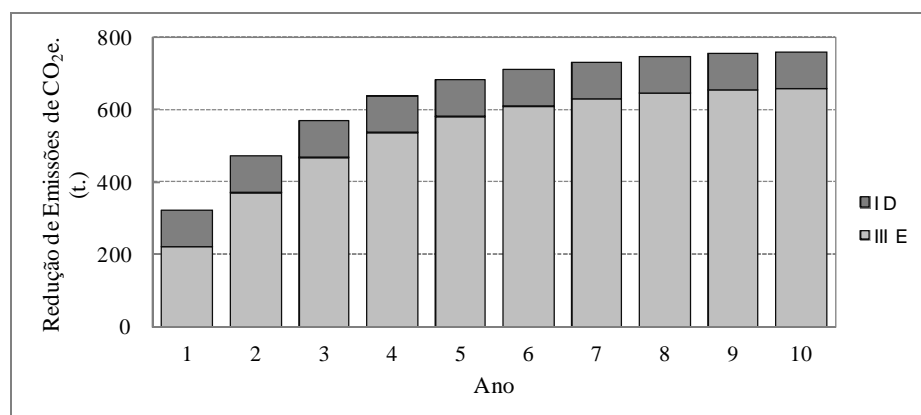


Figura 6-17: Redução das emissões de GEE (t.CO₂e) para o Cenário 2-b.

As metodologias e ferramentas empregadas pelo UNFCCC são de grande interesse e utilidade como apoio para a elaboração e cálculo das reduções de emissões de GEE em diversos projetos ao redor do mundo. Entretanto pode-se avaliar uma incoerência conceitual na metodologia III-E, visto que a ferramenta “*Emissions from solid waste disposal sites*” atribui reduções no projeto que não podem ser consideradas verdadeiras. A rigor, o Cenário 1 e o Cenário 2-a deveriam apresentar a mesma redução nas emissões, visto que a variação da massa encaminhada ao aterro sanitário corresponde a fração de água, a qual não é passível de degradação anaeróbia e por conseguinte não contribui para as emissões de GEE. A revisão da metodologia deveria considerar uma alteração do cálculo do DOC_j (fração de carbono orgânico degradável).

A venda dos créditos de carbono segue a dinâmica de mercado. Até a crise mundial iniciada no final de 2008, o preço da tonelada de carbono chegou a ser comercializada a 30 € em janeiro de 2009 a cotação despencou para valores que oscilavam em torno de 14 €. Para a estimativa do benefício econômico ao SAAE foi considerado como base o dia 27/09/2013, para essa data o preço do crédito de carbono foi de 7,72 €t CO₂e⁻¹ ou R\$ 23,6 por tonelada de CO₂e. (European Energy Exchange, 2013).

O projeto de venda de créditos de carbono pode ser submetido para um período base de 10 anos. Vale ressaltar que a redução na geração de GEE é apenas validada mediante monitoramento das emissões ao longo da efetivação da atividade de projeto.

O ganho líquido para a autarquia seria decorrente da receita, considerando-se ainda os gastos com a submissão do projeto, compra de equipamentos para a implantação da atividade de projeto, assim como investimento em equipamentos para monitoramento, dentre outros. A Tabela 6-18 apresenta um resumo dos benefícios econômicos que a submissão dos projetos de crédito de carbono poderiam fornecer à companhia de saneamento para o período de dez anos.

Tabela 6-18: Resumo das características dos cenários estudados e a receita bruta obtida com a venda dos créditos de carbono.

Cenário	Lodo não enviado ao aterro (t.ano ⁻¹)	Energia elétrica fornecida à rede de distribuição (kWh.ano ⁻¹)	Créditos de carbono (t. CO ₂ e.) ¹	Receita bruta (R\$) ¹
1	1.372	128.480	12.691	299.501
2-a	1.187	333.610	3.741	88.288
2-b	1.030	333.610	6.392	150.851

¹para o período de 10 anos.

6.4 Conclusões

- A caracterização sistemática da produção e do poder calorífico do biogás e do lodo produzidos na ETE *Laboreaux*, na cidade de Itabira/MG, possibilitou o desenvolvimento de balanços de massa e de energia que demonstraram o potencial de aproveitamento desses subprodutos do tratamento como fonte de energia renovável, em especial, nas próprias dependências da ETE.
- O lodo desidratado de filtro prensa, se for submetido à secagem para melhoria do poder calorífico, pode ser usado como um combustível para abastecer consumidores na região, em substituição da lenha ou do carvão. Já o uso do biogás deve ser feito na própria ETE. O Cenário 1 deste estudo refere-se ao emprego do biogás para secagem do lodo até atingir um valor final de 10% de umidade, e o biogás excedente sendo então usado para gerar eletricidade em motores de combustão interna. O Cenário 2 refere-se ao uso integral do biogás para geração elétrica em motor, sendo os gases de escapamento usados para a secagem do lodo ao máximo possível.
- O primeiro cenário se destaca pela eliminação do envio do lodo ao aterro sanitário, enquanto o segundo cenário apresenta elevado potencial de geração de eletricidade em benefício da ETE.

- De forma geral, o estudo das alternativas para o aproveitamento energético dos subprodutos do tratamento devem levar em conta as necessidades e realidade das estações. Os balanços de massa e energia são primordiais para a tomada de decisão, e podem ser usados para gerar dados necessários aos estudos de viabilidade econômica de projetos de aproveitamento energético que sejam tecnicamente viáveis para cada ETE individualmente.
- O biogás é o principal subproduto no que se refere o potencial de geração de energia na ETE *Laboreaux*. O potencial energético dos subprodutos lodo e biogás foi de 7.518 MJ.d^{-1} e 10.962 MJ.d^{-1} , respectivamente.
- A proposição de atividades de projeto e sua submissão junto ao UNFCCC, com vistas à obtenção de créditos de carbono, pode trazer benefícios econômicos e ambientais para a ETE estudada, o que foi mais evidente no Cenário 1.

7 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA A ESTIMATIVA DO BALANÇO ENERGÉTICO EM ETES OPERANDO COM REATORES UASB

7.1 Introdução

Sabe-se que o aproveitamento energético do biogás ainda é incipiente no Brasil, sendo que a grande maioria dos aterros sanitários e das estações de tratamento de esgoto apenas coletam e queimam o biogás gerado. Em adição, o lodo excedente tem sido encaminhado a aterros sanitários e o potencial de recuperação de energia não é explorado pelas estações de tratamento.

A sustentabilidade energética é um dos principais pontos a ser desenvolvido no futuro das ETES, e para tanto são necessários estudos que levem em consideração: (i) o potencial energético dos subprodutos do tratamento de esgoto; (ii) a demanda de energia para o funcionamento pleno das ETES; e (iii) o potencial de geração de energia em benefício da estação, seja ela na forma térmica ou elétrica, dependendo da necessidade e demanda local.

O potencial de geração de energia em ETES é função de diversos fatores, dentre os quais influenciam positivamente no potencial energético do biogás: maiores concentrações de esgoto, maiores eficiências de remoção de DQO e menores índices de perda de metano. Para o lodo, os fatores que influenciam positivamente referem-se basicamente aos baixos teores de cinzas, e elevada presença de carbono e hidrogênio em sua composição. No que pesem as características físicas das ETES, o gasto energético com estações elevatórias de esgoto representam grande influência nos gastos com eletricidade, e como consequência interferem na energia disponível a partir do aproveitamento energético dos subprodutos, seja qual for a tecnologia de conversão.

Estima-se que os gastos com energia em ETES podem corresponder até 30% da demanda total da estação (operação e manutenção), sendo que as atividades que demandam maior consumo de eletricidade correspondem à operação das unidades de tratamento seguida do bombeamento do esgoto em estações elevatórias (CARNS, 2005). Em sistemas anaeróbios o consumo de eletricidade para a operação de EEE em relação aos gastos para operação das unidades de tratamento é mais elevado quando comparado com a variante aeróbia.

A geração de energia livre, elétrica ou térmica, será maior, quanto maior for a diferença entre o potencial e o consumo de energia pela estação. Parte-se do princípio que a energia gerada pelos subprodutos pode ter como objetivo principal a geração de eletricidade ou priorizar

processo de cogeração. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para o prognóstico das diversas condições de operação das estações, facilitando, assim, até mesmo a tomada de decisão quanto à forma de gerenciamento dos subprodutos lodo e biogás, visando potencializar os benefícios ambientais, sociais e econômicos destes nas ETEs.

Nesse contexto, o objetivo específico deste capítulo foi desenvolver um modelo matemático para a estimativa do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo excedente de reatores UASB. O estudo também previu o cálculo da energia disponível a ser aproveitada em benefício da ETE e demais usos. A estimativa considera o consumo de eletricidade das estações elevatórias de esgoto, as quais representam os maiores gastos energéticos das plantas de tratamento que utilizam reatores anaeróbios e sistemas não mecanizados de pós-tratamento.

7.2 Material e Métodos

O modelo matemático foi estruturado em uma planilha eletrônica, tendo como premissas básicas a simplicidade e o reduzido número de dados de entrada.

De maneira geral, o modelo matemático foi desenvolvido considerando três cenários que acarretam em potenciais de recuperação dos subprodutos biogás e lodo excedente: (i) pior cenário; (ii) cenário típico e (iii) melhor cenário. A Tabela 7-1 descreve as principais características adotadas para o pior e melhor cenários. As condições intermediárias aos cenários apresentados correspondem ao cenário típico.

Tabela 7-1: Descrição das características do pior e melhor cenários para o modelo matemático relativos ao lodo e biogás gerados em reatores UASB.

Cenário	Pior cenário	Melhor cenário
Aspectos relacionados ao biogás ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas operando com esgoto mais diluído • Maiores concentrações de sulfato no afluente • Menor eficiência de remoção de DQO • Maiores índices de perda de metano 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas operando com esgoto mais concentrados • Menores concentrações de sulfato no afluente • Maior eficiência de remoção de DQO • Menores índices de perda de metano
Aspectos relacionados ao lodo	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada presença de cinzas • Baixa concentração de hidrogênio • Baixo teor de sólidos fixos 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzida presença de cinzas • Elevada concentração de hidrogênio • Elevado teor de sólidos fixos

¹ Lobato (2011)

7.2.1 Dados de entrada do modelo

Os dados de entrada necessários aos cálculos do potencial energético do biogás são: população contribuinte (P), contribuição per capita de esgoto (QPC), contribuição per capita de DQO (QPC_{DQO}), eficiência de remoção de DQO (E_{DQO}), concentração de sulfato no afluente (C_{SO_4}), eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}), temperatura operacional do reator (T) e percentual de CH_4 no biogás (C_{CH_4}). O procedimento de cálculo da vazão e do potencial energético do biogás é detalhado por LOBATO (2011).

Para a parcela referente à estimativa do potencial energético do lodo foram levados em consideração: coeficiente de produção de lodo, massa específica, concentração de sólidos secos, captura de sólidos na unidade de desidratação, concentração de sólidos no lodo desidratado, massa específica do lodo desidratado e composição elementar do lodo. O modelo previu a estimativa do potencial de geração de energia considerando duas alternativas de desidratação: filtro prensa e centrífuga. A composição elementar do lodo foi estabelecida a partir da análise dos dados de caracterização de lodo apresentados na Tabela 5-1 A Tabela 7-2 apresenta os dados de entrada utilizados no modelo para a estimativa do potencial energético dos subprodutos lodo e biogás.

A variabilidade nos dados de entrada apresentada por faixas de valores (Tabela 7-2) foi incorporada à interpretação dos resultados do modelo, através da Análise da Incerteza, a qual se baseia na execução de um elevado número de simulações (nesse caso 250 simulações para cada cenário), configurando a denominada simulação Monte Carlo. Em cada corrida do modelo é selecionado um conjunto diferente de valores dos dados de entrada sobre os quais existe incerteza. Desta forma os dados de entrada foram gerados aleatoriamente segundo a distribuição uniforme e dentro de faixas pré-estabelecidas.

7.2.2 Protocolo para o cálculo do balanço energético das ETES

Para o cálculo do balanço energético de ETES operando com reatores UASB, seguiu-se o procedimento apresentado de forma resumida a seguir:

(i) Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo: este estudo contempla o levantamento do potencial energético dos subprodutos gerados em ETES de diferentes portes.

(ii) Estimativa do consumo energético das ETES: O consumo de energia pelas ETES foi relacionado principalmente com a demanda de eletricidade pelas estações elevatórias de

chegada, desconsiderando-se outras demandas, a exemplo de unidades de pós-tratamento, desidratação, dentre outras.

(iii) Produção líquida de energia em benefício das ETES: A produção líquida, ou seja, a energia elétrica livre pode ser calculada pela diferença entre a eletricidade disponível, estimada pela diferença entre o potencial energético a partir do biogás e o consumo estimado para suprir os gastos energéticos na ETE.

Tabela 7-2: Dados de entrada para biogás e lodo considerados no modelo.

Componente	Parâmetro	Unidade	Cenário		
			Pior	Típica	Melhor
BIOGÁS	População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000		
	Contribuição per capita de esgoto (OPC)	L.hab ⁻¹ .d ⁻¹	120 a 220		
	Contribuição per capita de DQO (OPC _{DQO})	L.hab ⁻¹ .d ⁻¹	90 a 110		
	Eficiência de remoção de DQO (E _{DQO})	%	60	65	70
	Concentração de sulfato no afluente (C _{SO4})	kgSO ₄ .m ⁻³	80	60	40
	Eficiência de redução de sulfato (E _{SO4})	%	80	75	70
	Temperatura operacional do reator (T)	°C	20 a 30		
	Percentual de CH ₄ no biogás (C _{CH4})	%	70	75	80
Lodo gerado no reator UASB					
	Massa específica	kg.m ⁻³	1.020 a 1.030		
	Concentração de sólidos secos	%	3 a 6		
	Coefficiente de produção de sólidos	kg SS.kgDQO _{aplicada} ⁻¹	0,18		
Lodo gerado na unidade de desidratação (filtro prensa, leito de secagem e centrífuga)					
LODO EXCEDENTE	Captura de sólidos – centrífuga	%	90 a 95		
	Captura de sólidos – filtro prensa	%	90 a 98		
	Concentração do lodo desidratado - centrífuga	%	20 a 25		
	Concentração do lodo desidratado – filtro prensa	%	29 a 35		
	Massa específica do lodo desidratado	kg.m ⁻³	1.050 a 1.080		
	Carbono (C) ¹	%	18	30	38
	Hidrogênio (H) ¹	%	3,6	4,4	6,1
	Nitrogênio (N) ¹	%	1,6	1,9	2,5
	Enxofre (S) ¹	%	0,8	1,2	1,4
	Oxigênio (O) ¹	%	21	22	24
Cinzas ¹	%	55	40,5	28	

¹ em base seca **Fonte:** Adaptado de Lobato (2011) e Andreoli (2001)

7.2.2.1 Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo

O potencial de recuperação energético do biogás seguiu metodologia descrita por Lobato (2011). Para o estudo do potencial energético do lodo gerado em reatores UASB fez-se necessário avaliar inicialmente a quantidade de lodo produzido pelo reator anaeróbico, o item 1.2.1.1 apresenta o detalhamento deste procedimento e a Tabela 7-3 demonstra um resumo das principais equações utilizadas para este cálculo.

Após a determinação da produção de lodo, determinou-se a massa de lodo gerada após a etapa de desidratação. As simulações consideraram as alternativas de filtro prensa e centrífuga. Para este cálculo foi utilizado a captura de sólidos.

Tabela 7-3: Equações para cálculo da produção de lodo anaeróbio no reator UASB.

Parcelas	Equações	Observações
Reator UASB		
Carga DQO aplicada	$DQO_{aplic} = Pop \times QPC_{DQO}$	DQO_{aplic} = Carga DQO afluyente (kgDQO.d ⁻¹) Pop = População contribuinte QPC_{DQO} = Contribuição per capita de DQO (kg.hab ⁻¹ .d ⁻¹)
Produção de lodo	$P_{lodo} = DQO_{aplic} \times Y_{lodo}$	P_{lodo} = Produção de lodo no reator UASB (kgSS.d ⁻¹) DQO_{aplic} = Carga DQO afluyente (kgDQO.d ⁻¹) Y_{lodo} = Coeficiente de produção de lodo (0,18 kgSS.kgDQO _{aplic} ⁻¹)
Vazão de lodo	$Q_{lodo} = \frac{P_{lodo}}{\left[\frac{C(\%)}{100}\right] \times \rho_{lodo}}$	Q_{lodo} = Vazão de lodo (m ³ .d ⁻¹) P_{lodo} = Produção de lodo (kgSS.d ⁻¹) C = Concentração de sólidos (%) ρ_{lodo} = Massa específica do lodo (kg.m ⁻³)
Unidades de desidratação		
Produção de lodo	$P_{lodo'} = \frac{E_{sólidos}}{100} \times P_{lodo}$	$P_{lodo'}$ = Produção de sólidos efluente à unidade de desidratação (kgSS.d ⁻¹) $E_{sólidos}$ = Captura de sólidos pela unidade de desidratação (%) P_{lodo} = Produção de lodo no reator UASB (kgSS.d ⁻¹)
Produção total de lodo	$P_{tot} = \frac{P_{lodo'} / F}{\left[\frac{C'(\%)}{100}\right]}$	P_{tot} = Produção total de lodo (kg ST.d ⁻¹) F = relação entre SV/ST $P_{lodo'}$ = Produção de lodo efluente à unidade de desidratação (kgSS.d ⁻¹) C' = Concentração de sólidos no lodo desidratado (%).
Energia contida no lodo		
Poder Calorífico Superior	$PCS_s = [337,3 \times C + 1.418,9 \times (H - O/8) + 93,1 \times S + 23,3 \times N] / 1.000$	PCS = Poder calorífico superior, (MJ.kg ⁻¹), b.s. C = Teor de carbono (%), b.s. H = Teor de hidrogênio (%), b.s. O = Teor de oxigênio (%), b.s. S = Teor de enxofre (%), b.s. N = Teor de nitrogênio (%), b.s.
Potencial Calorífico Inferior	$PCI_t = [(PCS_s - \lambda \times (r + 0,09 \times H_s)) \times (100 - W_t) / 100]$	PCI _t = Potencial calorífico inferior (MJ.kg ⁻¹), b.t PCS _s = Potencial calorífico superior (MJ.kg ⁻¹), b.s λ = calor latente da água (2,31 MJ.kg ⁻¹ a 25°C) r = Razão entre teor de umidade e teor de sólidos no lodo desidratado (-) H_s = Teor de hidrogênio (%), b.s W_t = Teor de sólidos no lodo desidratado (%)
Potencial energético do lodo	$PE_{lodo} = PCI_t \times P_{tot}$	PE _{lodo} = Potencial energético do lodo (MJ.d ⁻¹) PCI _t = Potencial calorífico inferior (MJ.kg ⁻¹), b.t P_{tot} = Produção total de lodo (kg ST.d ⁻¹)
Potencial energético da ETE		
Potencial energético total da ETE	$PE_{Total} = PE_{lodo} + PE_{biogás}$	PE _{total} = Potencial energético total (MJ.d ⁻¹) PE _{lodo} = Potencial energético do lodo (MJ.d ⁻¹) PE _{biogás} = Potencial energético do biogás (MJ.d ⁻¹)

b.s: base seca, b.t: base de trabalho

De posse da quantidade de lodo gerado na unidade de desidratação, o potencial energético é calculado, na forma de poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI). Estas parcelas são detalhadas no item 3.2.1.2.

7.2.3 Validação do modelo de Monte Carlo

De acordo com estudos realizados por Lobato (2011), o modelo proposto para as estimativas da produção de biogás (vazão de esgoto afluyente, produção de biogás e percentual de CH₄), bem como da produção de metano e do potencial de geração de energia) apresenta-se calibrado, o que garante que os dados simulados referentes à produção de biogás estão

coerentes com os dados típicos de monitoramento de ETE de diferentes portes, em funcionamento. A validação foi realizada através dos dados de ETES em escala piloto e demonstração (Centro de pesquisa e Treinamento em Saneamento - CePTS), reatores UASB em escala real (ETE *Laboreaux*, Itabira e ETE Onça, Belo Horizonte)

Outra forma de validação do modelo se refere ao ajuste da produção e do potencial energético do lodo através da simulação de Monte Carlo. Para tanto foram utilizados dados da produção e potencial energético de lodo da ETE *Laboreaux* (Itabira-MG) e ETE Nova Contagem (Contagem-MG).

As ETES apresentam fluxograma simplificado, compreendendo unidades de tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), unidades de tratamento biológico anaeróbio e aeróbio em seqüência (reator UASB, filtro biológico percolador - FBP e decantador secundário - DS). O lodo dos decantadores secundários é recirculado aos reatores UASB, onde é adensado e estabilizado, seguindo, após o descarte, para a etapa de desidratação e posterior disposição final. A população de início de plano e a vazão afluente às ETES *Laboreaux* e Nova Contagem correspondem a 70.000 hab, 1.700 L.s⁻¹ e 18.258 hab, 68 L.s⁻¹, respectivamente. A validação do modelo para filtro prensa foi realizado para os dados obtidos na ETE *Laboreaux*, enquanto que os resultados para centrífuga foram comparados com os dados provenientes da ETE Nova Contagem.

O potencial energético das ETES foi a partir da caracterização de amostras coletadas de forma composta e encaminhadas para o laboratório a fim de se determinar as composição elementar e o poder calorífico. Para a determinação do potencial energético do lodo fez-se uso de dados secundários fornecidos pelas companhias de saneamento da quantidade de material desidratado encaminhado para os aterro sanitários.

7.2.3.1 Estimativa do consumo energético e produção líquida de eletricidade para as ETES

A estimativa do consumo energético nas ETES foi realizada considerando-se a seguinte classificação:

Situação 1: ETES com a chegada de esgoto por gravidade até o bombeamento a uma altura de 2 m.

Situação 2: nesta classe se enquadram ETES com EEE de chegada com altura de bombeamento (H_b) entre 5 a 7 metros.

Situação 3: Para este caso, ETes com EEE de chegada com altura de bombeamento (H_b) de 14 a 16 metros.

Um esquema ilustrativo das três situações estudadas é apresentado na Figura 7-1.

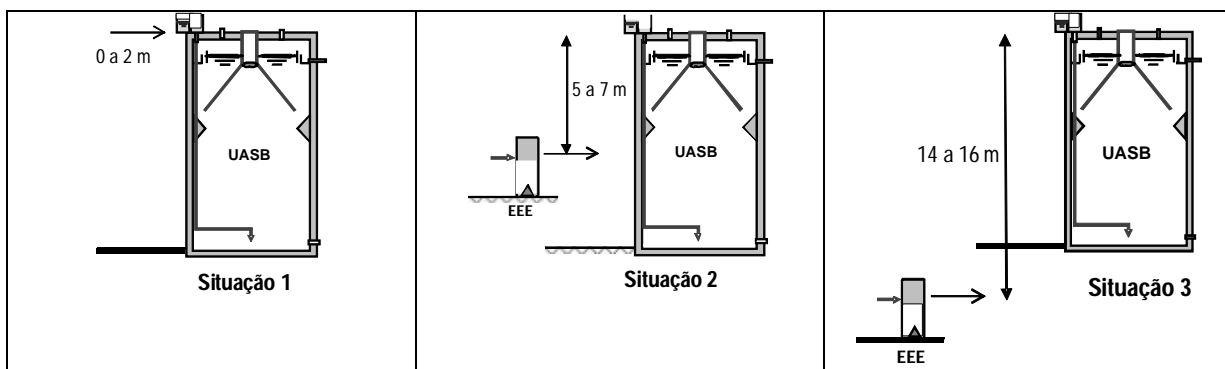


Figura 7-1: Cenários para a determinação do consumo energético em ETes, com o bombeamento de esgoto nas faixas de: 0 a 2 m (situação 1), 5 a 7 m (situação 2) e 14 a 16 m (situação 3).

A Tabela 7-4 apresenta os dados de entrada utilizados para a estimativa do consumo energético nas ETes para as três situações estudadas. Como já detalhado no item 7.2.1, as estimativas do consumo e a determinação da energia líquida para uso em benefício das ETes também segue a simulação Monte Carlo.

Tabela 7-4: Dados de entrada utilizados para a estimativa do consumo energético e produção líquida de energia nas ETes.

Parâmetro	Unidade	Situação		
		0 a 2 m	5 a 7 m	14 a 16 m
Aspectos relativos à geração de biogás				
População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000		
Contribuição per capita de esgoto (QPC)	L.hab ⁻¹ .d ⁻¹	120 a 220		
Aspectos relativos ao bombeamento de esgoto				
Peso específico do esgoto	kg.m ⁻³	1.000		
Eficiência do conjunto moto-bomba	%	0,55 a 0,65		
Eficiência do motorgerador na geração de eletricidade	%	30		

Considerou-se que a principal parcela envolvida com a energia elétrica demandada (consumida) pelas ETes se refere com o gasto energético para o bombeamento do esgoto nas EEE. A equação (7-1) apresenta o cálculo da potência requerida para o sistema de bombeamento.

$$P_B = \frac{\gamma \times g \times Q \times H_b}{\eta_b} \quad (7-1)$$

Em que:

P_B = Potência da bomba (kW);

γ = Peso específico da água (1.000 kg.m^{-3});

g = aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m.s}^{-2}$);

Q = Vazão de esgoto ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

H_b = altura de bombeamento (m);

η_b = Rendimento da bomba (%).

Ao se considerar a operação do sistema de bombas para o recalque de esgoto ao longo de todo o dia, a energia consumida para a operação das EEE corresponde ao valor obtido na equação (7-1) multiplicado por 24 horas, resultando no valor de eletricidade fornecido em kWh.d^{-1} .

7.3 Resultados e discussão

7.3.1 Simulação do potencial energético de ETes com população contribuinte de até 1.000.000 habitantes

7.3.1.1 Potencial energético do biogás

A partir do modelo foram previstos o potencial energético do lodo e do biogás para ETes com população contribuinte de até 1 milhão de habitantes. A Figura 7-2 e Figura 7-3 apresentam a produção estimada de biogás e o potencial energético do biogás em função de diferentes vazões contribuintes. A Figura 7-4 apresenta o potencial do biogás para população de até 1 milhão de habitantes. A Tabela 7-5 apresenta algumas relações unitárias para as três situações avaliadas.

De acordo com os resultados simulados, pode-se observar uma variação na produção de energia para valores médios dentro da faixa de $1,5$ a $3,0 \text{ MJ.m}^{-3}$ de esgoto tratado, e uma produção por habitante variando de $0,2$ a $0,5 \text{ MJ.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$.

Tabela 7-5: Relações unitárias de produção de metano e de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico.

Relação Unitária	Unidade	Pior cenário			Cenário típico			Melhor cenário		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Produção esperada/teórica de CH_4	%	0,6	0,3	0,5	0,7	0,5	0,6	0,8	0,7	0,8
Produção por habitante	$\text{kWh.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Produção por volume de esgoto	kWh.m^{-3}	0,8	0,2	0,4	1,1	0,3	0,6	1,3	0,5	0,8
Produção por habitante	$\text{MJ.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$	0,4	0,1	0,2	0,5	0,3	0,4	0,6	0,4	0,5
Produção por volume de esgoto	MJ.m^{-3}	2,9	0,6	1,5	4,0	1,2	2,3	4,6	1,8	3,0

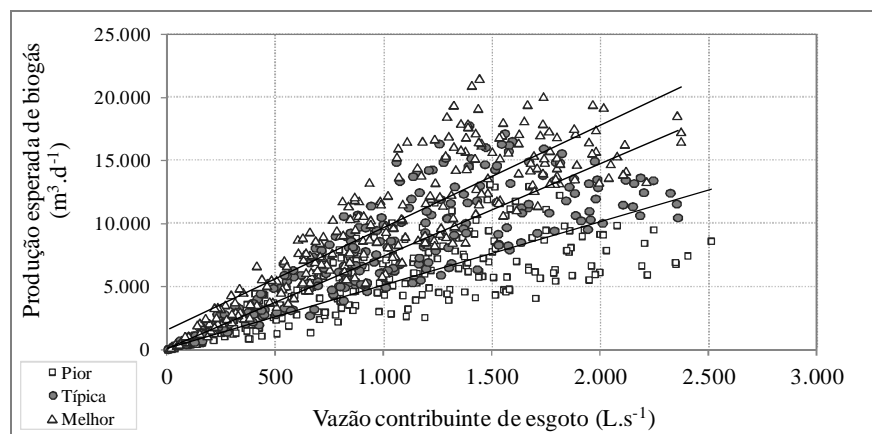


Figura 7-2: Estimativa da produção de biogás em reatores UASB tratando esgoto tipicamente doméstico em função de vazão afluyente de até 2.500 L.s⁻¹.

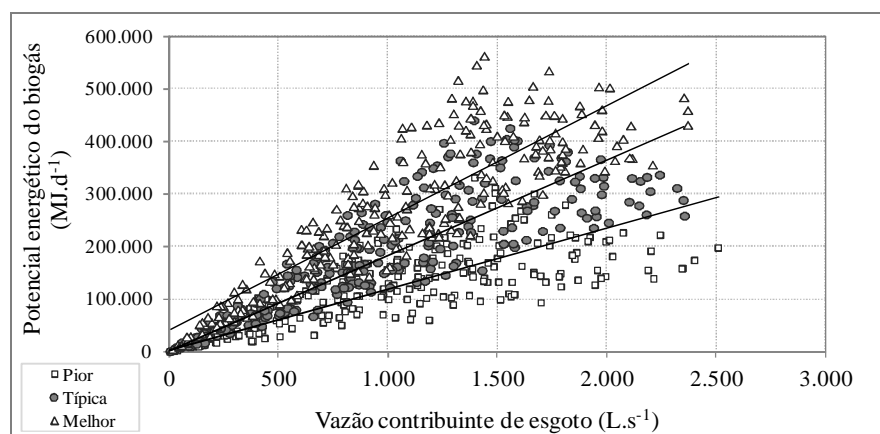


Figura 7-3: Estimativa do potencial energético do biogás em reatores UASB tratando esgoto em função de vazão afluyente de até 2.500 L.s⁻¹.

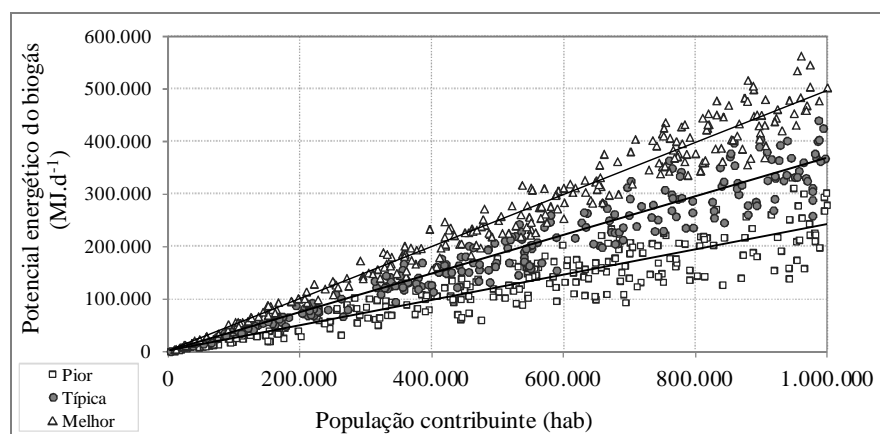


Figura 7-4: Estimativa do potencial energético do biogás em reatores UASB tratando esgoto em função para população de até 1 milhão de habitantes.

A Tabela 7-6 apresenta um resumo dos dados relacionados com a regressão linear para os dados apresentados nas figuras anteriores. Com as informações apresentadas, pode-se apreender que a relação entre a população (hab.) e a produção potencial de energia pelo biogás (MJ.d⁻¹) apresentou um melhor coeficiente de determinação dentre as relações

estudadas. Para o melhor cenário, o coeficiente de determinação foi de 0,962, ou seja, 96,2% dos dados observados para potencial energético podem ser explicados pela variável população. Em adição, para as relações propostas, observa-se que o coeficiente de determinação é maior para o cenário mais favorável.

Tabela 7-6: Resumo com as informações sobre a regressão linear para diversas relações propostas.

Relação	Cenário					
	Pior		Típico		Melhor	
	Equação	Coefficiente (R ²)	Equação	Coefficiente (R ²)	Equação	Coefficiente (R ²)
L.S. ⁻¹ x m ³ .d ⁻¹	y = 5,0515x	0,511	y = 7,3576x	0,696	y = 8,156x + 1459,9	0,776
L.S. ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	y = 116,37x	0,514	y = 181,74x	0,698	y = 214,68x + 38417	0,776
hab. x MJ.d ⁻¹	y = 0,2429x	0,838	y = 0,3678x	0,933	y = 0,496x - 470,29	0,962

7.3.1.2 Potencial energético do lodo

A Figura 7-5 apresenta a estimativa do potencial energético do lodo desidratado em função da população para os processos de desidratação: filtro prensa e centrífuga.

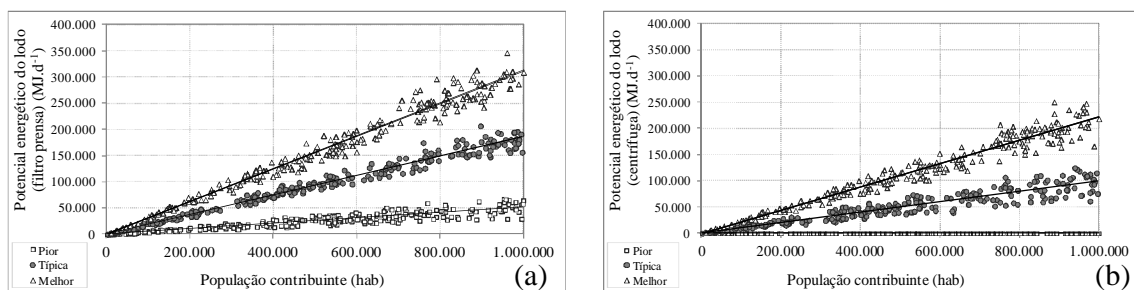


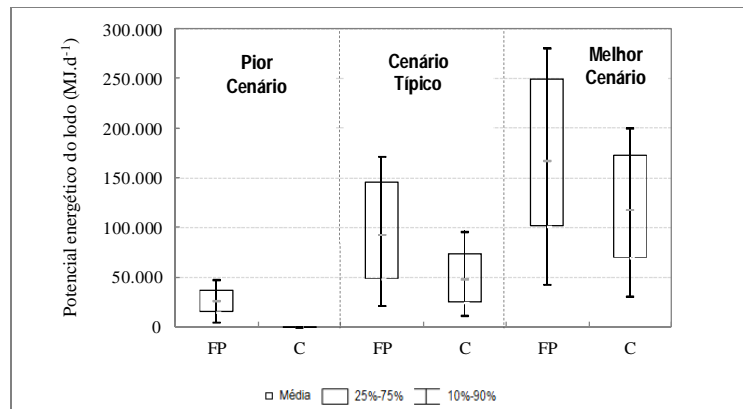
Figura 7-5: Estimativa do potencial energético do lodo em reatores UASB tratando esgoto após a desidratação em (a) filtro prensa e (b) centrífuga.

A Tabela 7-7 apresenta a estatística descritiva do potencial energético do lodo para as duas alternativas estudadas. Observa-se que para a centrífuga o potencial de energia é inferior ao filtro prensa, devido o teor de umidade, o qual contribui negativamente pela redução da energia disponível contida no lodo desidratado. A Figura 7-6 apresenta o gráfico box-plot com a variação do potencial energético do lodo desidratado considerando os diferentes cenários e unidades de desidratação. A Tabela 7-8 apresenta um resumo com as principais informações sobre regressão linear para diversas relações referentes ao lodo.

Tabela 7-7: Estatística descritiva do potencial de geração de energia do lodo, em MJ.d⁻¹, para diferentes cenários e condições de desidratação.

Cenário	Pior		Típico		Melhor	
	FP	C	FP	C	FP	C
Mín	92	0	506	217	2.901	1.940
Máx	67.470	0	207.354	124.886	347.339	250.703
Média	26.795	0	95.952	51.250	166.462	118.017

FP: Filtro prensa, C: Centrífuga.



FP: Filtro prensa, C: Centrífuga.

Figura 7-6: Box plot do potencial energético do lodo em função das características do lodo e das unidades de desidratação.

Tabela 7-8: Resumo com as informações sobre regressão linear para diversas relações propostas referentes ao lodo.

Unidade	Relação	Cenário					
		Pior		Típico		Melhor	
		Equação	(R ²)	Equação	(R ²)	Equação	(R ²)
F.P	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	y = 25,832x	0,721	y = 94x	0,866	y = 140,65x + 18.962	0,856
	hab x MJ.d ⁻¹	y = 0,0523x	0,826	y = 0,1869x	0,979	y = 0,3117x + 560,36	0,976
C	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	y = 0	-	y = 50,182x	0,751	y = 100,39x + 12.736	0,837
	hab x MJ.d ⁻¹	y = 0	-	y = 0,1x	0,873	y = 0,2227x - 506,41	0,956

7.3.2 Potencial energético global dos subprodutos da ETE

Com o objetivo de avaliar o potencial energético do biogás e lodo para as simulações realizadas, apresenta-se na Figura 7-7 o potencial energético total em função de populações contribuintes de até 1 milhão de habitantes quando a desidratação é realizada por filtro prensa. A Figura 7-8 apresenta a mesma análise para a desidratação por centrífuga. A Tabela 7-9 apresenta a regressão linear do potencial energético total da ETE (MJ.d⁻¹) em função da população contribuinte (hab), para as diferentes tecnologias de desidratação.

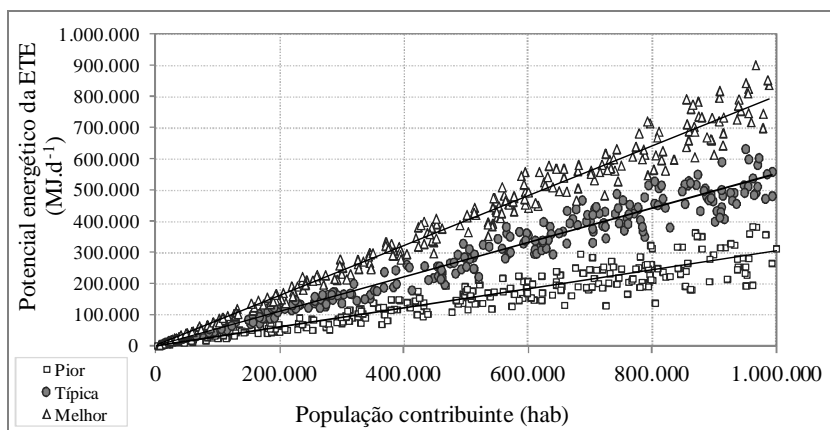


Figura 7-7: Potencial energético total de ETE com até 1.000.000 habitantes com o uso de filtro prensa como unidade de desidratação.

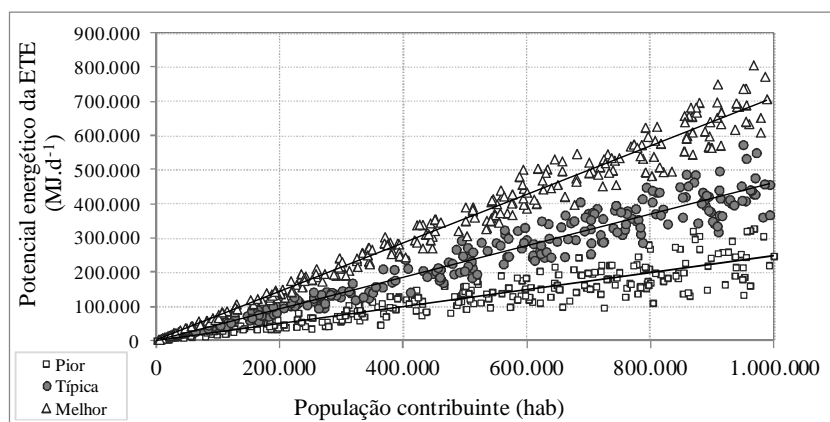


Figura 7-8: Potencial energético total de ETE com até 1.000.000 habitantes com o uso de centrífuga como unidade de desidratação.

A Tabela 7-10 apresenta algumas relações que fazem referência ao potencial total da estação, considerando a média dos valores para ETEs com contribuição populacional de até 1.000.000 habitantes. Dos dados, apreende-se que o biogás apresenta maior contribuição no potencial energético global das ETEs para desidratação realizada por filtro prensa. Em adição, com a melhoria das características do lodo ao longo dos cenários, observa-se que o subproduto lodo ganha destaque, representando uma maior contribuição na geração de energia nas ETEs.

Tabela 7-9: Regressão linear para o potencial energético total da ETE (MJ.d⁻¹) em função da população contribuinte (hab), para as diferentes alternativas de desidratação.

Unidade	Cenário					
	Pior		Típico		Melhor	
	Equação	(R ²)	Equação	(R ²)	Equação	(R ²)
F.P	$y = 0,3036x$	0,8609	$y = 0,5517x$	0,9577	$y = 0,8009x + 1334$	0,9766
C	$y = 0,2503x$	0,8135	$y = 0,4636x$	0,9381	$y = 0,7084x + 1714,7$	0,9744

FP: Filtro prensa, LS: Leito de secagem, C: Centrífuga.

Tabela 7-10: Relações entre o potencial gerado do biogás e lodo, para diferentes cenários e condições de desidratação.

Cenário	Pior		Típico		Melhor		
	Unidade	FP	C	FP	C	FP	C
Potencial biogás/total (%)		0,8	1,0	0,7	0,8	0,6	0,7
Potencial lodo/total (%)		0,2	0,0	0,3	0,2	0,4	0,3
Potencial biogás/lodo		4,0	-	2,3	4,0	1,5	2,3

FP: Filtro prensa, LS: Leito de secagem, C: Centrífuga.

7.3.3 Consumo e produção líquida de energia nas ETEs

A produção líquida de eletricidade para uso em ETEs quando da recuperação do biogás para fins energéticos varia de acordo com o consumo de energia elétrica pelas estações elevatórias de esgoto. A Figura 7-9 apresenta dados da potência requerida pelas EEE para as três situações estudadas

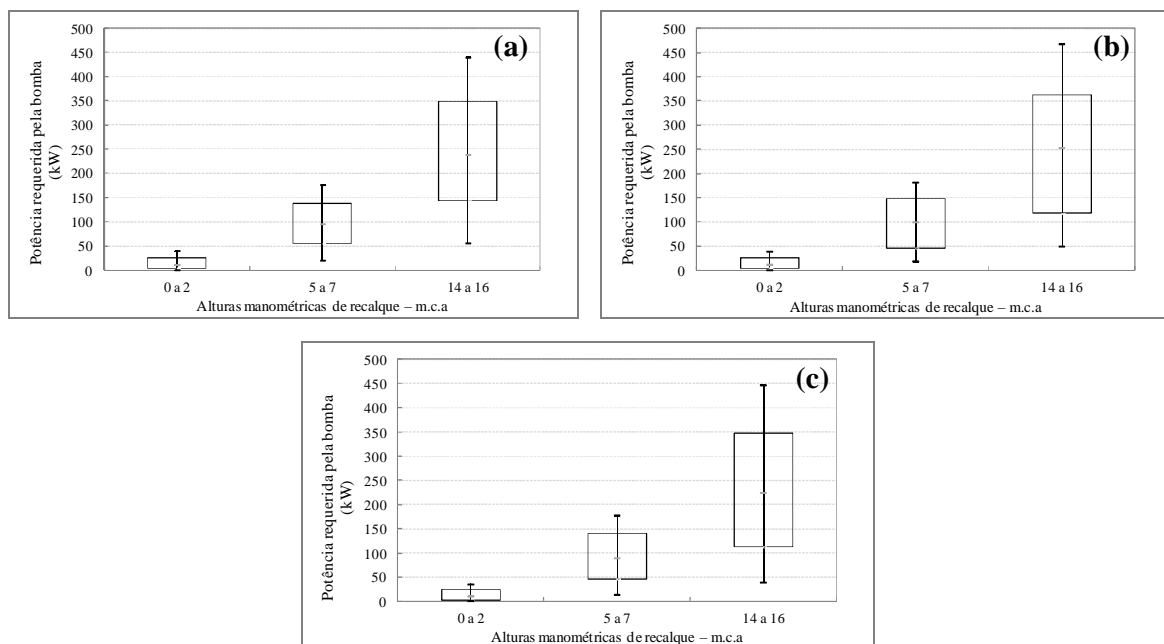


Figura 7-9: Potência requerida pelas EEE para o bombeamento de esgoto na (a) pior cenário; (b) cenário típico; e (c) melhor cenário.

De acordo com Hiperwatt (2011)⁶ o consumo específico para bombas elevatórias de esgoto é de $0,005 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$, o que corresponde ao gasto de 5Wh para a elevação de 1m^3 de esgoto a uma altura de 1 metro. Para os cenários estudados, o consumo específico apresentado também foi de $0,005 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$.

A Figura 7-10 apresenta a razão entre a energia consumida para o bombeamento do esgoto e a eletricidade gerada por um equipamento de conversão, a exemplo de um motor de combustão

⁶ Palestra apresentada por Eng. Christoph Platzer do HIPERWATT High Performance Energy Recovering Wastewater Treatment Technology no 1º. Seminário Internacional sobre Sustentabilidade em Estações de Tratamento de Esgotos

interna alimentado com biogás, operando com uma eficiência de 30%, para o pior, típico e melhor cenários, respectivamente. Ao analisar os dados apreende-se que para a condição menos favorável (pior cenário e altura de bombeamento de 14-16 m), a relação média indica que cerca de 55% da energia gerada seria consumida pela elevatória de chegada, disponibilizando apenas 45%, em média, para outros usos na ETE, a exemplo do consumo de eletricidade nas unidades de tratamento preliminar, desidratação, elevatórias de recirculação, equipamentos de laboratório e iluminação.

Para o melhor cenário, independente das condições de bombeamento, pelo menos 52% da eletricidade gerada a partir do biogás está disponível para o emprego em outras atividades nas estações, em função da relação entre o consumo e a geração de energia de 0,48, como observado na Tabela 7-11.

Tabela 7-11: Estatística descritiva para a relação entre a energia elétrica consumida pelas elevatórias de esgoto e a energia útil gerada pelo biogás.

Estatística	Pior			Típico			Melhor		
	0 a 2 m	5 a 7 m	14 a 16 m	0 a 2 m	5 a 7 m	14 a 16 m	0 a 2 m	5 a 7 m	14 a 16 m
Mínimo	0,00	0,09	0,25	0,00	0,07	0,22	0,00	0,06	0,17
Máximo	0,15	0,59	1,52	0,09	0,29	0,77	0,05	0,21	0,48
Mediana	0,04	0,22	0,55	0,02	0,15	0,39	0,02	0,11	0,29

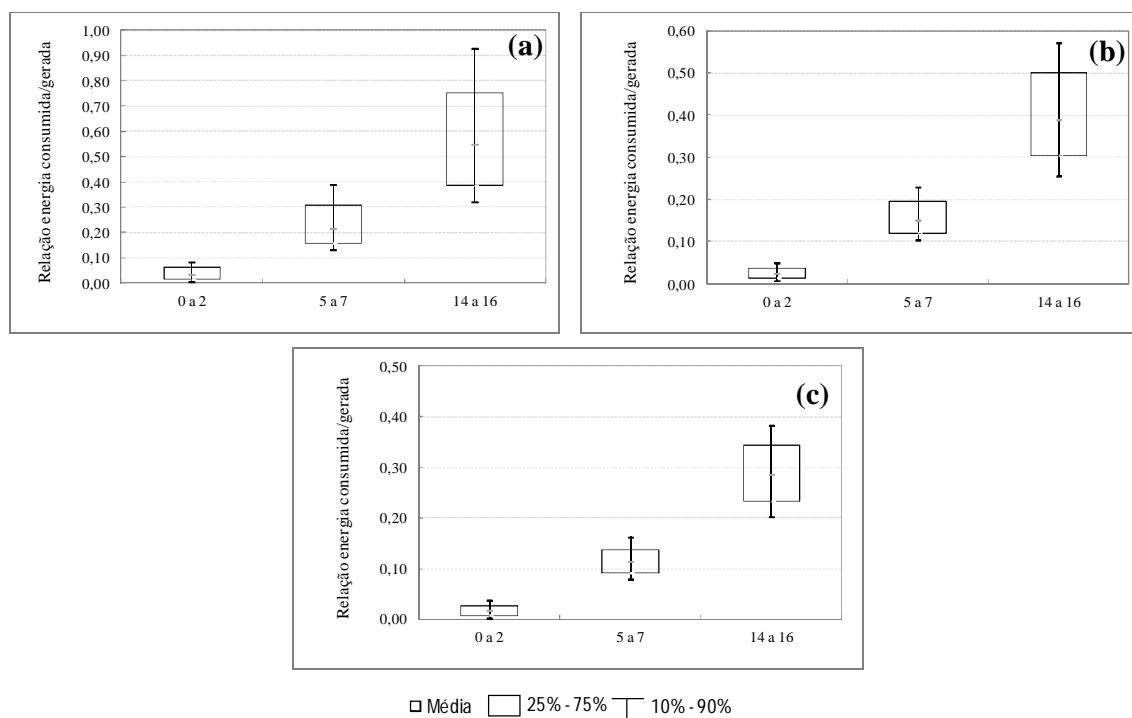


Figura 7-10: Relação da energia consumida para o bombeamento de esgoto e a produção de energia líquida a partir do biogás: (a) pior cenário; (b) cenário típico; (c) melhor cenário.

A Figura 7-11 apresenta a relação altura de bombeamento de 0 a 2 m e a energia consumida/gerada nas estações de tratamento de esgoto. De forma complementar, a Tabela 7-12 apresenta as equações de regressão linear para esta relação.

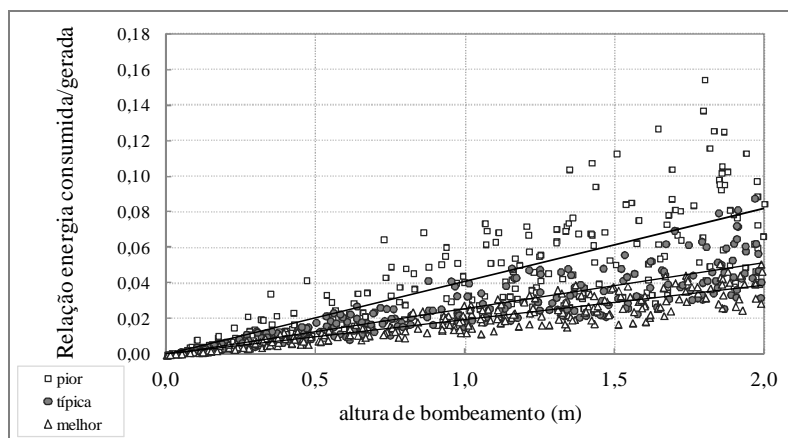


Figura 7-11: Estimativa da relação de energia consumida/gerada em ETES em função da altura de bombeamento do esgoto em estações elevatórias.

Tabela 7-12: Regressão linear da altura de bombeamento de 0 a 2 m e a relação energia consumida/gerada em ETES, para os três cenários.

Cenário					
Pior		Típico		Melhor	
Equação	Coefficiente (R ²)	Equação	Coefficiente (R ²)	Equação	Coefficiente (R ²)
$y = 0,0408x$	0,628	$y = 0,0259x$	0,729	$y = 0,0195x$	0,844

A energia elétrica disponível para outros usos na ETE além do fornecimento da energia necessária para a operação das EEE é apresentada na Figura 7-12, e considera os três cenários estudados, assim como as diferentes faixas de altura para o bombeamento de esgoto sanitário. De acordo com os dados a energia elétrica média disponível para outros usos para o pior, típico e melhor cenário, quanto do bombeamento de esgoto a alturas de 5 a 7 metros é da ordem de 7.614 kWh.d⁻¹ (27.410 MJ.d⁻¹), 13.044 kWh.d⁻¹ (46.958 MJ.d⁻¹), e 17.116 kWh.d⁻¹ (61.618 MJ.d⁻¹), respectivamente.

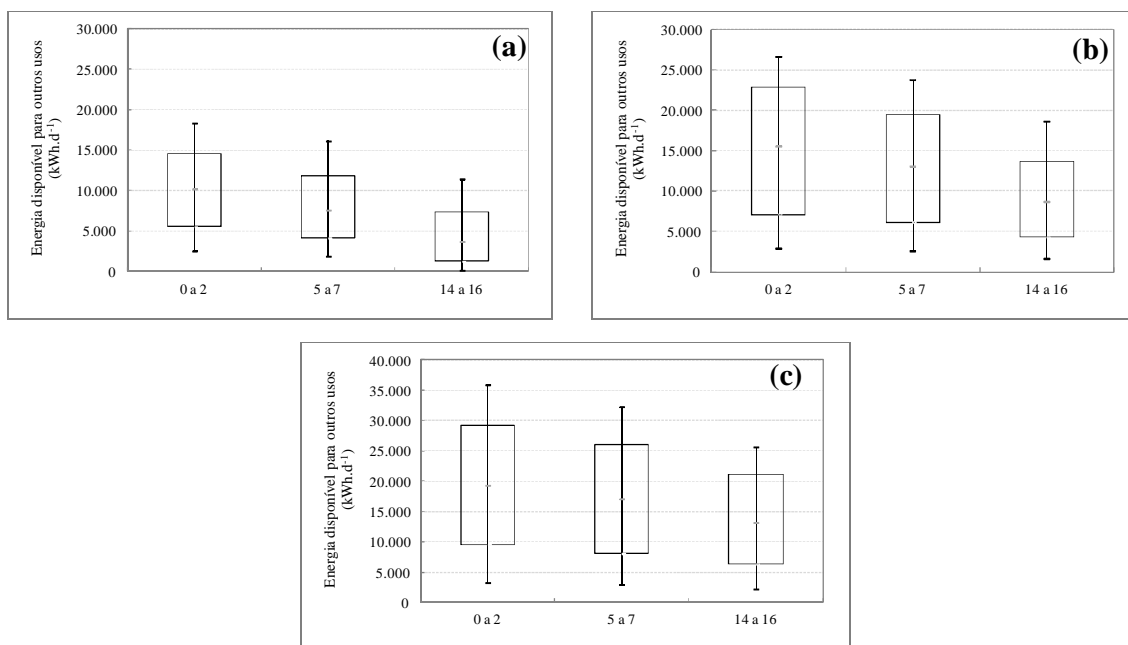


Figura 7-12: Variação da energia disponível para as ETES em função do cenário estudado e da faixa de altura de bombeamento do esgoto nas estações elevatórias de esgoto: (a) pior cenário; (b) cenário típico; (c) melhor cenário.

A Figura 7-13 apresenta gráficos de dispersão que relacionam as vazões de esgoto das ETES e as disponibilidades de energia elétrica para outros usos, após a garantia de operação das EEE. A Tabela 7-13 apresenta um resumo dos dados de regressão linear para os cenários estudados. De forma geral, observa-se que a relação entre vazão ($L.s^{-1}$) e energia disponível para outros usos ($kWh.d^{-1}$) apresentou um melhor coeficiente de determinação (R^2) para melhores situações e menores alturas de bombeamento.

Tabela 7-13: Resumo com as informações sobre a regressão linear para diferentes faixas de alturas entre a vazão de esgoto ($L.s^{-1}$) e a energia disponível para as ETES.

Faixas de alturas manométricas	Cenário					
	Pior		Típico		Melhor	
	Equação	Coefficiente (R^2)	Equação	Coefficiente (R^2)	Equação	Coefficiente (R^2)
0 a 2 m	$y = 9,6506x$	0,419	$y = 13,861x$	0,676	$y = 19,357x$	0,812
5 a 7 m	$y = 7,682x$	0,257	$y = 11,921x$	0,589	$y = 17,365x$	0,771
14 a 16 m	$y = 4,2283x$	-0,019	$y = 8,3669x$	0,349	$y = 13,773x$	0,662

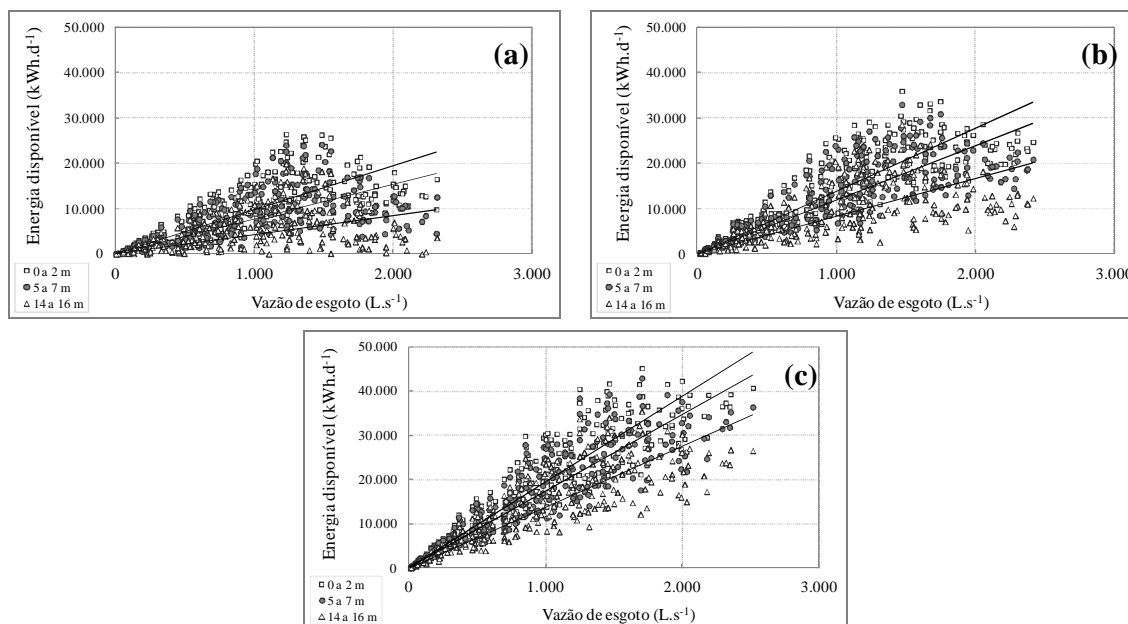


Figura 7-13: Estimativa da energia disponível para outros usos a partir da vazão afluyente das ETES: (a) pior cenário; (b) cenário típico; (c) melhor cenário.

7.3.4 Validação do modelo de Monte Carlo

Abaixo são apresentados os resultados referentes à validação do potencial energético do lodo e do biogás para as duas ETES estudadas. Vale ressaltar que a validação foi desenvolvida a fim de atender o objetivo proposto no tópico 7.2.2.1, intitulado “Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo”.

7.3.4.1 Validação do modelo – Reatores UASB ETE *Laboreaux* (Itabira/MG)

A Figura 7-14 apresenta os dados de geração de lodo do filtro prensa para a ETE *Laboreaux*. Apesar do monitoramento diário da produção de lodo no filtro prensa, para efeito de validação, foram considerados apenas dados para dias em que o material foi caracterizado quanto ao poder calorífico. A Tabela 7-14 apresenta a estatística descritiva para a caracterização do lodo desidratado utilizada para a validação do modelo matemático.

Tabela 7-14: Estatística descritiva dos resultados de caracterização do lodo desidratado gerado na ETE *Laboreaux* utilizados para a validação do modelo matemático.

Estatística	Composição imediata % em massa (b.s)			Umidade %	Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)				Composição elementar, % em massa (b.s)				
	Voláteis	Cinzas	Fixos		Teórico		Real		C	H	N	O*	Cinzas**
					PCS (b.s)	PCI (b.t)	PCS (b.s)	PCI (b.t)					
Média	44,2	52,7	3,1	59,1	8,1	1,7	8,7	1,9	20,1	3,6	2,0	21,4	52,9
Nº dados	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Mediana	44,2	53,2	3,1	59,2	8,1	1,8	8,8	2,0	20,1	3,5	2,0	21,6	53,3
σ	1,9	1,8	1,6	4,2	0,8	0,5	0,7	0,4	1,1	0,3	0,5	1,6	1,6

b.s: base seca, b.t: base de trabalho. PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), σ (desvio padrão em relação ao valor médio). *Determinado por diferença. **Considerados os dados medidos de cinzas para os dias que houve caracterização de composição elementar.

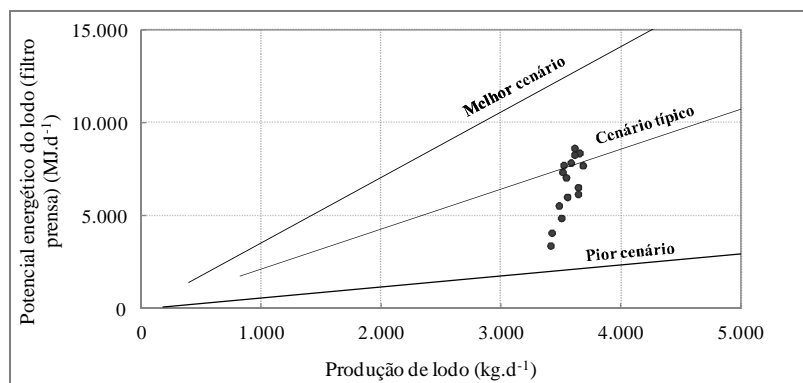


Figura 7-14: Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento da ETE *Laboreaux*.

De acordo com os dados apresentados, observa-se que o modelo se adequa para a estimativa do potencial energético do lodo retirado de filtro prensa, por apresentar os dados classificados entre a pior e o melhor cenário. De forma geral, os dados de potencial energético da ETE *Laboreaux* se enquadram entre o pior e o melhor cenários. De acordo com dados de monitoramento do lodo prensado, apresentados no tópico 6.3.2, isto pode ser explicado pelo elevado teor de cinzas e baixa concentração de hidrogênio nas amostras de lodo analisadas. Os resultados de caracterização do potencial energético dos subprodutos gerados na ETE *Laboreaux*, assim como as relações unitárias, são apresentadas na Tabela 7-15.

A Tabela 7-16 apresenta um resumo do estudo do poder calorífico e das relações unitárias que comprovam a adequação do modelo às medições realizadas de caracterização do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) na ETE *Laboreaux*. De acordo com o modelo matemático, conclui-se que os dados se ajustam ao modelo para o poder calorífico (superior e inferior) e para as relações unitárias dos potenciais energéticos dos subprodutos com a desidratação por filtro prensa.

Tabela 7-15: Relações unitárias obtidas a partir de dados reais da caracterização do lodo e biogás na ETE *Laboreaux*.

Dados	Potencial energético (MJ.d ⁻¹) medido			Relações unitárias		
	Lodo	Biogás	Total	biogás/total	lodo/total	biogás/lodo
1	8.395	15.289	23.684	0,65	0,35	1,82
2	7.728	13.721	21.449	0,64	0,36	1,78
3	8.395	13.273	21.668	0,61	0,39	1,58
4	7.371	14.085	21.456	0,66	0,34	1,91
5	7.876	15.093	22.969	0,66	0,34	1,92
6	8.303	12.097	20.400	0,59	0,41	1,46
7	6.552	13.777	20.329	0,68	0,32	2,10
8	4.900	13.553	18.453	0,73	0,27	2,77
9	6.188	15.261	21.449	0,71	0,29	2,47
10	7.744	13.133	20.877	0,63	0,37	1,70
11	8.664	12.685	21.349	0,59	0,41	1,46
12	7.080	11.593	18.673	0,62	0,38	1,64
13	4.104	12.097	16.201	0,75	0,25	2,95
14	5.568	11.509	17.077	0,67	0,33	2,07
15	3.410	6.832	10.242	0,67	0,33	2,00
16	6.035	5.516	11.551	0,48	0,52	0,91
Valores médios				0,65	0,35	1,91

Tabela 7-16: Estudo do poder calorífico e de relações unitárias para dados medidos na ETE *Laboreaux* e simulados pelo modelo de Monte Carlo.

Item	Unidades	Valores	
		Medidos	Simulados
Poder calorífico superior (PCS)	MJ.kg ⁻¹	8,7	7,5 – 17,3
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ.kg ⁻¹	1,9	0,6 – 3,5
Potencial energético biogás/total	%	0,65	0,6 – 0,8
Potencial energético lodo/total	%	0,35	0,2 – 0,4
Potencial energético biogás/lodo	%	1,91	1,6 – 4,9

7.3.4.2 Validação do modelo – Reatores UASB ETE Nova Contagem (Contagem/MG)

A Tabela 7-17 apresenta a estatística descritiva para a caracterização das análises realizadas para o lodo da ETE Nova Contagem. A Figura 7-15 apresenta os dados da validação do modelo de Monte Carlo para o lodo desidratado em centrífuga nos reatores UASB da ETE Nova Contagem. A partir dos resultados pode-se apreender que o modelo se adéqua à estimativa do potencial energético do lodo, pelo fato do potencial energético do lodo se enquadrar entre o melhor e o pior cenário, os dados preliminares apontam que o lodo da ETE se aproxima do melhor cenário. Observa-se ainda que o pior cenário corresponde à ausência de potencial energético do lodo, em função da elevada umidade que inviabiliza o uso do lodo como fonte energética, resultando em um potencial nulo na grande maioria dos casos simulados.

Tabela 7-17: Estatística descritiva dos resultados de caracterização do lodo desidratado gerado na ETE Nova Contagem utilizados para a validação do modelo matemático.

Estatística	Composição imediata % em massa (b.s)			Umidade %	Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)				Composição elementar, % em massa (b.s)				
	Voláteis	Cinzas	Fixos		Teórico		Real		C	H	N	O*	Cinzas**
					PCS (b.s)	PCI (b.t)	PCS (b.s)	PCI (b.t)					
Média	60,2	29,1	10,7	77,1	9,0	0,0	14,6	1,3	34,0	5,3	4,2	56,6	29,1
Nº dados	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Mediana	57,8	32,2	10,9	76,5	8,8	0,0	14,9	1,3	33,7	5,3	4,2	56,9	32,2
σ	6,2	5,7	0,9	1,6	0,7	0,2	0,6	0,3	0,9	0,2	0,1	1,1	5,7

b.s: base seca, b.t: base de trabalho. PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), σ (desvio padrão em relação ao valor médio). *Determinado por diferença. **Considerados os dados medidos de cinzas para os dias que houve caracterização de composição elementar.

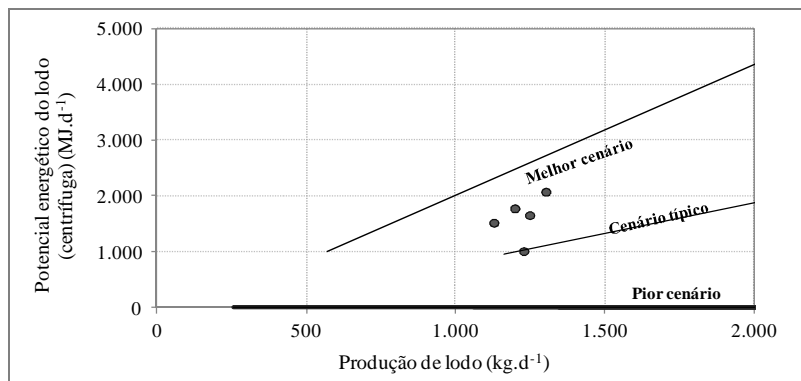


Figura 7-15: Validação do modelo a partir dos dados de monitoramento da ETE Nova Contagem.

Em decorrência da ausência de monitoramento da produção, assim como caracterização química do biogás, o modelo não pode ser validado a partir da ETE Nova Contagem.

7.4 Conclusões

Com as informações e estudos realizados a partir do uso de modelo matemático para a previsão de balanço energético em ETES pode-se concluir que:

- O modelo proposto apresenta-se como ferramenta útil para a determinação do potencial energético de ETES, através do uso do biogás e lodo excedente de reatores UASB como fontes de energia.
- Com a melhoria das características energéticas do lodo ao longo dos cenários, observou-se que o lodo apresentou uma maior contribuição na geração de energia nas ETES, quando comparado com ao biogás.
- O modelo de Monte Carlo indica estar validado no que diz respeito ao cálculo do potencial energético do lodo, com o emprego de filtro prensa e centrífuga como unidade de desidratação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds) *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001. 484 p., (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

APHA/WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21.ed.Washington, 2005.

ARJHARN, W.; HINSUI, T.; LIPLAP,P.; VIJAYA RAGHAVAN, G.S. Evaluation of an Energy Production System from Sewage Sludge Using a Pilot-Scale Downdraft Gasifier, *Energy e Fuels*, doi.org/10.1021/ef3012728, 27, 229–236, 2013.

ARTEAGA, J. A. F. *Análise energética e exergética de um sistema de cogeração com motores de combustão interna*. 2010. 154 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112 - *Carvão vegetal – análise imediata*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209 -. *Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário*, Rio de Janeiro, 2011.

AZNAR MP, CABALLERO MA, GIL J, MARTIN JA, CORELLA J. Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam oxygen mixtures, 2. Catalytic tar removal. *Ind Eng Chem Res*, v.37, p.2668–2680, 1998.

BEENACKERS, A. A. C. M. Biomass gasification in moving beds, a review of European technologies. *Renewable Energy*. v. 16, p. 1180, 1999.

BOGTE, J.; BREURE, A.; VAN ANDEL J.; LETTINGA, G. Anaerobic treatment of domestic wastewater in small scale UASB reactors. *Water Science and Technology* . v. 27 (9). p.75–82, 1983.

BORGES, E. S. M. *Tratamento térmico de lodo anaeróbio a partir da queima do biogás produzido em reator UASB objetivando a higienização e a melhora da biodisponibilidade e biodegradabilidade da fração orgânica*. 2004. 186 p. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S.H.W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. *Ciência e Energia*, v. 17, p. 27 – 32, 2008.

BRIDGEWATER, A.V. Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, v.91, p. 87-102. 2003.

BRUNO, J.C.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; CORONAS, A. 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.

BUWAL. *Sewage Sludge*. Disponível em: <<http://www.umweltschweiz.ch/buwal/eng>> Acesso em: 23 out. 2008.

CAO, Y.; PAWŁOWSKIA, A. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.16, p.1657– 1665, 2012.

- CARNS, K. 2005. Bringing Energy Efficiency to the Water & Wastewater Industry: How Do We Get There? In WEFTEC 2005 Proceedings.
- CARRASCO, J. E. Apostila do módulo V. Energia da Biomassa. Unidade 3. Processos e tecnologias de conversão energética de biomassa, EDDET. 66 p. 2009.
- CARTMELL, E. Biosolids - A Fuel or a Waste? An Integrated Appraisal of Five Co-combustion Scenarios with Policy Analysis. *Environ. Sci. Technol.* v. 40, p. 649-658, 2006.
- CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. Princípios de combustão aplicada. Florianópolis, 2007. 176p.
- CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. *Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte.* 2002. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/Estado_da_Arte.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2012.
- CHANG, C.; SHIE, J.; LIN, J.; LIN, J.; WU, C.; LEE, D.; CHANG, C. Major products obtained from the pyrolysis of oil sludge. *Energy e Fuels*, v.14, p.1176 - 1183, 2000.
- CHEN, G.; LOCK, YUE, P.L.; MUJUMDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. In: Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. 3.ed. Cap. 38, 2006, p.887-902.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios.* 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recover from Biogas in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. 2008. In: CHERNICHARO, C.A.L. *Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos.* Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2009. Relatório final de atividades referente a pós-doutorado.
- CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A, C.; FORESTI, E.; CYBIS, L.F. Introdução. In: CHERNICHARO, C. A. L (Coordenador); *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.* PROSAB 2. Belo Horizonte, 2001, p. 1-12.
- CHUNBAO, C. X.; LANCASTER, J. Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery. In: KÜHTZ, S.; INTINI, F.; BELLINI, S. *Energy Recovery Systems from Industrial Plants Waste*; Matera: Hardcover. 2011, p. 289-310.
- CONESA, J. A.; FONT, R.; FULLANA, A.; GULLÓN, M.; ARACIL, I.; GÁLVEZ, A.; MOLTÓ, J.; RICO, M. F. Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.84, p.95-102, 2009.
- CONSTANT, M.; NAVEAU, H.; FERRERO, G. L.; NYNS, E. J. Biogas End-Use in the European Community. *Elsevier Science Publisher*, England. 1989 *apud* NOYOLA, A., MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v. 5, p. 93-114. 2006.
- CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. *Biomassa para energia.* Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732 p.
- COURTAUD, L; PEREGRINA, C.; CREST, M.; SABLAYROLLES, M.L.; AUDIC, J.M.; ARLABOSSE, P. Alternative fuels derived from organic waste: the case of sewage sludge

- characterization as a potential energy source. In: 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WASTE, 2010, Venice, Italy. *Proceedings...Italy*, 2010.
- DAVID, A. C. *Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio*. 2002. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- DAVIS, R. D. The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal. *Water and Environment Journal*, v. 10, p. 65–9, 1996.
- DEGRÉMONT JORDAN. *Estudos de caso – ETE Samra*. Disponível em: http://www.degremont.com/en/activities/references/references/?reference_id=57. Acesso em 14 nov. 2012.
- DOGRU, M. MIDILLI, A. HOWARTH, C.R. Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Processing Technology*. v. 75, p.55-82, 2002.
- DOMÍNGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J. A.; PIS, P.P. Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 77, p.127-132, 2006.
- DUGAND, S. M. *Evaluation of the availability of raw materials for biogas production in medellín, Colombia*. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Departamento de Gestão e Engenharia, Universidade de Linköpings, Linköpings, 2010.
- ELIAS, X. Vías de tratamiento y valorización de fangos de depuradora. In: *Reciclaje de Residuos Industriales: Residuos Sólidos Urbanos y Fangos de Depuradora*, 2009. Cap 11, p. 909-997.
- ELIAS, X, CADAVID, C. F. Tratamento térmico de gases. In: CASTELLS, X, E. *Tratamiento y valorización energética de residuos*, 2005. Cap. 11, p. 743-807.
- ELIAS, X.; VELO, E. La pirólisis. In: CASTELLS, X, E. *Tratamiento y valorización energética de residuos*, 2005. Cap. 7, p. 477-539.
- EPM. Empresa Pública de Medellín, em Anais do Seminário de Biossólidos (CD), AIDIS, Rio de Janeiro, 2007.
- EPSAR. *Instalações em serviço na comunidade valenciana*. 2010. Disponível em: <http://www.epsar.gva.es/sanejament/instalaciones/list-en-servicio.aspx>. Acesso em 04 jan. 2013.
- EUROPEAN CLIMATE EXCHANGE. *Products and services*. 2012. Disponível em <<http://www.ecx.eu/>>. Acesso em 04 jun. 2012.
- FAAIJ, A.; VAN REE, R .; WALOHEIML.; OLSON, E.; OUOHUISA.; VANW IJK, A.; DAEY-OUWENCS.; TURKENBERWG. Gasification of biomass wastes and residues for electricity production. *Biomass and Bioenergy*. v. 12,(6), p.387, 1997.
- FEA. Federal Environmental Agency. Disponível em: <http://spin-project.eu/downloads/0_Background_paper_biogas_Germany_en.pdf>. Acesso em 01 jul. 2012.
- FEMP. Federal Energy Management Program. 2004. Disponível em: <www.eere.energy.gov/femp/financing/superespcs_biomass.cfm>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- FERNANDES, F.; LOPES, D.D.; ANDREOLI, C.V.; SILVA, S.M.C.P. *Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE*. 2001. 1. ed. Cap. 7, p. 299-317.

- FERRASSE, J. H.; SEYSSIECQ, I.; ROCHE, N. Thermal gasification: A feasible solution for sewage sludge? *Chemical Engineering e Technology*, v. 26, p. 941-945, 2003.
- FONT, R.; FULLANA, A.; CONESA, J. A.; LLAVADOR, F. Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. v. 58–59, p. 927–941, 2001.
- FONTS, I.; GEA, G.; AZUARA, M.; ÁBREGO, J.; ARAUZO, J. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 2.781–2.805, 2012.
- FONTS, I.; AZURA, M.; GEA, G.; MURILLO, M.B. Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 85, p. 184–191, 2009.
- FRIJNS, L.; HOFMAN, J.; NEDERLOF, M. The potential of (waste)water as energy Carrier. *Energy Conversion and Management*, v. 65, p.357–363, 2013.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais/Fundação Estadual do Meio Ambiente – Belo Horizonte:FEAM*, 2012. 163p.; il
- FULLANA, A. F. *Pirólisis y combustión de neumáticos y lodos de depuradoras*. 2001. 305p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Alicante, Alicante, 2001.
- FULLANA, A.; CONESA, J.A.; FONT, R.; MARTÍN-GULLÓN, I. Pyrolysis of sewage sludge: nitrogenated compounds and pretreatment effects. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, v. 68/69, p. 561-575, 2003.
- FURNESS, D. T.; HOGGETT.; A. JUDD, S. J. Thermochemical Treatment of Sewage Sludge. *J CIWEM*, v. 14, p.57-65, 2000.
- FYTILI, D. ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, p.116–140, 2008.
- GARCIA, J.; CASTELLS, X. E.; GOYA, J. Impactos Ambientales y energía. In: CASTELLS, X. E. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. 2005. Cap. 14, p. 965-1.133, 2005.
- GINORIS, Y. P.; GHESTI, G. F.; MALAFAIA, F. R.; BRASIL, A.; MACEDO, J. L.; ITAI, Y. Evaluation of municipal sewage sludge as a biomass resource for the production of energy by gasification. In: 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WASTE, 2010, Venice, Italy. Proceeding...Italy, 2010.
- GOLATO, M. A.; RUIZ, H.; D'ANGELO, J. F.; ASO, G.; PAZ, D. Determinación del coeficiente global de transferencia de calor en secaderos rotativos de cáscara de limón. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán Tomo*, v. 82 (1-2), p. 27-35, 2005.
- GÓMEZ, E. O. *Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão*. 2002. 369 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- GÓMEZ, E. O. *Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar*. 1996. 178 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

GÓMEZ-RICO, M.F.N.A. *Estudio de contaminantes orgânicos em el aprovechamiento de lodos de depuradora de águas residuales urbanas*. 2008. 373p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Alicante, Alicante, 2008.

GRIN, P. C.; ROERSMA, R. E.; LETTINGA, G. Anaerobic treatment of raw sewage at lower temperatures. In: *Proceedings of the BVC the European symposium on anaerobic wastewater treatment*, Noordwijkerhout, The Netherlands, 1983. p. 335–47. *apud* TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.

GROß, B.; EDER, C.; GRZIWA, P.; HORST, J.; KIMMERLE, K. Energy recovery from sewage sludge by means of fluidized bed gasification. *Waste Management*, v. 28, p.1.819–1.826, 2008.

HOUDKOVA, L.; BORAN, J.; UCEKAJ, V.; ELSASER, T.; STEHLIK, P. Thermal processing of sewage sludge – II. *Applied Thermal Engineering*. v. 28, p.2.083–2.088, 2008.

HWANG, I. H.; OUCHI, Y.; MATSUTO, T. Characteristics of leachate from pyrolysis residue of sewage sludge. *Chemosphere*, v.68, p.1913–1919, 2007.

IEA. *Energy Statistics*. Disponível em <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>. Acesso em 29 mai. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE – 2010. PNSB 2008: *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/notas_tecnicas.pdf>. Acesso em 20 ago. 2011.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change: CO₂ removals in residual combustion products (charcoal). Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Volume 4. Appendix 1, 2p. 2006.

ITABIRA. Prefeitura Municipal de Itabira. 2011. Disponível em: <<http://www.itabira.mg.gov.br/novoportal/>>. Acesso em 20 mai. 2012.

JENKINS, B.M. Fuel properties for biomass materials. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AND MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: THE ROLE OF BIOMASS*, 1990, Delphi. *apud* CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. *Biomassa para energia*. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732p.

JOHNSON, J. E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized bed, release and combustion of volatiles. *Fuel*. v.73, p. 617–26, 1996.

JUDEX, J. W.; GAIFFI, M.; BURGBACHER, C. Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and pilot plant. *Waste Management*, v. 32, p.719-723, 2012.

KARAYILDIRIM, T.; YANIK, J.; YUKSEL, B. Characterization of products from pyrolysis of waste sludges. *Energy Fuel*, v. 85, p. 1498-1508, 2006.

KÄÄNTE, U.; ZEVENHOVEN, R.; BACKMAN, R.; HUPA, M. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. *Fuel Process Technology*, v.85, p.293–301, 2004. *apud* FYTILI, D. ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in

- EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, p.116–140, 2008.
- KELESSIDIS, A.; STASINAKIS, A.S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, v. 32, 1186–1195, 2012.
- KHAN A. Municipal waste water treatment and energy recovery. In: Khanna S, Mohan K, editors. *Wealth from waste*. New Delhi: Tata Energy Research Institute; 1995. *apud* TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.
- KIM Y.; PARKER W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. *Bioresour Technol*, v. 99, p. 1409–16, 2008.
- LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; DE ZEEUW. W.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, v.22 (4), p.699–734, 1980. *apud* TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.
- LOBATO, L. C. S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2011. 173 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- LOBATO, L.C.S.; CHERNICHARO, C.A.L.; PUJATTI, F.J.P.; MARTINS, O.M.; MELO, G.C.B.; RECIO A.A.R. Use of biogas for cogeneration of heat and electricity for local application: performance evaluation of an engine power generator and a sludge thermal dryer. *Water Science and Technology*, 67 (1), 159-167, 2012.
- LOPES, R. P.; SOBRINHO, J. C.; SILVA, J. S.; NOGUEIRA, S. J. Fontes de energia para secagem de café. Boletim técnico n.3, Universidade Federal de Viçosa, 2001, p. 29.
- LUENGO, C, A.; FELFLI, F. E. F.; BEZZON, G. Apostila de Pirólise e Torrefação de Biomassa, Universidade de Campinas, UNICAMP. 2011, Cap. 10, 27 p.
- LUTZ, H.; ROMEIRO, G. A.; DAMASCENO, R. N.; KUTUBUDDIN, M.; BAYER, E. Low temperature conversion of some Brazilian municipal and industrial sludges. *Bioresour Technol*, v.74, p. 103 - 107, 2000.
- MAFRA, E. R. M. L.; VIEIRA, G. E. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F. Caracterização química por cg/em de bioóleo obtido a partir da pirólise de lodo digerido anaeróbico adicionado de óxido de cálcio. In: 6º Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás, 2011, Florianópolis.
- MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 16, p.2.566– 2.582, 2012.
- MANIATIS, K.: *Progress in Biomass Gasification: An Overview*, 2002
- MARRERO T, MCAULEY B, SUTTERLIN W, MORRIS S, MANAHAN S. Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge. *Waste Management*, v.24, p.193–8, 2003.

- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83, p.37-46, 2002.
- METCALF e EDDY. INC. Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book, 2003. 1815p.
- MEZERETTE, C.; GIRARD, P. Environmental Aspects of gaseous Emissions from Wood Carbonisation and Pyrolysis Process, In: *Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization*, Elsevier Applied Science, v. I., Londres, 1991, p. 263-287.
- MEYER, S.; BOWMAN, B. *Point Loma Wastewater Treatment Plant and Ocean Outfall Annual Monitoring Report*, 2007. Disponível em: <I:\REPORTS\PT_LOMA\Annuals\Annual2007\FinalSections\2007_1_Intro.doc>. Acesso em: 13 mai. 2012.
- MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. *Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil*. 2012. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764.html>. Acesso em: 12. out. 2013.
- MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. *Inventário brasileiro das emissões antrópicas de gases de efeito estufa*. 2009. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/>. Acesso em: 12. dez. 2011.
- MONTE, M.C.; FUENTE, E.; BLANCO, A.; NEGRO, C. Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*. v. 29, p.293-308, 2008.
- NDAJI, F.E.; ELLYAT, W.A.T.; MALIK, A.A.; THOMAS, K.M. Temperature programmed combustion studies of the co-processing of coal and waste materials. *Fuel*. v. 78, p.301-307, 1999.
- NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 200 p.
- NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v.5, p. 93-114. 2006.
- OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. *Biomass & Bioenergy*, v. 30, p.973-982, 2006.
- ONU. Department of international economic and social affairs. *Energy statistics: Definition, units of measure and conversion factors, studies in methods*, Series F, n°44. United Nations, New York, 1987.
- OTERO, M.; SANCHEZ, M.E.; GÓMEZ, X.; MORÁN, A. Thermogravimetric analysis of biowastes during combustion. *Waste Management*. doi: 10.1016 /j.wasman.2009.12.010., 2010.
- OTERO, M.; GOMEZ, X.; GARCIA, A. I.; MORAN, A. Non-isothermal thermogravimetric analysis of the combustion of two different carbonaceous materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. v. 93, p. 619–626, 2008.
- PERSSON, M., JÖNSSON, O., WELLINGER, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas, 2006.
- PINHEIRO, F. G.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. *Biomassa e Energia*, v. 2, n.2, p. 113-123, 2005.

- POLETSCHNY H. Klärschlamm-Nutzen oder Gefahr für die Landwirtschaft [Sewage sludge—useful or dangerous for agriculture]. In: Entsorgungspraxis-Spezial. Klärschlamm, p.10–13, 1998. *apud* WERTHER, J. OGADA, T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 25, p.55–116, 1999.
- PTASINSKI, K.J.; PRINS, M.J.; PIERIK, A. Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy*, v.32, p.568-574, 2007.
- RAJVANSHI, A.K. Alternative energy in agriculture. In: _____. Boca Raton (CRC Press), Biomass gasification, 1986, p. 83-102.
- RAMOS, A.L.D.; MARQUES, J.J.; SANTOS, M.V.; FREITAS, L.S.; SANTOS, R.G.V.M.; SOUZA, M.M.V.M. Atual estágio de desenvolvimento da tecnologia GTL e perspectivas para o Brasil. *Química Nova*, v. 34, n. 10, p. 1704-1716, 2011.
- REZAIYAN J., CHEREMISINOFF N.P. Gasification technologies- a primer for engineers and scientists. CRC Press Taylor & Francis Groups, Boca Raton, FL, 2005 *apud* CHUNBAO, C. X.; LANCASTER, J. Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery. In: KÜHTZ, S.; INTINI, F.; BELLINI, S. *Energy Recovery Systems from Industrial Plants Waste*; Matera: Hardcover. 2011, p. 289-310.
- RODRÍGUEZ, N. H.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; BLANCO-VARELA, M. T.; DONATELLO, S.; GUILLEM, M.; PUIG, J.; FOS, C.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. *Journal of Cleaner Production*, v. 52, p. 94-102, 2013.
- ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; FONSECA, W. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Estimativa do potencial energético de uma estação de tratamento de esgoto doméstico pelo uso dos subprodutos de reatores UASB: lodo excedente e biogás estudo de parâmetros cinéticos do reator UASB. In: 26º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL [Anais eletrônico...] Porto Alegre, 2011.
- RULKENS, W. Sewage sludge as a biomass resources for the production of energy: overview and assessment of the various options. *Energy & Fuels*, v.22, p.9-15, 2007.
- SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v.33, p.1101-1107. 2009.
- SÁNCHEZ, C. G. Apostila do curso de Tecnologia de Gaseificação – IM 338. Curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, UNICAMP.. 2003, Cap. 5, 16 p.
- SANCHEZ, M. E.; OTERO, M.; GOMEZ, X.; MORAN, A. Thermogravimetric kinetic analysis of the combustion of biowastes. *Renewable Energy*, v. 34, p.1622–1627, 2009.
- SATO, S.; LIN, S. Y.; SUZUKI, Y.; HATANO, H. Hydrogen production from heavy oil in the presence of calcium hydroxide. *Fuel*, v.82, p.561–567, 2003 *apud* MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 16, p.2.566– 2.582, 2012.
- SCHWARZENBECK, N.; BOMBALL, E.; PFEIFFER, W. Can a wastewater treatment plant be a powerplant? A case study. *Water Science & Technology*. v. 57 (10), p. 1.555- 1.561. doi: 10.2166/wst.2008.215, 2008.
- SEGGIANI, M.; VITOLO, S.; PUCCINI, M.; BELLINI, A. Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier. *Fuel*, v. 93, p.486–491, 2012.

SILVA, S.M.C.P.; FERNANDES, F.; SOCCOL, V.T.; MORITA, D.M. Principais contaminantes do lodo. In: *Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final*. 2001. 1. ed. Cap. 3, p. 69-119.

SOLER, P.B; LORA, E. S. *Pruebas de balance térmico calderas para bagazo*. Santiago de Cuba: Departamento de Termoenergética, Facultad de Ingeniería Mecánica, ISPJAM – Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella, 1991. *apud* CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. *Biomassa para energia*. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732 p.

SOTO, M.; RUIZ, I.; FERREIRO, M.J.; VEIGA, M. C.; VEGAER, B. Anaerobic treatment of domestic and industrial (Low concentration) wastewaters. In: Proceedings of the 3rd international conference appropriate waste management technologies for developing countries, NERRI, Nagpur, 1995. p.3–11. *apud* TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.

SPINOSA L.; AYOL A.; BAUDEZ J. C.; CANZIANI R.; JENICEK P.; LEONARD A.; Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. *Water*. v.3, p.702-717, 2011.

STASTA, P.; BORAN, J.; BEBAR, L.; STEHLIK, P.; ORAL, J. Thermal processing of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*, v. 26, p.1.420-1.426, 2006.

STILLWELL, A. S.; HOPPOCK, D. C.; WEBBER, D. M. E. Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. *Sustainability*. v. 2, p. 945-962; doi:10.3390/su2040945, 2010.

TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.

TRICASE, C.; LOMBARDI, M. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: technical-economic considerations. *Renewable Energy*, v. 34 (3), p.477–85, 2008.

TRICASE, C., LOMBARDI, M. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations. *Renewable Energy*, v. 34, p. 477–485, 2009.

TRINH, T. N.; JENSEN, P. A.; JOJHANSEN, K. D.; KNUDSEN, N.O. Influence of the Pyrolysis Temperature on Sewage Sludge Product Distribution, Bio-Oil, and Char Properties. *Energy Fuels*, v. 27, p. 1419–1427, 2013.

TSAGARAKIS, K. P. Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. *Energy Conversion and Management*, v.38, p. 2.694-2.698, 2007.

TSAGARAKIS, K.P.; PAPADOGIANNIS, CH. Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio Municipality, Greece. *Energy Conversion and Management*, v. 47, p. 844-847, 2006.

TSANG, K.R.; VESILIND, P.A. Moisture distribution in sludges. *Water. Science and Technology*, v. 22, p.135–142, 1990.

UE. União Européia. Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>. Acesso em: 25 nov. 2011.

- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. *CDM statistics*. 2011a. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/Statistics/index.html>. Acesso em 14 jan. 2012.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. *Grid connected renewable electricity generation*. 2011b. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/RSCTZ8SKT4F7N1CFDXCSA7BDQ7FU1X>. Acesso em 14 mai. 2011.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. *Emissions from solid waste disposal sites*. 2011c. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-04-v6.0.0.pdf>. Acesso em 14 mai. 2013.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. *Avoidance of methane production from decay of biomass through controlled combustion, gasification or mechanical/thermal treatment*. 2009. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/GPWCV89KQ7IFPEDCXA92BL6XK7JR3Y>. Acesso em 14 jan. 2013.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. *Kyoto Protocol*. 1997. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em 14 mar. 2008.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em 14 mai. 2013.
- USEPA. *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020*, 2006. Disponível em: www.epa.gov/climatechange/economics/international.html. Acesso em: 27 jun. 2012.
- USEPA. *Biosolids Technology Fact Sheet: Use of Incineration for Biosolids Management*; Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2003, Disponível em: http://www.epa.gov/owm/mtb/incineration_biosolids.pdf. Acesso em 15 out. 2011.
- VAN KREVELEN, D.W.; SCHUYER, J. *Coal Science*. Elsevier Publishing Company, 1957.
- VENKATESH, G.; ELM, R. A. 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*, p. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.025>, 2013.
- VIEIRA, G. E. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F. de; PEDROZA, C. M. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, 2011.
- VIRMOND, E. *Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia*. 2007. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, , 2007.
- VOLSCHAN, I, Poli/UFRJ, Rio de Janeiro: [s.n]. Notas de aula, 2010.
- VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R.F. *Lodo de esgoto: características e produção*. 2001. 1. ed. Cap. 2, p. 17-67.
- WERF. Water Environment Research Foundation. *Energy efficiency in wastewater treatment in North America: A compendium of best practices and case studies of novel approaches*. CH2M HILL Canada Limited, 2010.

WERLE S.; WILK R.K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy*, doi:10.1016/j.renene.2010.01.019, 2010.

WERTHER, J.; OGADA, T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 25, p.55–116, 1999.

WZOREK, M. Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 10.1016/j.fuproc.2012.04.023, 2012.

XU, Z.R.; ZHU, W.; LI, M. Influence of moisture content on the direct gasification of dewatered sludge via supercritical water. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.37, p. 6.527-6.535, 2012.

ZANETTE, A. L. *Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil*. 2009. 97 p. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

