

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRISCILA KOGA

**GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL A PARTIR DOS SUBPRODUTOS DE
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ANAERÓBIA DE ESGOTOS**

CURITIBA

2016

PRISCILA KOGA

**GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL A PARTIR DOS SUBPRODUTOS DE
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ANAERÓBIA DE ESGOTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial da Universidade Federal do Paraná, em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial e a Universidade de Stuttgart, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Friedrich Grauer
Coorientadores: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti e Prof. Dra. Karen Juliana do Amaral

CURITIBA

2016

K78g

Koga, Priscila

Geração de energia renovável a partir dos subprodutos de uma estação de tratamento anaeróbia de esgotos / Priscila Koga. – Curitiba, 2016.
137 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2016.

Orientador: Andreas Friedrich Grauer – Co-orientador: Gustavo Rafael
Collere Possetti; Karen Juliana do Amaral.
Bibliografia: p. 127-134.

1. Meio ambiente. 2. Biogás. 3. Tratamento de esgoto. 4. Reatores
anaeróbios. 5. Energia elétrica. 6. Fontes de energia renováveis.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Grauer, Andreas Friedrich. III. Possetti,
Gustavo Rafael Collere. IV. Amaral, Karen Juliana. V. Título.

CDD: 628.5



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL
Código CAPES: 40001016057P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PRISCILA KOGA**, intitulada: "**Geração de Energia Renovável a partir dos Subprodutos de uma Estação Anaeróbia de Esgotos**", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 25 de Novembro de 2016.

ANDREAS FRIEDRICH GRAUER
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

PATRICIA CHARVET
Avaliador Interno (UFPR)

PATRICIA BILOTTA
Avaliador Externo (UP)

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela compreensão nos momentos de ausência;

Ao querido Juliano, pelo incentivo, amor e apoio incondicional;

Ao professor Gustavo, exemplo de dedicação e profissionalismo, pelos ensinamentos e pelo conhecimento compartilhado;

Aos professores Andreas e Karen pelo incentivo e confiança depositada;

Aos amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.
(George Bernard Shaw)

RESUMO

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos possibilitam o abatimento da carga orgânica, gerando subprodutos sólidos e gasosos que são fontes de energia renováveis. No entanto, no Brasil, esses subprodutos normalmente são considerados apenas como passivos ambientais, sendo seu aproveitamento energético pouco explorado. Neste trabalho avaliou-se o potencial de aproveitamento energético dos subprodutos de uma estação de tratamento anaeróbia de esgotos (ETE) de médio porte por meio da análise de fluxos de materiais (AFM) e de energia (AFE), que foram construídos com base nos dados operacionais coletados ao longo dos anos de 2014 e 2015. Identificou-se que a etapa de tratamento com maior potencial energético é o tratamento anaeróbio, sendo o biogás responsável por mais de 75% deste potencial. As lagoas aeradas e de decantação é a etapa de tratamento com o maior consumo de energia elétrica, responsável por mais de 70% da demanda da ETE. A partir das informações obtidas por meio da AFM e AFE foram calculados indicadores específicos de materiais e de energia, que foram comparados com dados reportados na literatura. Os mesmos dados foram utilizados para avaliação dos seguintes cenários: 1 - geração de eletricidade a partir do biogás, 2 - cogeração a partir do biogás, 3 - secagem térmica do lodo a partir do biogás, 4 - secagem térmica do lodo e da espuma a partir do biogás, 5 - secagem térmica do lodo e da espuma a partir da combustão do lodo, espuma e biogás, 6 - secagem térmica do lodo e da espuma a partir da energia térmica do lodo, biogás e espuma e geração de energia elétrica a partir do biogás. Os cenários propostos foram avaliados quanto às suas potencialidades energéticas e custos evitados. Dentre os benefícios identificados na avaliação dos diferentes cenários, destaca-se o potencial de geração de energia elétrica da ordem de 1.600 MWh_e, redução dos volumes de lodo e espuma chegando a 90%, e custos evitados que chegariam a R\$ 1.184.446,79 em 2015.

Palavras-chave: Biogás. Lodo. Espuma. Reatores anaeróbios

ABSTRACT

Anaerobic wastewater treatment systems enable the reduction of the organic load present in wastewater, generating solid and gaseous byproducts which are renewable energy sources. However, in Brazil, these byproducts normally are considered only as environmental liabilities, being your energy use poorly explored. In this work the energetic potential of byproducts generated in a medium size wastewater treatment plant (ETE) were evaluated by the materials (AFM) and energy flow analysis (AFE) that were built based on operational data collected over the years 2014 and 2015. It was identified that the treatment step which offers the highest energetic potential was the anaerobic treatment and the biogas responsible for more than 75% of energetic potential. The aerated lagoon and decantation is the treatment step with the highest energetic consumption from ETE, responsible for more than 70% of ETE demand. Based on information obtained from AFM and AFE, specific indicators of material and energy were calculated and compared to data reported in the literature. The same data obtained were used for evaluated the following scenarios: 1 - generation of electricity from biogas, 2 - cogeneration from biogas, 3 - sludge drying from biogas thermal energy, 4 - sludge and scum thermal drying from biogas energy, 5 - sludge and scum thermal drying from the sludge, scum and biogas combustion, 6 - sludge and scum thermal drying from the sludge, scum and biogas combustion and electricity generation from biogas. The proposed scenarios were evaluated about energetic potentials and avoided costs. Among the identified benefits in the evaluation of different scenarios, stands out the potential of electricity generation about 1.600 MWh_e, reduction of sludge and scum volume reaching until 90% and avoided costs which would reach R\$ 1.184.446,79, in 2015.

Key-words: Biogas. Sludge. Scum. Anaerobic Reactors

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – BALANÇO DE DQO EM SISTEMAS ANAERÓBIOS E AERÓBIOS	20
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO.....	21
FIGURA 3 – ROTAS METABÓLICAS E GRUPOS MICROBIANOS ENVOLVIDOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA, COM REDUÇÃO DE SULFATO	23
FIGURA 4 – ROTAS DE CONVERSÃO DE DQO E FLUXOS DE METANO EM REATORES UASB	33
FIGURA 5 – PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS	43
FIGURA 6 – VISTA GERAL DA ETE ESTUDADA	47
FIGURA 7 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DA ETE ESTUDADA.....	48
FIGURA 8 – USO DO BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	58
FIGURA 9 – USO DO BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA E UTILIZAÇÃO DO CALOR RESIDUAL PARA SECAGEM DO LODO	59
FIGURA 10 – USO DO BIOGÁS PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO	63
FIGURA 11 – USO DO BIOGÁS PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO E DA ESCUMA	65
FIGURA 12 – USO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO E DA	67
FIGURA 13 – USO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO E DA ESCUMA, E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS	70
FIGURA 14 – DIAGRAMA DE FLUXO DE MATERIAIS DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2014	76
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE FLUXO DE MATERIAIS DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2015	77
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE FLUXO DE ENERGIA DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2014	83
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE FLUXO DE ENERGIA DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2015	84

FIGURA 18 – PARTICIPAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR PROCESSO DE TRATAMENTO NA ETE ESTUDADA PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	85
FIGURA 19 – PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SUBPRODUTO AVALIADO NA ETE ESTUDADA em 2014.....	85
FIGURA 20 – PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SUBPRODUTO AVALIADO NA ETE ESTUDADA em 2015.....	86
FIGURA 21 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PARA O ANO DE 2014.....	88
FIGURA 22 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PARA O ANO DE 2015.....	89
FIGURA 23 – GRÁFICO DA ESTIMATIVA MENSAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA OS ANOS DE 2014 E 2015	90
FIGURA 24 – GRÁFICO DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO AFLUENTE À ETE NOS ANOS DE 2014 E 2015.....	90
FIGURA 25 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2014.....	92
FIGURA 26 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2015	92
FIGURA 27 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DO MCI E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2014	93
FIGURA 28 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DO MCI E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2015	94
FIGURA 29 – GRÁFICO DO LODO RETIRADO DOS REATORES ANAERÓBIOS E LAGOAS EM 2014 E 2015.....	95
FIGURA 30 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DE LODO APÓS SECAGEM TÉRMICA COM O CALOR DO MCI PARA OS ANOS	

DE 2014 E 2015.....	95
FIGURA 31 – GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELO MCI.....	96
FIGURA 32 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2014.....	97
FIGURA 33 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2015.....	97
FIGURA 34 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DE LODO APÓS SECAGEM A PARTIR DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	98
FIGURA 35 – GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA QUEIMA DO BIOGÁS	99
FIGURA 36 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2014.....	100
FIGURA 37 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2015	100
FIGURA 38 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO E DA ESCUMA APÓS SECAGEM TÉRMICA.....	101
FIGURA 39 – GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO E DA ESCUMA APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA QUEIMA DO BIOGÁS.....	102
FIGURA 40 – GRÁFICO DA ESCUMA RETIRADA DOS REATORES ANAERÓBIOS.....	103
FIGURA 41 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA	

DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2014.	104
FIGURA 42 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2015.....	104
FIGURA 43- GRÁFICO DO VOLUME DE LODO E ESCUMA APÓS O PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA	105
FIGURA 44 - GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO E DA ESCUMA APÓS SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DA ENERGIA TÉRMICA DO BIOGÁS, DO LODO E DA ESCUMA.....	106
FIGURA 45 – GRÁFICO DO VOLUME FINAL DE RESÍDUOS A SEREM DESCARTADOS APÓS COMBUSTÃO DO LODO E ESCUMA SECOS.	107
FIGURA 46 - GRÁFICO DO TEOR DE SÓLIDOS DO LODO E DA ESCUMA APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA	107
FIGURA 47 - GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA ALIMENTAÇÃO DO SECADOR ROTATIVO, POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2014.....	108
FIGURA 48 - GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA ALIMENTAÇÃO DO SECADOR ROTATIVO, POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2015.....	109
FIGURA 49- GRÁFICO DO VOLUME DE LODO E ESCUMA APÓS O PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA E DO VOLUME PARCIAL DE BIOGÁS	110
FIGURA 50 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA E DO VOLUME PARCIAL DE BIOGÁS PARA O ANO DE PARA 2014.	110

FIGURA 51 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA E DO VOLUME PARCIAL DE BIOGÁS PARA O ANO DE PARA 2015.	111
FIGURA 52 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO E DA ESCUMA APÓS SECAGEM TÉRMICA.....	112
FIGURA 53 - GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO E DA ESCUMA APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA COMBUSTÃO DO LODO E ESCUMA E COMBUSTÃO DO BIOGÁS EXCEDENTE DO MCI.	112
FIGURA 54 – GRÁFICO DO CUSTO GLOBAL EVITADO.....	119

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 –	NÍVEIS DO TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	17
QUADRO 2 –	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS REATORES ANAERÓBIOS.....	19
QUADRO 3 –	ETAPAS DE GERENCIAMENTO DO LODO E PRINCIPAIS PROCESSOS UTILIZADOS.....	27
QUADRO 4 –	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS TÉRMICOS DE TRATAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	29
QUADRO 5 –	CLASSIFICAÇÃO DE ALGUMAS DAS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS PARA GERENCIAMENTO DO BIOGÁS.....	34
QUADRO 6 –	COMPONENTES MAIS FREQUENTEMENTE REMOVIDOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE BIOGÁS E AS POSSÍVEIS CONSEQUÊNCIAS DA NÃO REMOÇÃO NO PROCESSO DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS.....	35
QUADRO 7 –	MÉTODOS UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR OS MATERIAIS DA ETE.....	50
QUADRO 8 –	DADOS DE ENTRADA PARA AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS....	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E CALORIMÉTRICAS DE AMOSTRAS DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO.....	25
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO DO LODO DE REATORES ANAERÓBIOS.....	26
TABELA 3 – COMPONENTES DO BIOGÁS ORIUNDO DO TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO E LODO	31
TABELA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS DE COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR	38
TABELA 5 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE ESCUMA DE UASBs	40
TABELA 6 – PODER CALOR SUPERIOR E INFERIOR DA ESCUMA DAS ETES ATUBA SUL E PADILHA SUL E DO LODO ANAERÓBIO DAS ETES SANTA QUITÉRIA, BELÉM E ATUBA SUL	40
TABELA 7 – INDICADORES ESPECÍFICOS DE CONSUMO E GERAÇÃO DE MATERIAIS DA ETE ESTUDADA PARA OS ANOS DE 2014 E 2015 E NA ETE SANTA QUITÉRIA PARA O ANO DE 2013.	81
TABELA 8 - INDICADORES ESPECÍFICOS DE CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA NA ETE ESTUDADA PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	87
TABELA 9 – CONSUMO E TARIFA PAGA À CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE ESTUDADA NOS ANOS DE 2014 E 2015.....	113
TABELA 10 – CUSTO ANUAL EVITADO COM A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE ESTUDADA NOS ANOS DE 2014 E 2015.....	114
TABELA 11 – ESTIMATIVA DO CUSTO ATUAL E CUSTO EVITADO COM TRANSPORTE E DISPOSIÇÃO DE LODO E ESCUMA NA ETE ESTUDADA NOS ANOS DE 2014 E 2015.....	115
TABELA 12 – COMAPARAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS.....	117

LISTA DE SIGLAS

AFE	-	Análise de fluxo de energia
AFM	-	Análise de fluxo de materiais
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAFA	-	Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente
DBO	-	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	-	Demanda química de oxigênio
DWA	-	<i>Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall</i>
EP		Equivalente populacional
ETE	-	Estação de tratamento de esgoto
FHWA	-	<i>Federal Highway Administration Research and Technology</i>
GEE	-	Gases de efeito estufa
IPCC	-	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCI	-	Motor de combustão interna
NBR	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Nm ³	-	Normal metro cúbico.
O&G	-	Óleos e graxas
O&M	-	Operação e manutenção
PROBIOGÁS	-	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
PCI	-	Poder calorífico inferior
PCS	-	Poder calorífico superior
pH	-	Potencial hidrogeniônico
RAFA	-	Reator anaeróbio de fluxo ascendente

RALF	-	Reator anaeróbio de leito fluidificado
SANEPAR	-	Companhia de Saneamento do Paraná
SNIS	-	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SST	-	Sólidos suspensos totais
SSV	-	Sólidos suspensos voláteis
ST	-	Sólidos totais
SV	-	Sólidos voláteis
SVT	-	Sólidos voláteis totais
TS	-	Teor de sólidos
UASB	-	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>
UNFCCC	-	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS	17
3.2	TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS	18
3.2.1	Digestão anaeróbia.....	22
3.2.2	Subprodutos energéticos do tratamento anaeróbio	24
3.2.2.1	Lodo.....	24
3.2.2.2	Biogás.....	31
3.2.2.3	Escuma.....	39
3.3	ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS	41
3.4	ANÁLISE DE FLUXO DE ENERGIA.....	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	46
4.2	ESTUDO DOS FLUXOS DE MATERIAIS	47
4.2.1	Cálculo do indicador de consumo e geração de materiais	52
4.3	ESTUDO DOS FLUXOS DE ENERGIA.....	53
4.3.1	Demanda de energia elétrica da ETE.....	54
4.3.2	Estimativa do potencial de geração de energia a partir dos subprodutos.....	54
4.3.3	Cálculo do indicador de consumo e estimativa de geração de energia elétrica.....	56
4.4	CENÁRIOS AVALIADOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS	56
4.4.1	Cenário 1 – Geração de energia elétrica a partir do biogás	58

4.4.2	Cenário 2 – Cogeração de energia a partir do biogás	59
4.4.3	Cenário 3 – Secagem térmica do lodo a partir do biogás	63
4.4.4	Cenário 4 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir do biogás.....	65
4.4.5	Cenário 5 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da combustão do lodo, espuma e biogás	66
4.4.6	Cenário 6 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da energia térmica do lodo, biogás e espuma e geração de energia elétrica a partir do biogás	69
4.5	CUSTOS POTENCIALMENTE EVITADOS	73
4.5.1	Energia elétrica.....	73
4.5.2	Cálculo dos custos de transporte e disposição do lodo e espuma	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
5.1	ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAIS DA ETE	76
5.1.1	Balanco de massa anual da ETE.....	76
5.1.2	Indicadores de consumo e geração de materiais da ETE	80
5.2	ANÁLISE DO FLUXO DE ENERGIA DA ETE	82
5.2.1	Balanco de energia anual da ETE	82
5.2.2	Indicadores de consumo e geração de energia da ETE	86
5.3	ESTUDO DOS CENÁRIOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NA ETE	88
5.3.1	Cenário 1 – Geração de energia elétrica a partir do biogás	88
5.3.2	Cenário 2 – Cogeração de energia a partir do biogás	91
5.3.3	Cenário 3 – Secagem térmica do lodo a partir do biogás	97
5.3.4	Cenário 4 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir do biogás.....	99
5.3.5	Cenário 5 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da combustão do lodo, espuma e biogás	104
5.3.6	Cenário 6 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da energia térmica do lodo, biogás e espuma e geração de energia	

elétrica a partir do biogás	108
5.3.7 Custos evitados	113
5.3.7.1 Custos com energia elétrica	113
5.3.7.2 Custos com transporte e disposição final do lodo e espuma	114
5.3.8 Comparação dos cenários avaliados	116
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
6.1 CONCLUSÕES	123
6.2 TRABALHOS FUTUROS	125

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um grande déficit a ser superado em relação ao esgotamento sanitário. Aproximadamente 50% do esgoto gerado no país é coletado e cerca de 40% é tratado (SNIS, 2016).

Um dos principais desafios a serem enfrentados, para que a população possa usufruir de maior acesso aos serviços de saneamento, está relacionado ao custo associado à implantação e operação de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) que satisfaçam os requisitos da legislação ambiental vigente.

O aumento das restrições ambientais, como as estabelecidas pela Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005) e pela Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), têm feito com que as ETEs se tornem cada vez mais mecanizadas e energo-intensivas, acarretando em maiores investimentos e custos operacionais.

Os custos relacionados à energia elétrica, no setor de saneamento, correspondem a pouco mais de 11% das despesas de exploração, perdendo apenas para o custo com pessoal próprio, que representa, em média 42,4% (SNIS, 2016). Tendências apontam para um maior consumo de energia, no futuro, devido ao aumento da população atendida, requisitos de lançamento de esgotos ainda mais restritivos e envelhecimento da infraestrutura existente (STILLWELL, HOPPOCK e WEBBER, 2010).

O aproveitamento energético dos subprodutos do tratamento de esgotos vem de encontro às necessidades identificadas. Considerando que o processo de tratamento de esgotos ocorre de forma contínua e que a geração dos subprodutos é inerente ao processo, tem-se, então, uma fonte renovável de energia, que pode ser utilizada para subsidiar parte dos custos do sistema.

Segundo Chernicaró (2007), os processos biológicos de tratamento de esgotos consistem essencialmente na capacidade dos microorganismos envolvidos utilizarem os compostos orgânicos biodegradáveis, transformando-os em subprodutos que podem ser removidos do sistema. Esses subprodutos possuem um potencial energético representativo, porém pouco utilizado no Brasil. No caso dos sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes, os subprodutos mais energéticos são o biogás, o lodo e a espuma. A destinação final habitualmente adotada ao biogás limita-se à queima com baixa eficiência, enquanto que para o lodo e a

escuma ocorre a disposição em aterros sanitários, sendo escassas as iniciativas de aproveitamento energético.

A avaliação quanto ao potencial de aproveitamento energético de uma ETE pode ocorrer por meio de uma análise de fluxo de materiais e de energia, a fim de se diagnosticar suas potencialidades e requisitos energéticos. Já a escolha da melhor configuração de aproveitamento energético deve levar em consideração diferentes possibilidades de transformação da energia química dos subprodutos em energia útil, por meio da avaliação de cenários, além dos custos do projeto a ser implantado.

No Brasil ainda são incipientes os trabalhos relacionados ao aproveitamento energético de subprodutos de ETEs. Os trabalhos a nível mundial não refletem a realidade brasileira, por abordarem configurações de ETEs pouco utilizadas no país. Nesse sentido, o presente trabalho buscou avaliar os potenciais de geração de energia renovável em uma ETE de médio porte, que utiliza a tecnologia anaeróbia seguida de lagoas aeradas, a fim de contribuir com mais uma topologia de ETE condizente com a realidade brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás, lodo e espuma de uma estação anaeróbia de tratamento de esgotos para fins de geração de energia renovável.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar e quantificar os fluxos de materiais e de energia da ETE;
- Avaliar os indicadores de específicos de materiais e de energia por processo de tratamento;
- Estudar seis cenários de aproveitamento energético dos subprodutos buscando suprir a demanda energética da ETE;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

A seleção dos sistemas de tratamento de esgotos deve levar em conta uma análise detalhada das condições e necessidades locais, aplicação do conhecimento científico e engenharia baseado em experiências passadas e considerações sobre a legislação federal, estadual e municipal (METCALF, EDDY, 2003).

Os sistemas de tratamento de esgotos podem ser classificados de acordo com seu nível de tratamento e poluente removido (VON SPERLING, 1996), podendo ser adotados diferentes processos de tratamento para a remoção de um mesmo poluente, conforme relacionado no QUADRO 1.

QUADRO 1 – NÍVEIS DO TRATAMENTO DE ESGOTOS

NÍVEL DE TRATAMENTO	POLUENTE REMOVIDO	PROCESSO DE TRATAMENTO
Preliminar	- sólidos em suspensão grosseiros.	- gradeamento. - desarenação. - sedimentação. - flotação. - precipitação química.
Primário	- sólidos em suspensão sedimentáveis. - DBO em suspensão.	- decantadores primários. - precipitação química. - flotação.
Secundário	- sólidos não sedimentáveis. - DBO em suspensão fina. - DBO solúvel. - nutrientes (parcialmente). - patogênicos (parcialmente).	- lagoas de estabilização e variações. - lodos ativados e variações. - filtro biológico e variações. - tratamento anaeróbio. - sistema físico-químico.
Terciário	- nutrientes. - patogênicos. - compostos não biodegradáveis. - metais pesados. - sólidos inorgânicos dissolvidos. - sólidos em suspensão remanescentes.	- radiação ultravioleta. - ozonização. - nitrificação e desnitrificação biológica. - processos físico-químicos. - remoção biológica. - processos físico-químicos.

FONTE: Adaptado de VON SPERLING (1996) e METCALF e EDDY (2003)

No tratamento preliminar ocorre a remoção de sólidos grosseiros que podem vir a danificar os equipamentos da ETE. O tratamento primário caracteriza-se por se

tratar de um mecanismo físico, usualmente sedimentação ou flotação, que tem a finalidade de remover material flotável ou sedimentável. A matéria orgânica biodegradável é removida no tratamento secundário por meio de processos biológicos e/ou químicos, gerando subprodutos como lodo, espuma e biogás. No tratamento terciário ocorre a remoção dos sólidos suspensos remanescentes e de poluentes específicos.

As principais unidades de tratamento, na maior parte das ETEs, são as correspondentes ao tratamento secundário, onde podem ser adotadas diferentes combinações de processos, como os sistemas físico-químicos ou biológicos (LEITÃO *et al.*, 2006).

Os sistemas biológicos de tratamento de efluentes são divididos em aeróbios e anaeróbios. Autores como Seghezzeo *et al.* (1998) e Leitão *et al.* (2006) destacam como vantagens dos sistemas anaeróbios, frente aos sistemas aeróbios, a menor geração de lodo, menor requisito de energia (aeração) e geração de biogás.

No Brasil, a implementação da tecnologia anaeróbia foi impulsionada por fatores como condições ambientais favoráveis, extremo déficit no saneamento e a necessidade de desenvolvimento de sistemas de baixo custo a fim de superar as dificuldades financeiras (FORESTI, 2002).

Nos capítulos seguintes será detalhado o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos, seus subprodutos, além de alternativas de gerenciamento e aproveitamento energético.

3.2 TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos passaram por um período de descrédito até o início da década de 80. Segundo Chernicaró (2007), os reatores daquela época, chamados de baixa taxa, apresentavam reduzida taxa de crescimento da biomassa anaeróbia, acarretando em baixa capacidade de recuperação quando sujeitas a condições ambientais diversas.

Na década de 70, o Prof. Gatzke Lettinga e equipe da Universidade de Wageningen na Holanda, aperfeiçoaram a tecnologia de tratamento anaeróbio com o desenvolvimento dos reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*), ou Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (METCALF; EDDY, 2003).

Com a justificativa de se tratar de um sistema de operação simples e econômica, a utilização dos UASBs já é uma realidade em países tropicais e em desenvolvimento, como Brasil, México, Colômbia, Cuba, Índia, entre outros (JORDÃO; PESSÔA, 2011; FORESTI, 2002).

De acordo com Foresti (2012), os reatores UASBs satisfazem os principais requisitos do tratamento biológico simples e eficiente: i) alta concentração de biomassa no interior do reator, propiciando alto período de retenção celular; ii) desenvolvimento de uma estrutura multicelular agregada na forma de uma densa camada de lodo, composta de diferentes espécies de microorganismos, responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono; iii) baixo requisito de nutrientes e baixa produção de lodo excedente; iv) grande estabilidade quando exposto a flutuações normais de composição e concentração do efluente; v) capacidade de absorver altas cargas orgânicas.

O QUADRO 2 apresenta as vantagens e desvantagens dos reatores anaeróbios.

QUADRO 2 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS REATORES ANAERÓBIOS

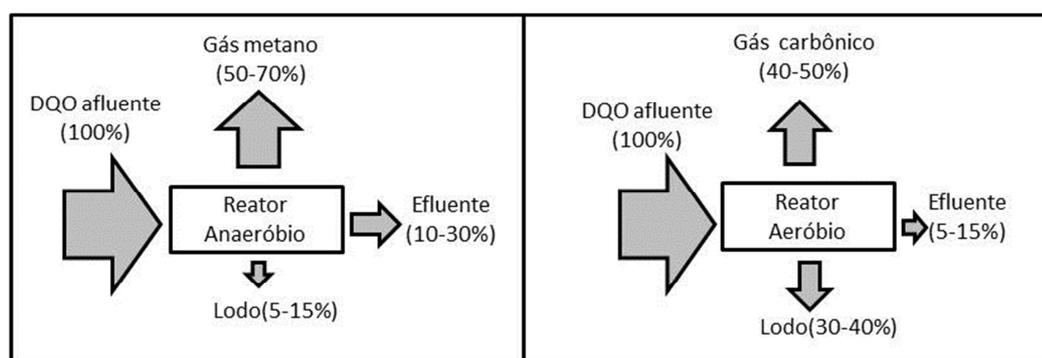
VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> – sistema compacto, com baixa demanda de área; – baixo custo de implantação e de operação; – baixa produção de lodo; – baixo consumo de energia; – satisfatória eficiência de remoção de DBO/DQO, da ordem de 65-75%; – possibilidade de reinício rápido, mesmo após longas paralisações; – elevada concentração de lodo excedente; – boa desidratabilidade do lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> – possibilidade de emissão de maus odores; – baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas; – baixa capacidade de remoção de patógenos e nutrientes; – elevado intervalo de tempo necessário para partida do sistema; – necessidade de uma etapa de pós tratamento, dependendo dos requisitos ambientais.

FONTE: Adaptado de CHERNICARO (2007) e SEGHEZZO *et al.* (1998).

Os efluentes dos reatores anaeróbios, no entanto, raramente atendem aos requisitos ambientais de tratamento de esgotos. A quantidade de nutrientes geralmente permanece inalterada após o tratamento e a concentração residual de patógenos é alta (AIYUK *et al.*, 2006), o que cria a necessidade da implantação de sistemas de pós-tratamento, como lagoas aeradas, lodos ativados, sistemas de flotação a ar dissolvido, entre outros (CHERNICARO, 2007).

A vantagem dos sistemas anaeróbios frente aos aeróbios também pode ser observada por meio da comparação entre a conversão biológica da Demanda Química de Oxigênio (DQO), que permite identificar diferentes rotas de conversão da matéria orgânica (FIGURA 1).

FIGURA 1 - BALANÇO DE DQO EM SISTEMAS ANAERÓBIOS E AERÓBIOS



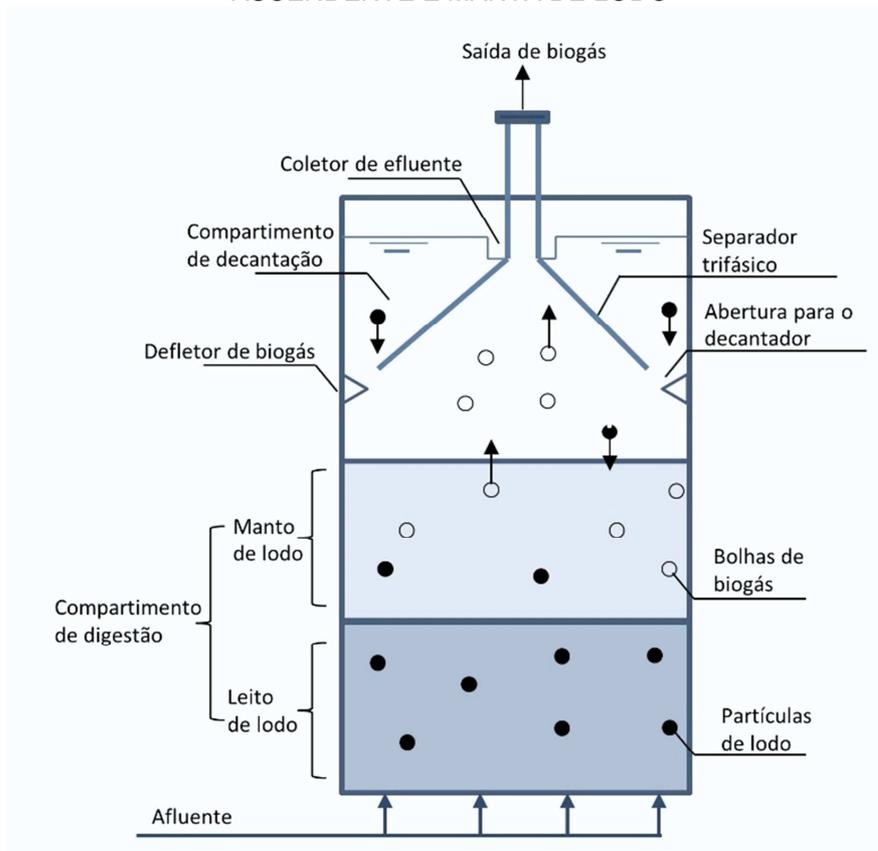
FONTE: Adaptado de CHERNICARO *et al.* (2007)

De acordo com Chernicaró (2007), a grande vantagem dos sistemas anaeróbios consiste no fato de que grande parte da DQO afluyente (50 a 70%) é convertida em biogás. A biomassa microbiana ou lodo gerado varia entre 5 e 15% e apresenta boas condições de desidratabilidade. A DQO não convertida deixa o reator e é lançado junto ao efluente (10-30%). Em sistemas aeróbios a estabilização biológica ocorre pela conversão de 40 a 50% da matéria orgânica em gás carbônico (CO₂). Cerca de 30 a 40% da matéria orgânica é convertida em biomassa microbiana. O material orgânico não convertido deixa o reator na forma de material não degradado (5 a 15%) (CHERNICARO, 2007).

No Brasil, têm-se adotado outras denominações para o UASB como RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado), RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) e DAFA (Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente).

Os reatores tipo UASB caracterizam-se por ser um processo onde o fluxo de esgotos ascende em um leito de lodo denso, com biomassa de elevada atividade. A FIGURA 2 mostra a representação esquemática de um reator UASB.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E MANTA DE LODO



FONTE: Adaptado de CHERNICARO (2007).

No reator UASB o esgoto segue por uma trajetória ascendente através do compartimento de digestão, passando pela abertura existente entre o defletor de gás e o separador trifásico, em direção ao compartimento de decantação. A digestão anaeróbia ocorre no contato do esgoto (material orgânico) com o lodo anaeróbio presente no compartimento de digestão, resultando na produção de biogás e crescimento do lodo (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994). O separador trifásico tem como funções a separação e a acumulação dos gases, a separação e retorno dos sólidos e o encaminhamento da fase líquida a zona de decantação (CHERNICARO, 2007).

Os flocos de lodo que são arrastados para a parte superior do separador trifásico encontram uma zona de baixa velocidade (zona de decantação), onde a velocidade de sedimentação pode se tornar maior do que a velocidade de arraste, fazendo com que os flocos de lodo fiquem depositados sobre a superfície inclinada do separador trifásico, retornando então ao compartimento de digestão (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

O biogás que se forma no compartimento de digestão ascende junto com a fase líquida até abaixo do separador trifásico, onde ocorre o desprendimento do biogás. O defletor de gás tem a função de encaminhar as bolhas de biogás que eventualmente se direcionam no sentido do compartimento de decantação para a tubulação de descarte ou aproveitamento do biogás (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994)

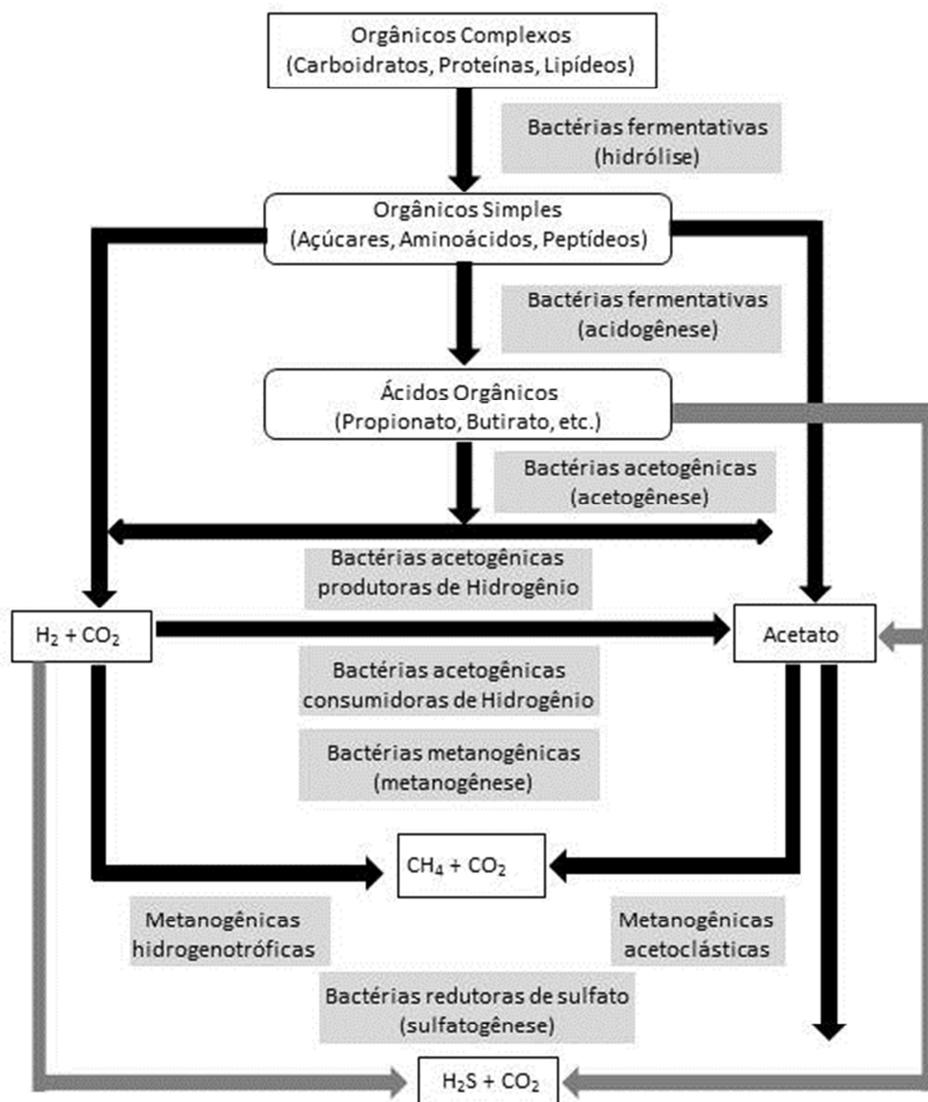
Além do UASB, outras configurações de sistemas anaeróbios têm sido estudadas, como os reatores anaeróbios compartimentados (JAMSHIDI *et al.*, 2014) e os reatores anaeróbios horizontais de leito fixo (ZAIAT; PASSIG; FORESTI, 2000). Embora os estudos tenham apresentado potenciais de aplicação, os resultados, em sua maioria, são baseados em modelos de bancada ou plantas piloto.

3.2.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo de múltiplas etapas onde compostos orgânicos complexos são convertidos em formas mais oxidadas e reduzidas de carbono monoatômico (dióxido de carbono e metano, respectivamente) (BATSTONE; VIRDIS, 2014).

O processo de digestão anaeróbia é dividido em quatro principais fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme pode ser observado na FIGURA 3.

FIGURA 3 - ROTAS METABÓLICAS E GRUPOS MICROBIANOS ENVOLVIDOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA, COM REDUÇÃO DE SULFATO



FONTE: Adaptado de CHERNICARO (2007)

Na hidrólise, materiais particulados complexos, como carboidratos, proteínas e lipídeos são biologicamente convertidos em materiais dissolvidos mais simples (McCARTY, 1964).

A acidogênese ocorre por meio de um grupo diversificado de bactérias fermentativas, na qual a maioria é anaeróbia, com algumas espécies facultativas que podem metabolizar o material orgânico por via oxidativa. Os produtos da hidrólise são absorvidos e excretados na forma de compostos mais simples, como os ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Na acetogênese, as bactérias oxidam os produtos gerados na acidogênese em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, substratos adequados para as bactérias metanogênicas. A formação dos ácidos acético e propiônico implica na produção de grande quantidade de hidrogênio, que pode ser consumido de duas formas: i) bactérias metanogênicas que utilizam o dióxido de carbono e hidrogênio para produção de metano; e ii) por meio da produção de ácidos orgânicos como o propiônico e o butírico, formados pela reação do hidrogênio com o dióxido de carbono e ácido acético (CHERNICARO, 2007).

Segundo Chernicaro (2007), as bactérias responsáveis pela metanogênese são divididas em dois grupos em função de seu substrato e magnitude de produção de metano: acetoclásticas, que formam metano a partir do acetato, e hidrogenotróficas, que produzem o metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono.

A sulfetogênese, redução de sulfato e formação de sulfetos, pode ser considerada como uma possível quinta fase e só ocorre se o efluente contém compostos de enxofre (CHERNICARO, 2007).

Segundo Leitão (2006) a digestão anaeróbia pode ser afetada por variações de ordem operacionais e ambientais, entre as quais, configuração do reator, variação da carga orgânica, variação da carga hidráulica, alcalinidade, choque de compostos específicos, baixas temperaturas, alterações de pH, entre outras.

Em termos gerais, pode-se dizer que as respostas para essas variações são bastante similares. A resposta típica é uma fase metanogênica incompleta, resultando em acumulação de ácidos graxos voláteis, queda do valor do pH e alcalinidade, mudança na produção e composição do biogás (aumento do CO₂ e H₂) (LEITÃO, 2006).

3.2.2 Subprodutos energéticos do tratamento anaeróbio

3.2.2.1 Lodo

O lodo, originário do tratamento anaeróbio de esgotos domésticos, é uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas e microrganismos. Alguns de seus ingredientes, como a matéria orgânica (cerca de 60% em base seca) e

nutrientes, são componentes valiosos que podem ser aproveitados na agricultura (MANARA; ZABANIOTOU, 2012).

Por outro lado, o lodo pode conter substâncias prejudiciais, como patógenos, disruptores endócrinos e metais pesados, o que torna fundamental seu correto gerenciamento e condicionamento, de modo a evitar possíveis contaminações no meio ambiente (WIECHMANN *et al.*, 2013)

Adicionalmente, o lodo, quando devidamente condicionado, possui um elevado poder calorífico, que permite sua aplicação para fins de aproveitamento energético;

A fim de verificar a potencialidade energética do lodo, é necessário conhecer sua composição e características. Possetti (2013) e Rosa (2013) avaliaram as propriedades físicas, químicas e calorimétricas do lodo oriundo de estações de tratamento anaeróbias. Os resultados obtidos estão sintetizados na TABELA 1.

TABELA 1 – PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E CALORIMÉTRICAS DE AMOSTRAS DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO

ANÁLISES	PARÂMETROS	ETE ATUBA SUL ^a	ETE SANTA QUITÉRIA ^a	ETE LABOREAUX ^b
Composição imediate	Cinzas (%)	45,19*	44,94*	53,3*
	Matéria volátil (%)	40,39*	48,79*	42,9*
	Carbono fixo (%)	14,42*	6,27*	3,8*
	Umidade (% ^c , bruta)	7,43	4,63	58,7
Composição elementar	C (%)	20,81*	30,76*	19,8*
	H (%)	3,43*	4,32*	3,6*
	N (% ^c , b. s.)	2,74*	3,29*	2,1*
	S (% ^c , b. s.)	4,84*	5,21*	-
	O (% ^c , b. s.)	22,29*	11,46*	20,5*
	Cl ⁻ (% ^c , b. s.)	0,70*	-	-
	F ⁻ (% ^c , b. s.)	< 0,001*	-	-
Poder calorífico	PCS ^{***} (kcal.kg ⁻¹)	2.128,06*	4.108,59*	2.079,35*
	PCI ^{****} (kcal.kg ⁻¹)	2.000,66*	3.856,59*	478,01**

FONTE: Adaptado de POSSETTI (2013) e ROSA (2013)

^a lodo após secagem térmica

^b lodo após desidratação mecânica em prensa parafuso

*base seca

** base de trabalho, à 58,7% de umidade

*** PCS: Poder calorífico superior

**** PCI: Poder calorífico inferior

Conforme relatado por Rosa (2013) na ETE Laboreaux, o elevado teor de cinzas pode ser explicado pelo uso de cal e cloreto férrico para a melhoria do processo de desidratação mecânica por filtro prensa. Para Possetti (2013), o elevado teor de cinzas nas ETEs Santa Quitéria e Atuba Sul indicam que teores consideráveis de minerais estão presentes em sua composição e realçam o processo de estabilização no interior dos reatores.

Elevados teores de carbono e hidrogênio contribuem de forma a aumentar o poder calorífico e o potencial de combustão. Já o oxigênio, faz diminuir o poder calorífico. (OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006).

O nitrogênio, caso o lodo seja submetido a processos de combustão, é quase que completamente convertido em nitrogênio gasoso e óxidos de nitrogênio, um dos principais impactos ambientais na queima de biocombustíveis no que diz respeito ao desequilíbrio do efeito estufa (OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006).

Em estudos de aproveitamento energético de lodos de ETE, o conhecimento do poder calorífico inferior do lodo (PCI) é fator determinante na avaliação da viabilidade do sistema. Os valores de PCI obtidos por Possetti (2013) para o lodo da ETE Santa Quitéria são equivalentes aos valores do PCI do carvão e madeira, também em base seca, relatados por Manara e Zabaniotou (2012), o que o torna um subproduto com potencial energético comparável a combustíveis sólidos comerciais.

O lodo anaeróbio oriundo de reatores UASB possui ainda características que facilitam o processo de desidratação como elevado grau de estabilização e elevada concentração de sólidos (CHERNICARO, 2007), conforme pode ser observado na TABELA 2.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO DO LODO DE REATORES ANAERÓBIOS

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	VALORES USUAIS
Relação SV/ST	-	0,55 – 0,80
Teor de sólidos	%	3 – 5
Massa específica	kg/m ³	1.010 – 1.020
Produção per capta lodo líquido	L(hab.d) ⁻¹	0,2 – 0,6

FONTE: Adaptado de ANDREOLI *et al.* (2001) e JORDÃO e PESSÔA (2011)

Uma das grandes vantagens dos sistemas anaeróbios frente aos sistemas aeróbios, de acordo com Chericaro (2007), consiste na baixa produção de lodo, que varia de 0,10 a 0,20 kgSST (kgDQO_{aplicada})⁻¹, consequência das baixas taxas de crescimento das bactérias anaeróbias. No processo de lodos ativados com aeração prolongada, por sua vez, estima-se uma produção de lodo na faixa de 0,50 a 0,55 kgSST.(kgDQO_{aplicada})⁻¹ (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A baixa produção de lodo reflete diretamente em um menor custo operacional no tratamento de esgotos. Segundo Andreoli *et al.* (2001), apesar do volume correspondente ao lodo representar de 1% a 2% do esgoto tratado, os custos relativos ao seu manuseio, tratamento e destinação variam entre 20 a 60% do custo total de operação de uma ETE.

Em relação aos custos de investimento, os valores relativos à implantação da infraestrutura necessária para gerenciamento do lodo, estes podem chegar a 50% do custo total de uma ETE (MEOZZI, 1997).

As principais etapas de gerenciamento do lodo e os processos utilizados em cada etapa estão relatados no QUADRO 3.

QUADRO 3 - ETAPAS DE GERENCIAMENTO DO LODO E PRINCIPAIS PROCESSOS UTILIZADOS

ETAPA	PROCESSO
Adensamento	- adensamento por gravidade. - flotação. - centrifugação. - filtro prensa.
Estabilização	- digestão anaeróbia. - digestão aeróbia. - tratamento térmico. - estabilização química.
Condicionamento	- condicionamento químico. - condicionamento térmico.
Desidratação	- leitos de secagem. - lagoas de lodo. - filtros prensa. - centrifugação. - filtro prensa. - filtro a vácuo. - secagem térmica.

ETAPA	PROCESSO
Higienização	<ul style="list-style-type: none"> - adição de cal. - tratamento térmico. - compostagem. - oxidação úmida. - outros (radiação gama, solarização, etc.).
Disposição final	<ul style="list-style-type: none"> - reciclagem agrícola. - recuperação de áreas degradadas - disposição no solo. - uso não agrícola (fabricação de lajotas, combustível, etc.). - incineração. - oxidação úmida. - aterro sanitário.

FONTE: ANDREOLI *et al.* (2001).

A etapa de adensamento tem como objetivo reduzir o volume do lodo a ser manuseado por meio da remoção parcial da água e consequente aumento do teor de sólidos (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

A estabilização visa a mineralização da matéria orgânica, promovendo a conversão do lodo bruto em líquidos, sólidos dissolvidos e subprodutos gasosos (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

O condicionamento antecede a etapa de desidratação. Nesta etapa são adicionados produtos químicos ao lodo como coagulantes e polieletrólitos com a finalidade de aumentar sua desidratabilidade (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A desidratação tem como objetivo reduzir a umidade do lodo a fim de diminuir os custos das etapas de transporte e destinação final.

A higienização do lodo só é necessária se a destinação final consistir em aplicação agrícola, visto que as etapas anteriores não reduzem o nível de patógenos a patamares aceitáveis (ANDREOLI *et al.*, 2001).

No Brasil, a Resolução CONAMA n. 375, de 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), estabelece as concentrações máximas de patógenos aceitáveis para o lodo a ser destinado na agricultura.

Nos países da União Europeia a diretiva 86/278/EEC é responsável por regular e estabelecer limites para a aplicação do lodo de esgotos na agricultura. No entanto, a aplicação agrícola do lodo vem sendo desencorajada por muitos dos

países membros da comidade europeia por ser considerada uma rota insegura, visto a possibilidade de acumulação de substâncias indesejáveis no lodo, como metais pesados, patógenos e poluentes orgânicos, que potencialmente podem ser incorporados à cadeia alimentar (FYTILI, ZABANIOTOU, 2008).

Dessa forma, dentre as possibilidades de recuperação e utilização do lodo, os processos térmicos vêm ganhando destaque nas últimas décadas por possibilitar a valoração dos subprodutos obtidos a partir dos resíduos da biomassa (ROSA, 2013).

Além dos benefícios energéticos, os processos térmicos associados ao gerenciamento do lodo de ETEs proporcionam vantagens como a redução do volume a ser transportado e a inertização do lodo, reduzindo custos de transporte e destinação final.

Segundo Fytily e Zabaniotou (2008), o principal objetivo do processamento térmico do lodo oriundo do tratamento de esgotos é propiciar a utilização da energia armazenada no lodo e a minimização dos impactos ambientais de forma simultânea a fim de atender às legislações cada vez mais restritivas.

Os processos térmicos mais representativos dessa categoria são a combustão gaseificação e a pirólise.

No QUADRO 4 estão relacionadas as vantagens e desvantagens da pirólise, gaseificação e combustão no tratamento térmico de lodo de ETE.

QUADRO 4 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS TÉRMICOS DE TRATAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

ALTERNATIVA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Combustão	<ul style="list-style-type: none"> - Significante redução de volume de lodo. - Valorização energética do lodo. - Os subprodutos da combustão, como cinzas e material inerte podem ser reciclados em aplicações como asfalto e pré-fabricados em concreto. - Tecnologia consolidada. - Minimização de odores por se tratar de sistema em ambiente fechado e sujeito a altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado de implantação e operação. - Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados, restringindo alternativas de disposição final. - Potencial de geração de compostos como NO_x, SO₂, HCl, HF, dioxinas e furanos, assim como acumulação de metais pesados. - Elevados custos para o controle ambiental, devido a limpeza dos gases.
Pirólise e Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> - Promovem a destruição dos compostos orgânicos. - Redução de volume do lodo da ordem de 90% e geração de 	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnologia complexa e pouco disponível comercialmente. - Elevado custo operacional e de manutenção.

ALTERNATIVA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
	material inerte. - Baixa 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. - Elevadas taxas de conversão dos subprodutos a energia. - Moderado poder calorífico dos gases gerados na pirólise, da ordem de 15 MJ/m ³ .	- Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com potencial de concentração dos metais pesados originalmente presentes no substrato. - Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo.

FONTE: ROSA (2013) e PÉREZ-ELVIRA, DIEZ E FERNANDEZ-POLANCO (2006).

Segundo Rosa (2013), o processo de combustão é o mais difundido e consolidado, apresentando vantagens como maior simplicidade operacional, menores requisitos de preparo do lodo e possibilidade de utilização em ETEs de diversos portes. A combustão do lodo, no entanto, pode ser vista como uma potencial fonte de vários poluentes, como dioxinas e furanos policlorados, SO_x, NO_x e metais pesados (FYTILI; ZABANIOTOU, 2008), exigindo um oneroso tratamento da fase gasosa resultante do processo.

A gaseificação é um processo termoquímico complexo onde o conteúdo carbonáceo do lodo é convertido em gás combustível e cinzas a partir de uma atmosfera controlada (FYTILI, ZABANIOTOU, 2008). Como produtos do processo têm-se o calor e o syngás (gás sintético), que possui elevado potencial energético e pode ser convertido em energia elétrica e calor (ROSA, 2013).

Na pirólise as substâncias orgânicas do lodo são termicamente decompostas em uma atmosfera livre de oxigênio, sob altas temperaturas, gerando como subprodutos gases combustíveis, carvão e óleo, vapor d'água (FYTILI; ZABANIOTOU, 2008). Parte de seus subprodutos sólidos e/ou gasosos são incinerados e usados como fonte de calor no próprio processo de pirólise (TYAGI; LO, 2013).

A gaseificação e a pirólise geralmente apresentam maior eficiência do que a combustão, com gastos operacionais semelhantes (ROSA, 2013). As plantas de pirólise e gaseificação constituem alternativas promissoras de recuperação

energética do lodo, porém ainda se encontram em fase experimental e necessitam de maiores estudos a fim de se obter aplicabilidade comercial (TYAGI; LO, 2013).

De acordo com Gorgec *et al.* (2016), a definição da alternativa de processamento térmico do lodo que atenda às necessidades da ETE deverá levar em consideração os custos de operação e manutenção e possíveis impactos na eficiência de tratamento da estação.

3.2.2.2 Biogás

O biogás pode ser definido como uma mistura de gases resultante da digestão anaeróbia da matéria orgânica, predominantemente metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e demais compostos, conforme pode ser observado na TABELA 3. Sua composição depende do tipo e da concentração da matéria orgânica a ser digerida, da condição físico-química do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de ânions como sulfatos e nitratos (CONSTANT *et al.*, 1989; NOYOLA *et al.*, 2006).

TABELA 3 – COMPONENTES DO BIOGÁS ORIUNDO DO TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO E LODO

COMPONENTE	UNIDADE	continua	
		BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE LODO
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	ppm*	1.000 – 5.000	500 - 1.500
Enxofre total (S)	mg. Nm ⁻³	-	20 – 2.500
Halogênios	mg.Nm ⁻³	-	0 – 100
Cloro (Cl)	mg.Nm ⁻³	-	1 -5
Flúor (F)	mg.Nm ⁻³	-	1 -5
Total de compostos orgânicos com silício	mg.Nm ⁻³	-	<40
Compostos aromáticos	mg.Nm ⁻³	-	< 10 em 100% CH ₄
Umidade relativa	%	-	90 – 100
Teor de oxigênio (O ₂)	% em vol.	0 – 2	0 – 1
Metano (CH ₄)	% em vol.	60 – 85	60 – 70
Número de Metano	-	-	>100

COMPONENTE	UNIDADE	conclusão	
		BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO	BIOGÁS DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE LODO
Poder calorífico inferior (PCI)	kWh.Nm ⁻³	6,0 – 8,5	6,0 – 7,0
Índice de Wobbe	kWh.Nm ⁻³	7,0 – 13,4	7,0 – 9,1
Dióxido de carbono (CO ₂)	% em vol.	5 – 15	20 – 40
Nitrogênio (N ₂)	% em vol.	2 – 25	0 – 2
Amônia (NH ₃)	% em vol.	-	< 0,05
Hidrogênio (H ₂)	% em vol.	0 - 3	0 – 1,5

FONTE: Adaptado de DWA-M 361 (2011); RANDES *et al.* (1981); NOYOLA, CAPDEVILLE e ROQUES (1988); AGRAWAL, HARADA e OKUI (1997); BOHN¹ (1993 *apud* BELLI, 2001); PAGLIUSO *et al.* (2002), BARBOSA E STUETZ (2005); USEPA (2005), NOYOLA *et al.* (2006); RASI *et al.* (2007).

*ppm: partes por milhão

Nm³: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 0 Cº e 1 atm.

De acordo com Agrawal, Harada e Okui (1997), o menor teor de CO₂ no biogás, oriundo do tratamento anaeróbico de esgotos em reatores do tipo UASB, indica que grande parte desse gás permanece no efluente como íons bicarbonato. A elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios é atribuída à dissolução do ar no esgoto doméstico que adentra o reator (BARBOSA; STUETZ, 2005).

A quantidade de metano presente no biogás está relacionada ao seu potencial energético, refletindo diretamente em seu poder calorífico. O biogás com composição típica de 60% de metano tem PCI de cerca de 6 kWh.Nm⁻³, o que corresponde a 67% do poder calorífico inferior do gás natural (LOBATO, 2011).

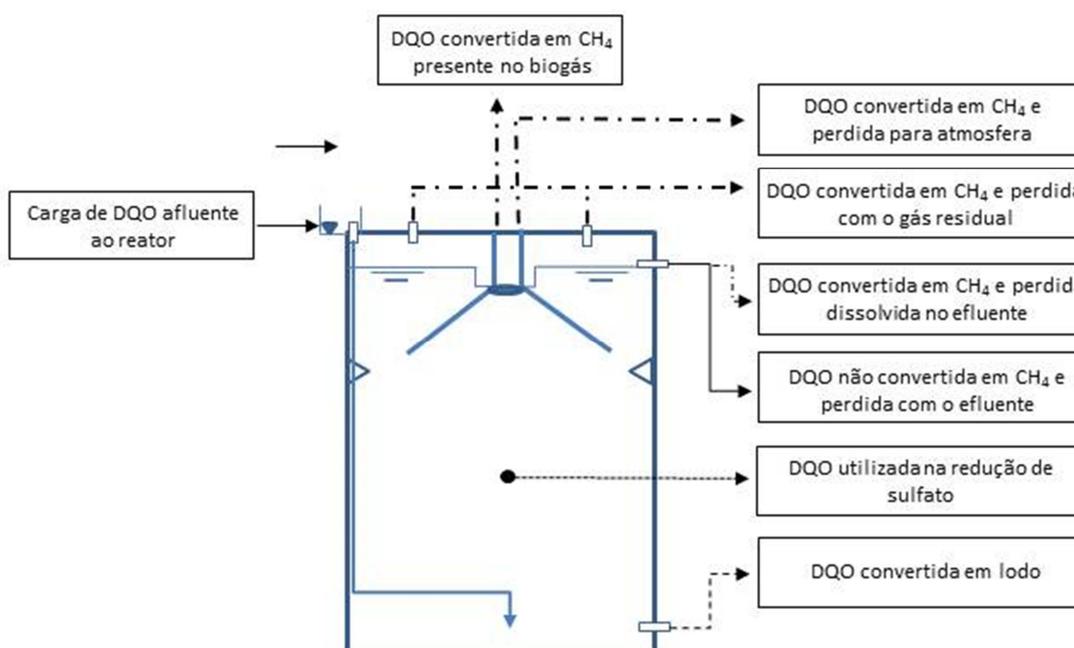
A produção de biogás pode ser obtida por meio de medições diretas, conforme realizado por Possetti *et al.* (2013), ou por meio de modelos matemáticos, que levam em consideração parâmetros como a vazão, eficiência de remoção de DQO, entre outros.

Silva, Possetti e Coelho (2014) avaliaram as metodologias propostas por IPCC (2006), UNFCC (2013), Chernicaro (1997) e Lobato (2011), comparando-as com medições em tempo real realizadas em 16 reatores UASB da ETE Atuba Sul,

¹BOHN, H. L. Bioprocessing of organic gases in waste air. **Symposium on Bioremediation and Bioprocessing**. 205 th National Meeting. American Chemical Society, Denver, 28 mar – 2 abr, 1993

localizada em Curitiba – PR. A metodologia proposta por Lobato (2011) foi a que mais se aproximou dos valores medidos, pois leva em consideração todas as rotas de conversão e perdas no reator, incluindo a porção de DQO utilizada na sulfato redução e as perdas do metano dissolvido no meio líquido, na forma de gases residuais, conforme FIGURA 4.

FIGURA 4 - ROTAS DE CONVERSÃO DE DQO E FLUXOS DE METANO EM REATORES UASB



FONTE: Adaptado de LOBATO (2011)

Simulações realizadas por Lobato (2011), com base em sua metodologia, resultaram em relações unitárias de produção de metano e biogás, levando em consideração cenários distintos de recuperação de metano, onde a estimativa de produção de metano variou de 3,6 a 16,7 NL(hab.dia)⁻¹ e a de biogás 5,2 a 20,8 NL(hab.dia)⁻¹ para os diferentes cenários e condições impostas pelo modelo.

Quanto à periodicidade da produção do biogás, estudos realizados por Possetti *et al.* (2013) indicaram que a produção de biogás possui um comportamento temporal variável, periódico e não estacionário, influenciado por chuvas e pelas características físico-químicas do esgoto afluente.

O biogás é um importante gás indutor de efeito estufa, o que torna seu gerenciamento parte fundamental do tratamento de efluentes. O QUADRO 5

apresenta a classificação de algumas das principais alternativas e respectivas tecnologias para gerenciamento do biogás.

QUADRO 5 - CLASSIFICAÇÃO DE ALGUMAS DAS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS PARA GERENCIAMENTO DO BIOGÁS

ALTERNATIVAS PARA GERENCIAMENTO DO BIOGÁS	TECNOLOGIA EMPREGADA
Combustão direta, sem recuperação de energia	- Queimadores abertos - Queimadores fechados
Combustão direta com geração de calor	- Caldeiras - Secadores térmicos
Geração combinada ou simples de eletricidade e calor	- Motores de combustão - Turbinas - Microturbinas

FONTE: Adaptado de LOBATO (2011).

O gerenciamento do biogás pode ocorrer com ou sem recuperação de energia. No Brasil, o biogás produzido em ETEs normalmente é encaminhado à queimadores abertos sendo termicamente destruído com baixa eficiência de queima. Como consequência, tem-se perda da energia química e taxas de emissão de efeito estufa pouco reduzidas (POSSETTI *et al.*, 2015). Assim, a perda de biogás, sua não utilização, ou simples queima, deve ser uma exceção para os casos em que não haja alternativas de uso mais nobre (PROBIOGÁS, 2015).

Valente (2015) avaliou a viabilidade econômica do aproveitamento energético de biogás em ETEs com capacidade de tratamento que variavam entre 50.000 a 450.000 habitantes, considerando cinco diferentes arranjos, onde o biogás foi empregado para geração de energia elétrica e secagem do lodo em diferentes cenários e condições operacionais. O autor concluiu que o aproveitamento energético do biogás é economicamente viável para ETEs entre 100.000 e 200.000 habitantes, o que representa mais de 172 municípios brasileiros.

Santos *et al.* (2016), avaliaram a geração de energia em um sistema anaeróbico de tratamento de esgotos (composto por reatores anaeróbicos) e concluiu que existe viabilidade econômica apenas nos casos em que o aproveitamento do biogás, na forma de energia elétrica, for superior a 40% da demanda da ETE.

Conforme relatado na TABELA 3, o biogás contém, em sua composição, além do metano e gás carbônico, diversos outros componentes como o sulfeto de hidrogênio, siloxanos e vapor d'água (PROBIOGÁS, 2015).

Dependendo do tipo de aproveitamento, diferentes níveis de tratamento do biogás são exigidos a fim de retirar componentes que possam prejudicar o processo em si ou o equipamento a ele relacionado.

O QUADRO 6 mostra os componentes mais frequentemente removidos no tratamento do biogás e as possíveis consequências da não remoção no processo de aproveitamento do biogás.

QUADRO 6 – COMPONENTES MAIS FREQUENTEMENTE REMOVIDOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DO BIOGÁS E AS POSSÍVEIS CONSEQUÊNCIAS DA NÃO REMOÇÃO NO PROCESSO DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS.

COMPONENTE	CONSEQUÊNCIA
Água	- A acumulação pode causar congelamento e corrosão da linha.
Sulfeto de Hidrogênio	- Possui toxicidade e efeito corrosivo. - O dióxido de enxofre, produto de sua combustão, também possui efeitos tóxicos
Dióxido de carbono	- Sua remoção promove um aumento no poder calorífico do biogás. - A compressão do biogás o torna um agente altamente corrosivo.
Siloxanos	- Durante o processo de combustão os siloxanos se transformam em silicatos e quartzo microcristalino que forma uma camada na câmara de combustão e consequentemente causando danos ao motor

FONTE: Adaptado de CONSTANT *et al.* (1989) e ARANZABE e CIRIA (2014)

Para a aplicação do biogás na geração de energia elétrica (motores de combustão interna) e térmica (aquecer, resfriar, secar), a remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, sulfeto de hidrogênio é suficiente (PROBIOGÁS, 2015).

A seguir são apresentadas as principais formas de aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs.

Combustão direta com geração de calor

Segundo Lobato (2011), a combustão direta consiste no método mais simples e eficiente para recuperação energética do biogás, pois cerca de 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil.

O calor gerado pela combustão direta do biogás é tipicamente aproveitado para aplicação em caldeiras e secadores térmicos de lodo.

As caldeiras possuem eficiências térmicas típicas na faixa de 75-85%, podendo ser adaptadas caldeiras convencionais a gás natural para o uso de biogás, desde que ajustadas as taxas de mistura ar/gás e aumentado o orifício de queima do combustível (AL SEADI *et al.*, 2008). Dentre os problemas relatados com as caldeiras que utilizam o biogás como combustível destacam-se a corrosão devido à umidade e ao ácido sulfúrico, que podem ser minimizadas com a instalação de purgadores e linhas de condensado para controle da umidade e utilização de materiais resistentes à corrosão, como o aço inoxidável (LOBATO, 2011).

Os secadores térmicos de lodo constituem uma importante alternativa para o gerenciamento do lodo em ETEs. Dentre os benefícios dessa aplicação destacam-se a substancial redução do volume, por propiciar elevadas taxas de remoção de água, diminuindo a quantidade de lodo a ser estocado e transportado (POSSETTI *et al.*, 2015); higienização do lodo sem a necessidade de incorporação de produtos químicos (DAVID, 2002); possibilidade de utilização do próprio lodo seco como combustível (LOBATO, 2011).

Possetti *et al.* (2015) avaliaram um sistema piloto de secagem térmica do lodo utilizando o biogás de reatores UASB como combustível e obtiveram como resultados uma redução da massa do lodo em aproximadamente 79%, atendimento aos requisitos da Resolução CONAMA n. 375, de 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), para o lodo classe A, além de condicionar o lodo a fim de obter um PCI da ordem de $2.497,84 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

Os secadores térmicos podem ser classificados em diretos ou indiretos, conforme o processo de transferência de calor. Nos secadores diretos, a transferência de calor é realizada por convecção, com contato direto do lodo com o meio de secagem, sendo mais alta que em secadores indiretos (LOBATO, 2011). Nos secadores indiretos, por sua vez, a transferência de calor ocorre por condução através de uma parede metálica que separa o lodo do meio de secagem (LOBATO, 2011).

De acordo com David (2002), a transferência de calor do lodo é afetada por condições externas como temperatura, umidade, velocidade e direção do gás de secagem, área de superfície de exposição, concentração do lodo, agitação e tempo de detenção. A escolha do secador mais apropriado depende do entendimento dessas condições externas e seus respectivos efeitos.

Geração combinada ou simples de calor e eletricidade

Lobato (2011) definiu cogeração como o aproveitamento local do calor residual originado de processos termodinâmicos de geração de energia elétrica, que de outra forma seria desperdiçado. A partir da cogeração, a eficiência energética do processo é aumentada, pois por mais eficiente que seja o processo de transformação de energia de um combustível em energia elétrica, a maior parte é transformada em calor.

As principais tecnologias comercialmente disponíveis para geração de energia elétrica ou cogeração a partir do biogás são os motores de combustão interna (ciclo Otto e ciclo Diesel) e as turbinas e microturbinas a gás.

Os motores a gás de ciclo Otto são utilizados em pequenas, médias e grandes plantas. A ignição ocorre externamente por meio de uma vela e a alimentação ocorre por meio de uma mistura controlada de biogás e ar. A eficiência elétrica varia entre 25 e 43% e a térmica entre 39 e 70%, de acordo com a capacidade instalada. Os custos de investimento são superiores aos motores ciclo Diesel devido à fabricação em escala reduzida (PROBIOGÁS, 2015; DWA-M 361, 2011).

Nos motores ciclo Diesel, tipicamente utilizados em plantas de grande porte, a ignição é realizada por meio do óleo de ignição, tendo uma eficiência elétrica que varia entre 36 e 45% e térmica entre 37 e 41%. Esses motores são bastante comuns e possuem um custo inferior aos ciclo Otto, porém a vida útil também é cerca de 60% inferior (PROBIOGÁS, 2015; DWA-M 361, 2011).

Nas turbinas ou microturbinas a gás o ar é injetado pela admissão da turbina e sofre uma elevada compressão, com aumento da temperatura. O ar é misturado ao combustível e uma vela dispara a combustão, que realiza trabalho mecânico. Parte da energia de rotação da turbina alimenta o compressor na admissão da turbina e parte movimenta um gerador para produção de eletricidade. A eficiência elétrica varia entre 24 e 31%, considerando as perdas por compressão do biogás, enquanto a eficiência térmica varia entre 52 e 59%, dependendo do porte da instalação (BRASIL, 2015; DWA, 2011).

A TABELA 4 apresenta uma comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS ALTERNATIVAS DE COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR

PARÂMETRO	PRINCIPAIS ALTERNATIVAS		
	Motores de combustão interna	Turbinas	Microturbinas
Faixa de potência disponível no mercado (kW)	5 – 5.000	500 – 250.000	30 – 1.000
Faixa usual de aplicação (kW)	800 – 3.000	> 3.000	< 1.000
Custo de implantação (US\$.kW ⁻¹)	900 – 1.000	1.000 – 1.800	4.000 – 5.000
Custos de O&M* (US\$.kW ⁻¹)	0,009 – 0,010	0,006 – 0,010	0,15 – 0,20
Taxa de geração de eletricidade e calor (kWh consumido por kWh gerado) (este item pela descrição parece igual ao item abaixo)	2,8 – 3,0	3,7 – 4,6	4,1 – 4,7
Eficiência elétrica (%)	33 – 36	22 – 27	22 – 33
Consumo de combustível (kWh.h ⁻¹ por kW instalado)	2,8 – 3,0	3,7 - 4,6	3,3 – 7,5
Pressão de alimentação do gás (atm.)	< 0,2 – 3,0	6,5 – 11	3,7 – 5,8
Produção de gás de exaustão, vazão mássica (kg.h ⁻¹)	6 – 7	15 – 20	23 – 37
Temperatura do gás de exaustão (C°)	360 – 470	510	280 – 310
Recuperação total de calor (kWh por kWh instalado)	1,10 – 1,28	1,56 – 2,08	3,2 – 3,6
Eficiência total de geração de eletricidade e calor (%)	75 – 76	68 – 69	60 – 73
Emissões de NO _x ** (ppm)	250 – 3.000	35 – 50	< 9

(*) Excluindo custos de combustível.

(**) Ao comparar as emissões de NO_x é preciso levar em consideração o produto das concentrações dessas emissões pela vazão dos gases de exaustão.

FONTE: Adaptado de USEPA (2002²; 2003a³; 2003b⁴ *apud* LOBATO, 2011); CENBIO⁵ (2005 *apud* LOBATO, 2011); CHAMBERS e POTTER⁶ (2000 *apud* LOBATO, 2011).

Dentre as alternativas avaliadas, o motor de combustão interna é a tecnologia que apresenta menor custo de implantação e maior eficiência, sendo a tecnologia mais usual nos processos de geração de eletricidade a partir do biogás (LOBATO, 2011).

² USEPA. **Powering microturbines with landfill gas** – EPA430-F-02-012. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 2002.

³ USEPA. **A brief characterization of gas turbines in combined heat and power applications**. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 2003a.

⁴ USEPA. **A brief characterization of reciprocating engines in combined heat and power applications**. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 2003b.

⁵ CENBIO. **Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgotos**. São Paulo, 2005.

⁶ CHAMBERS, A. K.; POTTER, I. **Gas utilization from sewage waste**. Carbon and energy management. Alberta research council, 2000.

Apesar dos altos custos de implantação, as microturbinas apresentam uma série de vantagens, como reduzido número de partes móveis, tamanho compacto e baixas emissões atmosféricas (RUTZ; MERGNER; JANSSEN, 2012).

3.2.2.3 Escuma

A espuma consiste em uma camada de materiais flutuantes que se acumula na superfície de unidades de tratamento de esgotos, como reatores, digestores e decantadores (LOBATO *et al.*, 2007). Usualmente, sua composição pode consistir em graxas, óleos vegetais e minerais, gordura animal, ceras, sabões e materiais plásticos oriundos de residências, restaurantes e indústrias. As quantidades e características da espuma gerada dependem da composição do substrato, principalmente sólidos suspensos, óleos e graxas, e do tipo de tratamento preliminar (SOUZA; AQUINO; CHERNICARO, 2006).

Segundo Souza, Aquino e Chernicaro (2006), a espuma em reatores tipo UASB pode se constituir e acumular em dois locais distintos: no interior do separador trifásico e na unidade de decantação. Por se tratarem de locais com diferentes características, interface líquido-gás e superfície líquida, respectivamente, as espumas tenderão a apresentar diferenças qualitativas e quantitativas entre si.

A formação da espuma em reatores anaeróbios pode ser agravada quando operam com baixo tempo de detenção e alta velocidade ascensional, ocasionando aumento da quantidade de sólidos arrastados para a superfície do reator, e também quando a frequência de retirada de lodo é inadequada (LOBATO *et al.*, 2007).

Souza, Aquino e Chernicaro (2006) avaliaram a taxa de formação de espuma em reatores UASBs em escala piloto e obtiveram valores na faixa de 0,01 a 0,05 L.(kg DQO aplicada)⁻¹ para reatores UASB operando com tempos de detenção hidráulica próximos de 7 a 9 horas, isto é, valores superiores ao obtido por Rosa (2013) em um reator UASB da ETE Laboreaux que obteve uma taxa de 0,0037 mL(kg DQO aplicada)⁻¹.

Entre os fatores potencialmente intervenientes na produção, acumulação e na constituição da espuma de reatores UASB, Souza (2006) destaca a concentração afluente, a constituição específica da matéria orgânica afluente, o projeto do reator e os parâmetros de operação do reator, o que torna difícil uma caracterização físico-química padronizada.

A TABELA 5 mostra características físico-químicas da espuma oriunda de reatores UASBs segundo diversos autores. Pode se observar que não existe um padrão nos parâmetros observados, com exceção dos valores relatados por Ross (2013), que são referentes à espuma gerada em ETEs localizadas na mesma cidade e com UASBs de mesma concepção.

TABELA 5 – VALORES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE ESCUMA DE UASBs

REFERÊNCIA	PARÂMETRO						
	ST (%)	SVT (% de ST)	SVT/ST -	pH -	DQO (g.L ⁻¹)	DBO (g.L ⁻¹)	O&G (g.kg ⁻¹)
Ross <i>et al.</i> (2013) (*)	18,18	13,01	0,71	6,2	111	26	66
Ross <i>et al.</i> (2013) (**)	18,75	11,86	0,64	7,2	97	29	28
Souza <i>et al.</i> (2006)	11,2	-	0,74	-	170	53	-
Oliveira <i>et al.</i> (2007)	61	-	0,73	-	108	-	-
Versiani (2005)	0,65	-	0,69	-	14	-	-

Obs: (*) ETE Atuba Sul
(**) ETE Padilha Sul

Ross *et al.* (2013) avaliaram o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) a partir da espuma de reatores anaeróbios e comparou com o lodo secundário de três ETEs, obtendo os seguintes resultados apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 – PODER CALOR SUPERIOR E INFERIOR DA ESCUMA DAS ETES ATUBA SUL E PADILHA SUL E DO LODO ANAERÓBIO DAS ETES SANTA QUITÉRIA, BELÉM E ATUBA SUL

	PCS (kcal/kg, b.s.) ⁽¹⁾	PCI (kcal/kg, b.s.) ⁽¹⁾
Escuma ETE Atuba Sul ⁽²⁾	(2.469 ± 1.419)	(1.884 ± 1.202)
Escuma ETE Padilha Sul ⁽²⁾	(2.522 ± 1.683)	(1.700 ± 1.135)
Lodo anaeróbio ETE Santa Quitéria ⁽³⁾	4.108	3.842
Lodo aeróbio ETE Belém ⁽³⁾	4.856	4.535
Lodo anaeróbio ETE Atuba Sul ⁽³⁾	2.128	2.000

Obs: b. s. = ⁽¹⁾ base seca, ⁽²⁾ ROSS *et al.*, 2013, ⁽³⁾ ALTHOFF, POSSETTI, 2013.
FONTE: Adaptado de ROSS *et al.*, (2013).

Os valores obtidos para o PCI da espuma, nas ETEs avaliadas, correspondem a cerca de 50% do PCI do lodo das ETEs Belém e Santa Quitéria e equivalem a cerca de 85% do lodo da ETE Atuba Sul.

Apesar de apresentar um PCI comparável ao do lodo, a destinação final habitualmente dada à espuma não contempla o aproveitamento de seu potencial energético, existindo ainda poucas iniciativas, muitas ainda a nível experimental.

A destinação habitualmente dada à espuma, segundo avaliação de Ross (2013) em 109 ETEs localizadas no Estado do Paraná, consiste em leitos de secagem, destinação em vala dentro da própria ETE e em aterro sanitário municipal.

O lodo de esgoto, por sua vez, tem como destinação preponderante, no Estado do Paraná, o aproveitamento agrícola (ROSS, 2015).

A Resolução CONAMA n. 375, de 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), no entanto, veta o uso agrícola de “material lipídico sobrenadante de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbios”, o que inviabiliza a destinação da espuma para a agricultura (BRASIL, 2006).

Estudos realizados por Bi *et al.* (2015) e Mu *et al.* (2016) sugerem o aproveitamento energético da espuma por meio de sua conversão em biodiesel, porém encontram-se ainda em escala piloto, necessitando de estudos mais aprofundados e desenvolvimento de equipamentos em escala comercial.

Os potenciais energéticos da espuma caracterizados por Ross *et al.* (2013) e Althoff e Possetti (2013) levantam a possibilidade de realizar o aproveitamento da espuma nos mesmos moldes em que ocorre o aproveitamento energético do lodo. Desta forma, sugere-se o emprego das mesmas tecnologias apresentadas no item 3.2.2.1.

3.3 ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS

A análise de fluxo de materiais (AFM) consiste em uma avaliação sistemática dos fluxos e estoques de materiais dentro de um sistema definido no espaço e no tempo (BRUNNER; RECHBERGER, 2005).

O princípio básico da AFM consiste na conservação da matéria ou lei da conservação da massa, que foi primeiramente postulada pelos filósofos da Grécia antiga, mas que ganhou notoriedade com o químico francês Lavoisier.

Podemos afirmar, como um axioma incontestável, que, em todas as operações da arte e da natureza, nada é criado; uma quantidade igual de matéria existe antes e depois do experimento; a qualidade e a quantidade dos elementos permanecem precisamente as mesmas; e nada ocorre além

de mudanças e modificações na combinação desses elementos. (LAVOISIER, 1790, p. 130-131)

Devido à lei da conservação das massas, a AFM pode ser controlada por um simples balanço de massa, o que a torna uma ferramenta de suporte à decisão atrativa no gerenciamento de recursos, gerenciamento de resíduos e gerenciamento ambiental (BRUNNER; RECHBERGER, 2005).

Segundo Schmidt (2010), a AFM sempre foi uma ferramenta comum na indústria química, originalmente utilizada para cálculos de consumo e produção. A combinação entre estequiometria, termodinâmica e lei da conservação das massas aplicada à AFM permite que ela seja utilizada nas mais diversas áreas, desde aplicações ligadas a avaliações de impacto ambiental até aplicações industriais.

Uma das aplicações mais atuais da AFM consiste na análise entre a ligação das atividades antropogênicas e o consumo dos recursos naturais e impactos ambientais. Segundo Brunner e Rechberger (2005), se os principais fluxos e estoques de materiais utilizados pelos humanos passassem por uma AFM, e se a informação obtida por meio de dessas AFMs fosse conectada às grandes bases de dados de fonte de recursos, estoques intermediários e disposição final, uma utilização mais eficiente dos recursos seria possível.

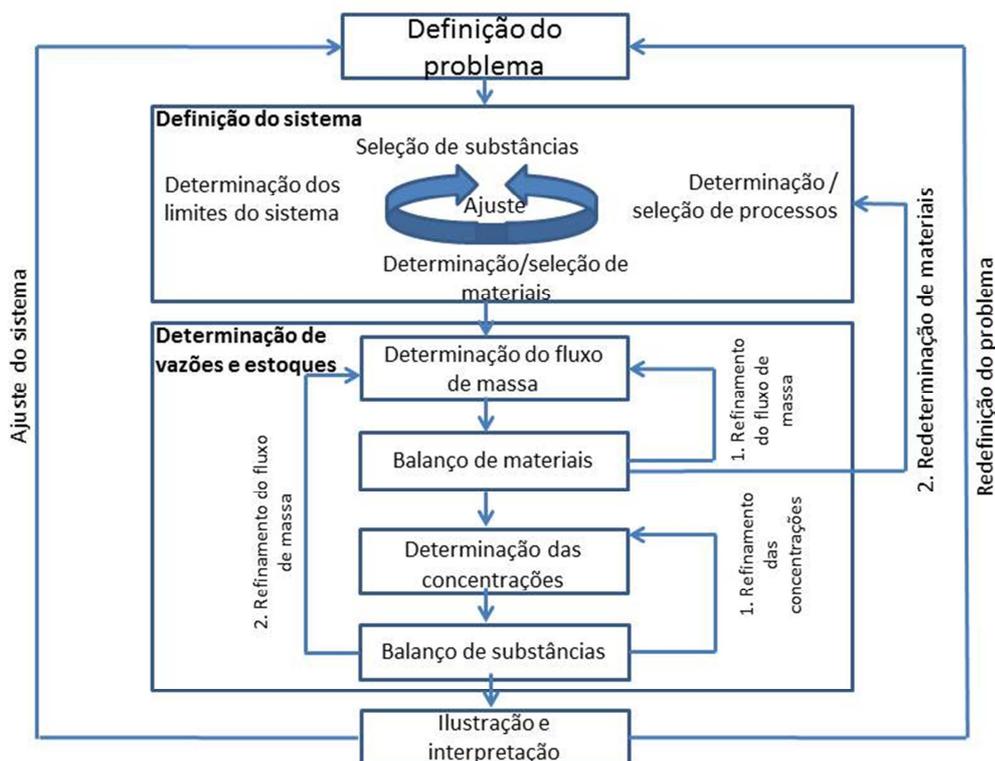
Para Binder, Voet e Rosselot (2009), a AFM tem potencial de aplicação nas seguintes áreas:

- melhoria no gerenciamento de materiais em âmbito regional ou corporativo a fim de otimizar a exploração de recursos, consumo e proteção ambiental nos limites da região ou companhia;
- implementação de programas de monitoramento a fim de avaliar os efeitos de medidas políticas;
- como uma ferramenta de identificação prévia do impacto de diferentes cenários do desenvolvimento socioeconômico;
- identificação de potenciais problemas relacionados a escassez de matérias primas, geração de resíduos e emissões.

Quanto aos procedimentos utilizados na AFM, Brunner e Rechberger (2005), afirmam que trata-se de um processo iterativo, consistindo em uma série de etapas que devem ser continuamente refinadas e aprimoradas até que se obtenha uma

quantidade confiável de dados de acordo com o objetivo de cada AFM. A FIGURA 5 mostra os procedimentos para AFM sugerido pelos referidos autores.

FIGURA 5 – PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS



FONTE: Adaptado de BRUNNER e RECHBERGER (2005)

Geralmente, inicia-se a AFM com definição do problema e de metas adequadas. O próximo passo consiste na seleção das substâncias relevantes, determinação dos limites dos sistemas, processos e materiais. Ocorre, então, a determinação das vazões e estoques de materiais e substâncias. Os resultados são apresentados de forma a visualizar a conclusão e facilitar a implementação das decisões orientadas ao alcance das metas inicialmente definidas (BRUNNER; RECHBERGER, 2005).

No âmbito do tratamento de esgotos, existem ainda poucas aplicações relatadas na literatura.

Oliveira e Foresti (2004) aplicaram o balanço de massa em reatores UASB que tratavam águas residuárias de suinocultura, a fim de avaliar a concentração de sólidos suspensos totais (SST) e o destino das frações da matéria orgânica do afluente no processo de bioconversão anaeróbia.

Lobato (2011) desenvolveu um modelo para estimativa do balanço de massa da DQO, considerando as perdas no meio líquido e gasoso a fim estimar o potencial energético do biogás de reatores UASB.

Shirado (2014) aplicou a AFM em uma planta de tratamento anaeróbio de esgotos de médio porte localizada em Curitiba. Como resultado foram identificadas oportunidades de melhorias no processo, como a redução no uso de produtos químicos e a minimização de custos de transporte de resíduos. A autora desenvolveu ainda, um procedimento para aplicação de análise de fluxo de materiais e de energia para aplicação em ETEs, que foram aplicados a este trabalho e estão descritos em detalhes nos itens 4.2 e 4.3.

3.4 ANÁLISE DE FLUXO DE ENERGIA

A crescente demanda por energia associada à escassez de recursos energéticos, aumento dos custos dos combustíveis fósseis e considerável impacto ambiental relacionado a sua exploração impulsionaram a busca por mecanismos que possibilitem um maior conhecimento a respeito do fluxo de energia dentro de processos energéticos.

Haberl e Weisz (2006) consideram a análise de fluxo de energia (AFE) como uma ferramenta complementar à AFM, utilizada para contabilizar a taxa de transferência de energia de um sistema. As metodologias, terminologias e definições utilizadas na AFE são as mesmas adotados na AFM, mas seu fluxo é baseado no conteúdo energético.

Hong *et al.* (2011) aplicaram a AFE em uma indústria de papel e celulose a fim de avaliar o potencial de aproveitamento da energia desperdiçado no processo, além de identificar áreas com possibilidades de otimização energética.

A Associação Alemã para Água, Esgoto e Resíduos (DWA), publicou recentemente a norma DWA – A 216, Verificação e análise energética – Instrumentos para a otimização energética de estações de tratamento de esgotos. Essa norma visa a disponibilização de uma metodologia padronizada de levantamento de dados e otimização energética de ETEs, por meio de uma AFE, consistindo nas etapas: i) execução regular da verificação energética e ii) elaboração da análise energética.

A etapa de análise energética, por sua vez, consiste no levantamento detalhado de dados da estação, onde são consideradas as tecnologias de equipamentos empregados, processos e construção. Os resultados obtidos na análise energética são comparados com valores ideais para ETEs com tecnologias e contexto semelhantes. Por fim, são propostas medidas de otimização energética por meio da comparação dos limites orçamentários com os custos operacionais e energéticos poupados (DWA – A 216, 2013).

A norma recomenda que a verificação energética seja realizada anualmente. Seu resultado determina a urgência da realização da análise energética e mostra a evolução energética da estação ao longo do tempo (DWA – A 216, 2013).

Shirado (2014) aplicou a AFE na mesma ETE já citada a fim de avaliar a demanda e o potencial de geração de energia de cada processo de tratamento que compõe a ETE. A análise possibilitou a identificação dos processos que mais consomem energia, além de concluir que 80% da energia elétrica consumida pela ETE poderia ser gerada por meio do aproveitamento do biogás.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A ETE objeto deste estudo entrou em operação no ano de 2002 e está localizada no município de Curitiba. Sua área de atendimento inclui a bacia do Padilha e parte do esgotamento sanitário da bacia do Alto Iguaçu e Barigüi. Em 2012 atendia uma população estimada em 181.208 habitantes, com uma capacidade instalada de $438,75 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

O efluente chega à ETE por meio de um interceptor de diâmetro nominal de 1200 mm, passa por gradeamento para remoção de sólidos grosseiros e segue para uma estação elevatória. A próxima etapa consiste em um gradeamento mecanizado com abertura de 10 mm.

Após gradeado, o efluente passa pelo desarenador do tipo caixa de areia retangular com remoção mecanizada de areia.

Finalizada a etapa preliminar o efluente é encaminhado para o tratamento anaeróbio em seis RALFs e na sequência à lagoa aerada e de decantação.

A aeração das lagoas ocorre por meio de aeradores mecânicos superficiais. O lançamento do efluente tratado se dá no ribeirão à jusante da ETE.

Os resíduos sólidos retirados do gradeamento e desarenação são acumulados em caçambas e enviados para destinação em aterro sanitário.

O lodo retirado dos RALFs e das lagoas passa por um processo de deságue mecânico e higienização por meio da estabilização alcalina prolongada, podendo ser destinado à agricultura ou encaminhado ao aterro sanitário.

A espuma é retirada por meio de caminhões de sucção e enviada para descarte em aterro sanitário.

Para o controle de odores é aplicado peróxido de hidrogênio (H_2O_2) na canaleta de saída do efluente dos RALFs a fim diminuir o teor de gás sulfídrico (H_2S).

Por fim, o biogás gerado nos RALFs é encaminhado para queima em queimadores abertos.

A FIGURA 6 apresenta uma vista geral da ETE estudada.

FIGURA 6 - VISTA GERAL DA ETE ESTUDADA



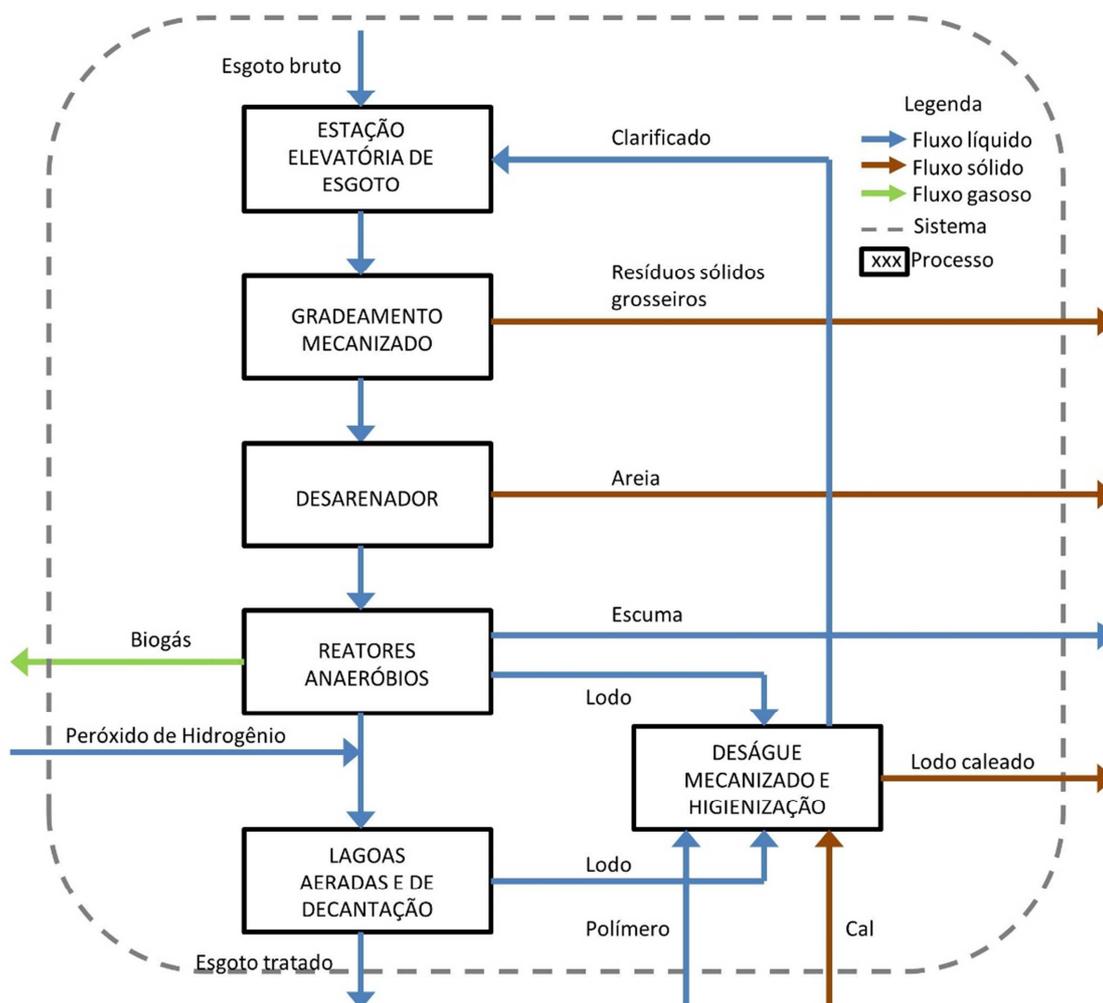
FONTE: Adaptado de SANEPAR (2010)

4.2 ESTUDO DOS FLUXOS DE MATERIAIS

O estudo dos fluxos de materiais foi baseado na metodologia proposta por Brunner e Rechberger (2005) e adaptada por Shirado (2014).

No presente estudo, os seguintes processos de tratamento foram englobados: elevatória de esgoto bruto, gradeamento, desarenação, tratamento biológico anaeróbio, por meio dos RALFs, tratamento biológico aeróbio, por meio das lagoas aeradas e de decantação, e sistema de deságue e higienização de lodo. O diagrama do processo de tratamento da ETE está representado na FIGURA 7.

FIGURA 7 - DIAGRAMA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DA ETE ESTUDADA



Na FIGURA 7, o sistema está delimitado por meio de uma linha pontilhada, representando o limite do estudo. Todos os processos, representados em caixas, encontram-se dentro do limite definido. As flechas mostram o sentido dos fluxos, que podem entrar ou sair dos processos ou até mesmo do sistema. A coloração das flechas define o estado físico do fluxo.

Os dados operacionais referentes aos anos de 2014 e 2015 foram utilizados para a quantificação dos insumos, ou materiais utilizados, e dos produtos ou subprodutos decorrentes do processo.

A quantificação do volume e composição do biogás gerado nos RALFs não pôde ser auferida *in loco* por inexistência de medidores de vazão e analisadores para verificação da composição do biogás. Dessa forma, as taxas de produção e os potenciais químicos energéticos do biogás proveniente dos RALFs foram estimados

com o auxílio do programa computacional PROBIO, versão 1.0, que utiliza o modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2011). Como dados de entrada, foram fornecidos a vazão média afluyente em ($\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$) e a DQO média (mg.L^{-1}) para cada um dos meses dos anos de 2014 e 2015. Para os demais parâmetros utilizados pelo modelo como a concentração de SO_4 afluyente, eficiência de remoção de DQO, eficiência de redução de SO_4 , coeficiente de produção de lodo, coeficiente de produção DQO-lodo, temperatura operacional do reator, fator de supersaturação de CH_4 na fase líquida, perda de CH_4 na fase gasoso com o gás residual e outras perdas de CH_4 na fase gasosa, foram utilizados os valores *default* para a pior situação de produção de biogás disponibilizada pelo *software*.

A pior situação foi selecionada a fim de avaliar os diversos cenários propostos de aproveitamento dos subprodutos na situação mais restritiva de geração de biogás, uma vez que os RALFs existentes não possuem qualquer tipo de enclausuramento e apresentam deficiências estruturais, como fissuras, trincas e corrosões, que favorecem a perda de biogás para o ambiente.

Segundo Lobato (2011), a pior situação se refere a sistemas onde o potencial energético é menor, por se tratar de esgoto diluído, grandes concentrações de sulfato afluyente, menor eficiência na remoção de DQO e maiores índices de perda de metano.

A simulação obteve como resultado a produção de biogás em ($\text{Nm}^3.\text{d}^{-1}$) e a energia química disponível ($\text{kWh}.\text{d}^{-1}$) para o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015.

O estudo dos fluxos de materiais proposto neste trabalho requer valores anuais de produção de biogás, assim o valor médio diário obtido por meio do PROBIO foi multiplicado pelo número de dias correntes de cada mês correspondente. Os valores mensais foram acumulados de forma a se obter a produção de biogás para 2014 e 2015.

O método utilizado para quantificação dos materiais em cada processo foi baseado em Shirado (2014), porém houve necessidade de adaptação para atender às particularidades da ETE estudada, conforme QUADRO 7.

QUADRO 7 – MÉTODOS UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR OS MATERIAIS DA ETE

PROCESSO	MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO	MÉTODO DE QUANTIFICAÇÃO
Estação elevatória	Esgoto bruto	Entrada	Soma do volume acumulado anual, totalizado por medidor instalado na calha Parshall, acrescido do volume de resíduos removidos no gradeamento e no desarenador e deduzidos os volumes de retorno do clarificado do desaguamento do lodo
Gradeamento	Resíduos sólidos grosseiros	Saída	Número de caçambas removidas com resíduos do gradeamento, multiplicado pela capacidade volumétrica das caçambas
Desarenação	Areia	Saída	Número de caçambas removidas na desarenação, multiplicado pela capacidade volumétrica das caçambas
Tratamento biológico anaeróbio (RALFs)	Escuma	Saída	Número de caminhões de sucção multiplicado por sua capacidade volumétrica
	Lodo	Saída	Soma do volume de cada descarte de lodo, calculado pela diferença entre o nível da água do reator antes e após o descarte, multiplicado pela área da base do reator
	Peróxido de hidrogênio	Entrada	Quantidade de produto consumido em quilogramas dividido pela massa específica do material, igual a 1200

PROCESSO		MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO	MÉTODO DE QUANTIFICAÇÃO
				kg/m ³ (PERÓXIDOS, 2015)
		Biogás	Saída	Estimado de acordo com o método proposto por Lobato <i>et al.</i> (2011)
Pós-tratamento (Lagoas aeradas e de decantação)		Lodo	Saída	Volume de lodo acumulado anual, dado por medidor instalado após o tanque de equalização subtraído do volume de lodo descartado dos RALFs
Desaguamento mecanizado e higienização	Equalização	Lodo	Saída	Volume de lodo acumulado anual, dado por medidor instalado após o tanque de equalização
		Solução de polímero a 0,3%	Entrada	Consumo de polímero dividido pela concentração do produto na solução de 3 kg de polímero por 1 m ³ de água (PANAMERICANA, 2005).
	Desaguamento	Lodo desaguado	Saída	Quantidade de sólidos totais presente no lodo, obtido por ensaios operacionais (ST médio= 3,7%), multiplicado pelo volume de lodo adensado e dividido pelo teor de sólidos totais no lodo desaguado também obtido por ensaios operacionais (ST médio=20%)
		Clarificado da centrífuga	Saída	Soma entre os volumes de lodo adensado e de polímero, subtraído do volume de lodo desaguado
	Higienização do lodo	Óxido de cálcio	Entrada	Estimado pela dosagem aplicada para a higienização do lodo da ETE,

PROCESSO		MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO	MÉTODO DE QUANTIFICAÇÃO
				correspondente a 57% sobre a massa seca da torta desaguada e dividida pela massa específica do material, segundo dados operacionais
		Lodo caulado	Saída	Soma entre os volumes de lodo desaguado e de óxido de cálcio

FONTE: Adaptado de SHIRADO (2014).

O fluxo de materiais foi elaborado por meio do programa computacional STAN, versão 2.5, desenvolvida pela Universidade Tecnológica de Viena e representado na forma de um diagrama de Sankey.

4.2.1 Cálculo do indicador de consumo e geração de materiais

Com base na quantificação de materiais, calculou-se um indicador específico de consumo e geração de materiais para cada etapa do processo, baseado no equivalente populacional da ETE, conforme metodologia proposta por Shirado (2014).

O equivalente populacional foi obtido dividindo-se a carga média diária anual de DQO afluente à ETE, pela DQO *per capita*, conforme EQUAÇÃO 1.

$$EP = CA \cdot (DQO_{\text{per capita}})^{-1} \quad (1),$$

em que:

EP é o equivalente populacional, expresso em número de habitantes equivalentes ($hab_{eq.}$);

CA é a carga média diária anual de DQO afluente à ETE, em $kg \cdot dia^{-1}$;

$DQO_{\text{per capita}}$ é a DQO por habitante dia, sendo adotado o valor de $0,120 \text{ kg} (hab \cdot dia)^{-1}$ (NBR 12209, 2011).

Um indicador de consumo e geração de materiais foi calculado para cada processo, conforme EQUAÇÃO 2.

$$M = V_{\text{anual}} \cdot EP^{-1} \cdot 1000 \quad (2),$$

em que:

M é o indicador de consumo ou de geração de materiais de um determinado processo, em L . (hab.ano)⁻¹;

V_{anual} é o consumo ou geração anual de materiais de um determinado processo da ETE, em m³. ano⁻¹.

Os indicadores foram calculados com base nos dados operacionais de 2014 e 2015. A fim de se comparar os dados obtidos com os dados reportados em literatura, foram elaboradas tabelas com os indicadores dos anos estudados e os obtidos por Shirado (2014) para a ETE Santa Quitéria.

A ETE estudada e a ETE Santa Quitéria estão localizadas no mesmo município, possuem reatores anaeróbios de mesma configuração e são de médio porte. O sistema de pós-tratamento, no entanto, é distinto. Enquanto na ETE estudada utilizam-se lagoas aeradas e de decantação, na ETE Santa Quitéria o pós-tratamento adotado é a flotação.

A diferenciação entre “material consumido” e “energia gerada”, foi realizada atribuindo-se o sinal negativo (-) para material consumido e o sinal positivo (+) para energia gerada.

4.3 ESTUDO DOS FLUXOS DE ENERGIA

O estudo dos fluxos de energia considerou o consumo de energia elétrica nos anos de 2014 e 2015 e também a estimativa de geração de energia a partir dos subprodutos gerados na ETE para o mesmo período.

Para tal, foram obtidas as demandas de energia elétrica da estação como um todo e estimados os consumos energéticos por processo de tratamento.

O cálculo do potencial energético dos subprodutos foi baseado nos dados quantitativos obtidos no estudo de fluxo de materiais.

Os indicadores de consumo e estimativa de geração de energia elétrica da ETE, também foram calculados, segregados por processo de tratamento e comparados com dados reportados na literatura.

4.3.1 Demanda de energia elétrica da ETE

A demanda de energia elétrica da ETE foi obtida através de levantamento em campo do consumo por meio de faturas fornecidas pela concessionária de energia elétrica. O consumo faturado leva em consideração todos os gastos energéticos da estação (consumo administrativo, laboratório, iluminação, estação elevatória de esgotos, centrífuga de deságue do lodo, aeradores e outros equipamentos).

A fim de se obter o consumo energético por processo de tratamento, foi realizado um inventário de todos os equipamentos existentes na ETE com dados de potência ativa e tempo de funcionamento, uma vez que não há medidores de energia elétrica instalados na ETE para verificação do consumo por processo de tratamento.

O consumo de energia elétrica, por processo, foi calculado por meio da EQUAÇÃO 3.

$$E_{\text{elétrica_cons.}} = P \cdot t \cdot F_c \cdot 365 \quad (3),$$

em que:

$E_{\text{elétrica_cons.}}$ é o consumo de energia elétrica, por processo, dado em $\text{kWh}_e \cdot \text{ano}^{-1}$;

P é a potência ativa do equipamento, dada em kW;

t é o tempo de operação diária do equipamento, dado em horas;

F_c é o fator de carga, onde o valor atribuído leva em consideração a utilização de inversores de frequência e interrupções no funcionamento do equipamento;

4.3.2 Estimativa do potencial de geração de energia a partir dos subprodutos

A estimativa do potencial energético químico do biogás foi obtida por meio do programa computacional PROBIO, versão 1.0, conforme descrito no item 4.2.

O estudo dos fluxos de energia requer valores anuais de energia química disponível. Assim o valor médio diário obtido por meio do PROBIO foi multiplicado pelo número de dias correntes de cada mês correspondente. Os valores mensais

foram acumulados de forma a se obter a energia química disponível para cada um dos anos do presente estudo.

Para o cálculo da estimativa do potencial energético químico do lodo e da espuma, foram utilizados os volumes quantificados no estudo de fluxo de materiais, multiplicados pelos respectivos PCIs, conforme EQUAÇÃO 4.

$$E_{\text{química}} = m \cdot \text{PCI} \cdot F_{\text{conv}} \quad (4),$$

em que:

$E_{\text{química}}$ é o potencial energético químico do lodo ou espuma, dado em $\text{kWh}_q \cdot \text{ano}^{-1}$;

m é a massa do lodo ou espuma, dada em kg;

PCI é poder calorífico inferior do lodo ou espuma, dado $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$;

F_{conv} é o fator de conversão de kWh_q para kcal, no valor de $1,16 \cdot 10^{-3}$.

O valor do PCI adotado para o lodo foi de $771,32 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$, considerando que o lodo a ser aproveitado é proveniente da centrífuga e possui um teor de sólidos de 20%. O PCI adotado corresponde a 20% do PCI em base seca relatado por Possetti (2013) em estudo realizado com lodo da ETE Santa Quitéria, que possui RALFs com concepção semelhante à ETE estudada.

O PCI de $340 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ foi adotado para a espuma, considerando que a espuma também passaria pela centrífuga obtendo-se um teor de sólidos totais de 20%. O PCI adotado corresponde a 20% do PCI em base seca relatado por Ross *et al.* (2013) em análise realizada na espuma da presente ETE.

No balanço de energia, considerou-se que os subprodutos lodo, espuma e biogás serão aproveitados na forma de energia elétrica.

Para o cálculo potencial de geração de energia elétrica, multiplicou-se o potencial energético químico do subproduto pelo rendimento da tecnologia de conversão adotada, conforme EQUAÇÃO 5.

$$E_{\text{Elétrica_ger}} = E_{\text{química}} \cdot \eta \quad (5)$$

em que:

$E_{\text{elétrica_ger}}$ é o potencial de geração energia elétrica a partir do subproduto, dado em $\text{kWh}_e \cdot \text{ano}^{-1}$;

$E_{\text{química}}$ é o potencial energético químico do subproduto, dado em $\text{kWh}_q \cdot \text{ano}^{-1}$;

η é o rendimento para a tecnologia de conversão adotada, sendo igual a 42% (VALENTE, 2015) para conversão de biogás em energia elétrica e 10% para conversão do lodo e espuma (VAN HAANDEL, 2009).

4.3.3 Cálculo do indicador de consumo e estimativa de geração de energia elétrica

Segundo Shirado (2014), o indicador de consumo de energia tem como intuito contribuir com o monitoramento e controle da eficiência energética dos processos de tratamento de esgotos. Consiste na razão entre o consumo ou geração de energia por processo pelo equivalente populacional, conforme EQUAÇÃO 6.

$$I_{\text{energia}} = E_{\text{elétrica}} \cdot EP^{-1} \quad (6)$$

em que:

I_{energia} é ao indicador de consumo ou geração de energia elétrica, dado em $\text{kWh}_e \cdot (\text{hab.ano})^{-1}$;

$E_{\text{elétrica}}$ é o consumo ou geração anual de energia elétrica inerente ao processo considerado, dado em $\text{kWh}_e \cdot \text{ano}^{-1}$;

Os indicadores foram calculados por processo de tratamento para os anos de 2014 e 2015, sendo representados por meio de uma tabela.

Os dados obtidos também foram utilizados para comparação com os indicadores relatados por Shirado (2014).

A diferenciação entre “energia consumida” e “energia gerada” foi realizada atribuindo-se o sinal negativo (-) para energia consumida e o sinal positivo (+) para energia gerada.

4.4 CENÁRIOS AVALIADOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS

Os cenários para aproveitamento energético foram elaborados com base nos dados operacionais de 2014 e 2015.

O QUADRO 8 apresenta os dados de entrada utilizados na avaliação dos cenários, que consistiu em uma análise de balanço de massa e/ou balanço de

energia para cada cenário proposto e construção de gráficos a fim de ilustrar os resultados obtidos.

QUADRO 8- DADOS DE ENTRADA PARA AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS

ITEM	VALOR	REFERÊNCIA
LODO		
Produção mensal ($m^3.mês^{-1}$)	Conforme metodologia descrita no QUADRO 7	Shirado (2014)
Teor de sólidos após a centrifuga (%)	20	Dado de operação
Produção mensal de lodo centrifugado ($m^3.mês^{-1}$) ou ($V_{lodo\ 20}$)*	Conforme metodologia descrita no QUADRO 7	Shirado (2014)
Poder calorífico inferior (PCI) b. s. ($kcal.kg^{-1}$)*	3856,59	Possetti (2013)
ESCUMA		
Produção mensal ($m^3.mês^{-1}$)	Conforme metodologia descrita no QUADRO 7	Shirado (2014)
Teor de sólidos após a centrifuga (%)	20	Dado de operação
Produção mensal de espuma centrifugado ($m^3.mês^{-1}$) ou ($V_{esc\ 20}$)*	Quantidade de ST presente na espuma descartada, obtido por ensaios operacionais (adotado ST médio= 18,75%), multiplicado pelo volume de espuma descartada e dividido pelo teor de sólidos da espuma desaguada (adotado TS = 20%)	Adaptado de Shirado (2014)
Poder calorífico inferior (PCI) b. s. ($kcal.kg^{-1}$)**	1.700	Ross <i>et al.</i> (2013)
BIOGÁS (RALFS)		
Estimativa produção mensal ($Nm^3.mês^{-1}$)	Estimado pelo PROBIO, conforme metodologia descrita em 4.3.2	PROBIO (2015)
Energia química disponível ($kWh_q\ mês^{-1}$)	Estimado pelo PROBIO conforme metodologia descrita em 4.3.2	PROBIO (2015)
Rendimento na conversão de energia química em energia térmica por meio da combustão (%)	80	Al Seadi <i>et al.</i> (2008)
CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS		
Potência MCI (kW)	400	Valente (2015)
Eficiência elétrica do MCI para 400 kW (%)	42	Valente (2015)
Eficiência térmica do MCI para 400 kW (%)	44	Valente (2015)
Energia necessária para evaporar a água do lodo ($kcal.kg^{-1}$)	1.323,91	Possetti <i>et al.</i> (2015)
Teor de sólidos do lodo pós secagem (%)	80	Albrecht (2016)
Potência instalada do secador rotativo (kW)	75	Albrecht (2016)
Capacidade secador lodo ($m^3.h^{-1}$)	0,6	Albrecht (2016)
Eficiência elétrica do MCI para 75 kW (%)	36	Valente (2015)
Eficiência térmica do MCI para 75 kW (%)	50	Valente (2015)
DEMANDA ENERGÉTICA DA ETE ESTUDADA		

ITEM	VALOR	REFERÊNCIA
Demanda de eletricidade	Conforme 4.3.1	

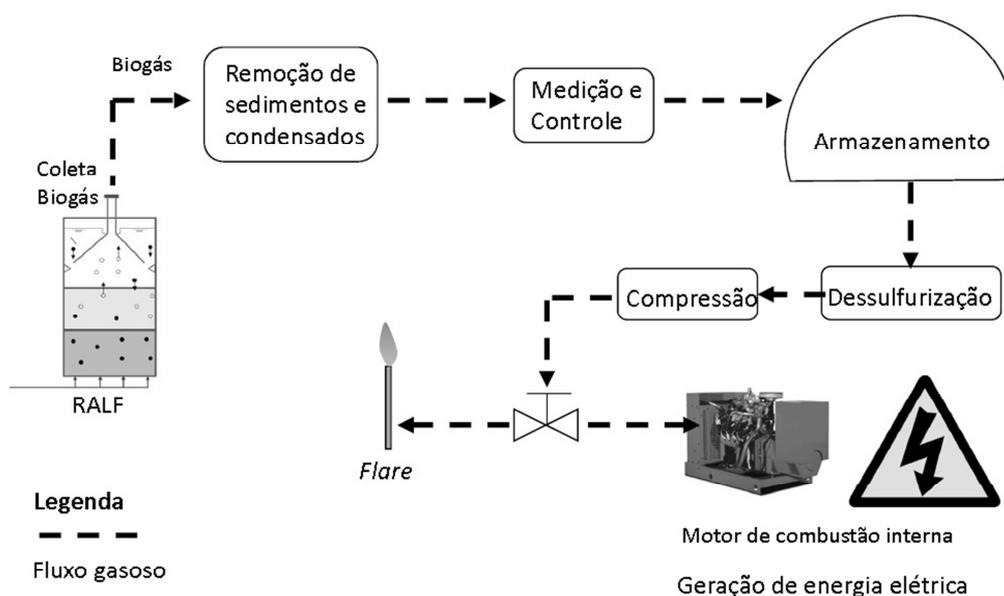
OBS: * para conversão dos volumes de lodo e espuma em massa, foi considerada a densidade de 1.000 kg.m^{-3}

**no presente estudo o PCI em base seca foi transformado em um PCI proporcional ao Teor de Sólidos obtido e de acordo com o cenário estudado.

4.4.1 Cenário 1 – Geração de energia elétrica a partir do biogás

No cenário 1, o biogás dos RALFs seria direcionado a um motor de combustão interna para geração de eletricidade a ser utilizada na própria ETE. O calor residual do motor de combustão interna não seria aproveitado, conforme ilustra a FIGURA 8.

FIGURA 8 – USO DO BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA



O biogás gerado pelos RALFs passaria primeiramente por um sistema de remoção de sedimentos e condensado e seria armazenado em um gasômetro para regularização da vazão. Antes de ser enviado ao motor de combustão interna (MCI), nesse caso, motor ciclo Otto, o biogás passaria por uma etapa de dessulfurização e compressão. O *flare* seria acionado em situações onde o MCI estivesse inoperante.

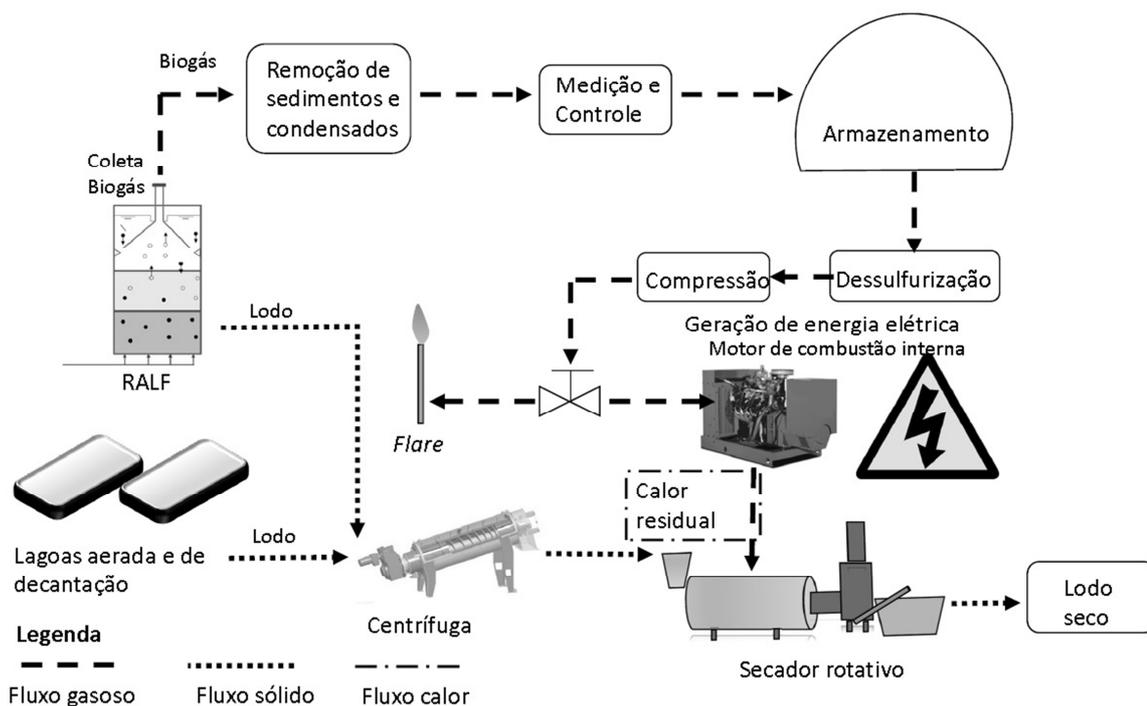
O balanço de energia foi aplicado a esse cenário a fim de se avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás em relação à demanda global de energia elétrica da ETE.

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica por meio do biogás foi realizado por meio da EQUAÇÃO 5. A autonomia elétrica foi obtida dividindo-se a energia elétrica gerada pela demanda de eletricidade da ETE.

4.4.2 Cenário 2 – Cogeração de energia a partir do biogás

Nesse cenário, o biogás dos RALFs seria direcionado a um MCI, onde a energia elétrica seria utilizada para suprir a demanda dos equipamentos da ETE e a energia térmica, na forma do calor residual do MCI, seria enviada a um secador rotativo a fim de diminuir a umidade do lodo gerado nos RALFs e lagoas, conforme representado na FIGURA 9.

FIGURA 9 – USO DO BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA E UTILIZAÇÃO DO CALOR RESIDUAL PARA SECAGEM DO LODO



As etapas de coleta do biogás até a geração de energia elétrica são idênticas às descritas no Cenário 1, o calor residual do MCI, por sua vez, seria direcionado ao secador rotativo para efetuar a secagem do lodo.

Se, por um lado, a geração de energia elétrica é a mesma do cenário 1, a demanda de eletricidade é maior, pois existe agora o consumo referente à potência elétrica instalada do secador rotativo.

O cálculo do consumo elétrico do secador rotativo foi feito por meio da EQUAÇÃO 7.

$$C_{\text{sec. rot}} = m_{\text{lodo } 20} \cdot \text{Cap}_{\text{sec}}^{-1} \cdot \text{Pot}_{\text{sec}} \quad (7)$$

em que:

$C_{\text{sec. rot}}$ é o consumo elétrico do secador rotativo (kWh);

$m_{\text{lodo } 20}$ é a massa de lodo correspondente a um teor de sólidos de 20%, (kg);

Cap_{sec} é a capacidade do secador rotativo ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$);

Pot_{sec} é a potência instalada do secador rotativo (kW).

Assim, no cenário 2, para o cálculo da demanda elétrica da ETE, o consumo elétrico do secador rotativo foi acrescido à demanda existente da ETE, obtida por meio da EQUAÇÃO 3. Um gráfico foi construído a fim de se avaliar a demanda de eletricidade da ETE em relação à produção de energia elétrica do biogás no período avaliado.

O potencial de geração de energia térmica (EQUAÇÃO 8), ou seja, a energia térmica disponível, foi obtido multiplicando-se o potencial químico do biogás, conforme descrito no item 4.3.2, pelo rendimento térmico do motor relatado no QUADRO 8.

$$E_{\text{térM MCI}} = E_{\text{q. bio}} \cdot \eta \quad (8)$$

em que:

$E_{\text{térM MCI}}$ é o potencial de geração de energia térmica do MCI ($\text{kWh}_t \cdot \text{mês}^{-1}$);

$E_{\text{q. bio}}$ é o potencial químico do biogás ($\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$);

η é o rendimento térmico do motor (%)

Para o cálculo da energia térmica requerida para a secagem do lodo a fim de obter um TS de 80%, primeiramente obteve-se o volume de lodo para esse teor de sólidos, conforme EQUAÇÃO 9.

$$V_{\text{lodo } 80} = (V_{\text{lodo } 20} \cdot 0,2) \cdot 0,8^{-1} \quad (9)$$

em que:

$V_{\text{lodo } 80}$ é o volume de lodo correspondente a um teor de sólidos de 80% ($\text{m}^3 \text{mês}^{-1}$);

$V_{\text{lodo } 20}$ é o volume de lodo correspondente a um teor de sólidos de 20%, ($\text{m}^3 \text{mês}^{-1}$);

O máximo volume de água que pode ser evaporado consistiu na subtração entre o volume de lodo a um TS de 20% e o volume de lodo a um TS de 80% e foi obtido pela EQUAÇÃO 10.

$$V_{\text{max_ág}} = V_{\text{lodo } 20} - V_{\text{lodo } 80} \quad (10)$$

em que:

$V_{\text{max_ág}}$ é o máximo volume de água que pode ser evaporado ($\text{m}^3 \text{mês}^{-1}$);

Na conversão do $V_{\text{max_ág}}$ em $m_{\text{max_ág}}$, adotou-se a densidade de 1.000 kg.m^{-3} .

A energia térmica requerida para secagem foi obtida calculando-se a energia necessária para evaporar a massa máxima de água, conforme EQUAÇÃO 11.

$$E_{\text{térm req}} = m_{\text{max_ág}} \cdot 1322,91 \cdot F_{\text{conv}} \quad (11)$$

em que:

$E_{\text{térm req}}$ é a energia térmica requerida para secagem ($\text{kWh}_t \cdot \text{mês}^{-1}$);

$m_{\text{max_ág}}$ é a massa máxima de água que pode ser evaporada (kg mês^{-1});

$1323,91 \text{ kcal.kg}^{-1}$ é a energia necessária para evaporar 1 kg. de água do lodo (POSSETTI *et al.*, 2015);

F_{conv} é o fator de conversão de kcal para kWh, cujo valor corresponde a $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kWh} \cdot \text{kcal}^{-1}$.

A energia térmica disponível para secagem em comparação com a energia térmica requerida para os anos de 2014 e 2015 foram apresentados na forma de gráficos.

Com o valor da energia térmica disponível, estimou-se a massa de água passível de ser evaporada, conforme EQUAÇÃO 12:

$$m_{\text{ag pas evp}} = (E_{\text{térM MCI}} \cdot (1323,91 \cdot F_{\text{conv}})^{-1}) \quad (12)$$

em que:

$m_{\text{ag pas evp}}$ é a massa de água passível de evaporação (kg mês^{-1});

$E_{\text{térM MCI}}$ é o potencial de geração de energia térmica do MCI (kWh mês^{-1});

Na conversão do $m_{\text{ag pas evp}}$ em $V_{\text{ag pas evp}}$, adotou-se a densidade de 1.000 kg.m^{-3} .

Para se obter o volume de água efetivamente evaporado ($V_{\text{ag eft evp}}$), comparou-se $V_{\text{ag pas evp}}$ e $V_{\text{max_ág}}$. Quando $V_{\text{ag pas evp}}$ foi superior ao $V_{\text{max_ág}}$, adotou-se $V_{\text{max_ág}}$. Na situação contrária, quando $V_{\text{ag pas evp}}$ foi inferior ao $V_{\text{max_ág}}$, adotou-se $V_{\text{ag pas evp}}$.

O volume de lodo centrifugado subtraído do volume de água efetivamente evaporado resultou no volume final do lodo, conforme EQUAÇÃO 13.

$$V_{\text{final lodo}} = V_{\text{lodo 20}} - V_{\text{ag eft evp}} \quad (13)$$

em que:

$V_{\text{final lodo}}$ é o volume final do lodo após secagem ($\text{m}^3 \text{ mês}^{-1}$);

$V_{\text{ag eft evp}}$ é o volume de água efetivamente evaporado ($\text{m}^3 \text{ mês}^{-1}$);

O percentual de redução do volume do lodo foi obtido por meio da EQUAÇÃO 14.

$$R_{\text{vol lodo}} = (V_{\text{lodo 20}} - V_{\text{final lodo}}) \cdot V_{\text{lodo 20}}^{-1} \quad (14)$$

em que:

$R_{\text{vol lodo}}$ é o percentual de redução do volume do lodo (%);

Os percentuais de redução de volumes foram representados na forma de um gráfico para os anos de 2014 e 2015.

O cálculo do teor de sólidos correspondente ao lodo, após processo de secagem, foi realizado por meio da EQUAÇÃO 15.

$$TS_{\text{final_lodo}} = (V_{\text{lodo } 20} \cdot 0,2) \cdot (V_{\text{lodo } 20} - V_{\text{ag eft evp}})^{-1} \quad (15)$$

em que:

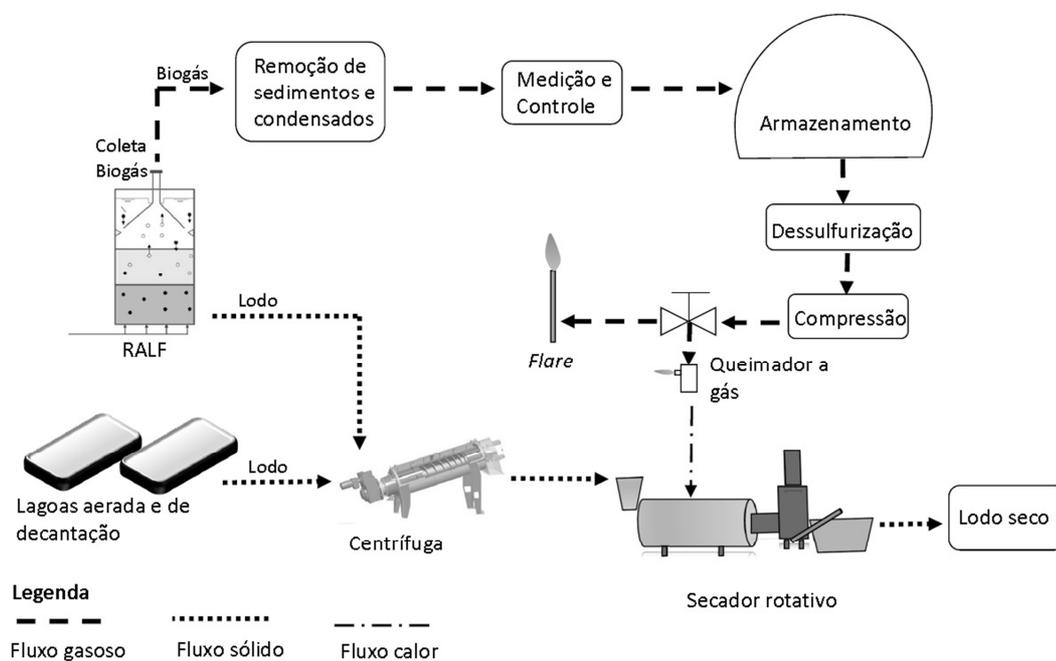
$TS_{\text{final_lodo}}$ é o teor de sólidos final do lodo obtido no processo de secagem térmica (%);

Os teores finais de sólidos obtidos após o processo de secagem foram apresentados na forma de um gráfico para o período estudado.

4.4.3 Cenário 3 – Secagem térmica do lodo a partir do biogás

No cenário 3, calor gerado pela combustão do biogás dos RALFs é encaminhado a um secador térmico a fim de secar o lodo gerado pelos RALFS e lagoas, conforme FIGURA 10.

FIGURA 10 – USO DO BIOGÁS PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO



As etapas de coleta do biogás até a compressão do biogás são idênticas às descritas no Cenário 1. O biogás é encaminhado ao queimador a gás, sendo o calor gerado direcionado integralmente a um secador rotativo de lodo.

O balanço de energia foi aplicado a este cenário a fim de se avaliar a demanda e a disponibilidade de energia térmica.

Por meio do balanço de massa, avaliou-se o volume de lodo a ser reduzido por meio do calor obtido da queima do biogás e o teor final de sólidos do lodo após secagem.

No cálculo do potencial de geração de energia térmica por meio do biogás, o potencial químico do biogás, obtido por meio do PROBIO e descrito no item 4.3.2, foi multiplicado pelo rendimento da conversão da energia química em energia térmica por meio da combustão, conforme EQUAÇÃO 16.

$$E_{\text{tér m bio}} = E_{\text{q. bio}} \cdot \eta \quad (16)$$

em que:

$E_{\text{tér m bio}}$ é o potencial de geração de energia térmica do biogás (kWh mês^{-1});

$E_{\text{q. bio}}$ é o potencial químico do biogás ($\text{kWh}_q \text{ mês}^{-1}$);

η é o rendimento obtido na conversão da energia química em energia térmica por meio da combustão do biogás (%).

A energia térmica requerida para secagem do lodo a um TS de 80 % foi calculada conforme as etapas descritas no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 9 a 11.

A energia térmica disponível para secagem em comparação com a energia térmica requerida para os anos de 2014 e 2015 foram apresentados na forma de gráficos.

O volume final do lodo, após processo de secagem térmica, também foi obtido conforme descrito no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 12 a 13.

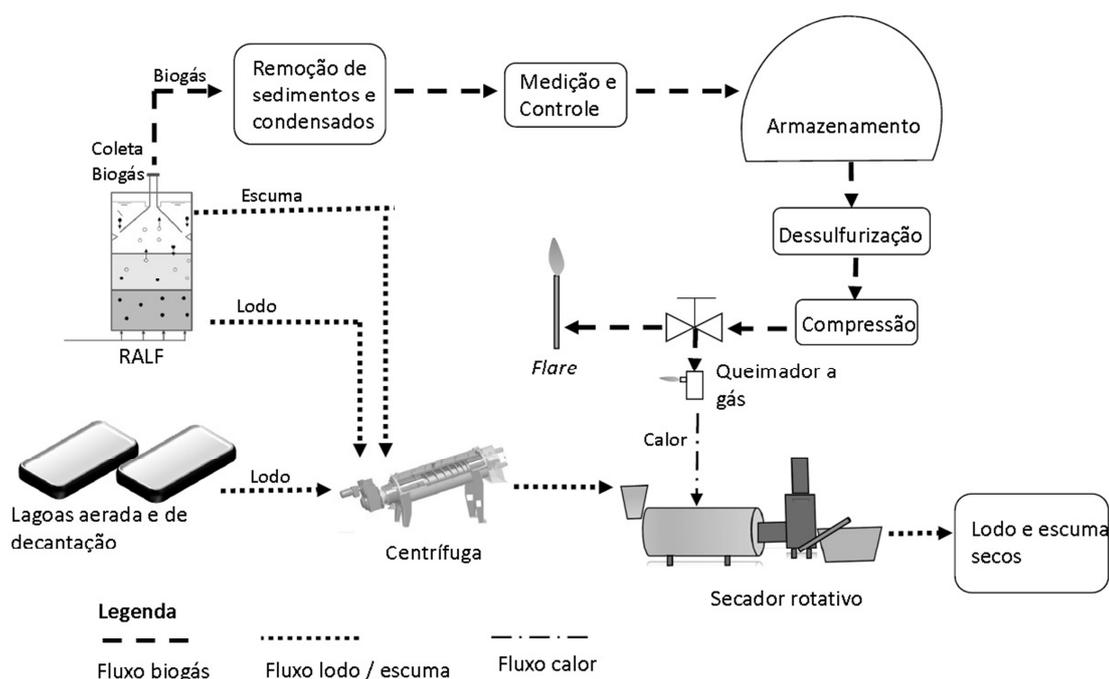
O percentual de redução do volume do lodo foi obtido por meio da EQUAÇÃO 14 e representado na forma de um gráfico para os anos de 2014 e 2015.

Para o cálculo do teor de sólidos correspondente ao lodo após processo de secagem, utilizou-se a EQUAÇÃO 15 e também foi apresentado na forma de um gráfico para o período estudado.

4.4.4 Cenário 4 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir do biogás

Nesse cenário, o fluxo gasoso e de calor segue a mesma sequência descrita no Cenário 3. No fluxo sólido, por sua vez, houve a incorporação da espuma gerada nos RALFs na etapa de secagem do lodo. A espuma também seria desaguada em centrífuga, da mesma forma e com o mesmo teor de sólidos totais do lodo. A FIGURA 11 ilustra a configuração avaliada nesse cenário.

FIGURA 11 – USO DO BIOGÁS PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO E DA ESCUMA



O balanço de energia foi aplicado a fim de se avaliar o potencial e a demanda de energia térmica a partir do biogás para secagem do lodo e espuma gerado na ETE.

Por meio do balanço de massa, avaliou-se o volume de lodo e espuma a ser reduzido pelo calor obtido da queima do biogás e o teor final de sólidos dos subprodutos.

A metodologia utilizada para os cálculos de energia térmica disponível por meio do biogás é a mesma do Cenário 3, calculada pela EQUAÇÃO 16.

A energia térmica requerida para secagem do lodo e espuma a um TS de 80 %, foi calculada conforme as etapas descritas no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 9 a 11, porém acrescentando os volumes relativos à espuma.

A energia térmica disponível para secagem em comparação com a energia térmica requerida para os anos de 2014 e 2015 foram apresentados na forma de gráficos.

O volume final do lodo e espuma, após processo de secagem térmica, também foi obtido conforme descrito no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 12 a 13.

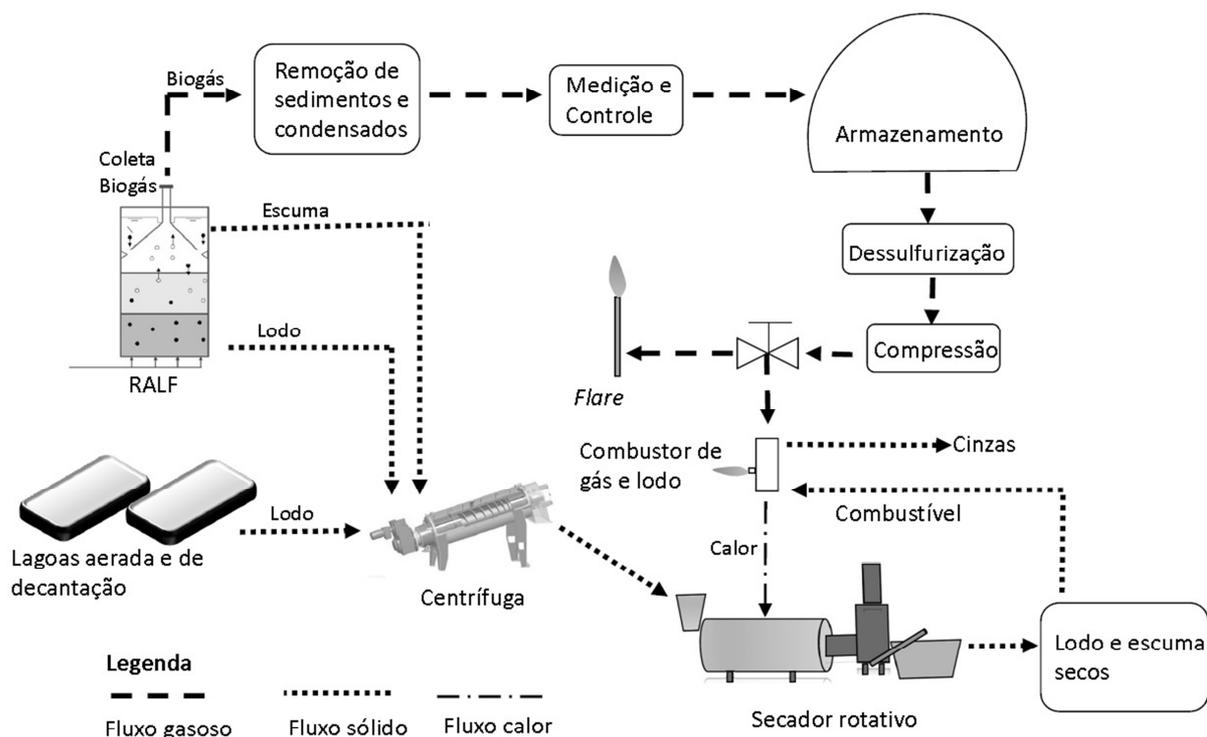
O percentual de redução do volume do lodo e da espuma foi obtido por meio da EQUAÇÃO 14 e representado na forma de um gráfico para os anos de 2014 e 2015.

No cálculo do teor de sólidos correspondente ao lodo e espuma após processo de secagem, utilizou-se a EQUAÇÃO 15. Os resultados também foram apresentado na forma de um gráfico para o período estudado.

4.4.5 Cenário 5 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da combustão do lodo, espuma e biogás

O lodo, a espuma e o biogás gerados nos RALFs, juntamente com o lodo das lagoas, serviriam de combustível para alimentação de um sistema de secagem térmica do lodo e da espuma. O calor gerado pela combustão do lodo e da espuma, após secos, assim como o calor gerado pela combustão do biogás seriam direcionados para o secador de lodo e espuma, conforme ilustrado na FIGURA 12.

FIGURA 12 – USO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO E DA



O fluxo gasoso segue a mesma sequência descrita no Cenário 3.

O balanço de energia foi aplicado a esse cenário a fim de se avaliar o potencial de geração de energia térmica a partir do biogás, lodo e espuma em relação à demanda de energia térmica para secagem do lodo e da espuma gerados na ETE.

Por meio do balanço de massa, avaliou-se o volume de lodo e espuma a ser reduzido após o processo de secagem térmica e também a produção de cinzas, subproduto originado da combustão do lodo e da espuma.

A energia térmica total disponível para secagem consistiu no somatório entre o potencial de geração de energia térmica por meio do biogás e da combustão do lodo e espuma pós secos.

O potencial de geração de energia térmica por meio do biogás, $E_{\text{térm bio}}$ foi calculado por meio da EQUAÇÃO 16, conforme já realizado para o cenário 3.

Para o cálculo do potencial de geração de energia térmica por meio da combustão do lodo e da espuma, inicialmente, foram estimados o volume desses subprodutos após o processo de secagem térmica e o respectivo teor de sólidos obtido, conforme descrito no cenário 4 e equações 12 a 15. Os volumes obtidos

foram transformados em massa, considerando-se a densidade de 1000 kg.m^{-3} , e multiplicados pelo respectivo PCI proporcional ao teor de sólidos, para estimativa da energia química disponível. O cálculo do PCI proporcional foi feito de acordo com a seguinte equação:

$$\text{PCI}_{\text{lodo_esc prop.}} = \text{PCI}_{\text{lodo_esc b. s.}} \cdot \text{TS} \quad (17)$$

em que:

$\text{PCI}_{\text{lodo_esc prop}}$ é o PCI do lodo ou espuma proporcional ao teor de sólidos obtido (kcal.kg^{-1});

$\text{PCI}_{\text{lodo_esc b. s.}}$ é o PCI do lodo ou da espuma em base seca (kcal.kg^{-1});

TS é o teor de sólidos obtido ao final do processo de secagem (%).

A energia química disponível foi calculada por meio da EQUAÇÃO 18.

$$E_{q. \text{lodo_esc.}} = \text{PCI}_{\text{lodo_esc prop.}} \cdot m_{\text{lodo_esc. sec.}} \cdot F_{\text{conv.}} \quad (18)$$

em que:

$E_{q. \text{lodo_esc}}$ é o potencial energético químico do lodo ou espuma, dado em $\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$;

$\text{PCI}_{\text{lodo_esc prop}}$ é o PCI do lodo ou espuma proporcional ao teor de sólidos obtido (kcal.kg^{-1});

$m_{\text{lodo_esc. sec}}$ é a massa do lodo ou espuma após o processo de secagem, dada em kg.;

F_{conv} é o fator de conversão de kWh_q para kcal, no valor de $1,16 \cdot 10^{-3}$.

Assim, o potencial de energia térmica por meio da combustão do lodo e espuma foi estimado de acordo com a EQUAÇÃO 19:

$$E_{\text{tér. lodo_esc}} = E_{q. \text{lodo_esc}} \cdot \eta \quad (19)$$

em que:

$E_{\text{tér. lodo_esc}}$ é o potencial de geração de energia térmica por meio da combustão do lodo ou espuma ($\text{kWh} \cdot \text{mês}^{-1}$);

$E_{q. \text{ lodo_esc}}$ é o potencial energético químico do lodo ou espuma, dado em $\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$;

η é o rendimento obtido na conversão da energia química em energia térmica por meio da combustão do lodo ou espuma (%).

A energia térmica requerida para secagem do lodo e espuma a um TS de 80 %, foi calculada conforme as etapas descritas no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 9 a 11, porém acrescentando os volumes relativos à espuma.

A energia térmica disponível para secagem em comparação com a energia térmica requerida para os anos de 2014 e 2015 foi apresentada na forma de gráficos.

O volume de lodo e espuma, após processo de secagem térmica, também foi obtido conforme descrito no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 12 a 13.

O percentual de redução do volume do lodo e da espuma foi obtido por meio da EQUAÇÃO 14 e representado na forma de um gráfico para os anos de 2014 e 2015.

A utilização do lodo e da espuma secos como combustível diminui ainda mais o volume de subproduto a ser descartado e gerando cinzas. O volume de cinzas foi estimado considerando que o processo de combustão diminui em 90% o volume do lodo e espuma em relação ao seu volume centrifugado, conforme relatado por Manara e Zabaniotou (2012).

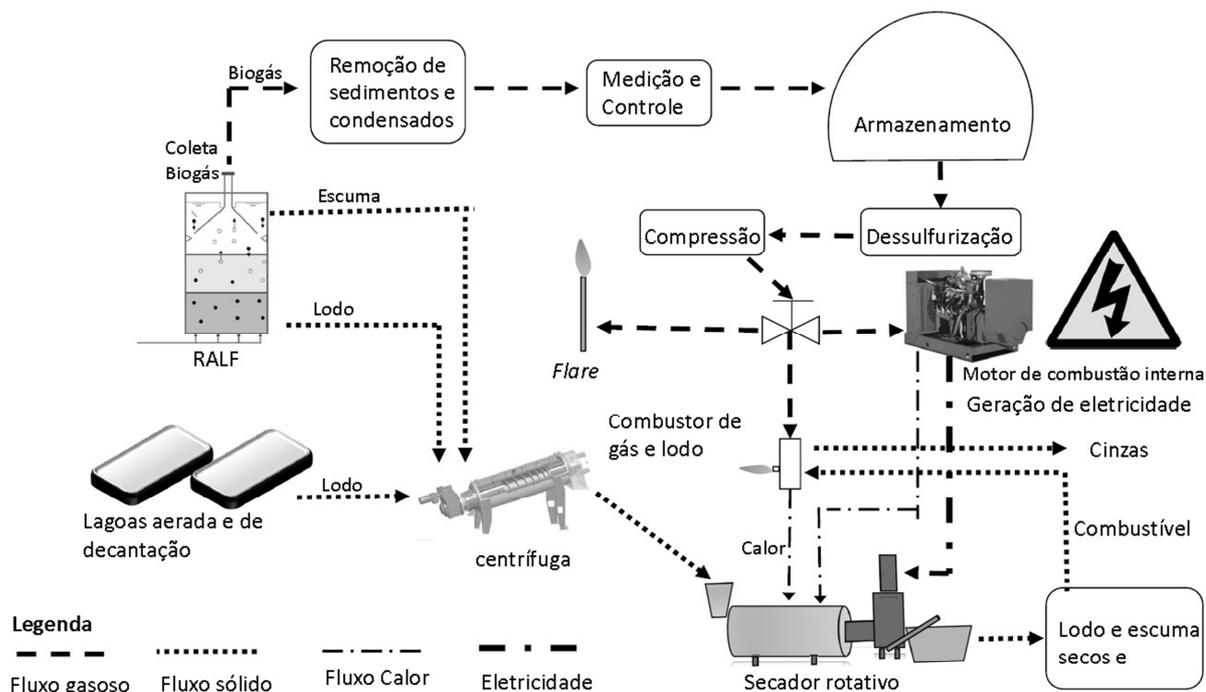
Para o cálculo do teor de sólidos correspondente ao lodo e espuma, após processo de secagem, utilizou-se a EQUAÇÃO 15. Os resultados também foram apresentados na forma de um gráfico para o período estudado.

4.4.6 Cenário 6 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da energia térmica do lodo, biogás e espuma e geração de energia elétrica a partir do biogás

Neste cenário, parte do biogás gerado nos RALFs é direcionado a um MCI a fim de gerar energia elétrica para alimentar os equipamentos do sistema de secagem térmica (esteiras, grelhas, tambores rotativos) e o excedente é enviado para queima e aproveitamento da energia térmica no secador rotativo. O calor residual do MCI é direcionado ao secador rotativo.

Conforme pode se observar na FIGURA 13, a fase gasosa, incluindo coleta, tratamento e armazenamento é idêntica aos demais cenários.

FIGURA 13 – USO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO E DA ESCUMA, E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS



O balanço de energia foi aplicado a esse cenário a fim de se avaliar o potencial de geração de energia elétrica para alimentação do secador rotativo, em relação à demanda global da ETE, e também o potencial de geração de energia térmica dos subprodutos em relação à demanda térmica do secador rotativo.

Por meio do balanço de massa, avaliou-se o volume de lodo e espuma a ser reduzido por meio do calor obtido na queima do biogás e do lodo e espuma após secos.

Os cálculos quanto à disponibilidade de energia térmica do biogás ($E_{\text{térm bio}}$), lodo e espuma ($E_{\text{térm lodo_esc}}$) foram realizados no cenário 5. Parte da energia química do biogás, no entanto, seria direcionada a um MCI para geração de energia elétrica, a fim de suprir a demanda da capacidade elétrica instalada do secador rotativo.

Para o cálculo da energia química do biogás requerida para alimentação do MCI, utilizou-se a EQUAÇÃO 20:

$$E_{q, req. sec} = ((V_{lodo_esc\ 20} \cdot Cap_{sec}^{-1}) \cdot P_{sec}) \cdot \eta^{-1} \quad (20)$$

em que:

$E_{q, req. sec}$ é a energia química requerida para alimentação elétrica do secador por meio do MCI ($kWh_q \cdot mês^{-1}$);

$V_{lodo_esc\ 20}$ é o volume de lodo e escuma obtido após a centrifugação com teor de sólidos de 20% ($m^3 \cdot mês^{-1}$);

Cap_{sec} é a capacidade de operação do secador ($m^3 \cdot h^{-1}$);

P_{sec} é a potência instalada do secador (kW);

η é o rendimento na conversão de energia química em energia térmica (%).

A demanda ou consumo de energia elétrica para abastecimento do secador foi calculada pela EQUAÇÃO 21:

$$C_{sec. rot} = E_{q, req. sec} \cdot \eta \quad (21)$$

em que:

$C_{sec. rot}$ é o consumo elétrico do secador rotativo (kWh);

$E_{q, req. sec}$ é a energia química requerida para alimentação elétrica do secador por meio do MCI ($kWh_q/mês$);

η é o rendimento na conversão de energia química em energia elétrica (%).

A fim de avaliar o potencial de geração de energia elétrica em relação à demanda da ETE (calculado no cenário 2), os valores obtidos foram representados na forma de um gráfico.

A energia química do biogás efetivamente disponível para secagem do lodo foi calculada por meio da EQUAÇÃO 22.

$$E_{q, bio\ sec} = E_{q, bio} - E_{q, req. sec} \quad (22)$$

em que:

$E_{q, bio. sec}$ é a energia química do biogás efetivamente disponível para secagem do lodo ($kWh_q \cdot mês^{-1}$);

$E_{q, bio}$ é o potencial químico do biogás ($kWh_q \cdot mês^{-1}$);

$E_{q, req. sec}$ é a energia química requerida para alimentação elétrica do secador por meio do MCI ($kWh_q \cdot mês^{-1}$);

O calor gerado pelo MCI também seria direcionado para o sistema de secagem. Para o cálculo da energia térmica gerada pelo MCI utilizou-se a EQUAÇÃO 23.

$$E_{\text{term MCI}} = E_{\text{q. req. sec}} \cdot \eta \quad (23)$$

Onde:

$E_{\text{term MCI}}$ é a energia térmica gerada pelo MCI ($\text{kWh}_t \cdot \text{mês}^{-1}$);

$E_{\text{q. req. sec}}$ é a energia química requerida para alimentação elétrica do secador por meio do MCI ($\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$);

η é o rendimento térmico do MCI (%)

Desta forma, a energia térmica disponível para secagem foi calculada por meio da EQUAÇÃO 24

$$E_{\text{term. disp. sec}} = E_{\text{tér. bio}} + E_{\text{tér. lodo_esc}} - E_{\text{q. req. sec}} + E_{\text{term MCI}} \quad (24)$$

Onde:

$E_{\text{term. disp. sec}}$ é a energia química disponível para secagem ($\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$)

$E_{\text{tér. bio}}$ é o potencial químico do biogás ($\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$);

$E_{\text{tér. lodo_esc}}$ é o potencial energético químico do lodo ou escuma, dado em ($\text{kWh}_q \cdot \text{mês}^{-1}$);

Da mesma forma que no cenário 5, no primeiro mês avaliado, janeiro de 2014, considerou-se como energia térmica disponível apenas a relativa ao biogás, pois teoricamente, ainda não haveria lodo e escuma secos disponíveis como combustível do secador. Assim, a partir de fevereiro, o lodo e escuma secos produzidos no mês imediatamente anterior (neste caso, janeiro), foram considerados disponíveis para utilização como combustível para o mês corrente da avaliação.

A energia térmica requerida para secagem do lodo e escuma a um TS de 80 %, foi calculada conforme as etapas descritas no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 9 a 11, porém acrescentando os volumes relativos à escuma.

A energia térmica disponível para secagem em comparação com a energia térmica requerida para os anos de 2014 e 2015 foi apresentada na forma de gráficos.

O volume final do lodo e escuma, após processo de secagem térmica, foi obtido conforme descrito no cenário 2, aplicando as EQUAÇÕES 12 a 13.

O percentual de redução do volume do lodo e da espuma foi obtido por meio da EQUAÇÃO 14 e representado na forma de um gráfico para os anos de 2014 e 2015.

Da mesma forma que no cenário 5, o lodo e da espuma secos seriam utilizados como combustível, reduzindo em 90% o volume do lodo e espuma em relação ao seu volume centrifugado. Como o volume de lodo e espuma centrifugado foi o mesmo em todos os cenários, o volume de cinzas gerado seria o mesmo em ambos os cenários.

Para o cálculo do teor de sólidos correspondente ao lodo e espuma após processo de secagem, utilizou-se a EQUAÇÃO 15 e também foram apresentados na forma de um gráfico para o período estudado.

4.5 CUSTOS POTENCIALMENTE EVITADOS

4.5.1 Energia elétrica

Nos cenários 1, 2 e 6 a energia elétrica gerada a partir do biogás seria consumida na própria ETE, diminuindo os custos operacionais referentes à eletricidade.

A ETE estudada está enquadrada no grupo tarifário alta tensão 2,3 a 25kV horo-sazonal azul, que possui tarifas diferenciadas para a energia consumida nos períodos seco e úmido e para a energia e demanda nos períodos de ponta e fora de ponta dos sistemas de distribuição.

Visto a diferenciação de tarifas dentro desse grupo tarifário, para o cálculo do custo evitado adotou-se a tarifa média paga à concessionária de energia elétrica nos anos de 2014 e 2015. Para o cálculo da tarifa média, dividiu-se o importe total faturado pelo consumo total (soma do consumo de ponta e fora de ponta), obtendo-se a tarifa média.

O potencial de geração de energia elétrica por meio do biogás foi calculado por meio da metodologia descrita no item 4.3.2.

O custo evitado com energia elétrica, nos cenários 1, 2 e 6 ,foi calculado de acordo com a EQUAÇÃO 25.

$$C_{el} = E_{elétrica_ger} \cdot T_{el}. \quad (25),$$

em que:

C_{el} . é o custo evitado com o consumo de eletricidade nos cenários (R\$);

$E_{elétrica_ger}$ é o potencial de geração de energia elétrica (kWh);

T_{el} . é a tarifa média (R\$ / kWh).

4.5.2 Cálculo dos custos de transporte e disposição do lodo e espuma

Nos cenários 2 e 3 a energia térmica proveniente do biogás seria utilizada para a secagem térmica do lodo. Nos cenários 4, 5 e 6 além do lodo, a espuma também seria encaminhada ao processo de secagem térmica promovida pela energia térmica dos subprodutos.

Adicionalmente, nos cenários 5 e 6, o lodo e a espuma secos seriam enviados ao combustor para geração de energia térmica, gerando cinzas como produto final.

A ETE estudada não possui processo de secagem térmica instalada, sendo o lodo pós-centrífuga, com teor de sólidos médio de 20%, transportado diretamente para destinação final. A espuma, atualmente, não passa pelo processo de deságue mecânico, sendo diretamente enviada ao aterro sanitário.

Dessa forma, o volume de água evaporado que deixará de ser transportado e destinado será considerado um custo evitado.

A tarifa de transporte e disposição do lodo e espuma depende de fatores como distância da ETE até o aterro e umidade dos subprodutos transportados.

De acordo com Valente (2015), em levantamento realizado junto a seis companhias estaduais de saneamento no ano de 2014, os valores de transporte e disposição variaram entre 70,00 a 184,00 R\$/t., para lodos com teor de sólidos entre 20 e 30%.

Segundo informações fornecidas pelos gestores da ETE estudada, atualmente paga-se o equivalente a R\$ 150,00 por tonelada para o transporte e disposição em aterro sanitário, valor que se encontra dentro dos custos levantados por Valente (2015), e que foi adotado no presente estudo para o cálculo do custo evitado e também para estimar o montante atualmente pago pela ETE.

O custo evitado com transporte e disposição final do lodo e espuma, nos cenários 2, 3, 4, 5 e 6 foi calculado de acordo com a EQUAÇÃO 26.

$$C_{\text{lodo esc}} = (M_{\text{lodo_esc } 20} - M_{\text{final lodo_esc}}) \cdot T_{\text{transp disp final}}. \quad (26),$$

em que:

$C_{\text{lodo esc}}$ é o custo evitado com o transporte de lodo e/ou espuma (R\$ mês⁻¹);

$M_{\text{lodo_esc } 20}$ é a massa de lodo e/ou espuma correspondente a um teor de sólidos de 20%, (t. mês⁻¹);

$M_{\text{final lodo_esc}}$ é a massa final do lodo e/ou espuma ou cinzas (t. mês⁻¹);

$T_{\text{transp disp. final}}$ é a tarifa de transporte e disposição final de lodo e/ou espuma (R\$/t.).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAIS DA ETE

5.1.1 Balanço de massa anual da ETE

A análise de fluxo de materiais baseou-se em dados operacionais dos anos de 2014 e 2015, e foi representada por meio de diagramas de Sankey, conforme FIGURA 14 e FIGURA 15.

FIGURA 14 – DIAGRAMA DE FLUXO DE MATERIAIS DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2014

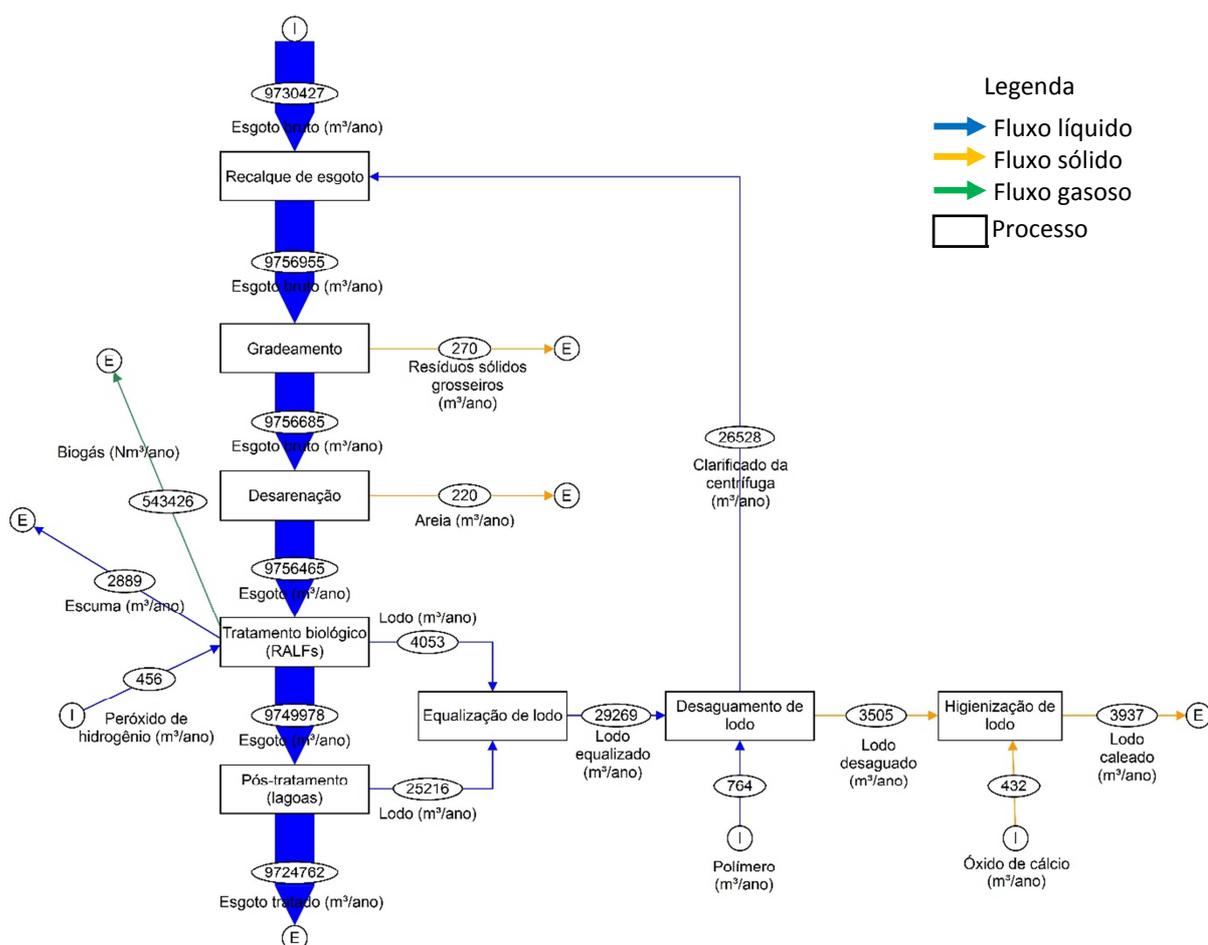
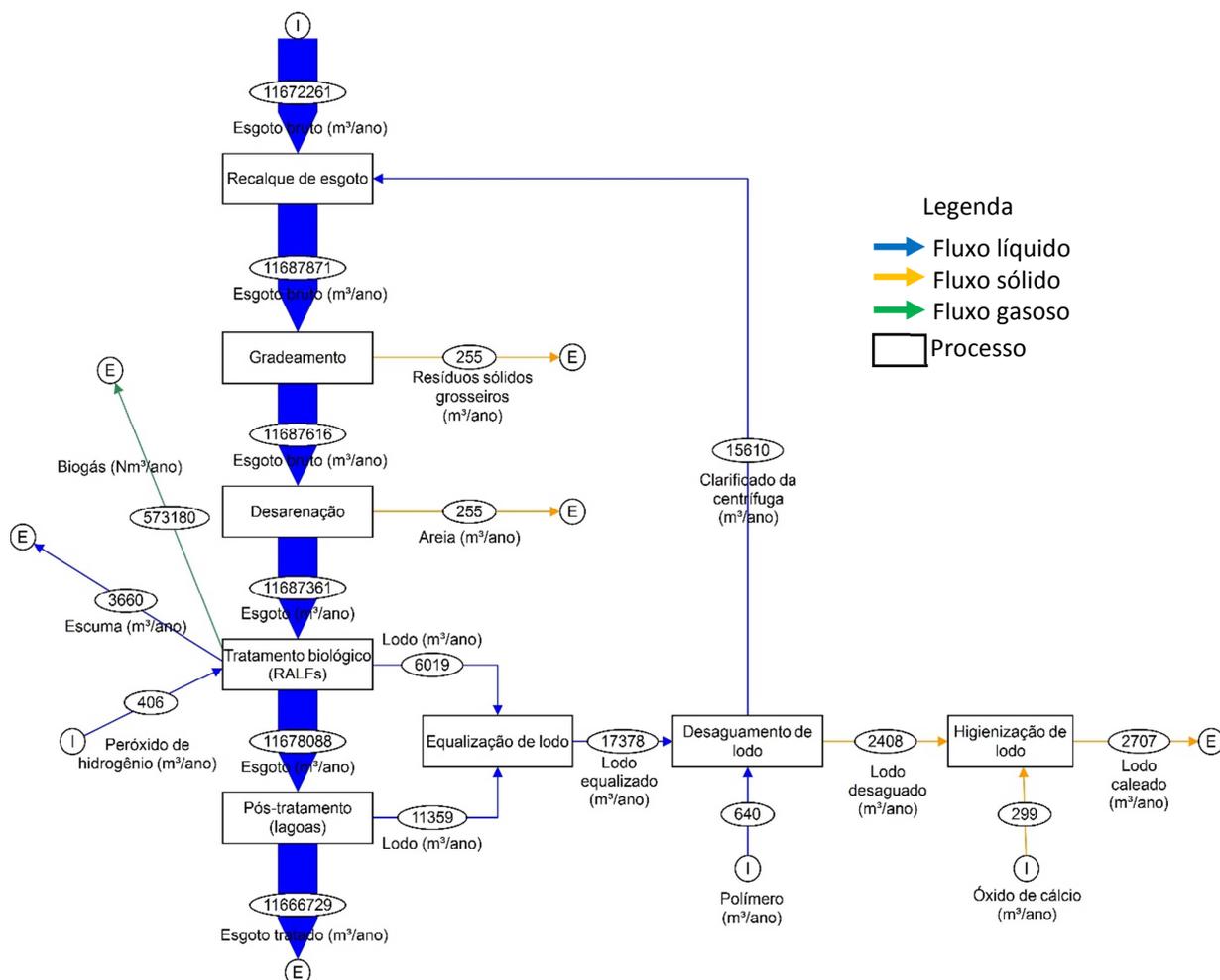


FIGURA 15 – DIAGRAMA DE FLUXO DE MATERIAIS DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2015



O fluxo líquido corresponde ao maior volume de material processado na ETE. O volume de esgoto bruto no ano de 2014 foi de 9.730.427 m³ e de 11.672.261 m³ em 2015, o que representa um acréscimo de cerca de 20%. Os volumes observados correspondem a uma vazão média diária de 308 L.s⁻¹ em 2014 e 370 L.s⁻¹ em 2015, valores inferiores aos 438,75 L.s⁻¹, capacidade nominal da ETE.

Segundo dados da operação, esse incremento de vazão não pode ser atribuído ao aumento do número de consumidores, visto que não houve acréscimos significativos no número de ligações de esgoto na bacia atendida pela ETE.

O sistema de condução de esgotos na cidade de Curitiba é do tipo separador absoluto, ou seja, a condução dos esgotos e das águas pluviais ocorre por meio de tubulações distintas. No Brasil, entretanto, é frequente a ocorrência de interligações de águas pluviais na rede de esgoto por meio de tubulações rompidas,

infiltrações e ligações prediais de drenagem Esta situação faz com que a vazão conduzida às ETEs seja, em grande parte, composta por contribuições de águas pluviais (BERTOLINO, 2013).

O índice pluviométrico acumulado para a cidade de Curitiba no ano de 2015 foi cerca de 15% superior ao ano de 2014 (PARANÁ, 2016). Estudos realizados por Bertolino (2013), em um condomínio residencial na região de Curitiba, apontaram que o volume de água de chuva conduzido de forma irregular à rede de esgotos chega a ser 20% superior ao volume do próprio esgoto gerado no mesmo condomínio.

Dessa forma, o maior índice pluviométrico verificado em 2015 em relação a 2014 está entre as possíveis causas do acréscimo de vazão identificado naquele ano.

Nas etapas preliminares de tratamento, foram removidos em 2014 o volume de 270 m³ de resíduos sólidos grosseiros e 220 m³ de areia. Em 2015 o volume removido de ambos os materiais foi o mesmo, 255 m³. Segundo Jordão e Pessôa (2011), o gradeamento remove cerca de 38 L. de resíduos para cada 1.000 m³ de esgoto, e a desarenação, 20 a 40 L. de areia para cada 1.000 m³ de esgoto. Os valores de resíduos sólidos grosseiro e areia removidos no ano de 2014 aproximam-se dos parâmetros descritos pelo autor. Já para o ano de 2015, os volumes removidos são cerca de 40% inferiores aos volumes estimados pelo mesmo autor, o que ratifica a possibilidade do acréscimo de vazão em 2015 ser decorrente do maior índice pluviométrico.

Durante o tratamento biológico anaeróbio foram removidos 4.053 m³ de lodo e 2.889 m³ de espuma no ano de 2014. Já em 2015, houve um acréscimo dos subprodutos removidos, passando para 6.019 m³ de lodo e 3.660 m³ de espuma. Percentualmente, houve um aumento de 48,51 % no volume descartado de lodo e de 26,69 % no volume de espuma retirado dos reatores anaeróbios no período observado.

O descarte do lodo em excesso dos RALFs é determinado por meio de análises do lodo e do efluente. Periodicamente, são realizadas medições para determinar o perfil de sólidos dentro do reator, por meio da análise de amostras de lodo retirados a 2,50 m a partir da superfície e daí em diante de 0,50 em 0,50 m até o fundo do reator (SANEPAR, 2013). No laboratório, são realizadas medições de

concentração de sólidos totais (ST) e sólidos suspensos voláteis (SSV). Recomenda-se a retirada da camada que apresentar a menor relação SSV/ST.

Fatores operacionais como correto funcionamento dos equipamentos de deságue e disponibilidade de espaço físico para armazenagem do lodo também podem ser determinantes no volume e periodicidade de descarte do lodo.

No ano de 2015 o descarte de lodo dos RALFs foi prejudicado devido a manutenção no pátio de lodo, problemas no equipamento de adensamento do lodo, entupimento de tubulações e paradas de manutenção.

A espuma é descartada mensalmente pelo operador da estação, que retira toda a camada visível com o auxílio de uma escumadeira e carrinho de mão, sendo succionada por um caminhão à vácuo. Dentre os motivos relatados por Lobato *et al.* (2007) e Souza, Aquino e Chernicaró (2006) que poderiam justificar a maior quantidade de espuma gerada nos reatores no ano de 2015 em relação à 2014, estão a constituição específica da matéria orgânica afluente, baixos tempos de detenção e alta velocidade ascensional no interior dos RALFs

Para o controle dos odores gerados nos reatores anaeróbios, foram aplicados 456 m³ de peróxido de hidrogênio em 2014 e 406 m³ em 2015 para oxidação de sulfetos. De acordo com Marin *et al.* (2013) é possível obter bons resultados na remoção de sulfeto de hidrogênio com dosagens de 1,5 kg de peróxido de hidrogênio 50% para cada 1,0 kg de sulfetos presente no efluente presente no RALF. Segundo dados da operação, a aplicação de peróxido de hidrogênio em 2014 foi 8% superior a dosagem teórica recomendada por Marin *et al.* (2013), e em 2015, 14%.

De acordo com as estimativas feitas por meio do *software* PROBIO, os mesmos reatores anaeróbios geraram 543.426 Nm³ de biogás em 2014. Em 2015, por sua vez, foram gerados 573.180 Nm³ de biogás, o que representa um acréscimo de cerca de 5 % em relação a 2014.

O *software* utiliza como dados de entrada os valores de DQO e vazão afluente. A DQO afluente média foi de (567,15 ± 82,56) mg.L⁻¹ em 2014 e de (522,46 ± 84,79) mg.L⁻¹ em 2015. Já a vazão afluente média foi de (26.657,77 ± 1.707,84) m³.d⁻¹ em 2014 e de (31.935,51 ± 2.758,55) m³.d⁻¹ em 2015. Multiplicando-se a vazão pela concentração têm-se a carga média diária, que foi cerca de 10% superior em 2015 em relação a 2014.

Das lagoas aeradas e de decantação foram retirados 25.216 m³ de lodo em 2014 e 11.359 m³ em 2015, o que representa um decréscimo de 55% no volume descartado de lodo nos respectivos anos. Em 2014 ainda não havia medidores de vazão instalados para medição do volume de lodo proveniente das lagoas. Naquele ano, o volume informado foi estimado pelas horas de trabalho da bomba de dragagem do lodo. Em 2015, não houve retirada de lodo nos meses de abril e maio devido a inoperância da bomba de dragagem do lodo. A imprecisão quanto à estimativa do volume de lodo descartado das lagoas em 2014, somado ao não descarte do lodo por dois meses de 2015 são fatos que podem justificar a grande diferença de volumes observada nos referidos anos.

No sistema de desaguamento de lodo, foi utilizado em 2014, o volume de 764 m³ de polímero. Em 2015 houve um decréscimo de 16% do volume de polímero utilizado, passando para 640 m³. A dosagem de polímero recomendada na ETE estudada é de 5,5 kg. (t ST)⁻¹ (SANEPAR, 2013). Segundo dados da operação, a dosagem de polímero aplicada foi 9 % superior à dosagem recomendada, em 2014, e 20% superior em 2015.

Na higienização do lodo, foram aplicados 432 m³ de óxido de cálcio em 2014 e 299 m³ em 2015. O decréscimo de 45% do volume se justifica pelo fato de que a dosagem de óxido de cálcio é baseada no volume de lodo a ser higienizado. Somando os volumes de lodo descartado dos reatores anaeróbios e da lagoa aerada e de decantação, houve uma diminuição de 40% em 2015 em relação a 2014. Desta forma, o volume de lodo caleado também foi cerca de 40% inferior se comparado a 2015.

Por fim, o volume de efluente tratado correspondeu a 9.724.962 m³ em 2014 e 11.666.729 m³ em 2015, um aumento de 20% do volume tratado em 2015 em comparação a 2014, compatível com o acréscimo no volume de efluente bruto.

5.1.2 Indicadores de consumo e geração de materiais da ETE

Os indicadores específicos de consumo e geração de materiais da ETE estudada e da ETE Santa Quitéria, calculados por Shirado (2014), estão representados TABELA 7.

TABELA 7 – INDICADORES ESPECÍFICOS DE CONSUMO E GERAÇÃO DE MATERIAIS DA ETE ESTUDADA PARA OS ANOS DE 2014 E 2015 E NA ETE SANTA QUITÉRIA PARA O ANO DE 2013.

PROCESSO	MATERIAL	INDICADOR ESPECÍFICO DE CONSUMO E GERAÇÃO DE MATERIAIS (L.(hab _{eq} .ano) ⁻¹)		
		ETE Estudada 2014	ETE Estudada 2015	ETE Santa Quitéria 2013 ^(a)
Recalque	Esgoto bruto	+78.709,23	+ 85.441,36	+100.010,80
Gradeamento	Resíduos sólidos grosseiros	+ 2,18	+1,87	+ 0,94
Desarenação	Areia	+ 1,78	+ 1,87	+ 1,93
Tratamento biológico anaeróbio	Escuma	+ 23,38	+ 26,79	+ 13,03
	Biogás	+ 4.387,11	+ 4.195,70	+ 3.645,62
	Lodo	+ 32,79	+ 44,06	+ 32,70
	Peróxido de hidrogênio	- 3,69	- 2,97	- 2,89
Pós-tratamento	Lodo	+ 203,97 ^(b)	+ 83,15 ^(b)	+ 229,29 ^(c)
Desaguamento	Lodo adensado	+ 236,76	+ 127,21	+ 170,22
	Polímero	- 6,18	- 4,68	- 10,93
	Lodo desaguado	+ 28,36	+ 17,62	+ 34,26
Higienização do lodo	Óxido de cálcio	- 3,50	- 2,19	- 4,61
	Lodo caleado	+ 31,85	+ 19,82	+ 35,47

OBS: (+) Materiais gerados; (-) Materiais consumidos

^(a) SHIRADO (2014)

^(b) Lodo oriundo das lagoas aeradas e de decantação

^(c) Lodo oriundo processo de flotação

As variações quanto aos indicadores específicos de consumo e de geração de materiais da ETE estudada para os anos de 2014 e 2015 são atribuídas aos distintos volumes contabilizados nos respectivos anos, os quais foram discutidos no item 5.1.1, e também ao equivalente populacional calculado. Em 2014, a carga afluente à ETE correspondeu ao efluente gerado por 123.625 habitantes equivalentes. Em 2015, houve um acréscimo de cerca de 10%, passando para 136.611 habitantes equivalentes.

Segundo a área operacional, nesta bacia de contribuição não houve acréscimo no número de ligações de esgoto entre 2014 e 2015 que justificasse o aumento no equivalente populacional calculado. Desta forma, para o esclarecimento quanto ao aumento da carga afluente à ETE seria necessário um trabalho operacional de vistoria em campo a fim de identificar contribuintes clandestinos.

Na comparação entre indicadores específicos de materiais de diferentes ETEs, como no caso da ETE estuda e da ETE Santa Quitéria é importante considerar que a população contribuinte também é distinta, com diferentes hábitos alimentares, culturais e sociais que impactam diretamente na geração dos materiais e no consumo de insumos para tratamento do efluente.

Distintos processos de tratamento também impactam no cálculo dos indicadores específicos. O sistema preliminar, o tratamento anaeróbio e os sistemas de deságue e higienização do lodo são semelhantes nas duas ETEs. O pós-tratamento, no entanto, é bastante distinto, sendo lagoas aeradas e de decantação para a ETE estudada e flotação por ar dissolvido para a ETE Santa Quitéria.

Diferentes sistemas de tratamento podem gerar volumes distintos de subprodutos, que estão relacionados à eficiência do tratamento, não cabendo uma comparação direta entre os indicadores relacionados ao pós-tratamento das duas ETEs.

Os indicadores calculados poderão ser utilizados para compor uma base de dados a fim de avaliar e comparar a eficiência de diferentes tecnologias, servindo de suporte à tomada de decisões (SHIRADO, 2014).

5.2 ANÁLISE DO FLUXO DE ENERGIA DA ETE

5.2.1 Balanço de energia anual da ETE

Baseado no consumo de energia elétrica e na estimativa de geração de eletricidade a partir dos subprodutos (biogás, lodo e espuma) da ETE, foram construídos diagramas de Sankey com o balanço de energia para os anos de 2014 e 2015 (FIGURA 16 e FIGURA 17).

FIGURA 16 – DIAGRAMA DE FLUXO DE ENERGIA DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2014

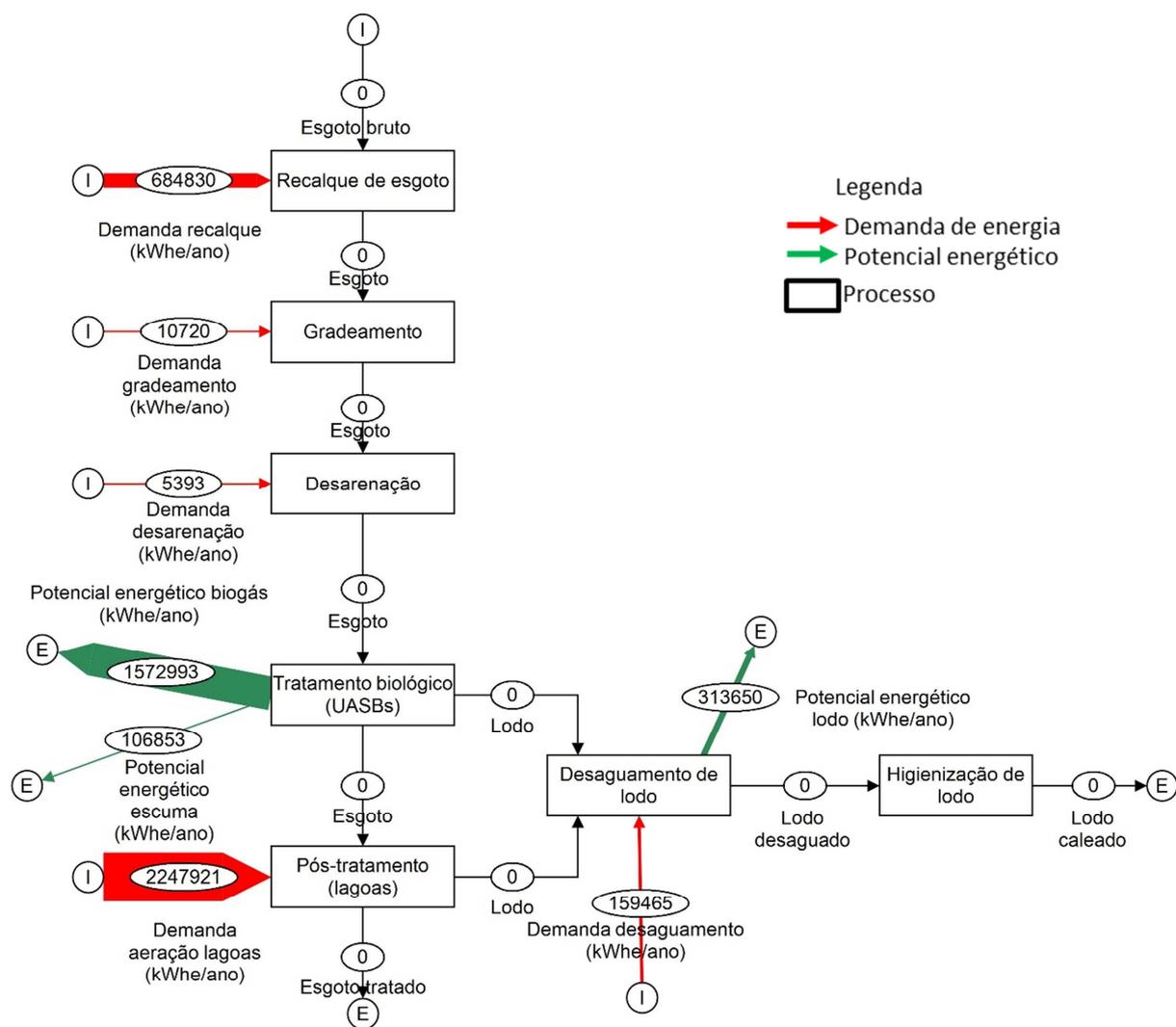
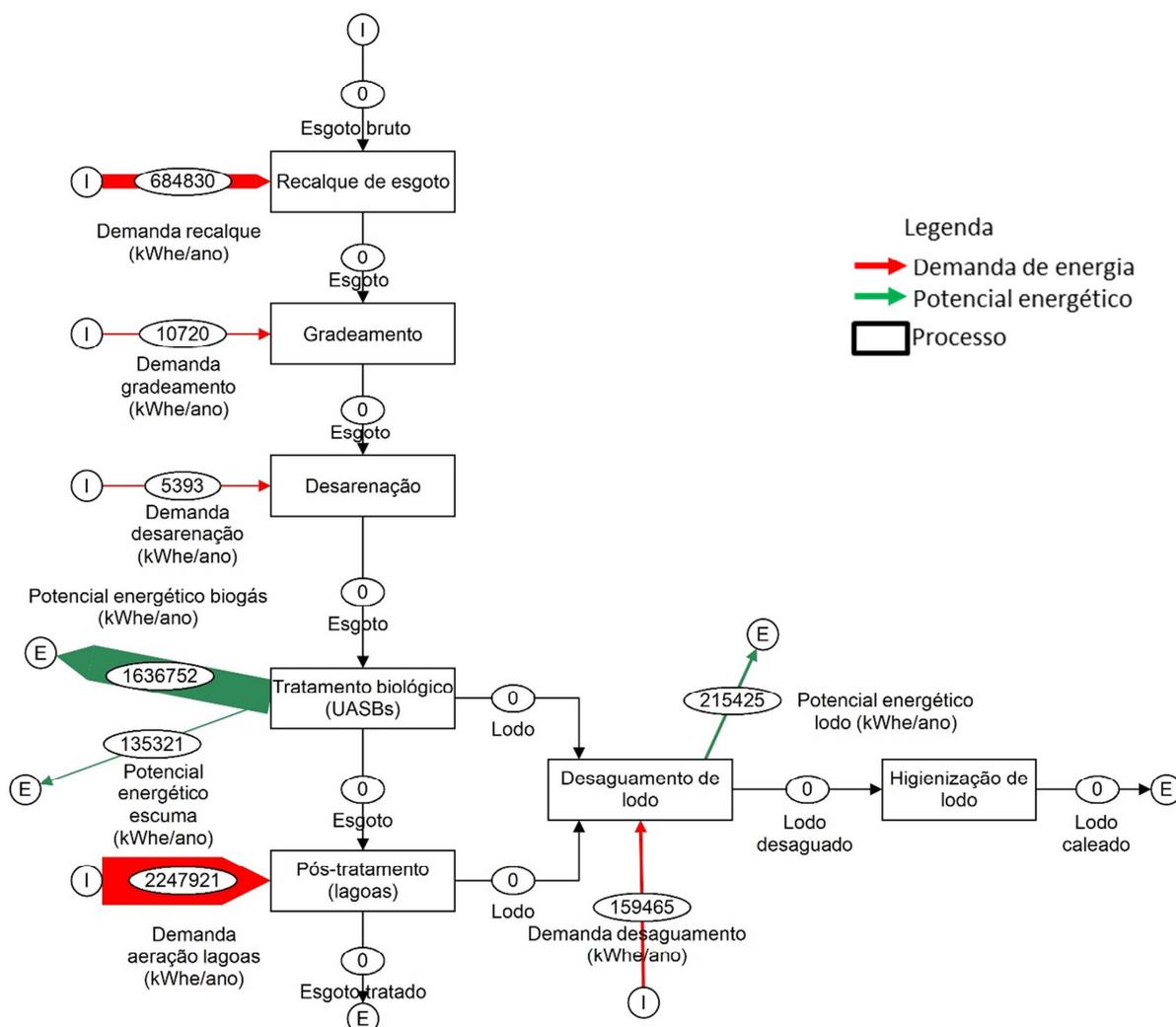


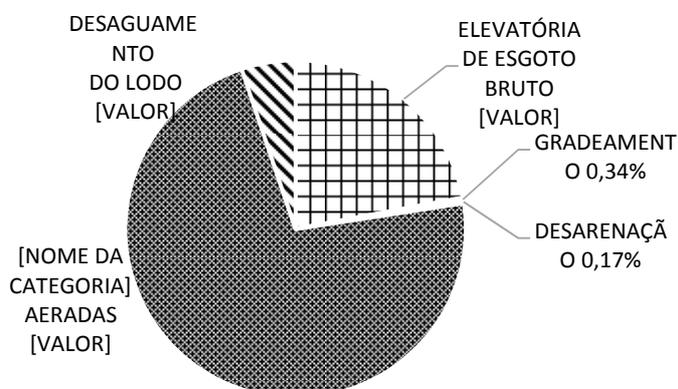
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE FLUXO DE ENERGIA DA ETE ESTUDADA PARA O ANO DE 2015



Na ETE estudada não há medidores individuais de consumo de energia elétrica por processo de tratamento. Desta forma o consumo foi calculado de acordo com a metodologia descrita no item 4.3.1 Uma vez que não houve alteração nos parâmetros utilizados na metodologia, sendo a mesma para os anos de 2014 e 2015, a estimativa do consumo de energia elétrica também foi a mesma.

A participação energética estimada para cada processo de tratamento está representada na FIGURA 18.

FIGURA 18 – PARTICIPAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR PROCESSO DE TRATAMENTO NA ETE ESTUDADA PARA OS ANOS DE 2014 E 2015



O sistema de pós-tratamento, composto pelas lagoas aeradas e de decantação é o maior consumidor de energia elétrica da ETE, seguido pela elevatória de esgoto bruto e sistema de desaguamento de lodo.

A geração de energia elétrica a partir dos subprodutos, por sua vez, foi distinta nos anos avaliados, uma vez que a estimativa se baseou nos dados operacionais de geração de lodo e espuma e na geração de biogás simulada pelo PROBIO para 2014 e 2015. A participação dos subprodutos na geração de energia elétrica para os anos de 2014 e 2015 está representada na FIGURA 19 e na FIGURA 20.

FIGURA 19 - PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SUBPRODUTO AVALIADO NA ETE ESTUDADA EM 2014

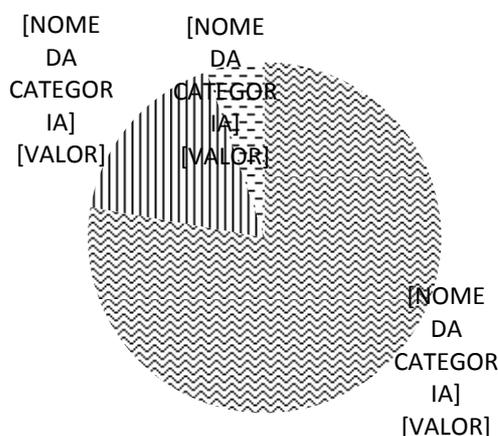
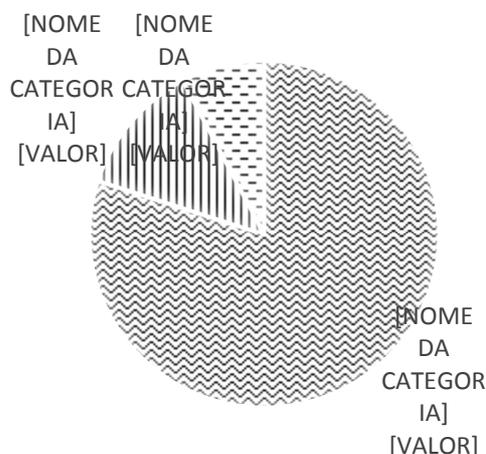


FIGURA 20 - PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SUBPRODUTO AVALIADO NA ETE ESTUDADA EM 2015



O biogás é o subproduto com maior potencial de geração de energia elétrica, seguido do lodo e espuma. Em 2014 e 2015 o percentual de participação dos subprodutos mostrou-se bastante semelhante.

A partir dos subprodutos lodo, espuma e biogás estimou-se a geração de 1,99 GWh_e de energia elétrica para o ano de 2014. A demanda de energia elétrica para o mesmo ano foi de 3,56 GWh_e, ou seja, a energia gerada seria suficiente para suprir 55,89% da demanda da ETE.

Em 2015, a geração de energia elétrica a partir dos mesmos subprodutos foi estimada em 1,98 GWh_e, e a demanda de energia elétrica foi de 3,35 GWh_e. A energia elétrica gerada supriria 59,10% da demanda da estação.

5.2.2 Indicadores de consumo e geração de energia da ETE

Os indicadores específicos de consumo e geração de energia da ETE estudada e da ETE Santa Quitéria estão representados na TABELA 8.

TABELA 8 - INDICADORES ESPECÍFICOS DE CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA NA ETE ESTUDADA PARA OS ANOS DE 2014 E 2015

PROCESSO	INDICADOR ESPECÍFICO DE CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA (kWh _e .(hab _{eq} .ano) ⁻¹)		
	ETE Estudada 2014	ETE Estudada 2015	ETE Santa Quitéria 2013 ^(a)
Recalque	- 5,54	- 5,01	- 3,10
Gradeamento	- 0,09	- 0,09	- 0,02
Desarenação	- 0,04	- 0,04	- 0,04
Tratamento biológico anaeróbio	Escuma	+ 0,86	+ 0,99
	Biogás	+ 12,72	+ 11,98
	Lodo	+ 2,54	+1,58
Pós-tratamento	Lodo	- 18,18 ^j	- 16,45 ^j
Desaguamento e Higienização		- 1,29	- 1,17
			- 0,96

OBS: (+) Energia gerada; (-) Energia consumida
^(a) SHIRADO (2014)

O indicador específico de consumo de energia representa o consumo de energia por habitante equivalente. Conforme já relatado, a estimativa de consumo de energia foi a mesma para os anos de 2014 e 2015 na ETE estudada. Assim, pode se atribuir o valor de indicador específico de consumo de energia inferior em 2015, se comparado a 2014, ao fato do equivalente populacional em 2015 ser, aproximadamente 10% superior em relação ao de 2014.

O indicador específico de geração de energia, por sua vez, está diretamente relacionado à estimativa de geração dos subprodutos escuma, biogás e lodo, que foram distintos nos anos avaliados conforme pôde ser observado nos balanços anuais da ETE, e ao equivalente populacional.

Na ETE Santa Quitéria, os indicadores específicos de consumo de energia foram inferiores aos da ETE estudada, com exceção do consumo observado na desarenação e pós-tratamento. Este indicador está diretamente relacionado às características e tempo de funcionamento dos equipamentos, variáveis distintas em ambas as ETEs.

5.3 ESTUDO DOS CENÁRIOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NA ETE

5.3.1 Cenário 1 – Geração de energia elétrica a partir do biogás

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás foi inferior à demanda de energia elétrica identificada nos anos de 2014 e 2015, conforme FIGURA 21 e FIGURA 22.

FIGURA 21 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PARA O ANO DE 2014

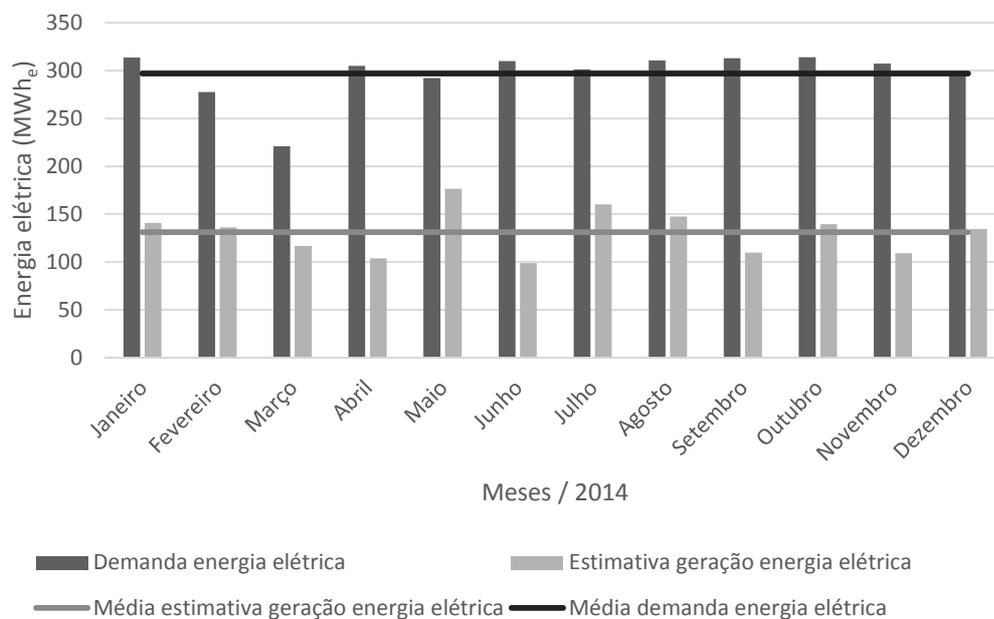
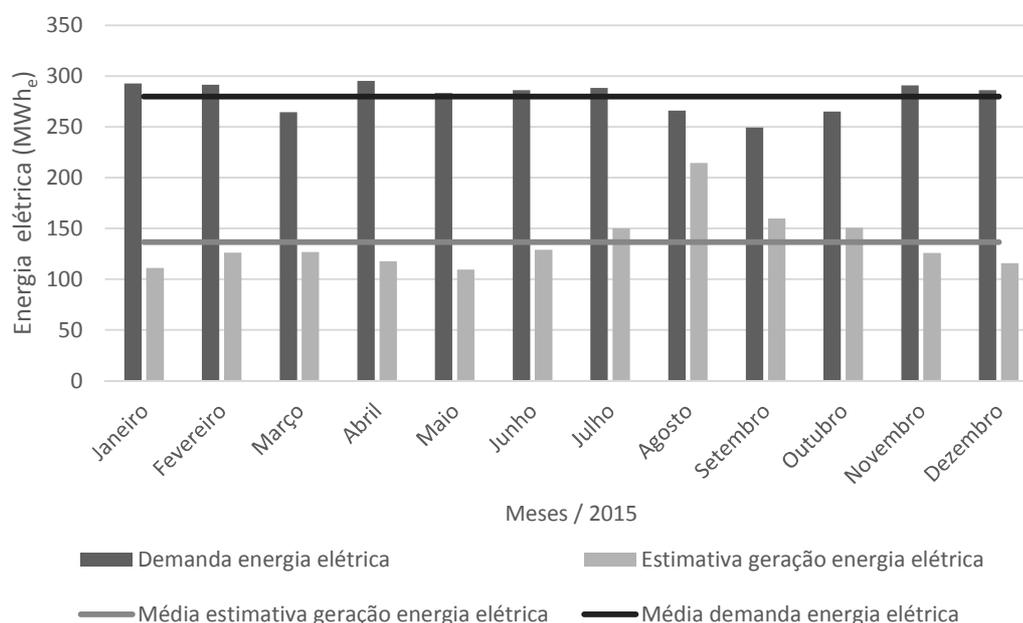


FIGURA 22 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PARA O ANO DE 2015



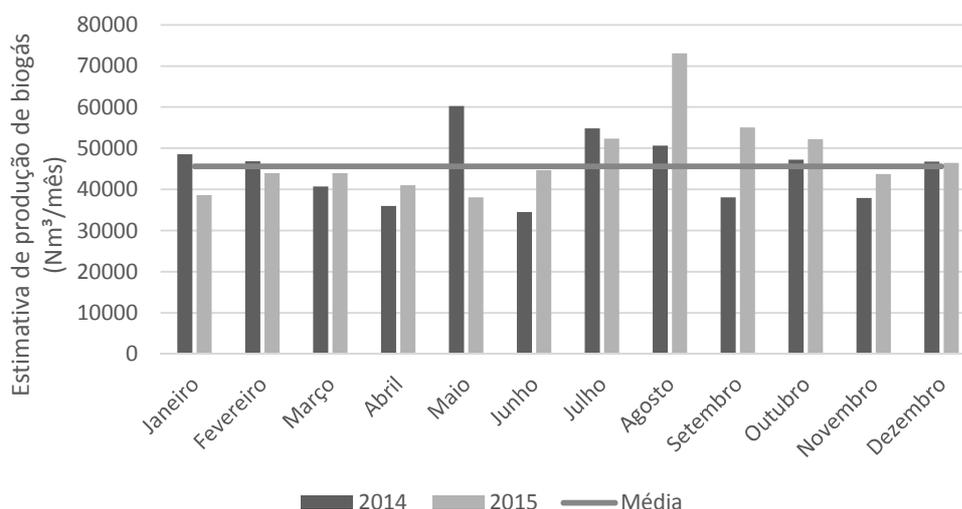
A média estimada de geração de energia elétrica seria de $(131,08 \pm 23,90)$ $MWh_e \cdot \text{mês}^{-1}$ para o ano de 2014 e de $(136,39 \pm 29,42)$ $MWh_e \cdot \text{mês}^{-1}$ para o ano de 2015. A maior produção seria de 214,34 MWh_e em agosto de 2015 e, a menor, de 98,70 MWh_e em junho de 2014.

Shirado (2014) avaliou o aproveitamento de biogás na forma de energia elétrica em uma ETE que possui reatores anaeróbios de mesma concepção da ETE estudada e com vazão de tratamento equivalente. A estimativa realizada pela autora apontou uma geração média mensal de $(100,74 \pm 40,75)$ $MWh_e \cdot \text{mês}^{-1}$ para o ano de 2013, valor cerca de 30% inferior ao calculado para a ETE estudada. Dentre os possíveis motivos da diferença identificada pode-se destacar as variações nas cargas orgânicas afluentes e diferentes rotinas operacionais como frequência de retirada de lodo e espuma.

Em valores anuais, o biogás produzido na ETE estudada, que trata o efluente de cerca de 180.000 habitantes, teria potencial para gerar 1.572,99 MWh_e de energia elétrica em 2014 e 1.636,75 MWh_e em 2015. Os valores obtidos foram proporcionalmente inferiores aos simulados por Valente (2015), que obteve um potencial para gerar 1.305 $MWh_e \cdot \text{ano}^{-1}$ para uma ETE de 100.000 habitantes e 2.748 $MWh_e \cdot \text{ano}^{-1}$ para uma ETE de 200.000 habitantes.

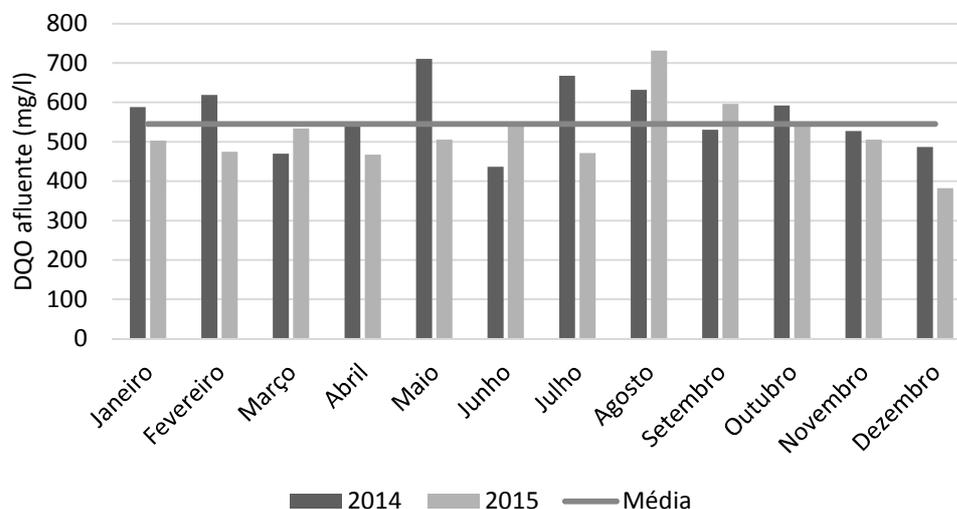
As variações observadas nas estimativas de geração de energia elétrica estão diretamente relacionadas à produção de biogás (FIGURA 23).

FIGURA 23 – GRÁFICO DA ESTIMATIVA MENSAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA OS ANOS DE 2014 E 2015



A estimativa de média de produção de biogás foi de $(45.569,60 \pm 8.722,04)$ $\text{Nm}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$ no período observado. Assim como na estimativa de produção de energia elétrica, a maior produção de biogás ocorreu em agosto de 2015, e a menor em junho de 2014, mesmos meses onde foram observados respectivamente a maior e a menor DQO afluente à ETE no período analisado, conforme FIGURA 24.

FIGURA 24 – GRÁFICO DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO AFLUENTE À ETE NOS ANOS DE 2014 E 2015



A demanda energética média da ETE estudada, por sua vez, foi de $(296,71 \pm 26,15)$ MWh_e.mês⁻¹ para o ano de 2014 e de $(279,88 \pm 14,73)$ MWh_e.mês⁻¹ para o ano de 2015, o que representa uma decréscimo de 5,67% entre os anos avaliados.

A autonomia média de energia elétrica para foi de $(46,85 \pm 10,96)$ %. Identificou-se a maior autonomia (80,61%) em agosto de 2015 e a menor (31,85%) em junho de 2014.

Shirado (2014) avaliou também a autonomia elétrica da ETE Santa Quitéria considerando o aproveitamento de energia elétrica gerado pelo biogás. Durante cinco meses do ano de 2013, a ETE avaliada seria autossuficiente.

Bilotta e Ross (2016) também avaliaram a autonomia energética da ETE Santa Quitéria no período de agosto de 2012 a março de 2013. Segundo as autoras, o biogás gerado pelos reatores anaeróbios seria suficiente para atender a 59% da demanda média mensal da energia elétrica da estação.

Importante destacar o fato de que a demanda da ETE Santa Quitéria corresponde a cerca de 40% da ETE estudada, diferença atribuída aos diferentes tipos de pós-tratamento adotados nas duas ETES.

No estudo realizado por Valente (2015), a energia elétrica gerada por meio do biogás seria suficiente para garantir a autonomia energética de 52% para uma ETE com capacidade para 100.000 habitantes e 55% para uma ETE de 200.000 habitantes, percentuais superiores à autonomia média da ETE estudada.

Dentre os fatores que justificam uma maior autonomia no estudo de Valente (2015) em comparação à ETE estudada está na diferença da potência elétrica instalada das ETES, cerca de três vezes maior na ETE estudada, que possui aeradores mecânicos superficiais.

5.3.2 Cenário 2 – Cogeração de energia a partir do biogás

A demanda de eletricidade da ETE em relação à estimativa de geração de energia elétrica do biogás, no período avaliado, está representada na FIGURA 25 e FIGURA 26.

FIGURA 25 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2014

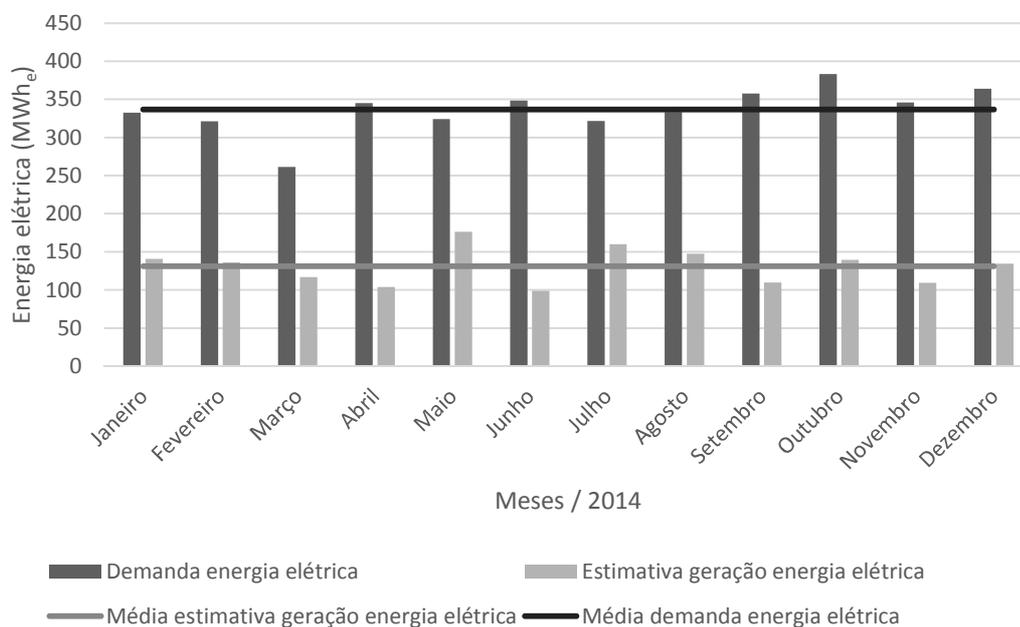
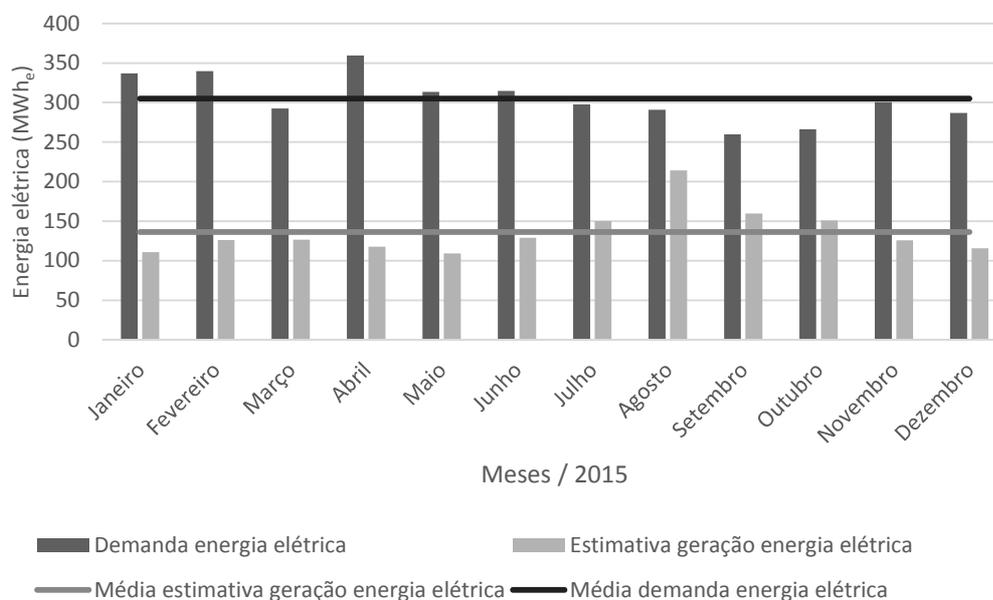


FIGURA 26 – GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2015



Neste cenário, assim como no cenário 1, a demanda de energia elétrica foi superior à estimativa de geração de energia elétrica em todo o período avaliado.

Em 2014, a demanda média mensal foi de $(333,22 \pm 31,96)$ MWh_e e a estimativa de geração de energia elétrica foi de $(131,08 \pm 23,91)$ MWh_e, conferindo uma autonomia média mensal de 39,78%.

Em 2015, a autonomia média mensal foi de 45,54%. A demanda média mensal foi de $(304,96 \pm 29,64)$ MWh_e, cerca de 10% inferior à 2014, enquanto a estimativa de geração de energia elétrica permaneceu praticamente constante, em média $(136,40 \pm 29,42)$ MWh_e.

Se comparado ao cenário 1, a demanda de energia elétrica foi superior no presente cenário, pois foram acrescentados o consumo relativo à potência instalado do secador rotativo.

A energia térmica do MCI e a requerida para secagem do lodo está representada na FIGURA 27 e FIGURA 28.

FIGURA 27 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DO MCI E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2014

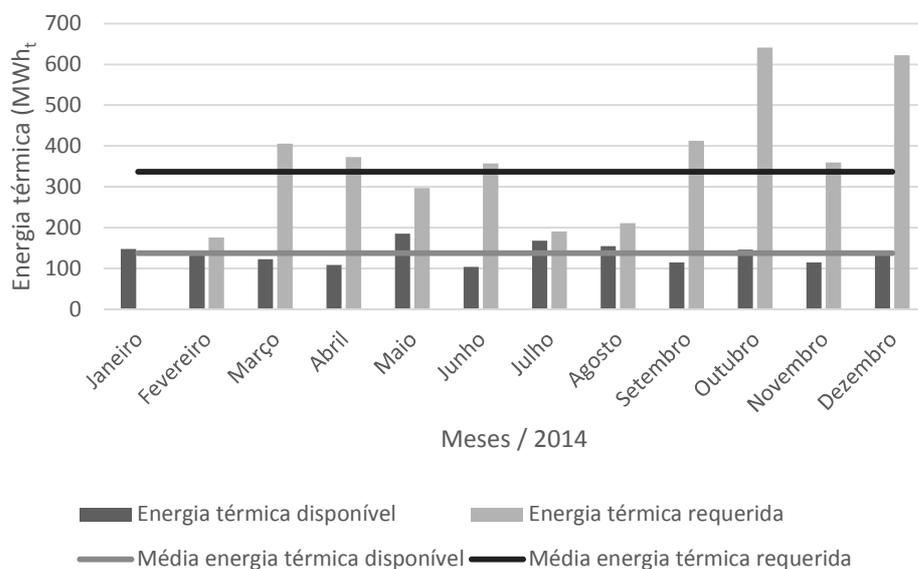
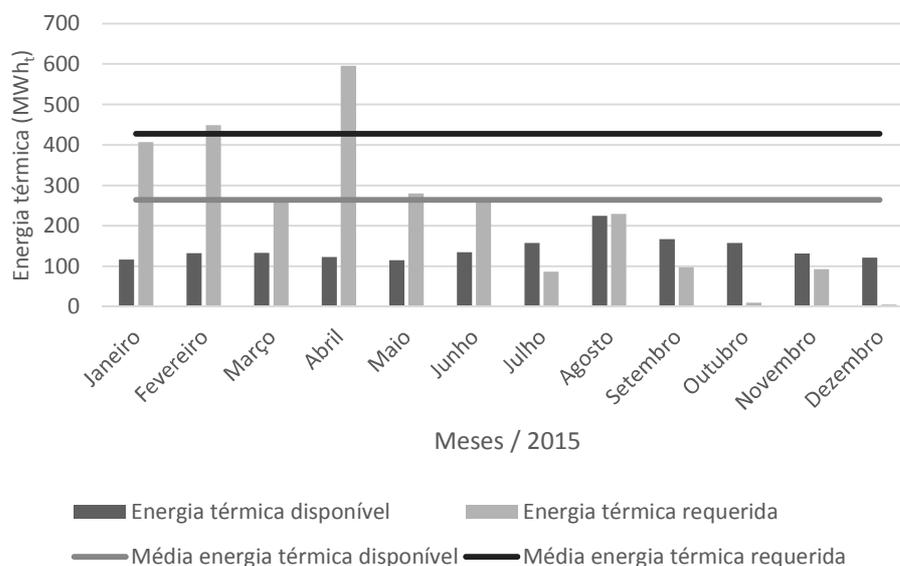


FIGURA 28 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DO MCI E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2015

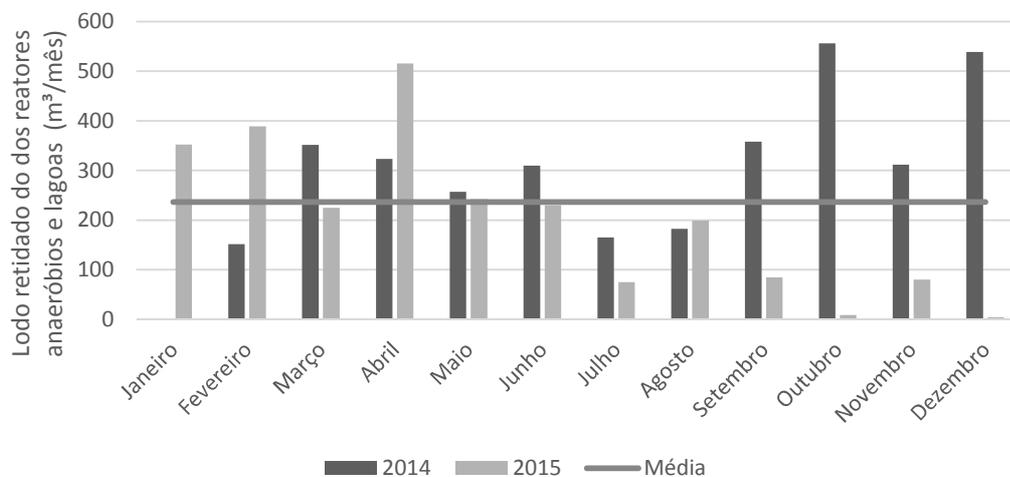


Em 2014 a energia térmica do MCI não seria suficiente para suprir a energia requerida nos meses avaliados, com exceção do mês de janeiro de 2014, onde não houve retirada de lodo devido à manutenção dos equipamentos de deságue. Em média, seriam produzidos $(137,32 \pm 25,04)$ MWh_t, sendo a demanda ou energia requerida $(337,11 \pm 182,26)$ MWh_t. A autonomia média no ano de 2014 seria de $(44,93 \pm 25,43)$ %.

Em cinco meses do ano de 2015, a quantidade de biogás gerada e enviada ao MCI e a consequente quantidade de energia térmica disponível seriam superiores à demanda do secador térmico. No entanto, se observados a média de energia produzida $(263,80 \pm 30,82)$ MWh_t, e a média de energia requerida $(231,547 \pm 184,04)$ MWh_t, conclui-se que, a autonomia média mensal seria de $(381,94 \pm 720,27)$ %. O grande desvio padrão observado foi diretamente influenciado pela baixa demanda energética nos meses de outubro e dezembro de 2015, que somados não chegariam a 16 MWh_t.

A demanda energética do secador está diretamente relacionada à quantidade de lodo retirada. A FIGURA 29 mostra os volumes mensais de lodo retirados em 2014 e 2015 após o processo de centrifugação, ou seja, a um TS de 20%.

FIGURA 29 – GRÁFICO DO LODO RETIRADO DOS REATORES ANAERÓBIOS E LAGOAS EM 2014 E 2015

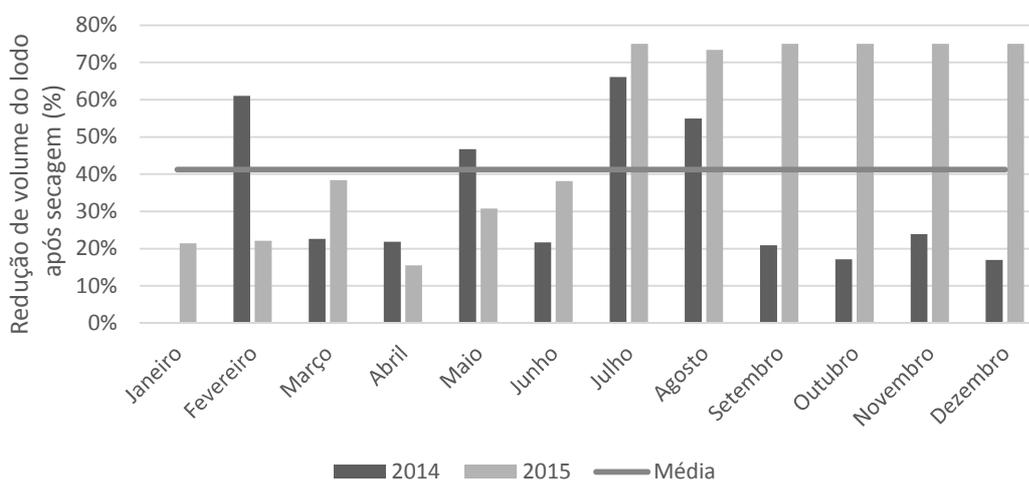


Os volumes retirados variaram de 4,69 m³, em dezembro de 2015, a 555,79 m³ em outubro de 2014, o que representa uma média $(236,39 \pm 162,10) \text{ m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$. No mês de janeiro de 2014 não houve descarte de lodo. Em 2014 o volume acumulado de lodo foi de 5.519,53 m³, valor cerca de 20% superior aos 4.422,72 m³ retirados em 2015.

Dentre os motivos que justificam a grande variabilidade dos volumes retirados estão a disponibilidade de espaço físico, manutenção de equipamentos e entupimento de tubulações, conforme discutido no item 5.1.1.

A secagem promove também a diminuição do volume do lodo a ser gerenciado. O percentual de redução do volume do lodo, após a secagem térmica está representado na FIGURA 30.

FIGURA 30 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DE LODO APÓS SECAGEM TÉRMICA COM O CALOR DO MCI PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.

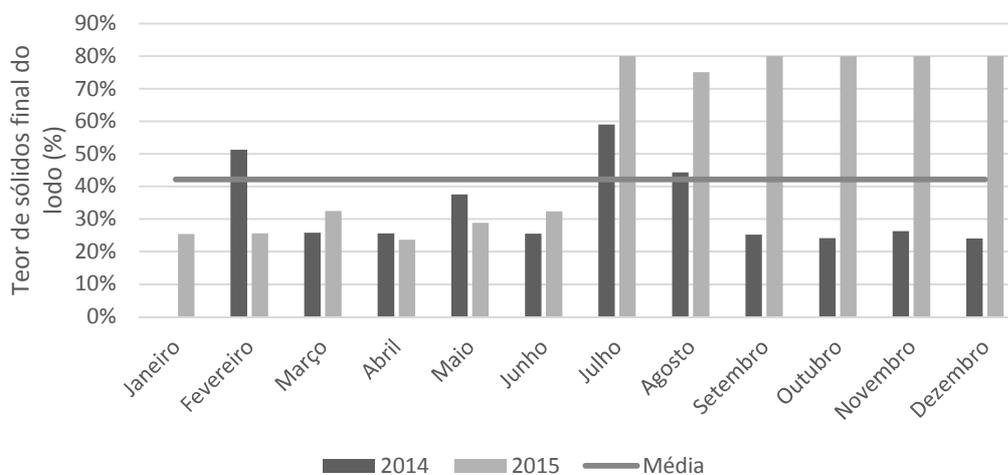


No período avaliado, a redução média observada foi de $(41,19 \pm 24,84) \%$, sendo 75% o maior percentual de redução de volume, observado em cinco dos 24 meses avaliados, e 15,53% o menor, em abril de 2015. O percentual de redução de volume do lodo após secagem está diretamente relacionado ao teor final de sólidos. Quanto maior a quantidade de água evaporada, maior o teor final de sólidos obtido, e consequentemente maior o ganho na redução de volume.

No estudo realizado por Valente (2015), o volume de lodo após secagem por meio do aproveitamento do calor por cogeração, sofreria uma diminuição de cerca de 40% em relação ao lodo centrifugado tanto para uma ETE de 100.000 ou para 200.000 habitantes, valor bastante próximo ao encontrado no presente estudo.

O teor final de sólidos obtido após o processo de secagem, considerando o aproveitamento da energia térmica do MCI pode ser observado na FIGURA 31.

FIGURA 31 – GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELO MCI



O teor final de sólidos médio para os anos de 2014 e 2015 foi de $(42,19 \pm 24,39) \%$, com o menor TS de 23,68% em abril de 2015 e o maior de 80,00% em julho, e de setembro a dezembro de 2015.

A grande variação observada no teor final de sólidos ocorreu devido às oscilações nos volumes de lodo retirados dos reatores anaeróbios e lagoas em relação à disponibilidade de energia térmica para secagem do lodo.

Em valores médios, o teor de sólidos obtido aproximou-se bastante do encontrado por Valente (2015), que variou de 43% a 41% para uma ETE de 100.000 e 200.000 habitantes respectivamente.

5.3.3 Cenário 3 – Secagem térmica do lodo a partir do biogás

O potencial de geração de energia térmica proveniente da combustão do biogás e a energia térmica requerida para secagem do lodo estão representados na FIGURA 32 e FIGURA 33.

FIGURA 32 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2014

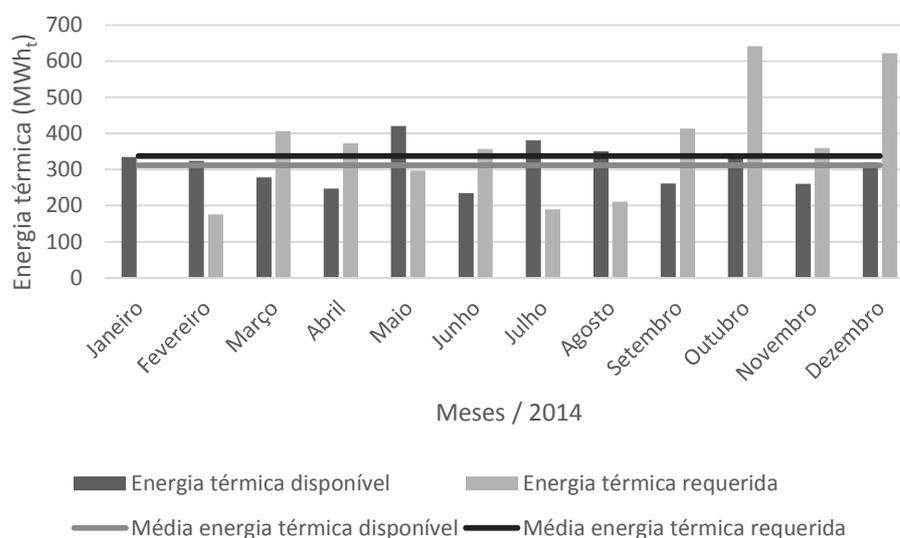
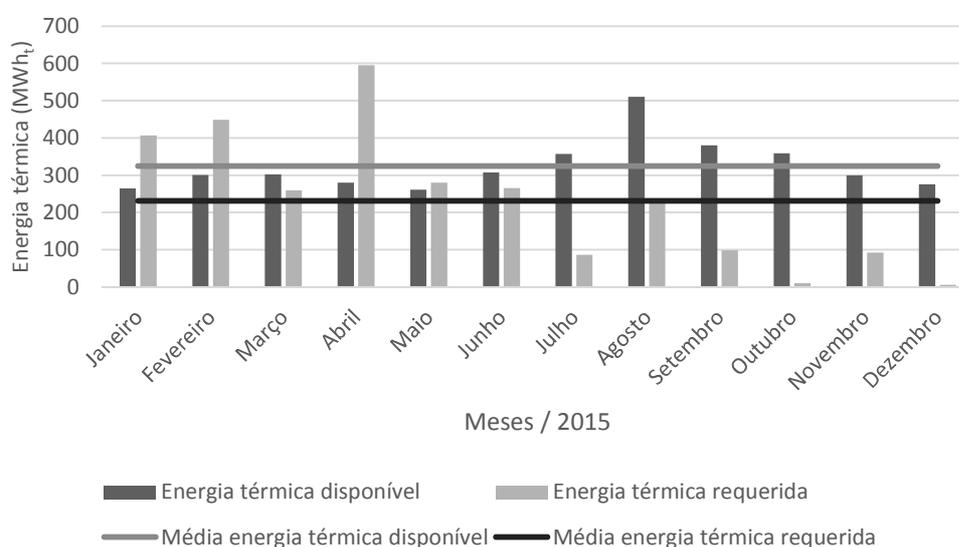


FIGURA 33 – GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO PARA O ANO DE 2015



Durante sete meses do ano de 2014 a energia térmica requerida para secagem foi superior a energia térmica disponível. Em média, foram gerados mensalmente $(312,10 \pm 56,92)$ MWh_t , enquanto a média de energia requerida foi de $(337,11 \pm 182,26)$ MWh_t . Em valores anuais seriam necessários 4.045,34 MWh_t , para realizar a secagem do lodo a um TS de 80%, porém a queima do biogás forneceria 3.745,22 MWh_t , garantindo uma autonomia de 92,58% para o ano de 2014.

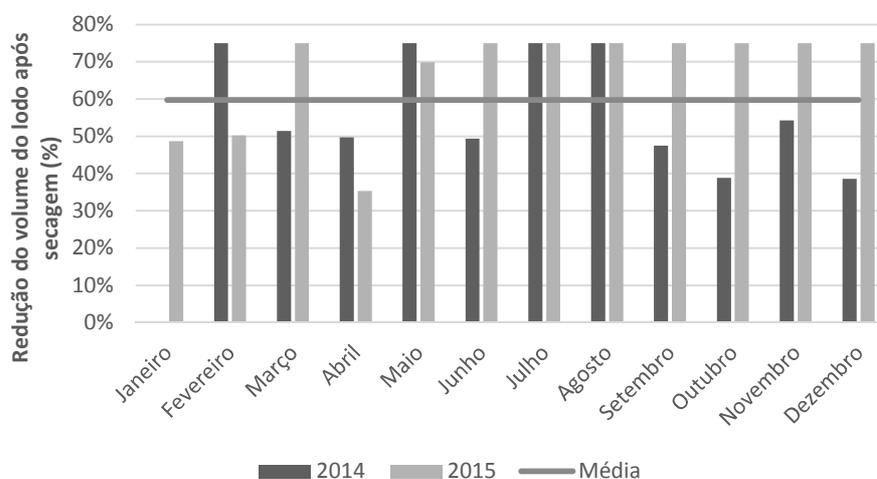
Em 2015, por sua vez, a energia térmica disponível foi superior à requerida em oito dos doze meses avaliados. A média de energia térmica disponível foi de $(324,75 \pm 70,05)$ kWh_t e a média de energia térmica requerida foi de $(231,54 \pm 184,04)$ kWh_t . Em valores acumulados, a demanda de energia térmica para o período seria de 2.778,47 MWh_t e o biogás produzido pelos RALFs poderia fornecer até 3.897,03 MWh_t

A autonomia para o período seria de 140,25%, valor diretamente influenciado pela baixa demanda energética no segundo semestre de 2015, resultado do reduzido volume de lodo retirado dos RALFs e lagoas.

Desta forma, em 2015, haveria um excedente de 1.118,56 MWh_q de energia química, que poderia ser utilizada para outras demandas na ETE.

O percentual de redução do volume do lodo, após a secagem térmica está representado na FIGURA 34

FIGURA 34 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DE LODO APÓS SECAGEM A PARTIR DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.

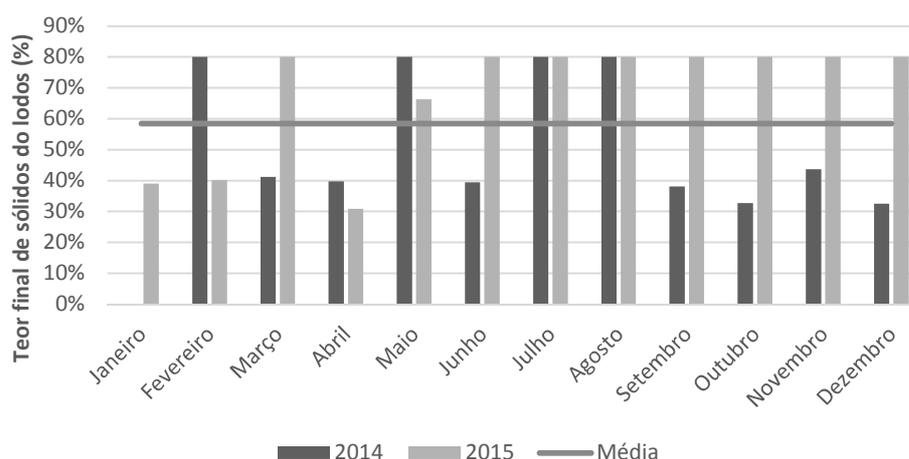


No referido período, a redução média observada foi de $(59,74 \pm 19,36)$ %, sendo 75% o maior percentual de redução de volume, verificado em 12 dos 24 meses avaliados e 35,30% o menor, em abril de 2015.

No estudo realizado por Valente (2015), onde o autor também avaliou o aproveitamento do biogás para secagem térmica do lodo. A redução de volume foi de cerca de 78%, seja para ETEs de 100.000 ou 200.000 habitantes, valor superior a média observada.

O teor final de sólidos do lodo após o processo de secagem do lodo por meio do aproveitamento da energia térmica proveniente da combustão do biogás está representado na FIGURA 35.

FIGURA 35 - GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA QUEIMA DO BIOGÁS



No período avaliado, o teor final de sólidos médio foi de $(58,49 \pm 24,22)$ %. O menor teor final de sólidos foi de 30,91%, em abril de 2015, e o maior foi de 80%, observado em 12 dos 24 meses avaliados.

Em comparação com o cenário 2, os benefícios obtidos na secagem do lodo, como o aumento do teor de sólidos e redução de volume, foram maiores, uma vez que todo o potencial químico do biogás foi direcionado ao secador térmico.

5.3.4 Cenário 4 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir do biogás

A FIGURA 36 e a FIGURA 37 comparam a energia térmica disponível e a requerida para secagem do lodo e da espuma no período avaliado.

FIGURA 36 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2014.

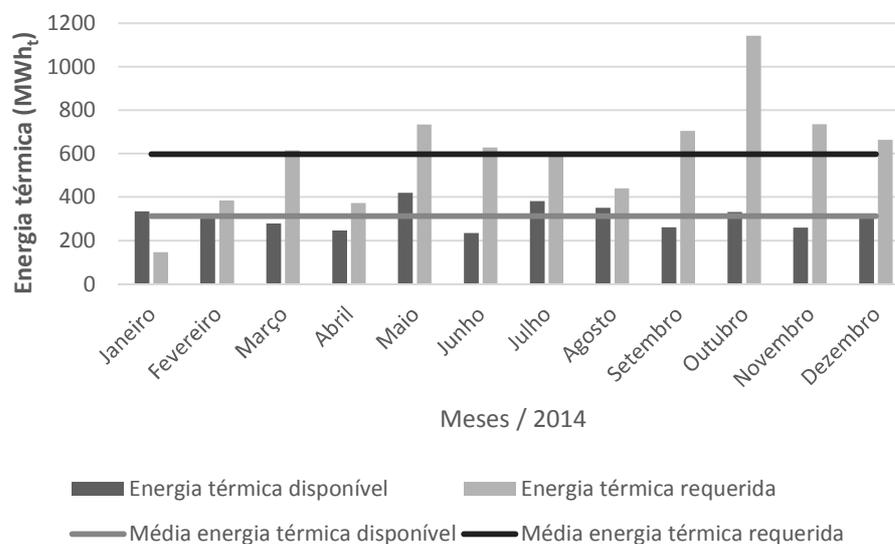
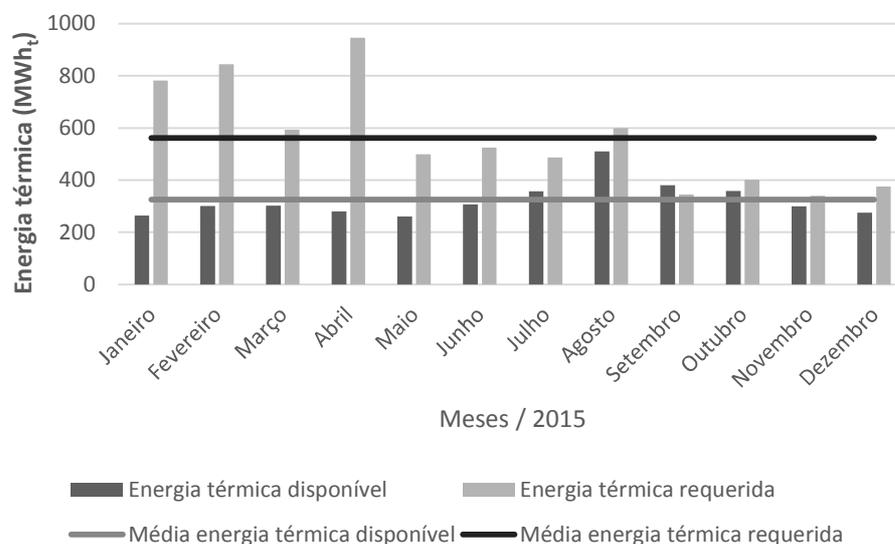


FIGURA 37 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL NA COMBUSTÃO DO BIOGÁS E DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2015



Em 2014, o biogás gerado pelos RALFs seria suficiente para disponibilizar uma média mensal de $(312,10 \pm 56,92)$ MWh_t de energia, porém a demanda mensal para alimentação do secador rotativo seria de $(598 \pm 247,87)$ MWh_t, conferindo uma autonomia de 52,22%.

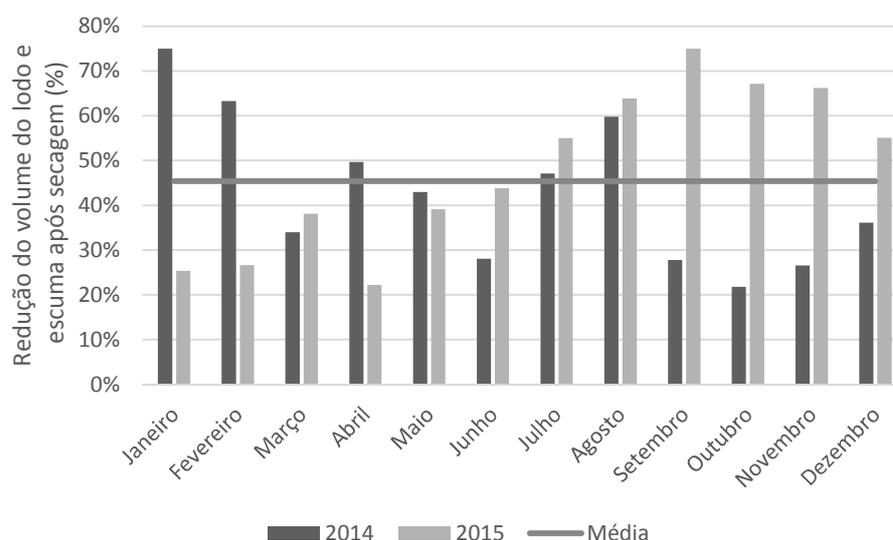
No ano de 2015, a disponibilidade média mensal de energia térmica por meio da queima do biogás seria de $(324,75 \pm 70,05)$ MWh_t, enquanto a demanda

média mensal para secagem do lodo e espuma seria de $(561,5 \pm 201,44)$ MWh_t, resultando em um autonomia de 57,84%.

Nos meses de janeiro de 2014 e setembro de 2015 o sistema seria termicamente autossuficiente, período inferior ao observado no cenário 3, uma vez que para a mesma energia disponível houve uma maior volume de subproduto a ser secado, com a inclusão da espuma.

O percentual de redução do volume do lodo e da espuma após processo de secagem térmica, considerando apenas o biogás gerado pelos RALFs, está representado na FIGURA 38.

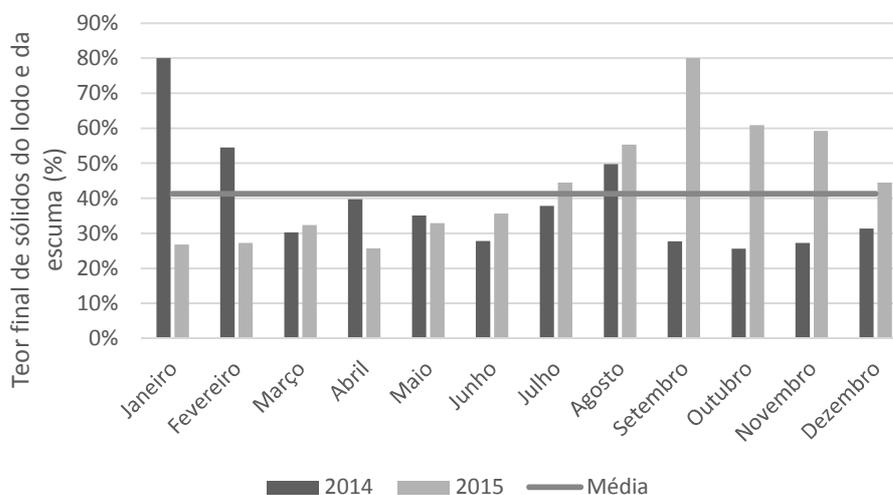
FIGURA 38 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO E DA ESPUMA APÓS SECAGEM TÉRMICA.



Mesmo produzindo cerca da metade da demanda do secador térmico, no período avaliado, a energia térmica gerada pela combustão do biogás dos RALFs proporcionaria uma redução média de $(45,41 \pm 17,27)$ % do volume do lodo e da espuma. Os maiores percentuais de redução (75%) ocorreram em janeiro de 2014 e setembro de 2015, mesmos meses onde foi identificada a menor produção de lodo e de espuma. O menor percentual de redução (21,82%) ocorreu em outubro de 2014, mesmo mês onde foi identificado a maior geração desses subprodutos.

O teor final de sólidos do lodo e da espuma após o processo de secagem está representado na FIGURA 39.

FIGURA 39 - GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO E DA ESCUMA APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA QUEIMA DO BIOGÁS

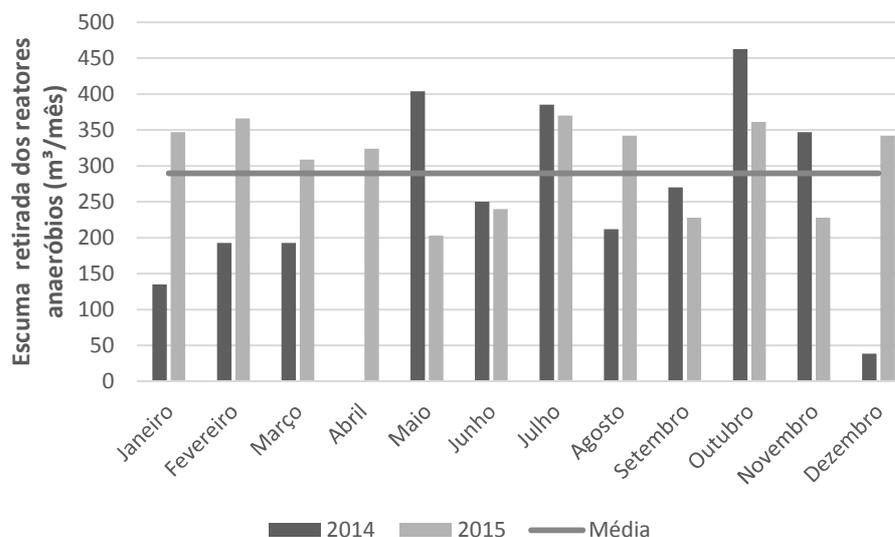


Nos anos de 2014 e 2015, o teor final de sólidos médio foi de $(41,32 \pm 15,92)$ %. Em janeiro de 2014 e setembro de 2015 foi obtido o teor de sólidos limite considerado na avaliação dos cenários, 80%. Em outubro de 2014 foi obtido o menor percentual, 25,58%.

Em comparação com o cenário 3, os benefícios relacionados à secagem térmica como o teor final de sólidos e redução do volume do lodo e da espuma, foram menores, pois uma maior quantidade de subprodutos seria submetida a secagem com a mesma quantidade de biogás gerada pelos RALFs

A variação observada no teor final de sólidos está relacionada à disponibilidade de lodo (FIGURA 29) e de espuma retirada dos reatores (FIGURA 40) em relação à disponibilidade de energia térmica proveniente da combustão do biogás (FIGURA 32) conforme discutido no cenário 3, porém com a inclusão da espuma.

FIGURA 40 – GRÁFICO DA ESCUMA RETIRADA DOS REATORES ANAERÓBIOS



No período avaliado, retirou-se em média ($289,50 \pm 112,59$) m³ de escuma dos reatores anaeróbios. No mês de abril de 2014 não houve retirada de escuma devido à indisponibilidade de caminhões de sucção. O maior volume, 462,72 m³, foi retirado em outubro de 2014.

A estimativa de produção mensal de escuma, aplicando a taxa proposta por Souza, Aquino e Chernicaró (2006) para uma DQO média aplicada de 544,81 mg.L⁻¹, observada no período de 2014 e 2015, seria de 1,76 m³, valor correspondente a 0,61% da escuma mensalmente retirada dos reatores.

Shirado (2014) fez a mesma comparação, entre a taxa de produção de escuma proposta por Souza, Aquino e Chernicaró (2006) e a produção na ETE Santa Quitéria. Os volumes de escuma estimados correspondem a cerca de 8% do volume de escuma efetivamente retirado dos reatores da ETE avaliada pela autora.

Os reatores da ETE Santa Quitéria e da ETE estudada são de mesma concepção e possuem capacidades equivalentes. Segundo Shirado (2015), as diferenças identificadas na produção de escuma entre as taxas propostas por Souza, Aquino e Chernicaró (2006) e os volumes efetivamente observados podem estar relacionados ao fato de que o reator anaeróbio tipo RALF, instalado em ambas as ETES possui uma abertura no separador trifásico que favorece a saída de sólidos e a incorporação destes na escuma, diferentemente do reator UASB utilizado por Souza, Aquino e Chernicaró (2006) em seu experimento.

5.3.5 Cenário 5 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da combustão do lodo, espuma e biogás

A FIGURA 41 e a FIGURA 42 comparam a energia térmica requerida e disponível para secagem do lodo e da espuma no período avaliado.

FIGURA 41 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2014.

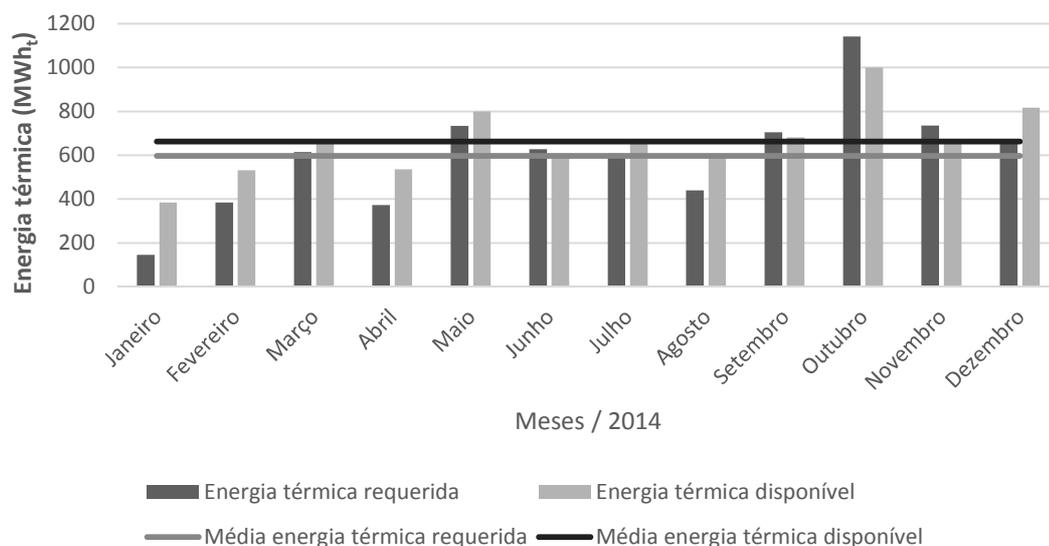
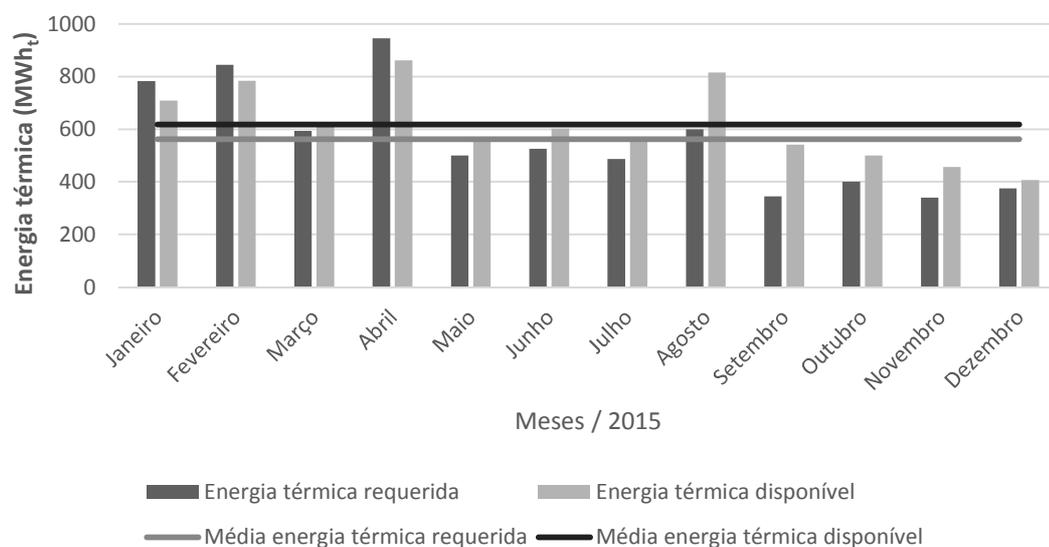


FIGURA 42 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, DO LODO E DA ESCUMA PARA O ANO DE 2015.



Em 2014, em média, seriam necessários mensalmente, $(597,65 \pm 247,87)$ MWh_t para alimentação do secador rotativo, sendo que o biogás, lodo e escuma teriam um potencial de fornecer, em média $(662,52 \pm 158,32)$ MWh_t .

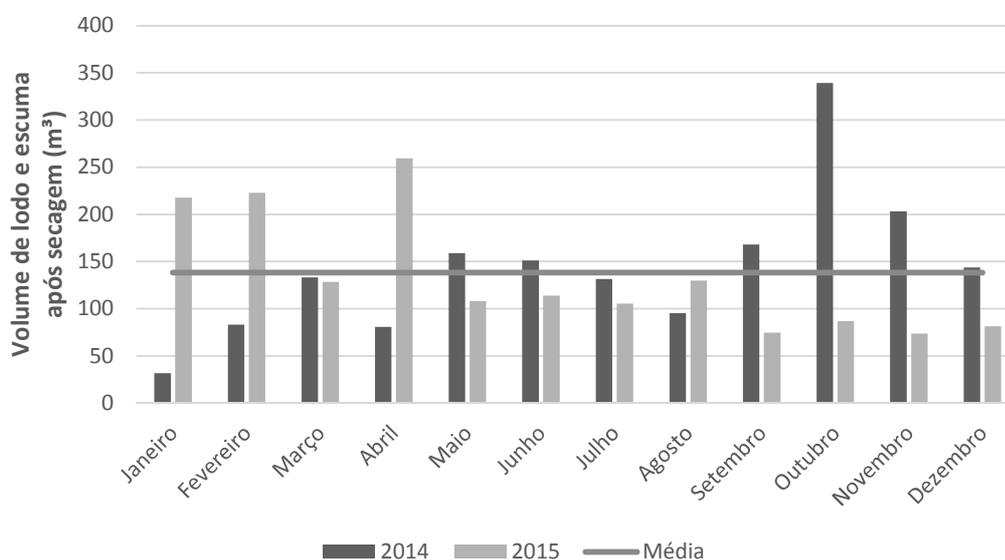
Para o ano de 2015, seriam necessários, em média, $(561,49 \pm 201,44)$ MWh_t , sendo o potencial de energia dos subprodutos $(617,04 \pm 145,25)$ MWh_t .

Em todo o período avaliado, a autonomia média mensal do sistema seria de $(120,06 \pm 36,06)\%$. Em 17 dos 24 meses avaliados o sistema seria termicamente autossuficiente.

Somando-se a energia térmica requerida no período e comparando-a com a energia disponível, verificou-se um excedente de energia da ordem de 1445,09 MWh_t , que poderia ser utilizada para outros fins, como por exemplo para secagem de lodo e de de escuma oriundos de outras ETEs.

Os volumes de lodo e escuma, após processo de secagem térmica, estão representados na FIGURA 43.

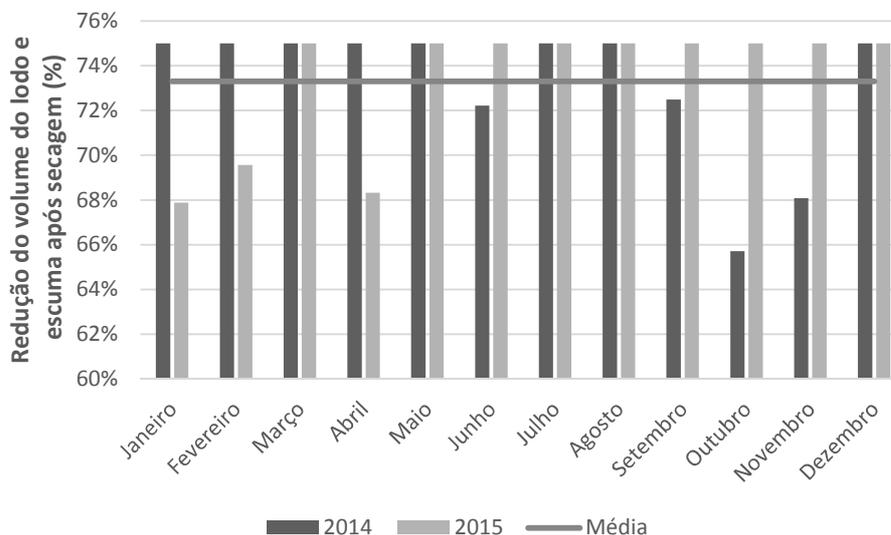
FIGURA 43- GRÁFICO DO VOLUME DE LODO E ESCUMA APÓS O PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA



Mensalmente, seriam produzidos, em média $(138,43 \pm 69,40)$ m^3 de lodo e escuma secos. O maior volume ($339,29 m^3$), seria produzido em outubro de 2014, mês onde também houve a maior produção de lodo e escuma. Já o menor volume ($31,63 m^3$), ocorreria em janeiro de 2014, mês onde não houve retirada de lodo e a produção de escuma foi reduzida (FIGURA 29 e FIGURA 40).

Os percentuais de redução do volume do lodo e da espuma após o processo de secagem térmica estão representados na FIGURA 44.

FIGURA 44 - GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO E DA ESCUMA APÓS SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DA ENERGIA TÉRMICA DO BIOGÁS, DO LODO E DA ESCUMA

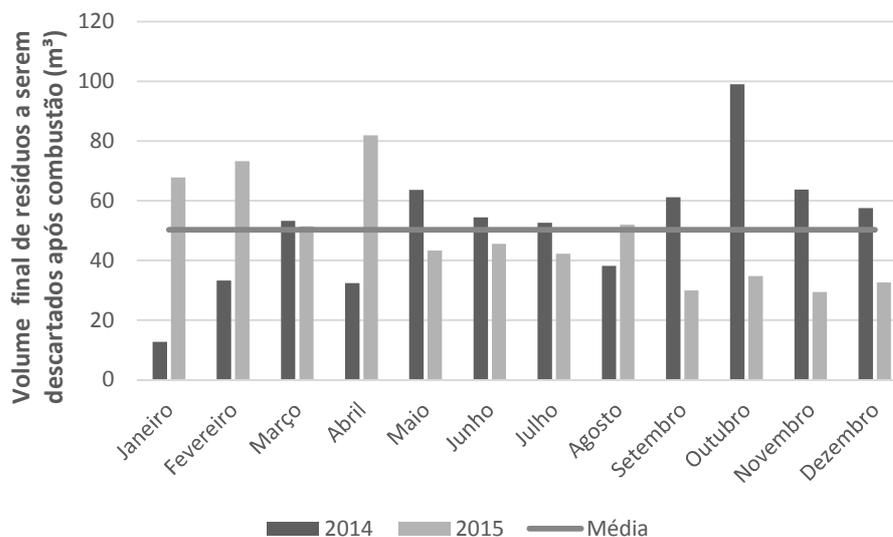


Em média, no período avaliado, a redução de volume foi de $(73,30 \pm 2,98)$ %. O maior percentual de redução de volume obtido foi de 75%, em 17 dos 24 meses avaliados. No mês de outubro de 2014, obteve-se o menor percentual de redução de volume, de 65,71%.

Na comparação com o cenário 4, os percentuais de redução de volume foram maiores, uma vez que a energia térmica disponível foi superior, considerando que houve a inclusão da energia térmica oriunda da combustão do lodo e da espuma secos.

A utilização do lodo e da espuma secos como combustível resulta na diminuição do volume de resíduo a ser descartado, uma vez que os subprodutos serão enviados ao combustor, transformando-se em cinzas. A FIGURA 45 mostra os volumes mensais de resíduos a serem descartados no período avaliado.

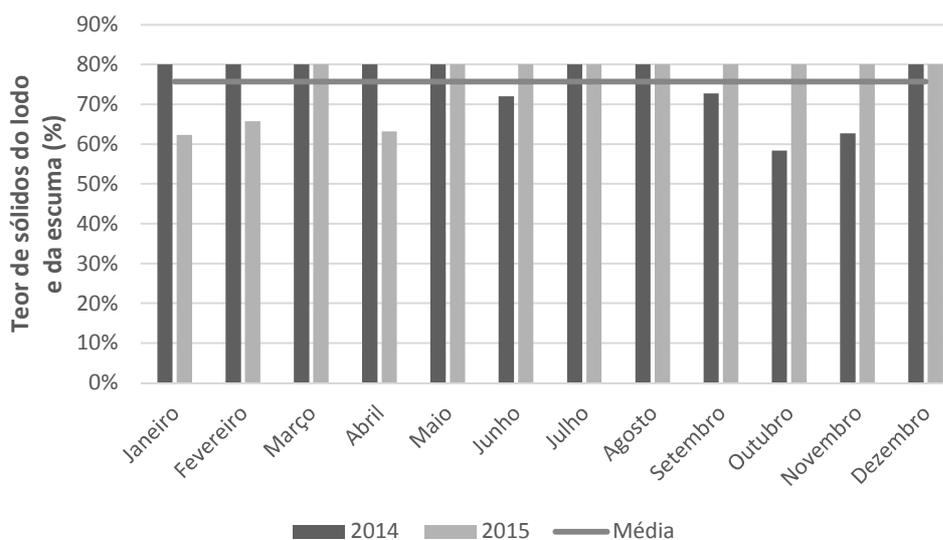
FIGURA 45 – GRÁFICO DO VOLUME FINAL DE RESÍDUOS A SEREM DESCARTADOS APÓS COMBUSTÃO DO LODO E ESCUMA SECOS.



O volume médio de resíduo a ser descartado seria de $(50,22 \pm 19,21)$ m³. No mês de janeiro de 2014, com 13 m³, e o maior volume a ser descartado (98,96 m³) em 2014 e o mês de outubro (em 2015).

O teor final de sólido do lodo e da espuma, após processo de secagem, está representados na FIGURA 46.

FIGURA 46 - GRÁFICO DO TEOR DE SÓLIDOS DO LODO E DA ESCUMA APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA COMBUSTÃO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA



Nos anos de 2014 e 2015, o teor de sólidos médio foi de $(75,70 \pm 7,36)$ %. Em 17 dos 24 meses avaliados foi obtido o teor de sólidos limite considerado na

avaliação dos cenários, 80%. Em outubro de 2014 foi obtido o menor percentual, 58,33 %.

Se comparado ao cenário 4, os valores obtidos de teor de sólidos, percentuais de redução de volume e autonomia do sistema de secagem foram maiores, uma vez que, no presente cenário, além do biogás, o lodo e a espuma serviram de combustível para a secagem dos mesmos subprodutos.

5.3.6 Cenário 6 – Secagem térmica do lodo e da espuma a partir da energia térmica do lodo, biogás e espuma e geração de energia elétrica a partir do biogás

A demanda de eletricidade da ETE em relação à estimativa de geração de eletricidade para alimentação do MCI, a fim de gerar energia elétrica para alimentar os equipamentos do sistema de secagem térmica, no período avaliado, está representada na FIGURA 47 e FIGURA 48.

FIGURA 47 - GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA ALIMENTAÇÃO DO SECADOR ROTATIVO, POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2014

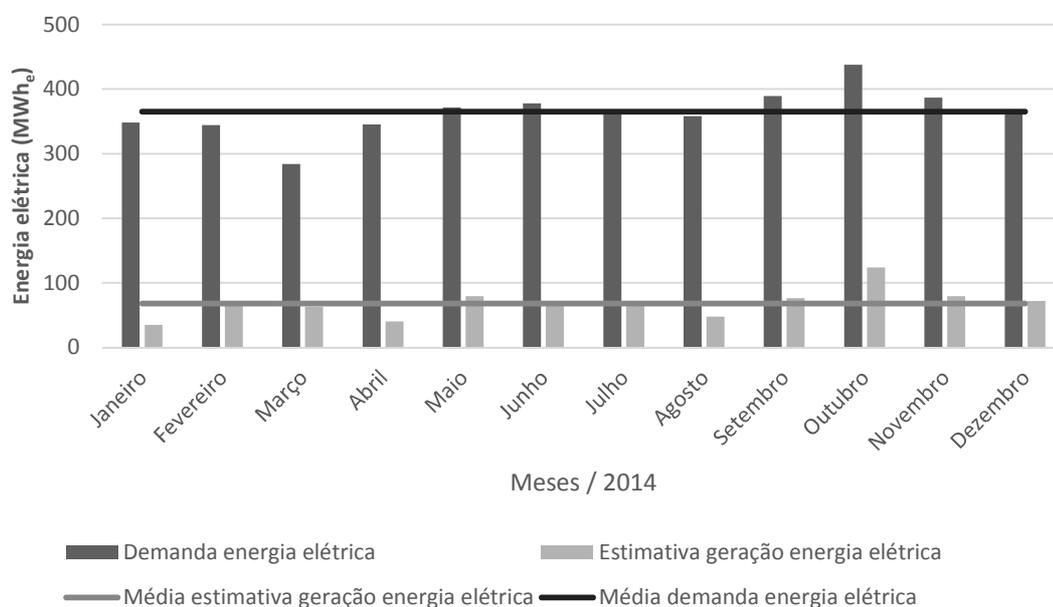
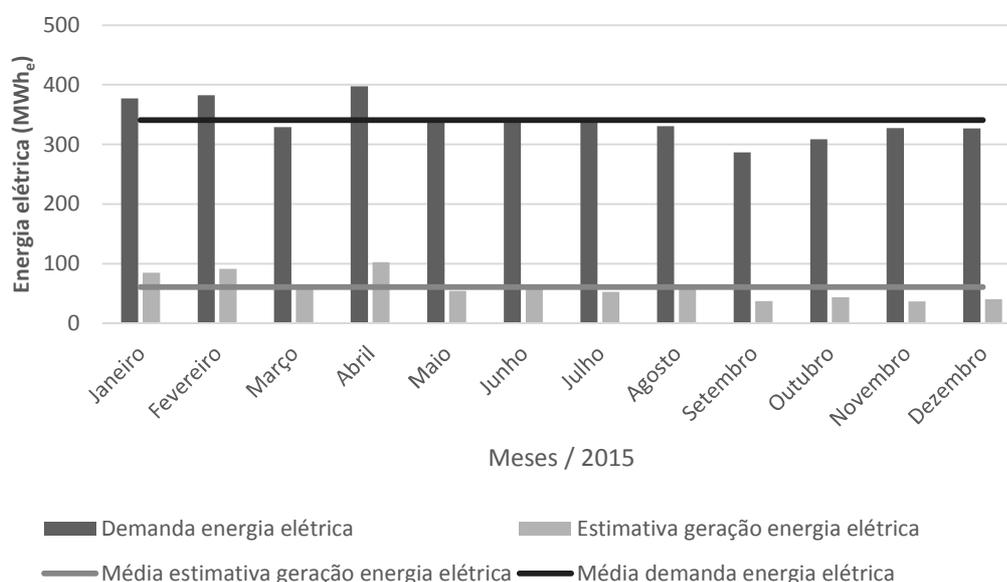


FIGURA 48 - GRÁFICO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA ALIMENTAÇÃO DO SECADOR ROTATIVO, POR MEIO DO MCI COM APROVEITAMENTO TÉRMICO PARA O ANO DE 2015



Assim como nos cenários 1 e 2, a demanda de energia elétrica foi superior à estimativa de geração em todo o período avaliado.

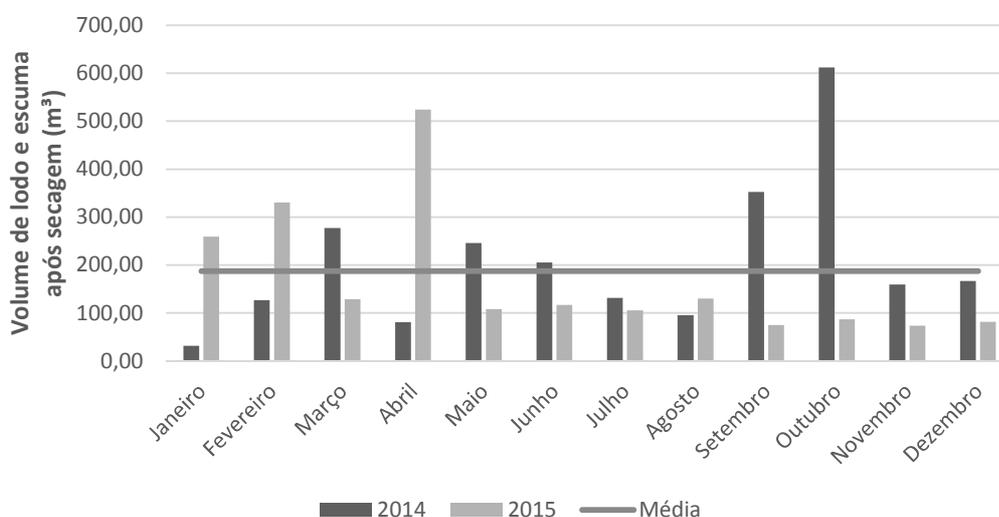
Em 2014, a estimativa média de geração de energia elétrica seria de $(64,74 \pm 25,71)$ MWh_e, enquanto a energia requerida ou a demanda elétrica média da ETE seria de $(361,45 \pm 36,79)$ MWh_e, resultando numa autonomia elétrica média de 17,91%.

Em 2015, a autonomia elétrica média seria de 17,85%, considerando uma estimativa média de geração de energia elétrica de $(60,82 \pm 20,89)$ MWh_e e uma demanda elétrica média de $(340,70 \pm 30,17)$ MWh_e.

Se comparado aos cenários 1 e 2 a autonomia elétrica foi inferior, pois a estimativa de geração de energia elétrica atenderia do presente cenário apenas à demanda do secador rotativo.

Os volumes de lodo e espuma, após processo de secagem térmica, estão representados na FIGURA 49.

FIGURA 49- GRÁFICO DO VOLUME DE LODO E ESCUMA APÓS O PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA E DO VOLUME PARCIAL DE BIOGÁS



Mensalmente, seriam produzidos, em média ($187,70 \pm 144,79$) m³ de lodo e espuma secos. O maior volume (611,85 m³), seria produzido em outubro de 2014, mês onde também houve a maior produção de lodo e espuma. Já o menor volume (31,63 m³), ocorreria em janeiro de 2014, mês onde não houve retirada de lodo e a produção de espuma foi reduzida (FIGURA 29 e FIGURA 40).

A FIGURA 50 e FIGURA 51 comparam a energia térmica disponível e a requerida para secagem do lodo e da espuma no período avaliado.

FIGURA 50 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA E DO VOLUME PARCIAL DE BIOGÁS PARA O ANO DE 2014.

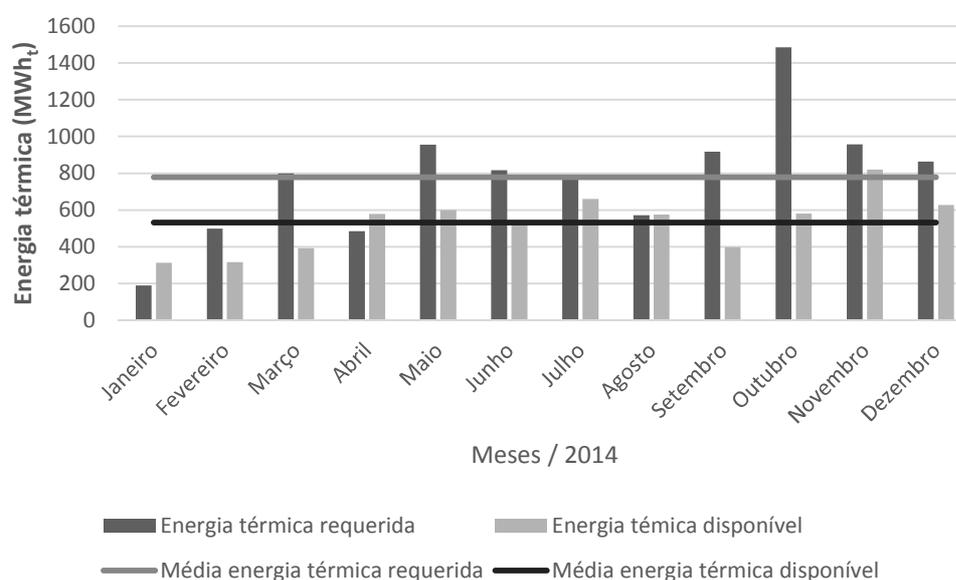
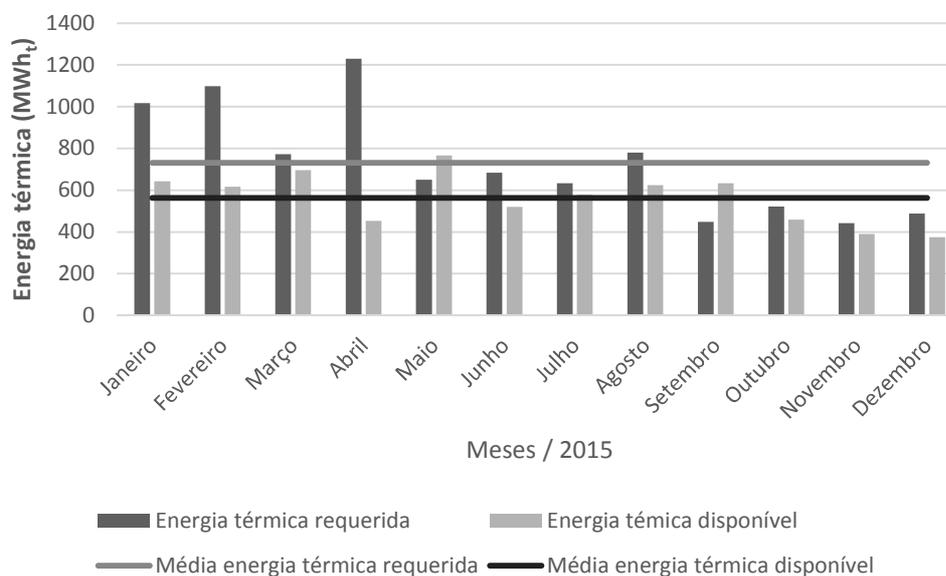


FIGURA 51 - GRÁFICO DA ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA E DO VOLUME PARCIAL DE BIOGÁS PARA O ANO DE PARA 2015.



Em 2014, com exceção dos meses de janeiro, abril e agosto, a energia térmica requerida para secagem do lodo e da espuma seria superior à disponível em todos os demais meses. Em média, a energia mensal disponível seria de $(551,82 \pm 151,01)$ MWh_t e a requerida foi de $(777,48 \pm 322,45)$ MWh_t.

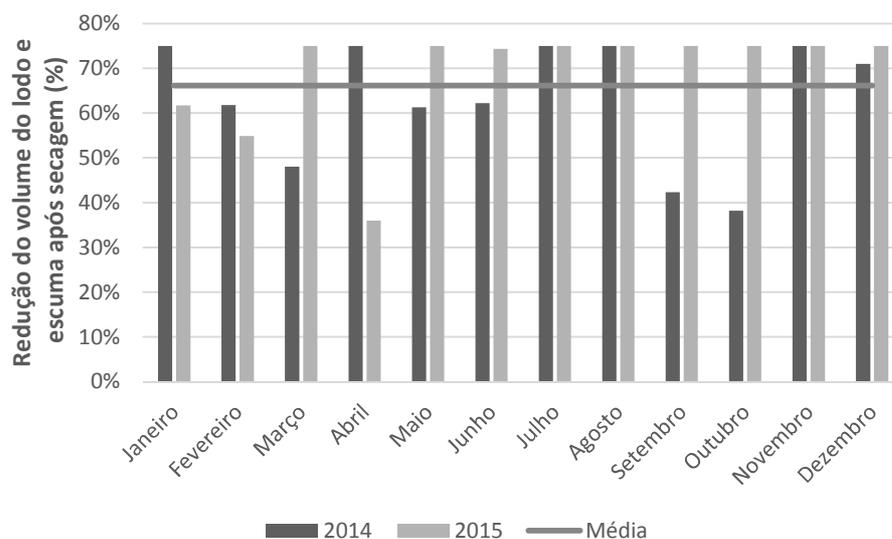
No ano de 2015, de forma semelhante ao ocorrido em 2014, a energia térmica requerida seria inferior à disponível em apenas dois meses, maio e setembro, sendo superior nos demais meses. Em média, a energia mensal disponível seria de $(563,67 \pm 123,52)$ MWh_t e a requerida de $(730,44 \pm 262,05)$ MWh_t.

A autonomia térmica anual do sistema de secagem seria de 68,40 % em 2014 e de 77,17% em 2015.

Em comparação com o cenário 5, a quantidade de energia térmica disponível para secagem foi inferior, uma vez que parte do biogás foi direcionado ao MCI para geração da energia elétrica necessária ao suprimento do equipamento de secagem.

O percentual de redução do volume do lodo e da espuma após processo de secagem térmica, está representado na FIGURA 52.

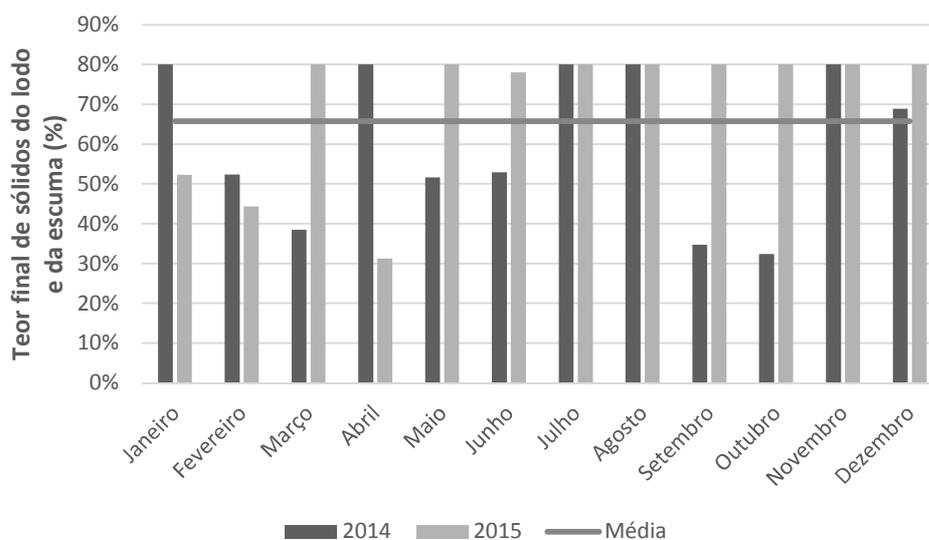
FIGURA 52 – GRÁFICO DA REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO E DA ESCUMA APÓS SECAGEM TÉRMICA.



Em 12 dos 24 meses avaliados, a energia dos subprodutos seria suficiente para atingir o maior percentual de redução de volume calculado, de 75%. A redução de volume média observado no período seria de $(66,11 \pm 13,03)$ %.

Neste cenário, os teores finais de sólidos do lodo e da espuma após o processo de secagem estão representados na FIGURA 53.

FIGURA 53 - GRÁFICO DO TEOR FINAL DE SÓLIDOS DO LODO E DA ESCUMA APÓS PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA POR MEIO DO APROVEITAMENTO DO CALOR GERADO PELA COMBUSTÃO DO LODO E ESCUMA E COMBUSTÃO DO BIOGÁS EXCEDENTE DO MCI.



No período avaliado, o teor final de sólidos médio seria de $(65,72 \pm 18,65)$ %. Em 13 dos 24 meses avaliados foi obtido o teor de sólidos limite considerado na

avaliação dos cenários, 80%. Em abril de 2015 foi obtido o menor percentual, 31,25%.

Se comparado ao cenário 5, o número de meses em que se obteve o teor de sólidos limite foi menor, pois passou de 16 para 13. Este comportamento é esperado devido à menor disponibilidade de energia térmica para secagem.

5.3.7 Custos evitados

5.3.7.1 Custos com energia elétrica

A tarifa média paga à concessionária de energia elétrica nos anos de 2014 e 2015 foi calculada à partir do consumo de energia e do total faturado e está representada na TABELA 9.

TABELA 9 – CONSUMO E TARIFA PAGA À CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE ESTUDADA NOS ANOS DE 2014 E 2015

MESES	CONSUMO PONTA E FORA DE PONTA (kWh)		TOTAL FATURADO (R\$)		TARIFA MÉDIA (R\$ / kWh)	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015
Janeiro	313.409	292.668	80.228,09	104.001,66	0,2561	0,3553
Fevereiro	277.398	291.297	72.989,00	113.176,28	0,2631	0,3885
Março	220.923	264.554	57.102,12	128.141,20	0,2584	0,4843
Abril	304.800	295.086	79.670,00	166.426,13	0,2613	0,5639
Maiο	292.055	283.262	75.282,95	161.541,20	0,2577	0,5702
Junho	309.909	286.128	81.898,35	163.415,45	0,2642	0,5711
Julho	301.040	288.390	78.709,90	180.669,02	0,2614	0,6264
Agosto	310.430	265.913	120.885,61	175.133,67	0,3894	0,6586
Setembro	312.774	249.393	104.101,70	161.864,36	0,3328	0,6491
Outubro	313.919	265.072	106.076,22	169.404,72	0,3379	0,6390
Novembro	307.078	290.718	108.909,66	186.947,37	0,3546	0,6430
Dezembro	296.761	286.161	100.001,66	189.133,84	0,3389	0,6609
Total	3.560.496	3.358.612	1.065.855,26	1.899.854,90	0,2993	0,5657

Comparando o consumo dos anos de 2014 e 2015, verificou-se um decréscimo de 5,67% no período. O total faturado, no entanto, sofreu um acréscimo

de 78,25%, consequência dos sucessivos aumentos praticados pelas concessionárias de energia elétrica no período.

O custo anual evitado com energia elétrica nos cenários 1, 2 e 6 está representado na TABELA 10

TABELA 10 – CUSTO ANUAL EVITADO COM A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE ESTUDADA NOS ANOS DE 2014 E 2015

ANO	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 6
2014	R\$ 467.899,09	R\$ 467.899,09	R\$ 236.759,68
2015	R\$ 945.009,41	R\$ 945.009,41	R\$ 396.211,51

Nos cenários 1 e 2, o custo evitado foi o mesmo, visto que ambos possuem igual potencial de geração de energia elétrica, sendo a existência de aproveitamento térmico do MCI a diferenciação entre os dois cenários, fato que não altera o custo anual evitado com geração de energia elétrica.

Nestes cenários, o custo anual evitado para o ano de 2014 corresponderia a 43,90% do custo total de energia pago no ano. Para o ano de 2015, o percentual chegaria a 49,74% do consumo anual.

No cenário 6, o custo anual evitado corresponde apenas a energia elétrica gerada para alimentação elétrica do secador rotativo. Como a ETE estudada atualmente não possui sistema de secagem térmica instalada, o custo evitado não impactaria nos consumos de energia elétrica faturados em 2014 e 2015, servindo apenas como indicador do custo a ser evitado caso o cenário 6 viesse a ser implantado.

5.3.7.2 Custos com transporte e disposição final do lodo e escuma

A estimativa do custo atual e do custo evitado com transporte e disposição do lodo e escuma nos cenários 2, 3, 4, 5 e 6 estão apresentados na TABELA 11.

TABELA 11 – ESTIMATIVA DO CUSTO ATUAL E CUSTO EVITADO COM TRANSPORTE E DISPOSIÇÃO DE LODO E ESCUMA NA ETE ESTUDADA NOS ANOS DE 2014 E 2015

SUB PRODUTO	ANO	CUSTO ATUAL	CUSTOS EVITADOS				
			CENÁRIO ATUAL	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4	CENÁRIO 5
Lodo	2014	525.830,30	146.285,46	273.666,26	188.825,74	473.247,27	473.247,27
(R\$)	2015	361.157,60	124.016,74	209.925,70	132.473,18	325.041,84	325.041,84
Escuma	2014	406.389,38			157.875,28	365.750,44	365.750,44
(R\$)	2015	514.659,38			243.956,04	463.193,44	463.193,44

Dentre os cenários avaliados, os cenários 5 e 6 são os que proporcionariam o maior custo evitado com transporte e disposição dos subprodutos, uma vez que o lodo e escuma seriam transformados em cinzas. Nestes cenários, os custos evitados com a disposição das cinzas chegariam a 90% se comparado ao custo atual.

Os referidos cenários apresentaram o mesmo custo evitado, pois, conforme a metodologia utilizada para estimativa de produção de cinzas, descrita no item 4.4.5, o volume de cinzas foi estimado considerando que o lodo e escuma a um TS de 20% teria seu volume reduzido em 90%.

O cenário 4 seria o segundo cenário com o maior custo evitado, pois toda a energia química do biogás seria direcionada para promover a diminuição do volume do lodo e da escuma por meio da secagem térmica. O custo evitado com a disposição destes subprodutos traria como benefício uma redução de 37,19% em relação ao custo atual, para o ano de 2014 e de 42,98 % em 2015.

No cenário 3, o benefício do custo evitado seria apenas para a disposição do lodo, não interferindo no custo para a disposição da escuma. O custo evitado corresponderia a 29,35 % do custo realizado com a disposição dos subprodutos em 2014 e de 23,96 % em 2015.

O menor custo evitado seria o proporcionado pelo cenário 2, pois o calor residual do MCI seria a única fonte de energia térmica para a secagem do lodo. Em 2014, 15,69% do montante pago na disposição do lodo e da escuma poderiam ser evitados. Em 2015, este percentual seria de 14,16 %.

5.3.8 Comparação dos cenários avaliados

A avaliação dos cenários propiciou a identificação de diferentes benefícios de acordo com a finalidade e disponibilidade de subprodutos. Na TABELA 12 estão apresentados os resultados obtidos em cada cenário avaliado.

TABELA 12 – COMAPARAÇÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS

ITEM	ANO	CENÁRIO ATUAL	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 4	CENÁRIO 5	CENÁRIO 6
Volume de lodo ou cinzas para disposição final (m ³)	2014	3.505,54	3.505,54	2.530,30	1.681,09	2.246,70	350,55	350,55
	2015	2.407,72	2.407,72	1.580,94	1.008,21	1.524,56	240,77	240,77
Massa de lodo evitado por ano (t)	2014	-	-	975,24	1.824,44	1.258,84	3.154,98	3.154,98
	2015	-	-	826,78	1.399,50	883,15	2.166,95	2.166,95
Custo evitado com a disposição do lodo (R\$)	2014	-	-	146.285,46	273.666,26	188.825,74	473.247,27	473.247,27
	2015	-	-	124.016,74	209.925,70	132.473,18	325.041,84	325.041,84
Volume de espuma ou cinzas para disposição final (m ³)	2014	2.709,26	2.709,26	2.709,26	2.709,26	1.656,76	270,93	270,93
	2015	3.431,06	3.431,06	3.431,06	3.431,06	1.804,69	343,11	343,11
Massa de espuma evitado por ano (t)	2014	-	-	-	-	1.052,50	2.438,34	2.438,34
	2015	-	-	-	-	1.626,37	3.087,96	3.087,96
Custo anual evitado com a disposição da espuma (R\$)	2014	-	-	-	-	157.875,28	365.750,44	365.750,44
	2015	-	-	-	-	243.956,04	463.193,44	463.193,44
Redução média do volume do lodo e/ou espuma para disposição final (%)	2014	-	-	33,98%	57,23%	42,68%	90,00%	90,00%
	2015	-	-	51,23%	67,01%	48,14%	90,00%	90,00%
Geração anual de energia elétrica (MWh _e)	2014	-	1.572,99	1.572,99	-	-	-	776,85
	2015	-	1.636,75	1.636,75	-	-	-	729,85
Suprimento médio de energia elétrica (%)	2014	-	44,52%	39,78%	-	-	-	17,61%
	2015	-	49,18%	45,54%	-	-	-	17,51%
Custo anual evitado com a geração de energia elétrica (R\$)	2014	-	467.899,09	467.899,09	-	-	-	236.759,68
	2015	-	945.009,41	945.009,41	-	-	-	396.211,51
Geração anual de energia térmica (MWh _t)	2014	-	-	1.647,90	3.745,22	3.745,22	7.950,26	6.381,84
	2015	-	-	1.714,69	3.897,03	3.897,03	7.404,49	6.764,00
Suprimento médio de energia térmica (%)	2014	-	-	44,93%	94,39%	67,69%	125,20%	78,99%
	2015	-	-	381,94%	868,05%	65,05%	114,92%	83,94%

Nos cenários avaliados, verificou-se que o custo evitado com o gerenciamento do lodo está diretamente relacionado à disponibilidade de energia direcionada ao secador rotativo, refletindo no volume de água evaporada e no aumento do teor final de sólidos. As configurações que propiciariam os maiores custos evitados no transporte e disposição final do lodo, em ordem crescente, seriam os cenários 2, 4, 3, 5 e 6. A economia poderia chegar a R\$ 473.247,27, no caso dos cenários 5 e 6, para o ano de 2014.

A redução do volume de lodo em comparação ao cenário atual, onde o lodo não passa por tratamento térmico, variou de 27,82% a 90,00%, com uma massa de lodo evitada da ordem de 826,78 t/ano a 3.154,98 t/ano.

O custo evitado com o transporte e disposição de espuma, de forma semelhante ao lodo, também está relacionado à disponibilidade de energia direcionada ao secador rotativo. Em ordem crescente, os cenários que propiciariam os maiores custos evitados seriam o 4, 5 e 6. O maior custo evitado ocorreria no ano de 2015, atingindo o valor de R\$ 463.193,44.

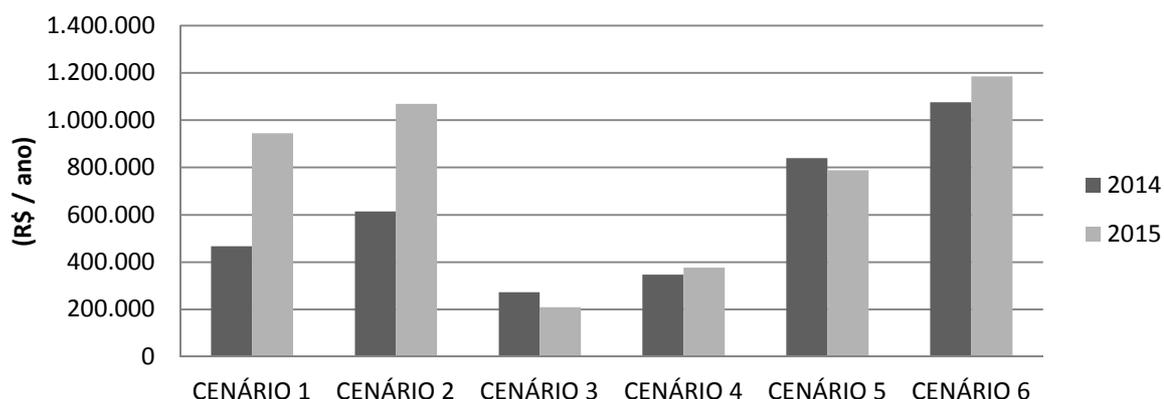
No cenário atual, a espuma, assim como o lodo, não passa por qualquer processo térmico. Se comparado o volume de redução de espuma dos cenários avaliados em relação ao cenário atual, em termos percentuais, a redução poderia variar entre 38,84% e 90,00%, o que representaria uma massa de lodo evitada entre 1.052,50 t/ano a 3.087,96 t/ano.

O biogás poderia gerar entre 729,85 MWh_e a 1.636,75 MWh_e de energia elétrica nos diferentes cenários avaliados. No cenário 6, o biogás atenderia a 100% da demanda do secador rotativo, o que corresponde a cerca de 17% do suprimento de energia elétrica da ETE, proporcionando um custo evitado de até R\$ 396.211,51, segundo dados de 2015.

Nos cenários 1 e 2, o biogás, por meio do MCI, atenderia entre 39,78% e 49,18% da demanda elétrica da ETE, proporcionando um custo anual evitado de R\$ 467.899,09 em 2014 e de R\$ 945.009,41 em 2015.

O custo global evitado por cenário foi obtido somando-se os benefícios do custo evitado na disposição do lodo, espuma, cinzas e geração de energia elétrica e está representado na FIGURA 54.

FIGURA 54 – GRÁFICO DO CUSTO GLOBAL EVITADO



Analisando os cenários em ordem decrescente de custo evitado, verificou-se algumas diferenças em 2014 e 2015 que podem ser atribuídas ao progressivo aumento no custo da energia elétrica no período avaliado, conforme relatado no item 5.3.7.1.

Nos anos de 2014 e 2015, o cenário 6 proporcionaria o maior custo global evitado, chegando a R\$ 1.184.446,79 em 2015. Nesse cenário, a energia química dos subprodutos teria seu máximo aproveitamento, sendo utilizada na forma de energia elétrica (biogás) e energia térmica (biogás, lodo e escuma secos e calor do MCI).

O segundo cenário de maior custo global evitado seria distinto nos anos avaliados, sendo o cenário 5 em 2014 e o cenário 2 em 2015. Enquanto o cenário 5 direciona o aproveitamento energético dos subprodutos exclusivamente na forma de energia térmica, o cenário 2 prioriza a geração de energia elétrica por meio do biogás, aproveitando também o calor gerado pelo MCI. No cenário 2 a geração de energia elétrica correspondeu a mais de 75% do custo global evitado em 2015.

O terceiro cenário de maior custo global evitado seria o cenário 2 em 2014 e o cenário 1 em 2015. Ambos os cenários priorizariam a geração de energia elétrica.

O quarto cenário de maior custo global evitado seria o cenário 1 em 2014 e o cenário 5 em 2015. Enquanto no cenário 1 o aproveitamento energético ocorreria apenas na forma de energia elétrica, no cenário 5, o aproveitamento seria apenas na forma de energia térmica.

O quinto cenário de maior custo global evitado seria o cenário 4, em ambos os anos. Nesse cenário ocorreria o aproveitamento da energia térmica do biogás para secagem do lodo e escuma.

Por fim, o cenário que proporcionara o menor custo evitado seria o cenário 3, tanto em 2014 quanto em 2015. A energia térmica do biogás, oriundo dos reatores anaeróbios, seria utilizada para secagem do lodo.

A avaliação dos cenários para os anos de 2014 e 2015 permitiu concluir que os custos relativos ao transporte e disposição dos subprodutos e o aumento na tarifa de energia elétrica foram fatores determinantes nos cálculos de custos evitados.

Lobato (2011), em seu estudo, sugeriu possíveis arranjos para aproveitamento energético dos subprodutos para reatores que possuem baixo potencial de produção e recuperação de biogás, como no caso da ETE estudada, em que foi considerado o pior cenário de geração de biogás. Para a autora é pouco provável que os equipamentos para geração combinada de eletricidade e calor encontrem viabilidade econômica, sugerindo, desta forma, o aproveitamento do biogás na forma de combustão direta e recuperação de energia térmica. O arranjo sugerido pela autora corresponderia ao cenário 3, que foi identificado como o de menor custo evitado no presente estudo.

Como neste trabalho não foi contemplado o estudo de viabilidade econômica, não foi possível confirmar a afirmação feita por Lobato (2011).

Rosa (2013) propôs duas configurações de aproveitamento energético distintas, para ETEs de pequeno porte (abaixo de $250 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) e com baixo potencial de recuperação de metano, e para ETE de grande porte (acima de $250 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) com alto potencial de recuperação de metano e lodo. Para o primeiro grupo de ETEs, no qual a ETE estudada se enquadra, devido a baixa produção estimada de biogás, o autor sugeriu um arranjo contemplando a queima direta do biogás para secagem do lodo e possível aproveitamento do lodo como combustível, o que corresponderia aos cenários 3 e 5, sem o aproveitamento da espuma. Conforme já descrito, o cenário 3 foi identificado como o de menor custo evitado e o cenário 5 como o segundo maior custo evitado em 2014 e quinto maior custo evitado em 2015.

Para ETEs de grande porte, Rosa (2013) sugere outras três configurações, onde a primeira contempla um reator pirolítico, a segunda, geração de eletricidade por meio do biogás e gaseificação e a terceira se assemelha à configuração do cenário 6, porém com a inclusão do aproveitamento do vapor d'água gerado na câmara de combustão do lodo para geração de energia elétrica, cenário de maior custo evitado em 2015.

O mesmo autor realizou estudos a fim de estimar o potencial energético e da redução dos GEE da ETE Laboureaux, em Itabira, Minas Gerais. A referida ETE também é composta por reatores anaeróbios, porém o pós-tratamento consiste em filtros biológicos percoladores, sendo projetada para atender a 170 L.s^{-1} , vazão que corresponde a cerca de 40% da ETE estudada. Os cenários avaliados por Rosa (2013) consistiram em: i) 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 e ii) uso prioritário do biogás em MCI visando a geração de eletricidade e aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para secagem térmica do lodo.

O primeiro cenário abordado por Rosa (2013) é semelhante ao cenário 3, porém, sem geração de energia elétrica. Na ETE Laboureaux, o biogás oriundo dos reatores anaeróbios seria utilizado para realizar a secagem do lodo a um TS de 90%, sendo o volume excedente enviado ao MCI, gerando energia elétrica suficiente para suprir 22,2% da demanda de eletricidade da estação.

Na ETE estudada, no cenário 3, o biogás gerado foi suficiente apenas para realizar a secagem do lodo a um TS entre 41,71% a 47,76%. Para que o lodo atinja um TS de 90% seria necessária a adição de energia complementar.

O segundo cenário abordado por Rosa (2013) possui a mesma configuração proposta para o cenário 2. Na ETE Laboureaux, a energia elétrica produzida por meio do MCI supriria a 57,6% da demanda da ETE, e o calor residual oriundo do MCI promoveria a secagem do lodo, oriundo do filtro prensa, a um TS de 47,3% e uma redução de 13,5% da massa em relação ao lodo destinado ao aterro. O fato do suprimento de energia elétrica obtido por Rosa (2013) ser superior à da ETE estudada pode ser atribuído à maior demanda de energia elétrica na ETE estudada, que possui lagoas aeradas como pós-tratamento, enquanto a ETE Laboureaux possui filtros biológicos percoladores, com baixa demanda energética.

O ganho no teor final de sólidos obtidos após o processo de secagem na ETE estudada também foi superior ao obtido por Rosa (2013). Na ETE Laboureaux o lodo sai do filtro prensa com um TS de 41,3%, sendo o ganho de sólidos obtido após secagem de 6%, chegando a um TS final de 47,3%. Na ETE estudada, por sua vez, o teor de sólidos médio passaria de 20% para 30,75%, em, 2014, e 53,63% em 2015, sendo comparativamente maior.

O percentual de redução do lodo a ser destinado ao aterro foi menor na ETE Laboureaux (13,5%), em relação à ETE estudada (33,98 a 51,23%) consequência do menor volume de água evaporado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A análise de fluxo de materiais e de energia permitiu avaliar o potencial de aproveitamento energético da ETE estudada, diagnosticando suas potencialidades e requisitos energéticos por meio da avaliação sistemática dos fluxos e estoques de cada etapa de tratamento.

Por meio do diagrama de fluxo de materiais foi possível identificar que a etapa do tratamento biológico (RALFs) é a que gera a maior quantidade de subprodutos com potencial de aproveitamento energético, seguida das lagoas aeradas e de decantação.

No ano de 2014, os RALFs geraram 543.426 Nm³ de biogás, 4.053 m³ de lodo excedente e 2.889 m³ de espuma.

Em 2015, o volume de biogás gerado foi de 573.180 Nm³. O volume de lodo excedente retirado dos reatores totalizou 6.019 m³ e a espuma 3.660 m³.

Os volumes de subprodutos gerados estão relacionados à vazão e a carga afluente à ETE. Assim, os diferentes volumes de subprodutos gerados podem estar relacionados à maior vazão afluente, 20% maior em 2015, se comparado a 2014, que, por sua vez, pode ser atribuído ao maior índice pluviométrico naquele ano.

Por meio da análise de fluxo de energia foi possível identificar que a etapa de tratamento que possui a maior demanda de energia elétrica é o pós-tratamento com lagoas aeradas, seguido da elevatória de recalque de esgoto.

A aeração das lagoas representa cerca de 70% da demanda energética de toda a ETE, o que corresponde a 2.248 MWh_e.ano⁻¹.

A etapa de tratamento que possui o maior potencial de geração de energia elétrica, por gerar a maior quantidade de subprodutos com potencial de aproveitamento energético, é o tratamento biológico por meio dos RALFs, seguido das lagoas aeradas e de decantação.

Em 2014, o potencial de geração de energia elétrica dos subprodutos, da ordem de 1,99 GWh_e, seria suficiente para suprir 55,89 % da demanda da ETE. Já, em 2015, o potencial seria de 1,98 GWh_e, garantindo o suprimento de 59,10% da demanda da ETE.

Os indicadores de consumo e geração de materiais e de energia calculados para a ETE estudada possibilitarão monitorar a eficiência do processo, servindo como base de dados para comparação com outras ETEs e impulsionando, desta forma, a melhoria dos processos por meio de *benchmarking*.

No caso de novos projetos de ETEs, os indicadores possibilitarão a avaliação e comparação da eficiência de diferentes tecnologias, servindo de suporte à tomada de decisões com base em dados reais, de ETEs em operação.

O estudo dos cenários para aproveitamento energético propiciou avaliar diferentes possibilidades de uso do potencial energético dos subprodutos, de acordo com a demanda energética da ETE.

No cenário 1, a energia elétrica gerada por meio do biogás supriria um percentual superior a 44% da demanda energética da ETE, resultando num custo evitado de R\$ 467.899,09, em 2014, e de R\$ 945.009,41 em 2015.

O aproveitamento da energia térmica do MCI, somado à geração de energia elétrica do cenário 1, resultou no cenário 2. Neste cenário, apesar da demanda elétrica suprida ser superior ao cenário 1, pois foi acrescido a demanda do secador rotativo, há que se considerar o benefício da redução do volume de lodo a ser transportado e destinado, visto o aproveitamento da energia térmica do MCI. A redução do volume de lodo, em relação ao cenário atual, seria superior a 33%. Os custos evitados com energia elétrica e transporte e destinação do lodo chegariam a R\$ 614.184,55, em 2014 e R\$ 1.069.026,15, em 2015.

No cenário 3, o potencial energético do biogás seria aproveitado na forma de energia térmica para redução do volume de lodo em um secador rotativo. A redução do volume do lodo, em relação à situação atual, seria superior a 57%, proporcionando um custo evitado de R\$ 273.666,26, em 2014 e de R\$ 209.925,70 em 2015.

O acréscimo da espuma para secagem térmica no cenário 3, resultou no cenário 4. O lodo e espuma sofreriam uma redução de volume superior a 42%, refletindo numa economia de R\$ 346.701,02 em 2014 e de R\$ 376.429,22, em 2015.

No cenário 5, o potencial energético do biogás e dos subprodutos, lodo e espuma, após secos, serviriam de combustível para alimentação do secador rotativo a fim de diminuir a umidade do lodo e espuma. Neste cenário, a redução do volume seria de 90%, com um custo evitado de R\$ 838.997,70 em 2014 e de R\$ 788.235,28 em 2015.

O cenário 6 é bastante semelhante ao cenário 5, porém levou em consideração a demanda elétrica do secador rotativo. Assim, parte do biogás foi direcionado a um MCI para suprir a referida demanda elétrica, sendo o biogás excedente e o calor do MCI direcionados ao secador rotativo juntamente com os subprodutos após secagem térmica. A redução do volume de lodo e espuma seria de 90 %. O custo evitado, somando também a autogeração de energia elétrica seria de R\$ 1.075.757,38 em 2014 e de R\$ 1.184.446,79 em 2015.

Nos cenários avaliados, a determinação do cenário de menor custo evitado está diretamente ligada ao custo da energia elétrica e do transporte e disposição dos subprodutos. Entre 2014 e 2015, o custo de energia elétrica sofreu um acréscimo de 78,25% de acordo com as faturas de energia elétrica.

Desta forma, o estudo apontou como os cenários de maiores custos globais evitados os que privilegiaram a redução do volume dos subprodutos. Em 2015, ocorreu o inverso, os maiores custos evitados ocorreram nos cenários que deram enfoque à geração de energia elétrica.

Para uma avaliação mais acurada dos cenários é necessário que sejam considerados também os custos de investimento necessários à aquisição dos equipamentos, assim como um estudo de viabilidade econômica e financeira.

O presente estudo mostrou que os subprodutos gerados nas ETEs possuem potenciais energéticos que não podem ser negligenciados. Seu aproveitamento energético promove benefícios que refletem diretamente na diminuição dos custos operacionais, um dos fatores limitantes na expansão do saneamento e que, com o aumento das exigências ambientais e escassez de recursos energéticos, possui uma tendência de aumento gradativo.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se que a aplicação do cálculo dos indicadores específicos de materiais e energia sejam adotadas em ETEs de diferentes tipologias adotadas no país, a fim de criar um banco de informações sobre as condições dos processos de tratamento de esgotos no Brasil.

Sugere-se a avaliação do potencial de geração de energia renovável em ETEs de diferentes tipologias, como as que contemplam sistemas com decantação primária e digestores de lodo.

Recomenda-se a avaliação de cenários de aproveitamento energético que contemplem tecnologias promissoras, que em pouco tempo estarão comercialmente disponíveis como a pirólise e gaseificação.

Adicionalmente, sugere-se a elaboração de um estudo de viabilidade econômica e financeira dos cenários avaliados a fim de subsidiar a definição do cenário mais vantajoso para a condição da ETE estudada.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, L. K.; HARADA, H.; OKUI, H. Treatment of diluted wastewater in a UASB reactor at moderate temperature: performance aspects. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 83, n.2, p. 179-184, 1997.
- AIYUK, S.; FORREZ, I.; LIEVEN, K.; van HAANDEL, A.; VERSTRAETE, W. Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates – A review. **Biosource Technology**, v. 97, p; 2225-2241, 2006.
- AL SEADI, T.; RUTZ, T.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008. Disponível em < <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>>. Acesso em: 01/09/ 2015.
- ALBRECHT. **Cotação para equipamento de secagem de lodo por meio do biogás e biomassa**. Albrecht equipamentos industriais. Joinville, 2016.
- ALTHOFF, C. A. POSSETTI, G. R. C. **Relatório técnico parcial 01-2013 do projeto de secagem de lodo de esgotos em secador tipo tambor rotativo**. Parceria com a empresa Albrecht equipamentos industriais LTDA, 2013.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.
- ARANZABE, E.; CIRIA, J. I. **Siloxanos en motores de gas**. Lubrication management, 2014. Disponível em < http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Siloxanos_motores_gas_ES.pdf>. Acesso em: 15/04/2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulicos sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BARBOSA, V. L.; STUETZ, R. M. Treatment of hydrogen sulfide in biofuels. In: LENS, P.; WESTERMANN, P.; HABERBAUER, M.; MORENO, A. (Ed.). **Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation**. London: IWA Publishing, 524 p., 2005.
- BATSTONE, D. J.; VIRDIS, B. The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 24, p. 142-149, 2014.
- BELLI FILHO, P.; COSTA, R. H. R.; GONÇALVES, R. F.; FILHO, B. C.; LISBOA, H. M. Pós-tratamento de odores em sistemas de esgotos sanitários. In: CHERNICARO

C. A. L. (Coordenador). **Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. PROSAB 2. Belo Horizonte, p. 455-490, 2001.

BERTOLINO, M. **Avaliação das contribuições de água de chuva provenientes de ligações domiciliares em sistema de esgotamento sanitário separador absoluto**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BI, C.; MIN, M.; NIE, Y.; XIE, Q.; LU, Q.; DENG, X.; ANDERSON, E.; LI, D.; CHEN, P.; RUAN, R. Process development for scum to biodiesel conversion. **Biosource Technology**, v. 185, p. 185-193, 2015.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. V. 21, n. 2, p. 275-582, 2016.

BINDER, C. R.; VOET, E. van der.; ROSSELOT, K. S. Implementing the results of material flow analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 13, n. 5, p. 643-649, 2009.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgotos - PROBIOGÁS**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: diagnóstico dos serviços de água e esgotos referente ao ano de 2014, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Acesso em 01/05/2016.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, D. F., n. 53, 18 mar. 2005.

BRASIL. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgotos gerados em estações de tratamento de esgotos sanitários e seus derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, D. F., n. 167, 29 ago. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, D. F., n. 53, 3 ago. 2010.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. **Practical handbook of material flow analysis**: Advanced methods in resource and waste management. Taylor & Francis e-Library, 2005.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CONSTANT, M.; NAVEAU, G.; FERRERO, G. L.; NYNS, E. J. **Biogas end-use in the European Community**. Elsevier Science Publisher, England, 1989.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodo de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DWA. Norma **DWA-A 216**: Verificação e análise energética – Instrumentos para a otimização energética de estações de tratamento de esgoto. Hennef, Alemanha: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, 2013.

DWA. Norma **DWA-M 361**: Tratamento de biogás. Hennef, Alemanha: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, 2011

FORESTI, E. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**. v. 45, n. 10, p. 181-186, 2002.

FYTILI, A.; 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.

GORGEC, A. G.; INSEL, G.; YAGCI, N.; DOGRU, M.; ERDINÇLER, A.; SANIN, D.; FILIBELI, A.; KESKINLER, B.; ÇOKGOR, E. Comparison of energy efficiencies for advanced anaerobic digestion, incineration and gasification processes in municipal sludge management. **Journal of Residuals Science and Technology**. V. 13, n. 1, p.54-67, 2016.

HABERL, H.; WEISZ H. **The potential use of the materials and energy flow analysis (MEFA) framework to evaluate the environmental costs of agricultural production systems and possible application to aquaculture**. In: FAO/WFT Expert Workshop, Vancouver, 2006.

HONG, G.; MA, C.; CHEN, H.; CHUANG, K.; CHANG, C.; SU, T. Energy flow analysis in pulp and paper industry. **Energy**. v. 36, n. 5, p. 3063-3068, 2011.

IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (eds.). V. 5, Waste, Chapter 6, Wastewater Treatment and Discharge, IGES, Japan, 2006.

JAMSHIDI, S.; AKBARZADEH, A.; WOO, K.; VALIPOUR, A. Wastewater treatment using integrated anaerobic baffled reactor and Bio-rack wetland planted with *Phragmites* sp. and *Typha* sp. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 12, 2014. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4212116/>> Acesso em: 20/12/2015.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.

LEITÃO, R. C.; van HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G., LETTINGA, G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. **Biosource Technology**, v. 97, p. 1105-1118, 2006.

LAVOISIER, A. L. **Tratado elementar de química**. Trad: Ivo Korytowski. São Paulo: Ed. Madras, 2007.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 176 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICARO, C. A. L.; OLIVEIRA FILHO, J. M.; MORAES, O. J. S. Avaliação de desempenho de pré-operação dos reatores UASB ETE Onça: capacidade instalada 2,05 m³/s. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, Belo Horizonte, 2007. **Anais...** ABES: 2007. 1 CD-ROM.

MARIN, C. A.; ISHISATO, E. M.; BONGIOLO, A. S.; ROSS, B. L. **Estudo de caso: Aplicação de peróxido de hidrogênio para oxidação de sulfetos em sistema anaeróbio de grande porte**. Trabalho apresentado no 27. Congresso Nacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2566-2582, 2012.

McCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. **Public Works**, n. 9, p. 107-112; 1964.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: Treatment and reuse**. 4 ed. Nova York: Mc-Graw-Hill Education, 2003.

MEOZZI, P. **Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences**. Copenhagen: ISWA, 1997. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/publications/GH-10-97-106-EN-C/download>>. Acesso em 13/02/2016.

MU, D.; ADDU, M.; ANDERSON, E.; CHEN, P.; RUAN, R. A life cycle assessment and economic analysis of the scum-to-biodiesel technology in wastewater treatment plants. **Biosource Technology**, v. 204, p. 89-87, 2016.

NOYOLA, A.; CAPDEVILLE, B.; ROQUES, H. Anaerobic treatment of domestic sewage with a rotating stationary fixed-film reactor. **Water research**, v. 22, n. 12, p. 1585-1592, 1988.

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 Biotechnology**, v. 5, p. 93-114, 2006.

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

OLIVEIRA, R.; FORESTI, E. Balanço de massa de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 807-820, 2004.

OLIVEIRA, J. P.; SILVA, J. S. C.; NETO, G. P. P.; BASTOS, G. S. M.; CHERNICARO, C. A. L. Avaliação comparativa do desempenho de reator UASB convencional e reator UASB com dois estágios de coleta de biogás no tratamento de esgotos domésticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, Belo Horizonte, 2007. **Anais...** ABES: 2007. 1 CD-ROM.

PEREIRA, J.O.; CHERNICARO, C. A. L. Remoção física e biológica de espuma do separador trifásico em reator UASB com duplo estágio de coleta de biogás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, Goiânia, 2013. **Anais...** ABES: 2013, 1 pen drive.

PANAMERICANA, **Ficha de informação de segurança de produtos químicos**: POLICAT, 2005. Disponível em: <<http://www.panamericana.com.br/panamericana/uploads/fispqs/SC/FISPQ%20-%20PC%20EH501.pdf>>. Acesso em 10/01/2016.

PARANÁ, Instituto de Águas do Paraná. **Sistema de Informações Hidrológicas**, 2016. Disponível em < <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioAlturasMensaisPrecipitacao.do?action=carregarInterfacelInicial>>. Acesso em 02/03/2016.

PAGLIUSO, J. D.; PASSIG, F. H.; VILLELA, L. C. H. **Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants**. In: VII Oficina e Simpósio Latino-Americano de Digestão Anaeróbia, Mérida, Yucatán – México, IWA/FEMISCA, 2002.

PÉREZ-ELVIRA, S. I.; NIETO DIEZ, P.; FENANDEZ-POLANCO, F. Sludge minimisation technologies. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, p. 375-398, 2006.

PERÓXIDOS, **Ficha de informação de segurança de produtos químicos**, 2015. Disponível em <<http://www.peroxidos.com.br/pt/binaries/MSDS-HydrogenPeroxide8a35-PT-202008.pdf>>. Acesso em: 5/01/2016.

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; MESQUITA, N. C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, Goiânia, 2013. **Anais...** ABES: 2013. 1 CD-ROM.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C. A.; CARNEIRO, C. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28, Rio de Janeiro, 2015. **Anais...** ABES: 2015. 1 CD-ROM.

POSSETTI, G. R. C. **Propriedades físicas, químicas e calorimétricas de lodos oriundos do processo de tratamento de esgoto doméstico na Sanepar**. Curitiba: SANEPAR, 2013. 3 p. Informe técnico.

RANDS, M. B.; COOPER, D. E.; WOO, C. P.; FLETCHER, G. C.; ROLFE, F. K. Compost filters for H₂S removal from anaerobic digestion and rendering exhausts. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 53, p. 185-189, 1981.

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**, v. 32, p. 1375-1380, 2007.

ROSA, A. P. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto**. 172 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROSS, B. Z. L.; CARNEIRO, C.; AISSE, M. M.; FROEHNER, S. **Caracterização da espuma produzida em reatores anaeróbios de manta de lodo, estado do Paraná**. Trabalho apresentado no 27º. Congresso Nacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013.

RUTZ, D.; MERGNER R.; JANSSEN R. **Sustainable heat use of biogas plants**. **Munich**, Wip Renewable Energies, 2012.

SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. **Acervo fotográfico**. Sanepar. Curitiba, 2010.

SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. **Tratando esgoto ambiente legal**: módulo operacional. Sanepar. Curitiba, 2013..

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; SOARES, D. M.; ALVES, L. V. Economic and CO₂ avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small power plant in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 17, p. 77-84, 2016.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; van LIER, J. B.; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Biosource Technology**, v. 65, p 175-190, 1998.

SOUZA, C.L.; AQUINO, S.F.; CHERNICHARO, C.A.L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic waste water. **Water Science & Technology**, v. 54, p. 201-208, 2006.

SCHMIDT, M. Material and energy flow analysis. **Chemical engineering Technology**, v. 33, n. 4, p. 551-551, 2010.

SHIRADO, J. **Análise dos fluxos de materiais e de energia como ferramenta de gestão para uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico**. 117f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SILVA. T. C. F.; POSSETTI, G. R. C.; COELHO, S. T. **Avaliação do potencial de produção de energia a partir do biogás gerado no tratamento de esgotos domésticos**. Trabalho apresentado no 9. Congresso Brasileiro De Planejamento Energético, 9, 2014, Florianópolis, 2014.

STILLWELL, A. S.; HOPPOCK, D. C.; WEBBER, M. E. Energy recovery from wastewater treatment plants in the United States: A case study of the energy.-water nexus. **Sustainability**, Basel, v. 2, p. 945-962, abr. 2010.

TYAGI, V. K.; LO, S. Sludge: A waste or renewable source of energy and resources recovery ? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 708-728, 2013.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Approved Methodologies for Small Scale CDM Project Activities**. Type III. AMS-III-H. Methane recovery in wastewater treatment (Version 16.0), in Clean Development Mechanism - CDM Methodology - Booklet, 2013.

USEPA. **Landfill gas emissions model (LandGEM) and user's manual**, Version 3.02. U. S. EPA, Office of Research and Development and Clean Air Technology Center. Washington, D. C.: Environmental Protection Agency, 2005.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. 182f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VAN HAANDEL, A. Potencial de geração de energia a partir do lodo de sistemas de tratamento de esgoto. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 2, p. 125-142, 2009.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

VERSIANI, B. M. **Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do Campus da UFRJ**. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WIECHMANN, B.; DIENEMANN, C.; KABBE, C.; BRANDT, S.; VOGEL, I.; ROSKOSCH, A. **Sewage sludge management in Germany**. Bonn: Umweltbundesamt, 2013.

ZAIAT, M.; PASSIG, F. H.; FORESTI, E. A mathematical model and criteria for designing horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactors for wastewater treatment. **Biosource Technology**, v. 71, n. 3, p. 235-243, 2000.