

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JACQUELINE SHIRADO

**ANÁLISE DOS FLUXOS DE MATERIAIS E DE ENERGIA COMO FERRAMENTA
DE GESTÃO PARA UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE
ESGOTO DOMÉSTICO**

CURITIBA

2014

JACQUELINE SHIRADO

**ANÁLISE DOS FLUXOS DE MATERIAIS E DE ENERGIA COMO FERRAMENTA
DE GESTÃO PARA UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE
ESGOTO DOMÉSTICO**

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.

Orientadora: Profa. Dra. Karen Juliana do Amaral

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti

CURITIBA

2014

Shirado, Jacqueline

Análise dos fluxos de materiais e de energia como ferramenta de gestão para uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico / Jacqueline Shirado. – Curitiba, 2014

117 f. : il.; tabs., grafs.

Dissertação (mestrado profissional) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, SENAI – PR, Universidade de Stuttgart.

Orientadora: Karen Juliana do Amaral

Coorientador: Gustavo Rafael Collere Possetti

Bibliografia: p. 99-106

1. Esgotos - Tratamento. 2. Águas residuais - Purificação.
I. Amaral, Karen Juliana. II. Possetti, Gustavo Rafael Collere. III. Título.

CDD 628.742

TERMO DE APROVAÇÃO


JACQUELINE SHIRADO

“ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAIS E DE ENERGIA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO DOMÉSTICO”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI/PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:

Coorientador:


Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti
SANEPAR/ISAE


Prof. Dr. Carlos Alberto Ubirajara Gontarski
PPGMAUI/UFPR


Prof. Dr. Pedro Ramos da Costa Neto
UTFPR


Profª. Drª. MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE
Coordenadora do PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 29 de setembro de 2014.

Dedico este trabalho aos meus colegas
da USEG, em especial, àqueles da
Unidade Industrial Barigui/Iguaçu, com
quem aprendi lições que levarei por toda
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, por guiar meus passos e dar forças para seguir sempre adiante independente dos obstáculos que surgiram;

Ao meu coorientador e amigo, Prof. Dr. Gustavo R. C. Possetti, exemplo de dedicação e profissionalismo, pela alegria contagiante e pelo incentivo para que este trabalho fosse concluído;

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Karen J. Amaral, pela dedicação, profissionalismo e confiança depositada;

Ao querido Lucas Martins Gonçalves Júnior, pelo apoio e carinho;

À minha família, que mesmo distante, esteve sempre presente torcendo por mim;

Aos amigos e colegas da ETE Santa Quitéria, em especial, ao Marino Kumegawa, com quem muito aprendi, e a todos os operadores da ETE Santa Quitéria, cujo esforço diário foi importante para a concretização deste trabalho;

À Sanepar, em especial à USEG e à APD;

Aos amigos e colegas, Fábio Adelino da Silva, César Augusto Marin, Eduardo Sabino Pegorini, Marcelo Schuster Oliveira Santos, Júlio César Rietow, Maurício Bergamini Scheer, Ronald Gervasoni, Alexandre Moreno Lisboa, Bárbara Zanicotti Leite Ross, Charles Carneiro, que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

O bom gerenciamento dos processos de tratamento de esgotos é fundamental para garantir que o fluxo e a concentração de poluentes na água, no solo e no ar sejam mantidos em níveis que não comprometam o meio ambiente e a saúde pública. Para tanto, faz-se necessário conhecer as entradas, os estoques e as saídas de materiais e de energia nesses processos. As análises dos fluxos de materiais (AFM) e de energia (AFE) podem ser empregadas como ferramentas para o gerenciamento operacional de estações de tratamento de esgoto (ETE). Neste trabalho, aplicaram-se a AFM e a AFE em uma planta de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico de médio porte, localizada no município de Curitiba, com o intuito de avaliar o desempenho de cada etapa do processo da ETE, criar indicadores para avaliação da eficiência do tratamento, diagnosticar oportunidades de aproveitamento de subprodutos do processo e desenvolver procedimentos para aplicação da AFM e da AFE em outras ETEs. Os materiais consumidos e gerados pelo processo de tratamento durante o ano de 2013 foram quantificados e, posteriormente, representados em um diagrama de Sankey. Da mesma forma, também foram estudados a energia consumida e o potencial energético de subprodutos, como o biogás, o lodo e a espuma. A aplicação da AFM permitiu identificar oportunidades de melhorias, tais como a redução no uso de produtos químicos e a minimização de custos associados com o transporte de resíduos. Além disso, a AFE permitiu identificar que a flotação por ar dissolvido, adotada na etapa de pós-tratamento do esgoto, é o processo que mais consome energia na ETE, seguida da elevatória de recalque de esgoto bruto. Por meio da AFE foi possível verificar ainda que seria possível a geração de mais de 80% da energia elétrica consumida pela ETE em 2013, caso o biogás fosse utilizado para tal fim. O aproveitamento energético do biogás, da espuma e, principalmente, do lodo por meio de sua combustão após prévia secagem demonstrou ser atrativo, em especial se tais subprodutos fossem utilizados como fontes de energia para o processo de secagem térmica de resíduos. Por fim, os indicadores específicos concebidos para avaliação da eficiência de cada etapa do processo de tratamento possibilitaram a criação de dados de referência para a supervisão sistemática das rotinas operacionais da ETE e para a tomada de decisão acerca do aprimoramento de processos. A replicação da AFM e da AFE poderá beneficiar o gerenciamento de outras ETEs, bem como possibilitar que os dados gerados neste trabalho sejam utilizados como fonte de comparação entre diversos processos de tratamento.

Palavras-chave: Análise do fluxo de materiais, análise do fluxo de energia, estação de tratamento de esgoto, gerenciamento operacional.

ABSTRACT

Best practices in wastewater treatment management are important to assure low environmental thresholds taking into account water, soil and air. Consequently, it is necessary to address all the inputs, stocks and outputs of the treatment process. The material and energy flow analysis (MFA and EFA, respectively) can be employed as tools for operational management of wastewater treatment plants (WWTP). The MFA and EFA were applied in a midsize WWTP located in the Brazilian southern region, in order to evaluate the performance of each step in the treatment process, create indicators for assessing treatment efficiency, diagnose opportunities to reuse by-products of the process and develop procedures to allow the tool to replicate in others plants. The materials used and generated in the plant over 2013 were measured and reported in a Sankey diagram. Likewise, energy consumed and energy potential of reuse of by-products such as biogas, sludge and scum, were also studied. The application of MFA allowed to identify opportunities for improvement, such as reducing the use of chemicals and minimizing transportation costs of waste. In addition, the EFA identified that the dissolved air flotation is the process that consumes more energy in the WWTP, following by the lifting of raw sewage process. By EFA was still possible to verify that it would be possible to generate more than 80% of the electricity consumed by the WWTP in 2013, if biogas was reused for this purpose. The energy reuse of biogas, scum and, especially, of the sludge through its combustion, after previous drying, proved to be very attractive, if it is used as an energy source in the thermal drying of waste. Finally, specific indicators designed to assess the efficiency of each step of the treatment process enabled the creation of reference data for the systematic surveillance of the WWTP operational routines and decision making about process improvement. The replication of the AFM and the EFA can benefit the management of others WWTPs and the data generated in this study can be used as comparison between different treatment processes.

Key-words: Material flow analysis, energy flow analysis, wastewater treatment plant, operational management.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS REATORES ANAERÓBIOS: (a) UASB e (b) RALF. EM DESTAQUE A DIFERENÇA ENTRE OS SEPARADORES TRIFÁSICOS.....	23
FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	27
FIGURA 3 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E FOTO DA VISTA AÉREA DA ETE SANTA QUITÉRIA.....	40
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DA ETE SANTA QUITÉRIA.....	41
FIGURA 5 – (a) SISTEMA GRADEAMENTO E (b) ESTEIRA TRANSPORTADORA E CAÇAMBA DE RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS DA ETE SANTA QUITÉRIA	42
FIGURA 6 – SISTEMA DE REMOÇÃO DE AREIA DA ETE SANTA QUITÉRIA: (a) DESARENADOR COM LIMPEZA DE FUNDO MECANIZADA E (b) TRANSPORTADOR INCLINADO E CAÇAMBA DE AREIA.....	43
FIGURA 7 – RALFs DA ETE SANTA QUITÉRIA: (a) LINHA COM 4 REATORES E (b) LINHA COM 2 REATORES	44
FIGURA 8 – FOTO DE UM DOS QUEIMADORES ABERTOS DE GÁS DA ETE SANTA QUITÉRIA	44
FIGURA 9 – FADs DA ETE SANTA QUITÉRIA: (a) VISTA GERAL E (b) VISTA DE UM DOS MÓDULOS DE FLOTAÇÃO COM LODO FLOTADO E RASPADORES ...	45
FIGURA 10 – SISTEMA DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODOS DA ETE SANTA QUITÉRIA	46
FIGURA 11 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO FLUXO DE MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA CLASSIFICADOS DE ACORDO COM O ESTADO FÍSICO DOS MATERIAIS.....	48
FIGURA 12 – DIAGRAMA DE FLUXO DE MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA PARA O ANO DE 2013	65
FIGURA 13 – GRÁFICO DO VOLUME MENSAL DE ESGOTO TRATADO NO ANO DE 2013 NA ETE SANTA QUITÉRIA.....	66
FIGURA 14 – GRÁFICO DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS REMOVIDOS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	66

FIGURA 15 – GRÁFICO DO VOLUME DE AREIA REMOVIDO MENSALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	67
FIGURA 16 – GRÁFICO DO VOLUME DE ESCUMA REMOVIDA BIMESTRALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	68
FIGURA 17 – GRÁFICO DO VOLUME DE LODO REMOVIDO MENSALMENTE DOS RALFs, E DE SEUS RESPECTIVOS TEORES DE SÓLIDOS, NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL	70
FIGURA 18 – GRÁFICO DA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO MENSAL DE BIOGÁS NA ETE SANTA QUITÉRIA NO ANO DE 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL	70
FIGURA 19 – GRÁFICO DO VOLUME DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO CONSUMIDO E CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE SULFETOS NO EFLUENTE DOS RALFs POR MÊS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL.....	72
FIGURA 20 – GRÁFICO DO VOLUME DE CLORETO FÉRRICO CONSUMIDO MENSALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	73
FIGURA 21 – GRÁFICO DO VOLUME DE LODO REMOVIDO DOS FADs E CONSUMO DE CLORETO FÉRRICO DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL	74
FIGURA 22 – GRÁFICO DO CONSUMO DE POLÍMERO E DOS VOLUMES DE LODO ADENSADO E DESAGUADO MENSALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL	75
FIGURA 23 – GRÁFICO DA PARTICIPAÇÃO DOS PROCESSOS NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013.....	80
FIGURA 24 - DIAGRAMA DE FLUXO DE ENERGIA DA ETE SANTA QUITÉRIA PARA O ANO DE 2013.....	82
FIGURA 25 – GRÁFICO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA MENSAL DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	83
FIGURA 26 – GRÁFICO DA ESTIMATIVA DA QUANTIDADE MENSAL DE ENERGIA ELÉTRICA ASSOCIADA COM A RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	84
FIGURA 27 – (a) GRÁFICO DA COMPARAÇÃO MENSAL ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA E A ENERGIA ELÉTRICA QUE PODERIA SER GERADA A PARTIR DO BIOGÁS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. (b) GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA GERADA A PARTIR DO BIOGÁS E A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA	85

FIGURA 28 - GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA E A ENERGIA ELÉTRICA QUE PODERIA SER GERADA A PARTIR DA COMBUSTÃO DA ESCUMA E DO LODO	86
FIGURA 29 – (a) GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA E A ENERGIA ELÉTRICA GERADA A PARTIR DA RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS E DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA. (b) GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA GERADA A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA E A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NA ETE SANTA QUITÉRIA.....	86
FIGURA 30 – (a) GRÁFICO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA TÉRMICA DEMANDADA PARA A SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO DO LODO E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DO BIOGÁS DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. (b) RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA PELO BIOGÁS E A DEMANDADA PARA SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO DO LODO	88
FIGURA 31 – GRÁFICO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DA ESCUMA E DO LODO E DA ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA PELO BIOGÁS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013.....	89
FIGURA 32 - GRÁFICO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA PELA COMBUSTÃO DO LODO DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013.....	90
FIGURA 33 - GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E A ENERGIA TÉRMICA GERADA PELA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	91
FIGURA 34 - (a) GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E A ENERGIA GERADA PELO BIOGÁS, LODO E ESCUMA. (b) RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA E A ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013.....	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS RETIDOS NA GRADE EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE BARRAS.....	20
TABELA 2 - EQUIPAMENTOS DA ETE SANTA QUITÉRIA POR PROCESSO DE TRATAMENTO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	59
TABELA 3 - PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA	61
TABELA 4 - RESUMO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO OPERACIONAL DOS PROCESSOS QUE COMPÕEM A ETE SANTA QUITÉRIA NO ANO DE 2013.....	77
TABELA 5 - INDICADORES ESPECÍFICOS PARA GERAÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	78
TABELA 6 - INDICADORES ESPECÍFICOS PARA O CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MÉTODOS UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR OS MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA	56
---	----

LISTA DE SIGLAS

AFE – Análise do fluxo de energia
AFM – Análise do fluxo de materiais
AFS – Análise do fluxo de substância
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO – Demanda biológica de oxigênio
DQO – Demanda química de oxigênio
EEEb – Estação elevatória de esgoto bruto
EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ETE – Estação de tratamento de esgoto
FAD – Flotação por ar dissolvido
PCI – Poder calorífico inferior
pH – Potencial hidrogeniônico
RALF – Reator anaeróbio de leito fluidizado
Sanepar – Companhia de Saneamento do Paraná
ST – Sólidos totais
SV – Sólidos voláteis
UASB – *Upflow anaerobic sludge blanket*
UGL – Unidade gerenciadora de lodo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÕES	13
1.2	ESTRUTURAÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO	17
3.1.1	Esgoto doméstico	17
3.1.2	Processos de tratamento de esgoto	18
3.1.3	Tratamento preliminar	19
3.1.4	Tratamento secundário	21
3.1.5	Tratamento terciário	25
3.2	DESAGUAMENTO DE LODO	28
3.2.1	Centrífugas desaguadoras	28
3.2.2	Higienização de lodos	30
3.3	FERRAMENTAS PARA GESTÃO OPERACIONAL DE ETEs	31
3.3.1	Análise de fluxo de materiais (AFM)	32
3.3.2	Eficiência energética em ETEs e análise de fluxo de energia (AFE)	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	A ETE INVESTIGADA	40
4.1.1	Gradeamento mecanizado	42
4.1.2	Desarenador	43
4.1.3	Reatores anaeróbios	43
4.1.4	Flotação por ar dissolvido	45

4.1.5 Sistema de desaguamento de lodo.....	46
4.2 METODOLOGIA	47
4.2.1 Estudo dos fluxos de materiais	47
4.2.2 Estudo dos fluxos de energia.....	58
4.2.3 Procedimento para aplicação da AFM e da AFE em ETEs	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1 ESTUDO DO FLUXO DE MATERIAIS DA ETE.....	64
5.1.1 Balanço de massa anual na ETE.....	64
5.1.2 Análise detalhada do desempenho operacional dos processos da ETE	65
5.1.3 Cálculo dos indicadores específicos de materiais para os processos da ETE .	78
5.2 ESTUDO DO FLUXO DE ENERGIA DA ETE.....	79
5.2.1 Balanço de energia anual da ETE	79
5.2.2 Análise detalhada do desempenho energético da ETE	82
5.2.3 Cálculo dos indicadores específicos de energia da ETE	93
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
6.1 CONCLUSÕES.....	94
6.2 TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS.....	99
APÊNDICES	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) têm papel fundamental no controle da poluição, uma vez que o lançamento de esgotos, não tratados ou processados com baixa eficiência, no solo ou em corpos hídricos podem acarretar impactos negativos para o meio ambiente e para a saúde pública. Esses impactos podem ainda ser agravados se subprodutos, como resíduos sólidos grosseiros, areia, lodo, espuma e biogás, não forem gerenciados adequadamente.

De acordo com Spellman (2014), o gerenciamento do tratamento de esgoto deve estar voltado para a promoção do tratamento do esgoto que chega a ETE, independente do seu volume, e deve ainda garantir que o padrão de qualidade do efluente exigido em legislação seja alcançado a um custo justo. O bom gerenciamento de uma ETE deve garantir, portanto, que esses requisitos sejam atingidos. Nesse contexto, a otimização dos processos de tratamento, bem como a qualidade dos serviços prestados devem ser priorizadas pelos envolvidos nas questões de saneamento, a fim de evitar o comprometimento do equilíbrio ambiental e garantir a saúde pública.

Barbosa (2006) observou que o gerenciamento operacional das ETEs da Companhia de Saneamento do Pará necessitava ser aprimorado com o intuito de promover ações voltadas para as reais necessidades dessas ETEs. Diante disso, percebe-se a importância do gerenciamento operacional pautado em métodos de gestão que visem atingir tal objetivo.

A análise do fluxo de materiais (AFM) pode ser utilizada como ferramenta de suporte ao gerenciamento operacional de ETEs. A AFM baseia-se na lei de conservação da matéria e avalia de forma sistemática os fluxos e estoques de materiais de um sistema em um espaço e tempo definidos, sendo possível visualizar fluxos de resíduos, bem como identificar suas fontes geradoras. Assim, a AFM pode ser aplicada em qualquer área que exija tomada de decisões relacionadas ao

gerenciamento ambiental, de resíduos e de recursos (BRUNNER e RECHBERGER, 2005).

Complementarmente à AFM, o emprego da análise de fluxo de energia (AFE) possibilita verificar o desempenho de um sistema sob o ponto de vista energético e propor, conseqüentemente, alternativas operacionais mais eficientes e menos onerosas para o sistema avaliado. A AFE quantifica o consumo e o potencial de geração energético dentro de um sistema e pode, portanto, ser empregada em uma ETE.

Frente ao contexto atual em que recursos fósseis estão se esgotando e o encarecimento da energia é contínuo, torna-se imprescindível implementar ações de redução de consumo de energia e/ou de geração alternativa por meio de recursos naturais renováveis. Aliar o reaproveitamento de resíduos de ETEs, como a espuma, lodo e biogás, que necessitam de gerenciamento adequado e, muitas vezes, oneroso para as companhias de saneamento, com a possibilidade de gerar energia para o próprio processo de tratamento de esgoto é atrativo sob o ponto de vista ambiental e financeiro.

Diante disso, percebe-se que, a aplicação da AFM e da AFE em ETEs, prática ainda incipiente, sobretudo no Brasil, pode promover a minimização de impactos ambientais negativos, a redução de custos operacionais, o reaproveitamento de resíduos e a geração de energia limpa.

Nesse contexto, este trabalho empregou a AFM e a AFE em uma ETE de médio porte dotada de reatores anaeróbios e pós-tratamento com flotores por ar dissolvido, localizada no município de Curitiba - Paraná. O objetivo da aplicação dessas ferramentas é obter suporte para um maior controle do processo e identificar necessidades prementes, oportunidades de melhorias e potenciais de reaproveitamento de materiais na geração de energia renovável, além de definir critérios para avaliações futuras na própria ETE ou em plantas similares. O uso dessas ferramentas de suporte de gestão é importante para que o papel do saneamento ambiental seja cumprido em todos os âmbitos e para que o processo de tratamento de esgoto torne-se sustentável.

1.2 ESTRUTURAÇÃO

Este documento está estruturado em seis seções e dois apêndices.

A primeira seção contém a introdução do estudo e apresenta as motivações e justificativas para a realização deste trabalho.

A segunda seção apresenta os objetivos geral e específicos inerentes ao estudo.

A terceira seção reporta a fundamentação teórica necessária para o entendimento desta dissertação. Nesse sentido, ela contempla os processos de tratamento de esgotos domésticos com base nas operações unitárias existentes na ETE investigada e os conceitos sobre a AFM e a AFE. Uma revisão do estado da arte sobre o assunto também é apresentada e reforça a relevância deste trabalho.

Na quarta seção encontra-se a descrição detalhada da ETE investigada, incluindo seus processos, insumos, produtos e subprodutos. A metodologia empregada para a determinação dos fluxos de materiais e energia na ETE também é reportada nesta seção. A quinta seção, por sua vez, apresenta os resultados obtidos, em especial, a AFM e a AFE para a ETE sob estudo. A seção ainda traz uma análise crítica acerca dos desempenhos de cada uma das etapas de processo de tratamento de esgoto, comparando-os com dados de referência e prospectando oportunidades de melhorias. O sexto capítulo relata as conclusões do estudo e apresenta sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Os apêndices, por fim, apresentam os produtos técnico-científicos associados com esta dissertação, incluindo o procedimento para aplicação da AFM e da AFE em ETEs. Anexo a este trabalho encontra-se disponível ainda um CD contendo o Boletim de Controle Operacional da ETE estudada, que auxiliará no desenvolvimento da AFM e da AFM ao longo dos próximos anos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a aplicabilidade das análises de fluxos de materiais e de energia como ferramentas de gestão para uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico de médio porte, localizada no município de Curitiba - Paraná.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir os fluxogramas de materiais e de energia da ETE estudada;
- Avaliar os desempenhos das etapas que compõem o processo de tratamento de esgoto da ETE, comparando-os com valores de referência;
- Propor indicadores que possibilitem o acompanhamento operacional da ETE;
- Diagnosticar oportunidades de aproveitamento de subprodutos do processo de tratamento de esgoto da ETE, quantificando seus benefícios financeiros e ambientais;
- Desenvolver um procedimento que permita empregar a AFM e a AFE no gerenciamento operacional da ETE investigada e de outras plantas similares.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

3.1.1 Esgoto doméstico

De acordo com Jordão e Pessôa (2011), o termo esgoto refere-se ao líquido resultante dos diversos usos da água, como, por exemplo, o uso agrícola, residencial, comercial e industrial. O esgoto doméstico, proveniente principalmente de residências, edifícios comerciais, instituições e afins, juntamente com o esgoto industrial, constituído por despejos de diversos tipos de indústrias, correspondem aos dois principais grupos em que o esgoto pode ser classificado.

O esgoto é composto majoritariamente por água, que corresponde a aproximadamente 98%. O restante é constituído por sólidos suspensos, sólidos inertes, sólidos dissolvidos, nutrientes, compostos orgânicos, sólidos grosseiros e organismos patogênicos. Pode eventualmente conter contaminantes tóxicos decorrentes de atividades industriais ou de acidentes (NETO e CAMPOS, 1999).

O volume de esgoto produzido por determinada população varia de acordo com a região atendida e sua respectiva disponibilidade de água, atividades desenvolvidas, incluindo as industriais, nível socioeconômico, nível cultural, além de outras causas comportamentais.

A vazão é uma importante grandeza para caracterizar o esgoto que chega até uma ETE. Corresponde ao volume de esgoto transportado em determinado período de tempo e é, geralmente, expressa em m^3 / dia , m^3 / h ou L / s (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Mesmo em locais onde o sistema de coleta de esgoto é do tipo separador absoluto – independente do sistema de drenagem de águas pluviais – em dias de chuva pode ocorrer a introdução das águas pluviais por meio das juntas e paredes das tubulações, caixas de passagem e poços de visita. Tais águas de infiltração,

denominadas parasitárias, podem causar um incremento significativo na vazão do esgoto, não podendo ser, portanto, desconsiderada (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

3.1.2 Processos de tratamento de esgoto

A escolha dos tipos de tratamento a serem construídos em uma ETE dependerá sempre da legislação ambiental, das características do corpo receptor e do tipo de uso da água à jusante do ponto de lançamento. Tipicamente, quanto maior é a sofisticação empregada em uma ETE, maiores são seus custos de implantação, operação e manutenção. Por isso, deve-se avaliar criteriosamente a necessidade de cada processo de tratamento (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

De acordo com o artigo 3º da Resolução CONAMA nº 430 de 2011 (BRASIL, 2011):

“Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedecem às condições e exigências dispostas nesta Resolução e em outras normas aplicáveis”.

A mesma resolução estabelece ainda que o padrão mínimo de lançamento de efluentes de sistemas de esgotos sanitários é de 120 mg/L de demanda química de oxigênio (DQO), podendo este valor ser excedido nos casos em que a eficiência do processo de tratamento for superior a 60% ou mediante comprovação, por meio de estudo de autodepuração do corpo hídrico, do atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor. Outros parâmetros de lançamento, como potencial hidrogeniônico (pH), sólidos sedimentáveis, temperatura, além da demanda biológica de oxigênio (DBO), também são requeridos na referida resolução (BRASIL, 2011).

Os processos de uma ETE podem ser divididos em níveis de tratamento de acordo com os patamares de redução de sólidos e de carga orgânica, sendo eles: preliminar, primário, secundário e terciário. Esses níveis, com exceção do primário, serão explicados a seguir. O processamento do lodo também é uma importante etapa de uma ETE.

3.1.3 Tratamento preliminar

Além da matéria orgânica, o esgoto doméstico possui em sua composição resíduos sólidos grosseiros e areia. A remoção desses materiais é fundamental para proteger equipamentos e unidades de tratamento de esgoto, como reatores e meios filtrantes, além de auxiliar na remoção parcial da carga poluidora (METCALF e EDDY, 2003).

O tratamento preliminar tem o objetivo de remover esses resíduos e é, tipicamente, composto por gradeamento, desarenador, controle de odor e equalizador de vazão (EPA, 2003).

Neto e Campos (1999) sugerem que sejam adotados minimamente no tratamento primário, a grade, a caixa retentora de espuma e o medidor de vazão, mas que ainda pode ser inserido a este nível de tratamento um decantador primário ou uma peneira estática ou mecânica. Geralmente, permite-se a ausência de peneira ou decantador em sistemas de lagoas de estabilização ou sistemas com aeração prolongada. O decantador pode ser dispensado em sistemas que possuem reatores anaeróbios, exigindo, entretanto, a implantação do gradeamento fino do esgoto.

3.1.3.1 Remoção de resíduos sólidos grosseiros (*Gradeamento*)

Os resíduos sólidos grosseiros presentes no esgoto são provenientes, de uma maneira geral, do uso inadequado do sistema de esgotamento sanitário. De acordo com a EPA (2003), os resíduos sólidos grosseiros removidos do esgoto doméstico são compostos basicamente por trapos, papéis, plásticos e metais.

A remoção de resíduos sólidos grosseiros se dá por meio de dispositivos constituídos, geralmente, por barras de ferro ou de aço dispostas paralelamente, os quais são chamados de grades. Tais barras são projetadas com espaçamentos que permitem o fluxo normal do esgoto e retêm os resíduos sólidos desejados (finos, médios ou grosseiros) (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

As características e as quantidades de resíduos sólidos removidos pelo gradeamento podem variar de acordo com os hábitos e nível de instrução da

população contribuinte e com a quantidade de material que pode ser carregado para o esgoto na presença de eventos de chuva.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), a quantidade de resíduos sólidos removidos pelo gradeamento pode variar de 15 a 37 L / 1.000 m³ de esgoto para grades com espaçamento entre barras de 25 mm. Jordão e Pessôa (2011) relatam que é comum a remoção de 40 a 50 litros de resíduos sólidos grosseiros a cada 1.000 m³ de esgoto tratado em grades com espaçamento de fino a médio.

A TABELA 1 apresenta a relação entre o espaçamento entre barras e a quantidade típica de material retido a cada 1.000 m³ de esgoto tratado.

TABELA 1 - RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS RETIDOS NA GRADE EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE BARRAS

Espaçamento (mm)	Resíduos sólidos grosseiros retidos (L / 1.000 m³)
12,5	50
20	38
35	12
40	9
50	6

FONTE: Jordão e Pessôa (2011).

O material removido das grades deve ser adequadamente acondicionado, podendo sofrer tratamento antes de receber destinação final. Entre os tipos de tratamento incluem-se a lavagem do material, a secagem e a adição de substâncias químicas para remover o odor e reduzir a proliferação de insetos. Como destino final dos sólidos grosseiros recomenda-se a disposição em aterro sanitário ou a incineração, sendo esta última a mais indicada sob o ponto de vista sanitário. (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

3.1.3.2 Remoção de areia (desarenador)

A areia presente no esgoto doméstico é constituída, tipicamente, por partículas de rochas, areia, cascalho, cinzas ou outros materiais pesados, que tem facilidade em decantar. Pode-se encontrar também: grãos, fibras, verduras, cascas de ovo, pedaços de ossos e pedaços de comida em geral (EPA, 2003).

A remoção destes resíduos tem como objetivo evitar o desgaste de equipamentos e tubulações por abrasão, minimizar a obstrução de tubulações, conexões e válvulas e facilitar o fluxo do esgoto pelas unidades de tratamento. A

separação dos sólidos da parte líquida pode ser realizada por gravidade ou por centrifugação e sua remoção pode ser realizada manualmente, de forma mecanizada ou por meio de ciclone separador (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), os desarenadores são, geralmente, instalados logo após a etapa de gradeamento. Os desarenadores quadráticos de fluxo horizontal são utilizados há mais de 60 anos e consistem em tanques de formato quadrado com pouca profundidade e raspadores de fundo que separam a areia por sedimentação, removendo-a mecanicamente.

Esses desarenadores possuem a desvantagem de remover uma parcela considerável de matéria orgânica mais pesada. O resíduo necessita, portanto, passar por um lavador, evitando assim maus odores.

Normalmente, os teores de umidade e de sólidos voláteis da areia removida variam entre 13 e 65% e entre 1 e 56%, respectivamente (Metcalf e Eddy, 2003).

Conforme Jordão e Pessôa (2011), o rendimento médio do desarenador deve compreender de 20 a 40 L de areia para cada 1.000 m³ de esgoto tratado. Se a remoção ultrapassar 150 L / 1.000 m³ de esgoto tratado, então devem existir avarias ou irregularidades na rede coletora, cujo fluxo passa a ser influenciado por infiltrações ou ligações clandestinas de esgoto.

Já Metcalf e Eddy (2003), afirmam que a presença de areia no esgoto sofre influência das características topográficas de cada região atendida pela rede coletora e, portanto, a quantidade de areia removida pelo desarenador pode variar consideravelmente. Em sistemas de coleta separados, a quantidade média de areia removida pode variar entre 4 e 37 L / 1.000 m³ de esgoto tratado.

3.1.4 Tratamento secundário

O tratamento secundário é responsável pela degradação de compostos carbonáceos por meio de processo biológico, quando carboidratos, óleos e graxas e proteínas são transformados em compostos mais simples. Após a remoção de matéria orgânica, os sólidos gerados devem ser removidos do sistema e processados adequadamente (NETO e CAMPOS, 1999).

Segundo Jordão e Pessôa (2011), inclui-se no tratamento secundário os processos de sedimentação, de flotação, os sistemas anaeróbios, a digestão do lodo e a secagem do lodo. Para este estudo, serão abordados neste capítulo apenas os reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF), uma versão modificada do reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (*UASB-Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

3.1.4.1 *Reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF)*

De acordo com Foresti (2002), existem diversos reatores UASB ou unidades similares a estes reatores, instalados pelo mundo, principalmente em países em desenvolvimento, para tratar esgoto doméstico. No Brasil, os reatores UASB e suas variações, estão presentes em diversos estados como, Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Paraíba e Bahia.

No estado do Paraná existem basicamente dois tipos de reatores anaeróbios instalados nas ETEs: o reator UASB convencional e o reator UASB modificado, conhecido como RALF, que pode ser encontrado principalmente em dois formatos: na forma circular com tronco cônico e na forma quadrática.

O princípio de funcionamento dos reatores é similar. A alimentação do reator com o esgoto a ser tratado ocorre de forma ascendente. Os sólidos suspensos presentes no esgoto tendem a ficar retidos no manto biológico espesso existente no fundo do tanque e com concentração de sólidos totais tipicamente variando entre 4 e 10%. No processo de degradação anaeróbia ocorre a formação de gases que juntamente com o movimento ascendente do fluxo do esgoto, realizam a mistura do sistema e o carreamento de lodo com o líquido. Diante disso, faz-se necessária a instalação de um dispositivo, chamado de separador trifásico, que é responsável pela separação dos sólidos que ainda não foram degradados, do gás gerado no processo e do líquido tratado.

A FIGURA 1 apresenta o diagrama esquemático do reator UASB convencional e do RALF (UASB modificado), na qual é possível observar que a principal diferença entre os dois reatores consiste na abertura superior do separador trifásico existente somente no RALF, que favorece a saída do líquido juntamente com o gás pela parte superior do reator.

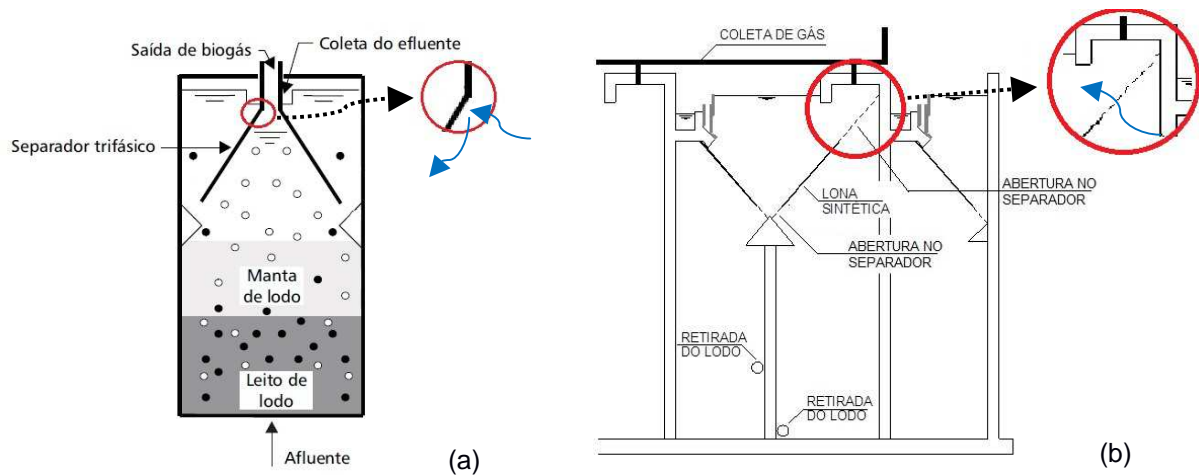


FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS REATORES ANAERÓBIOS: (a) UASB e (b) RALF. EM DESTAQUE A DIFERENÇA ENTRE OS SEPARADORES TRIFÁSICOS
 FONTE: (a) adaptado de Chernicharo et al. (1999) e (b) adaptado de Kovaltchuk et al. (2006)

Os sólidos mais pesados que por ventura não tenham sido separados da parte líquida tendem a voltar para a zona de digestão por meio da câmara de sedimentação, desenvolvida especialmente para este fim. Já os sólidos mais leves são perdidos no efluente final. O biogás gerado é captado na câmara de gás e, se possível, conduzido ainda para o medidor de gás, para posterior reaproveitamento ou queima.

No interior do separador trifásico e na superfície do decantador pode ocorrer a formação de espuma, constituída por materiais plásticos, pontas de cigarro, papel, algodão, cabelo, cascas de frutas e vegetais, restos de alimentos, sabões, ceras, óleos e gordura, lodo, dentre outros materiais similares. A espuma é um material flutuante, cuja quantidade e composição dependem das características do esgoto afluente à ETE (CHERNICHARO, 2007).

A espuma formada na superfície dos decantadores tende a ser consideravelmente baixa, principalmente quando o esgoto afluente é mais diluído. Souza (2006) apresentou em seu trabalho dados das características físicas e químicas do resíduo gerado em reatores UASB da cidade de Belo Horizonte, para os quais encontrou o coeficiente de acumulação de espuma variando entre 0,01 e 0,04 L / kg DQO_{aplicada} na superfície das câmaras de decantação.

De acordo com Chernicharo (2007), em afluentes mais diluídos a formação de espuma no interior do separador trifásico pode ser relativamente baixa, o que permite que a remoção desse material seja realizada em intervalos de 30 dias. Intervalos de limpeza muito elevados levam à concentração da espuma, o que

dificulta a sua remoção e exige que o reator possua dispositivos que possibilitem a sua limpeza. Quando a espuma encontra-se em uma condição mais fluida, a remoção pode ser realizada por mecanismo hidrostático, operacionalmente mais fácil.

Durante o processo de digestão anaeróbia, ocorre a produção de gases, cuja composição pode variar de acordo com o tipo de substrato submetido ao tratamento. Entre os principais gases produzidos em reatores anaeróbios que tratam esgotos domésticos citam-se o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e nitrogênio (N_2), que compõem, juntamente com gases existentes em menores proporções, o biogás (NOYOLA et al., 2006). Entre os componentes minoritários, destaca-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que é indutor de maus odores, mesmo a baixas concentrações. Isso porque o limiar de detecção humano é da ordem de 0,0081 ppm (AMOORE e HAUTALA, 1983).

Lobato et al. (2012) desenvolveram um modelo matemático que estima de forma mais realista a produção de biogás em reatores UASB. Esse modelo considera as perdas na produção do biogás, ponderando o consumo da DQO inerente à geração do lodo e ao processo de redução do sulfato. O modelo considera ainda as perdas na recuperação do biogás e a parcela de DQO convertida em metano que é eliminada juntamente com o efluente do reator na forma dissolvida. Além disso, o modelo contempla a parcela de metano que se desprende na zona de decantação do reator e que é perdida para a atmosfera.

Possetti et al. (2013) realizaram medições em tempo real da vazão, do teor de metano, da temperatura e da pressão manométrica do biogás gerado em 4 RALFs no período de 6 meses sob a condição de guiamento passivo. Nesse estudo, verificou-se que a produção de biogás pelos RALFs seguem um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário devido às alterações físicas e químicas do esgoto bruto que ocorrem, normalmente, ao longo do dia ou que sofrem influência de eventos de chuva. A vazão média de biogás gerada nos 4 RALFs foi de $(21,56 \pm 6,45) \text{ Nm}^3/\text{h}$, com teor médio de metano de $(59,76 \pm 4,48)\% \text{ v/v}$.

Além da formação de gás durante o processo de degradação anaeróbia, ocorre também o crescimento de sólidos que se acumulam no interior do reator e necessitam de remoção periódica, os quais são denominados lodos. Esses sólidos em excessocrescem a uma taxa de 0,10 a 0,20 kg SST / kg DQO_{aplicada} (coeficiente

de produção de sólidos) e possuem elevado grau de estabilização. A produção de lodo pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$P_{\text{lodo}} = Y \cdot \text{DQO}_{\text{média_aplicada}} \quad (1),$$

em que:

P_{lodo} é a produção de sólidos, expressa em kg SST / dia;

Y é o coeficiente de produção de sólidos;

$\text{DQO}_{\text{média_aplicada}}$ é a carga de DQO aplicada ao sistema por dia, dado em kg DQO.

De acordo com Chernicharo et al. (1999), a descarga de lodo em excesso no reator consiste em um aspecto operacional de grande importância, evitando assim descargas de lodo junto com o efluente e salvaguardando a eficiência do tratamento. Entretanto, essa ação está atrelada à capacidade do sistema de processamento de lodo absorver todo o lodo descartado. Diante disso, é imprescindível planejar a maneira e a frequência de remoção do lodo excedente do sistema.

3.1.5 Tratamento terciário

Os reatores UASB têm dificuldade em produzir efluentes que atendam à legislação ambiental, exigindo um tratamento subsequente para adequar seus efluentes e propiciar a proteção dos corpos hídricos receptores. O tratamento terciário, ou pós-tratamento, busca, então, a complementação da remoção da carga orgânica desses efluentes, proporcionando, se possível, ainda a remoção de nutrientes, tais como o nitrogênio e o fósforo, e de microrganismos patogênicos (AISSE et al., 2001).

Existe atualmente uma grande variedade de tratamentos terciários que podem ser aplicados aos efluentes de reatores UASB. Considerando a eficiência de remoção dos reatores anaeróbios, o sistema combinado possibilita uma remoção de DQO da ordem de 90% (KHAN, 2011). Neste trabalho será abordado, entretanto, apenas o sistema de flotação por ar dissolvido.

3.1.5.1 Flotação por ar dissolvido

A flotação por ar dissolvido (FAD) corresponde a uma das alternativas de pós-tratamento de reatores anaeróbios, que visa remover sólidos em suspensão. Pode-se adicionar ao processo de flotação agentes coagulantes para remover nutrientes e matéria orgânica dissolvida (AISSE et al., 2001).

De acordo com Kovaltchuk (2011), no pós-tratamento de reatores anaeróbios, é possível encontrar FADs operando no Distrito Federal, no Paraná e em Minas Gerais.

Atualmente, a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) possui FADs em cinco de suas ETEs, das quais três são de pequeno porte (100 L / s), uma é de médio porte (420 L / s) e uma é de grande porte (1.120 L / s).

Uma explicação sucinta sobre o funcionamento do FAD é apresentada a seguir, baseada nos autores Di Bernardo (2005) e Jordão e Pessôa (2011).

O processo de flotação inicia-se com a adição de coagulante no efluente do RALF que ocorre na câmara de mistura rápida. O líquido com coagulante é encaminhado, então, para três câmaras de mistura lenta em série, onde ocorre o processo de floculação. Em seguida, o líquido contendo flocos é encaminhado para um tanque de flotação onde recebe a água saturada (com microbolhas de ar), responsável por exercer forças de empuxo, fazendo com que as partículas ou flocos flutuem na superfície do líquido, separando a parte líquida da sólida.

O material flutuante, denominado neste trabalho de lodo flotado, pode ser removido hidráulica ou mecanicamente e encaminhado para o sistema de desaguamento de lodo. O efluente clarificado é enviado para a etapa seguinte ou para o corpo hídrico receptor.

A FIGURA 2 apresenta um diagrama esquemático do processo de flotação por ar dissolvido.

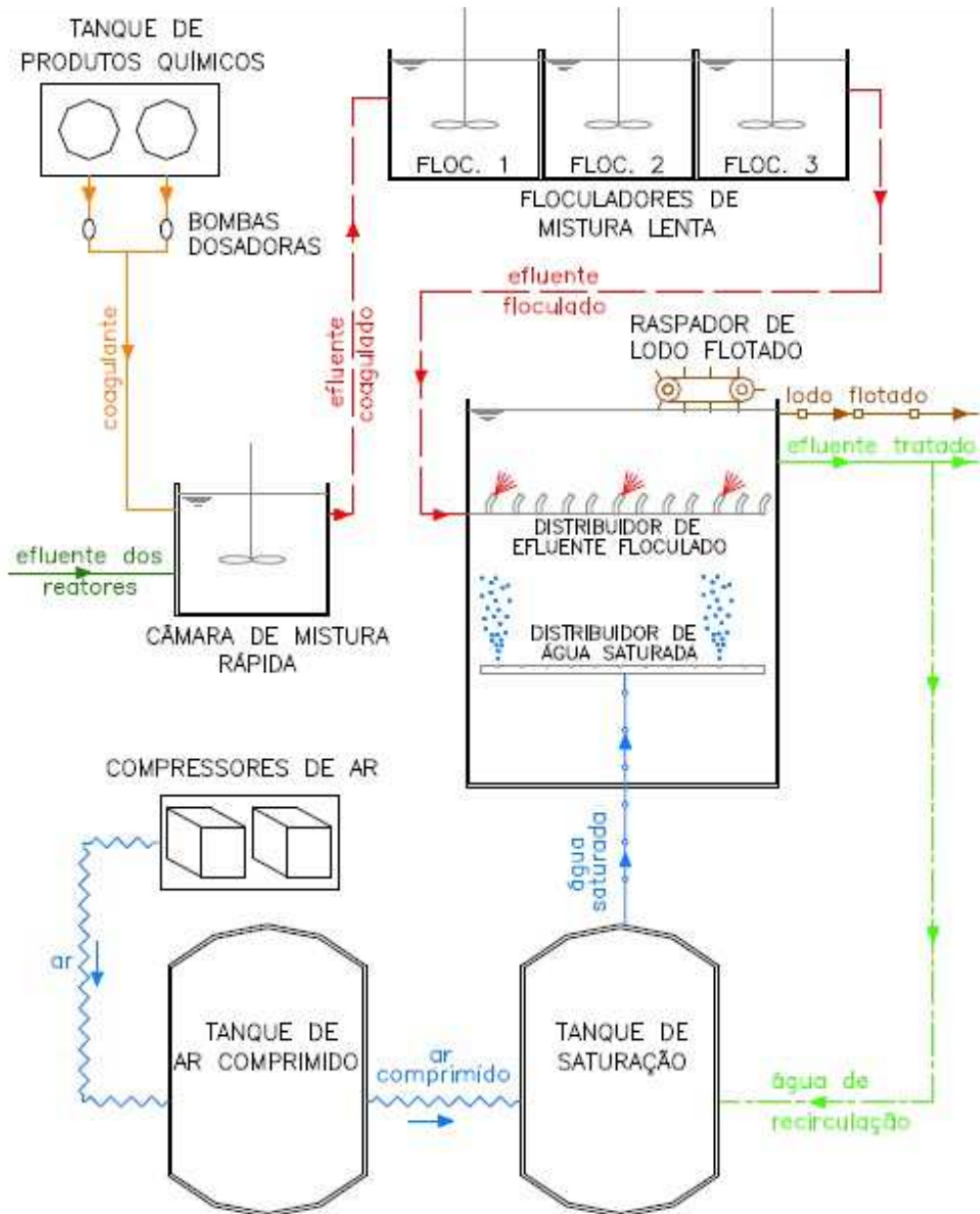


FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
 FONTE: Kovaltchuk, 2010.

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), as dosagens de cloreto férrico, utilizado como coagulante, praticadas para remoção de sólidos em suspensão, sem remoção de fósforo, variam normalmente entre 20 e 40 mg / L de cloreto férrico. Para a remoção de fósforo as dosagens variam entre 40 e 60 mg / L.

3.2 DESAGUAMENTO DE LODO

O lodo produzido no tratamento de esgoto e que deve ser removido do processo, necessita de processamento para facilitar seu manejo, utilização e disposição final. Isso porque é um material que requer cuidados devido à presença de patogênicos, além de representar um grande volume a ser gerenciado uma vez que possui baixa concentração de sólidos (AISSE et al., 1999).

O tipo de processamento de lodo pode variar dependendo do objetivo que se pretende atingir. O lodo pode sofrer digestão aeróbia ou anaeróbia, por exemplo, com vistas à sua estabilização. Se o intuito for reduzir o teor de água livre presente no lodo, podem ser aplicados processos de adensamento ou flotação. Para reduzir ainda mais o volume de lodo, adota-se geralmente a secagem natural ou secagem por processos mecânicos, sendo utilizados leitos e lagoas de secagem na primeira opção e processos de filtração e centrifugação na segunda. Existem também processos de secagem térmica e incineração. A destinação final, dependendo da condição em que o lodo tratado se encontra, inclui desde a higienização com óxido de cálcio para reciclagem agrícola até o reaproveitamento em indústrias de cimento (AISSE et al., 1999).

Neste trabalho, serão abordados: o adensamento de lodo, o desaguamento por centrífuga desaguadora e o processo de higienização com óxido de cálcio para reciclagem agrícola. Breves considerações sobre as técnicas disponíveis atualmente para processamento do lodo também serão apresentadas.

3.2.1 Centrífugas desaguadoras

As centrífugas desaguadoras são equipamentos utilizados na remoção da água presente no lodo por diferença de força centrífuga. A separação ocorre pela sedimentação do lodo a uma velocidade superior àquela que ocorreria pela ação da gravidade. Em processo subsequente, o lodo é compactado pela ação prolongada da centrifugação e perde parte da água capilar (ANDREOLI et al., 2001).

Existem dois tipos de centrífuga: a de eixo horizontal e a de eixo vertical. Geralmente, as centrífugas de eixo horizontal são mais utilizadas por admitirem uma alimentação mais contínua e teores de sólidos da torta de lodo mais elevado, quando comparados com os patamares de operação das centrífugas de eixo vertical. No mercado brasileiro estão disponíveis centrífugas com capacidade entre 2,5 e 180 m³ / h (ANDREOLI et al., 2001).

De acordo com Zhang et al. (2014), para o alcance da eficiência desejada no processo de desaguamento, faz-se necessário um condicionamento químico preliminar do lodo, pois a separação do material sólido da água ocorre com mais facilidade com a aplicação de coagulantes químicos. Isso porque esses coagulantes tendem a aumentar o tamanho das partículas devido à aglomeração dos sólidos finos presentes no lodo.

Miki (1998) testou o uso de polímero catiônico de alto peso molecular para condicionamento do lodo de ETE no desaguamento em filtro prensa e obteve boa torta de lodo com dosagem de polímero em pó de 5,38 kg por tonelada de lodo. Spavier et al. (2001) identificaram em seus estudos em escala de laboratório que os polímeros catiônicos e os não-iônicos são os mais indicados ao desaguamento de lodo de reatores UASB.

A presença de sólidos voláteis no lodo também influencia no processo de desaguamento. Andreoli et al. (2001) reportam que quanto maior é a concentração de sólidos fixos (inertes) no lodo a ser desaguado, melhor é o desempenho da centrífuga, gerando uma torta com maior concentração de sólidos totais.

Aisse et al. (1999) registraram dados da torta de lodo na saída da centrífuga da ordem de 30% de sólidos totais, para um lodo afluyente de 4%, em teste realizado em uma ETE no município de Curitiba-PR.

Segundo Schofield (1997), o lodo de sistemas de flotação por ar dissolvido para tratamento de água, dificilmente atinge 17% de teor de sólidos totais, fato que pode estar relacionado à retenção de microbolhas no lodo flotado e à presença de algas na água bruta.

3.2.2 Higienização de lodos

A higienização do lodo por estabilização alcalina prolongada ocorre pela adição de cal (óxido de cálcio) no lodo com o intuito de elevar seu pH e temperatura, resultando na diminuição dos organismos patogênicos presentes em sua composição, além de contribuir para a redução da potencial ocorrência de maus odores (Andreoli et al., 2001).

Para higienização de lodo na fase sólida, a cal virgem é a mais indicada. Isso porque ela reage com a água presente no lodo, por meio de uma reação exotérmica e, portanto, liberando calor. Segundo Andreoli et al. (2001), pesquisadores obtiveram lodo com níveis de microrganismos abaixo dos limites de detecção com a adição de cal virgem com dosagens de 30 a 50% da massa seca de lodo.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (2000), para que o lodo esteja livre de organismos patogênicos, recomenda-se que o lodo caleado mantenha pH maior ou igual a 12 por, no mínimo, 72 horas e mantenha, por pelo menos 12 horas desse período, a temperatura de 52 °C.

Malta e Tsutiya (2003) avaliaram em seu trabalho diferentes dosagens de cal virgem para estabilização do lodo e constataram que teores de 65% sobre a matéria seca possibilitaram a obtenção de temperaturas da ordem de 52 °C, mantendo o pH acima de 12 por 72 horas.

Segundo Ihlenfeld (1999), a dosagem de 50% de cal sobre a matéria seca propiciou um lodo caleado com pH de aproximadamente 12 e com 100% de redução de ovos viáveis de helminto. O autor sugere ainda que o lodo seja armazenado por 60 dias após a mistura.

Outra alternativa no processamento do lodo que vem sendo empregada é a secagem térmica, que pode proporcionar duas vantagens para o gerenciamento do lodo de ETEs: redução do volume e higienização no mesmo processo (SERENOTTI, 2009).

Serenotti (2009) avaliou o uso do secador convectivo direto de fluxo ascendente para redução do volume e higienização do lodo primário da ETE Tatu localizada em Limeira – São Paulo. O autor obteve uma redução de 50% no volume

do lodo e, para a temperatura de 60 °C e tempo de exposição de 60 minutos empregados nos testes, a secagem térmica foi suficiente apenas para eliminação da *Salmonella spp* e *Escherichia coli*. Para a mesma condição de operação do secador, ainda foram identificados ovos de helmintos e protozoários em algumas amostras, por serem de mais difícil eliminação.

Já Maldonado et al. (2009) avaliou o emprego de um secador térmico piloto na secagem de lodo já higienizado termicamente e concluiu que o produto final poderia ser enquadrado como biossólido do tipo A, podendo, portanto, ser utilizado sem restrição na agricultura.

Lobato (2011) obteve com a secagem térmica do lodo uma redução de 50% do volume do lodo e a completa inativação dos ovos de helminto em uma hora e meia de exposição do lodo ao calor.

De acordo com estudo realizado por David e Tsutiya (2001), o biogás gerado na ETE pode reduzir os custos operacionais do uso do secador térmico. Além disso, o lodo seco pode ser aplicado na agricultura, promovendo a reciclagem de elementos no ambiente.

Borges (2004) utilizou o próprio biogás gerado na ETE para higienização térmica do lodo excedente dos reatores e obteve 100% de inviabilização de ovos de *Ascaris lumbricoides*. Possetti et al. (2012) avaliaram um sistema térmico de higienização do lodo de esgoto e em 5 dias de operação foi possível a eliminação de salmonelas e a redução de ovos viáveis de helmintos para nível inferior ao preconizado na Resolução CONAMA 375/2006 com uma temperatura média de 59 °C durante 3,5 dias.

3.3 FERRAMENTAS PARA GESTÃO OPERACIONAL DE ETEs

De acordo com Lins (2010), as ETEs podem ser grandes geradoras de poluição, uma vez que consomem insumos e energia e geram rejeitos que podem causar impactos ambientais negativos no ar, no solo e na água. Diante disso, para melhorar o desempenho ambiental de uma ETE, algumas ferramentas de gerenciamento podem ser empregadas, tais como a AFM e a AFE.

3.3.1 Análise de fluxo de materiais (AFM)

A AFM tornou-se uma ferramenta de suporte à tomada de decisões utilizada, por exemplo, no gerenciamento de recursos, gerenciamento de resíduos e gerenciamento ambiental. A AFM possui o mesmo princípio empregado em balanços de massa e avalia de forma sistemática os fluxos e estoques de materiais em um espaço e tempo definidos (BRUNNER e RECHBERGER, 2005).

De acordo com Brunner e Rechberger (2005), por meio da avaliação da entrada, saída e estoque de determinados materiais, ou seja, da AFM, é possível visualizar fluxos de resíduos, bem como identificar suas fontes geradoras. Essa metodologia permite ainda identificar pequenas mudanças que não poderiam ser verificadas em curto período de tempo e que, no entanto, tornam-se evidentes na avaliação do fluxo de materiais. Além disso, a AFM pode ser associada, entre outros, à análise de energia, à economia de recursos e ao planejamento de tarefas.

Binder et al. (2009) citam o potencial de aplicabilidade da AFM às seguintes áreas:

- melhoria do gerenciamento de materiais de forma a otimizar a exploração, o consumo e a proteção ambiental;
- criação de programas de monitoramento;
- como ferramenta para identificar os impactos dos diferentes cenários do desenvolvimento socioeconômico; e,
- identificação dos possíveis problemas relacionados à escassez, emissões e resíduos.

Antes de se tornar uma ferramenta amplamente utilizada, o princípio do balanço de massa já era aplicado em diversos campos, como economia, engenharia, química e medicina. Em 1936, Leontief foi pioneiro na aplicação desse instrumento quando demonstrou, por meio de análises de entradas e saídas, problemas econômicos em escala nacional (BINDER, 2009).

Ainda de acordo com o mesmo autor, a AFM é utilizada desde os anos 60 para identificar e compreender o fluxo de materiais dentro de uma sociedade,

possibilitando entender, por exemplo, o crescimento populacional e industrial de algumas regiões.

A AFM passou a ser aplicada no estudo da conservação dos recursos e no gerenciamento do meio ambiente somente na década de 70, sendo utilizada originalmente no campo do estudo do metabolismo das cidades e na análise de poluentes em áreas como bacias hidrográficas ou zonas urbanas. Na sequência, passou a ser uma ferramenta consolidada no controle de processos, tratamento de efluentes e resíduos, gerenciamento da qualidade da água, entre outros (BRUNNER e RECHBERGER, 2005).

Atualmente, a AFM é aplicada principalmente no gerenciamento ambiental, na ecologia industrial, no manejo de recursos, no gerenciamento de resíduos e em sistemas antropogênicos (BRUNNER e RECHBERGER, 2005). Bauer (2009) menciona em seu trabalho que a AFM pode ser aplicada, por exemplo, na avaliação do impacto ambiental causado pelos diversos tipos de geração de energia e os insumos necessários para sua produção, relacionando-o ainda ao contexto da economia global.

Bertram et al. (2009), por sua vez, aplicaram a AFM na indústria do alumínio, com o objetivo de melhor compreender os estoques e os fluxos do alumínio e reconhecer suas mudanças ao longo do tempo.

A AFM foi utilizada por Yokoyama et al. (2009) para estudar o fluxo do fósforo no Japão, um elemento de extrema importância para a agricultura e pecuária e cada vez mais escasso no mundo. Para tanto, foram utilizados dados estatísticos referentes ao ano de 2002, que incluíam informações de indústrias de ferro e aço. Os autores perceberam que o fósforo poderia ser recuperado da escória de siderúrgicas por meio de um novo processo com benefícios ambientais e econômicos, uma vez que se trata de um resíduo dessas indústrias.

Segundo Kowalski e Huttler (1999), ao avaliar o fluxo de materiais de um sistema, pode-se olhar para o sistema como um todo em termos de matéria e/ou energia, e pode-se avaliar, por exemplo, somente as entradas do sistema a fim de identificar suas saídas ou vice-versa.

Bauer (2009) avaliou a utilidade da AFM diante da crescente restrição imposta pela política ambiental dos Estados Unidos, como uma ferramenta eficaz para avaliação dos impactos ambientais dos setores econômicos. De acordo com o

autor, a AFM poderia ser aplicada, por exemplo, para avaliar o impacto ambiental de cada estágio do ciclo de vida da energia elétrica, desde sua geração até o consumo final, levando-se em consideração ainda a infraestrutura para produção e transmissão da energia e os materiais utilizados para tais fins. A AFM pode ser útil também para ajudar a identificar em quais pontos do fluxo de materiais podem ser inseridas tecnologias limpas com o maior efeito positivo possível.

Por meio da AFM, Russi et al. (2008) compararam o fluxo de materiais do Chile, México, Equador e Peru e identificaram que, entre os anos de 1980 e 2000, a extração de recursos naturais cresceu constantemente nos quatro países avaliados. Essa informação é relevante, pois a AFM possibilita a comparação entre fluxos de materiais de diferentes localidades e até mesmo da mesma localidade, mas em períodos diferenciados. .

Eckelman e Chertow (2009) reportaram em seu trabalho a aplicação da AFM na ilha de Oahu, localizada no estado do Havaí pertencente aos Estados Unidos, com o intuito de avaliar o gerenciamento dos resíduos gerados na região. Os resultados dessa avaliação possibilitaram identificar a oportunidade de utilizar os resíduos gerados em substituição à importação de alguns materiais, principalmente aqueles da construção civil e, reduzir, conseqüentemente, a geração de resíduos. Em resumo, os autores identificaram várias oportunidades de aumentar a autossuficiência de materiais na ilha e de reduzir o volume de resíduos a serem gerenciados.

Herva et al. (2012) aplicaram a AFM, por exemplo, na avaliação ambiental de uma indústria têxtil e identificaram que o processo de corte do tecido requeria ações prioritárias para minimizar os impactos ambientais negativos da fábrica. Por meio da AFM, Navazo et al. (2013) identificaram que é possível recuperar cobre em indústrias de reciclagem de aparelhos celulares, gastando metade da energia requerida pela extração primária do produto. Por sua vez, Tonini et al. (2014) utilizaram a AFM e a AFE para avaliar a recuperação de bioenergia, materiais e nutrientes em uma refinaria de resíduos municipais. Esses pesquisadores observaram que é possível reaproveitar mais da metade da matéria seca presente no fluxo de biolíquido e produzir 6,2 GJ de energia química a partir do uso do biogás proveniente da decomposição de resíduos domiciliares.

A AFM, quando focada em uma determinada substância, é conhecida também pela denominação de análise do fluxo de substância (AFS) e é, geralmente, motivada pela preocupação gerada por algum poluente específico ou até mesmo pela escassez de recurso. Entre os exemplos da aplicação da AFM para substâncias, pode-se elencar a determinação de metais pesados, nutrientes e poluentes traço existentes em recursos hídricos e até mesmo em regiões urbanas (BINDER et al., 2009).

Mastellone et al. (2009) definiram, por meio da AFS, seis propostas de gerenciamento de resíduos para a região de Campânia na Itália. Para cada cenário proposto, as substâncias foram quantificadas em relação ao processo a que poderiam ser submetidos, como: incineração, digestão anaeróbia, tratamento para disposição final em aterros, reciclagem e geração de energia a partir dos resíduos. A avaliação dos fluxos de substâncias permitiu identificar que a combinação dos processos de reciclagem, tratamento térmico, digestão anaeróbia e otimização do aterro sanitário atende de maneira mais efetiva a política de gerenciamento de resíduos da região.

A aplicação da AFM em ETEs ainda é pouco explorada. A metodologia mais utilizada em ETEs é o balanço de massa, principalmente para avaliar o desempenho de reatores anaeróbios.

Dantas et al. (2002), por exemplo, aplicou o balanço de massa de DQO em reator anaeróbio tratando resíduos sólidos orgânicos por batelada e Oliveira e Foresti (2004) aplicaram o balanço de massa da DQO em reatores anaeróbios tratando efluentes da suinocultura. Em ambos os casos, foi possível identificar por meio do balanço de massa qual o percentual de DQO transformado em metano, dentre outras informações relativas ao processo de tratamento anaeróbio.

Já Sá (2011) utilizou o balanço de massa para estimar a formação do gás sulfídrico em um reator UASB e verificou que a produção de H_2S está relacionada, em maior parte, ao consumo de acetato, seguido do consumo de hidrogênio e da degradação do propionato.

Pegorini et al. (2003) concluíram, utilizando o balanço de massa, que a produção de lodo em Curitiba e região metropolitana varia de acordo com a população atendida pela ETE e o tipo de tratamento adotado (aeróbio e anaeróbio).

Somente mais recentemente a AFM passou de fato a ser aplicada em ETEs, como foi o caso de Yoshida et al. (2014) que utilizaram tal ferramenta para avaliar o destino do carbono orgânico total e de quatro grupos de poluentes orgânicos em uma ETE, composta basicamente por tratamento aeróbio do esgoto, tratamento anaeróbio do lodo e incinerador. A partir da avaliação, os autores identificaram que os elementos orgânicos e inorgânicos se acumularam no lodo do esgoto, com exceção da parte solúvel ou da parte que foi digerida nos processos de tratamento.

Yoshida et al. (2014) verificaram ainda que grande parte dos metais também ficou retida na cinza do incinerador e que os poluentes orgânicos foram eliminados de forma efetiva pelos processos de tratamento da ETE. Além disso, os autores identificaram que o retorno dos resíduos gerados nos processos de desaguamento e de incineração para o início do processo contém fluxos de substâncias significativos para o processo e que, por este motivo, não podem ser desprezados.

3.3.2 Eficiência energética em ETEs e análise de fluxo de energia (AFE)

De acordo com Deublein e Steinhauser (2011), em um cenário otimista com crescimento sustentável, no período de 1990 a 2100, o consumo de energia crescerá 7 vezes. Esse aumento no consumo é esperado baseado na hipótese de que a população mundial passará de 6 bilhões para 10 bilhões de pessoas, além do acelerado crescimento econômico de países emergentes. Nesse contexto, o uso de fontes renováveis de energia, como a biomassa, deve ser ampliado diante da crescente demanda de energia.

Uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto pode ser considerada uma fonte produtora de energia, tanto pelo biogás quanto pelo lodo gerados no processo de tratamento. Existem diversos estudos disponíveis em literatura sobre o reaproveitamento energético do biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgotos e em digestores anaeróbios para tratamento do lodo.

Justi et al. (2013) estudaram a viabilidade do reaproveitamento do biogás para geração de energia elétrica pelas ETEs localizadas na cidade de Dourados (MS) baseada na Resolução Normativa nº 482/12 da Agência Nacional de Energia

Elétrica (ANEEL). Essa resolução estabelece condições gerais para o acesso de micro e minigeração de energia e o sistema de compensação de energia elétrica, que de maneira geral beneficia o reaproveitamento energético em ETEs. Os autores verificaram em seu trabalho que a ETE, dotada de reator anaeróbio, poderia gerar energia suficiente para suprir seu próprio consumo, além do consumo de pelo menos outra ETE por eles avaliada.

Zilotti (2013) avaliou a produção de biogás em um RALF localizado na cidade de Cascavel-Paraná, vislumbrando a geração de energia elétrica em horário de ponta para atendimento de uma estação de tratamento de água. De acordo com o autor, o volume de biogás gerado seria capaz de produzir 35.459 kWh_e / mês.

De acordo com Lobato (2011), a tecnologia com maior custo-benefício para o reaproveitamento do biogás é a combustão direta com reaproveitamento da energia térmica, podendo ser aplicada inclusive em ETEs de pequeno porte ou em reatores com baixa recuperação do metano. Dentre as alternativas de cogeração de eletricidade e calor a que emprega motores de combustão interna é a que apresenta mais vantagens com relação a fatores econômicos, confiabilidade e simplicidade tecnológica, favorecendo o seu uso em países em desenvolvimento. Esta última opção somente é viável em ETEs que possuem alta capacidade de produção e recuperação do metano. Em seu trabalho, Lobato (2011) gerou 1,35 kWh_e / Nm³ de biogás a partir da cogeração de energia elétrica e térmica, que foi suficiente para abastecer seu protótipo e ainda gerar um excedente de kWh_e / Nm³ de biogás consumido.

O lodo de ETEs também pode ser utilizado como biomassa para cogeração de energia elétrica e térmica. Alguns estudos foram realizados no sentido de verificar as características físico-químicas do lodo e o potencial de seu reaproveitamento. O poder calorífico inferior (PCI) é um dos principais parâmetros para a avaliação do potencial energético dos materiais.

O PCI do lodo da ETE Jardim das Flores em Rio Claro (SP) para recuperação de energia por meio de sua queima foi avaliado por Lee e Santos (2011), os quais verificaram que o mesmo variou nos meses analisados (14,02 MJ / kg em base seca em fevereiro e 16,74 MJ / kg em base seca em maio). Os autores avaliaram ainda as características das cinzas resultantes da combustão

do lodo com o intuito de reaproveitá-las na indústria de cimento, tijolos e de cerâmica.

Borges et al. (2008) também analisaram o PCI do lodo proveniente do tratamento de esgoto sanitário e obtiveram PCI de $(18,6 \pm 0,6)$ MJ/kg em base seca. Segundo os autores, a eficiência da liberação de energia pela combustão pode ser aumentada quanto maior for o teor de carbono e hidrogênio.

Da mesma forma, Possetti (2013) caracterizou o lodo proveniente de três ETEs localizadas em Curitiba-Paraná, encontrando para o lodo da ETE Atuba Sul um PCI de 2.000,66 kcal / kg em base seca; para o da ETE Santa Quitéria um PCI de 3.856,59 kcal / kg em base seca e 4.535,80 kcal / kg em base seca para a ETE Belém. Para comparação entre os PCIs obtidos pelos diversos autores, pode-se unificar todos os valores na unidade kcal / kg, multiplicando-se a unidade MJ / kg por 238,85.

Sob a mesma ótica, a espuma também pode ser utilizada como biomassa para geração de energia. Ross et al. (2013) avaliaram o PCI deste subproduto do tratamento em duas ETEs de Curitiba-Paraná. Os autores reportam um PCI de (1.884 ± 1.202) kcal / kg em base seca para a espuma da ETE Atuba Sul e (1.700 ± 1.135) kcal / kg em base seca para a espuma da ETE Padilha Sul.

Apesar de todos esses produtos constituírem fonte de energia renovável para a própria ETE, os investimentos neste ramo ainda são muito incipientes. Soma-se ainda o fato de pouco se conhecer os processos de tratamento e suas demandas de energia, bem como o potencial energético da ETE.

A Alemanha identificou a necessidade de aumentar a eficiência energética no setor do saneamento e elaborou uma norma, denominada DWA-A 216, que preconiza a verificação e análise energética periódica em ETEs. A norma propõe procedimentos para verificação rápida anual com base no consumo de energia por habitante, dado em kWh_e / hab.ano, de cada processo ou da ETE completa para verificação com valores característicos. Além disso, propõe a análise detalhada do processo, caso a verificação aponte dados divergentes dos valores característicos e classifica as ações necessárias no processo analisado de acordo com a prioridade de resolução para aumentar a eficiência energética.

Lima (2005) avaliou, sob o ponto de vista de eficiência energética, 6 ETEs, localizadas em Minas Gerais e São Paulo e verificou que, em geral, há um baixo

interesse das prestadoras de serviço de saneamento em monitorar a eficiência energética de suas ETEs. O autor observou que a ETE Barueri foi a única ETE a possuir os dados de consumo de energia elétrica separados por processo de tratamento e que os tanques de aeração são responsáveis por 50% do consumo elétrico e que a estação elevatória consome 30% do total.

O balanço energético ou a AFE pode vir ao encontro dessa necessidade. Por meio dessa ferramenta, pode-se avaliar a demanda e o potencial de geração de energia para a operação de cada processo de tratamento de uma ETE. É uma ferramenta que pode ser utilizada como apoio na tomada de decisão, uma vez que viabiliza a identificação de tecnologias sustentáveis do ponto de vista energético.

O trabalho realizado por Lima (2005) comparou o processo de tratamento aeróbio e o anaeróbio das ETEs estudadas por meio do parâmetro de eficiência energética, dado por kWh / kg DQO_{aplicada}. O autor concluiu por meio do balanço energético elaborado para cada ETE, que a quantidade de biogás formado nos reatores UASB é maior que a quantidade gerada em digestores anaeróbios de lodo de processos aeróbios.

A AFE foi utilizada por van Handeel (2009) para avaliar o potencial de geração de energia a partir do lodo em dois sistemas: em um sistema de tratamento aeróbio com digestão anaeróbia do lodo e em um sistema de tratamento anaeróbio com secagem de lodo. A aplicação da AFE permitiu que o autor comparasse os dois sistemas avaliados energeticamente e concluísse que no sistema de tratamento anaeróbio o potencial de geração de energia é maior que no outro sistema e que a demanda de energia é consideravelmente menor. Segundo o autor, teoricamente o uso do lodo pode tornar os sistemas anaeróbios autossuficientes em termos energéticos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 A ETE INVESTIGADA

Este trabalho teve como objeto de estudo a ETE Santa Quitéria, a qual se localiza no município de Curitiba – Paraná e é operada pela Sanepar. A FIGURA 3 apresenta a localização geográfica da ETE, bem como uma foto de sua vista aérea. Considerada uma estação de médio porte, atualmente tem capacidade para tratar até 420 L/s de esgoto, o que equivale a uma população atendida de aproximadamente 200 mil habitantes. Essa ETE conta com três elevatórias de esgoto bruto contribuintes, além do esgoto que chega por gravidade.

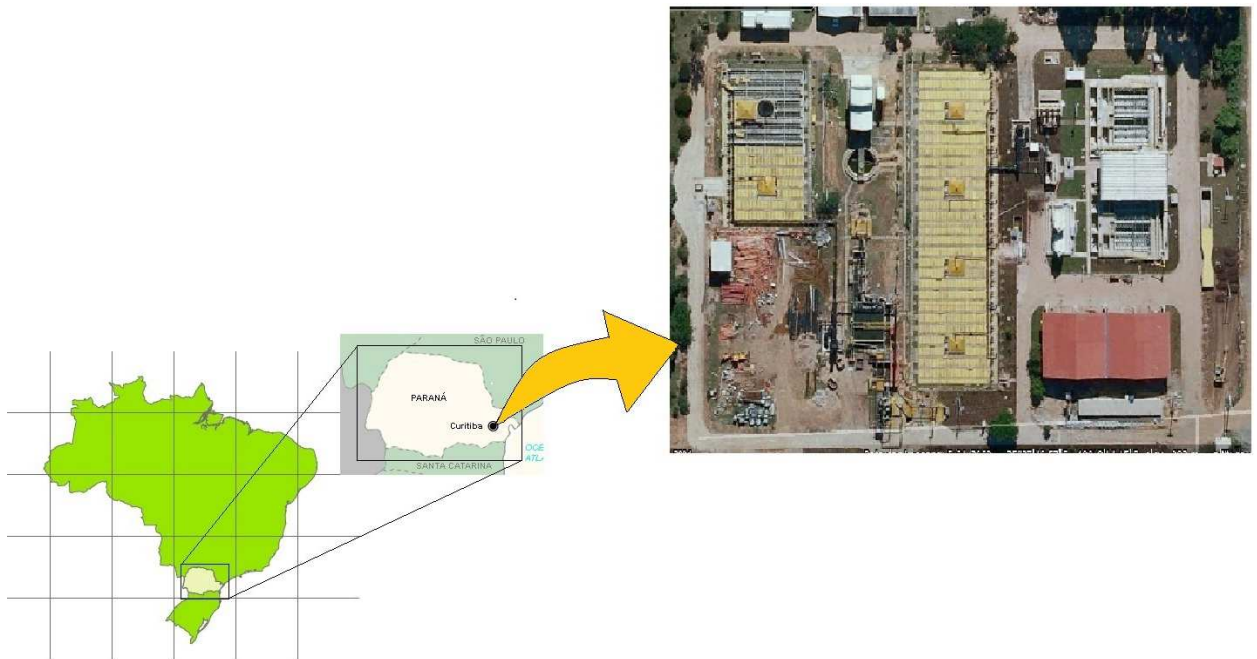


FIGURA 3 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E FOTO DA VISTA AÉREA DA ETE SANTA QUITÉRIA

FONTE: Google Earth (2014).

A ETE entrou em operação no ano de 1999 e continha, inicialmente, uma grade mecanizada e um desarenador como tratamento preliminar, seis RALFs para tratamento biológico e um sistema de desaguamento e higienização do lodo.

Posteriormente, a ETE sofreu ampliação para implantação do sistema de pós-tratamento de esgoto com FADs, cuja operação teve início em 2010.

Na FIGURA 4 é apresentado o percurso do esgoto desde sua chegada na ETE até o seu lançamento no rio Barigui (fluxo em vermelho), bem como são identificadas suas unidades operacionais.

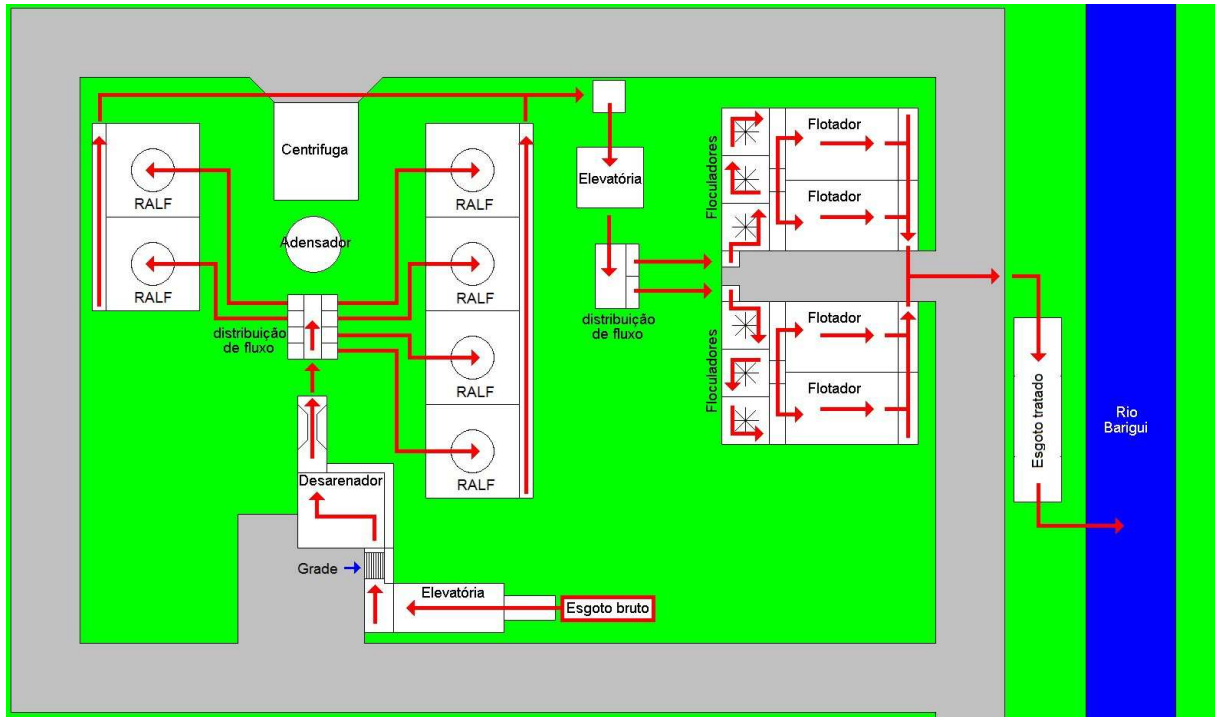


FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DA ETE SANTA QUITÉRIA

Quando chega à estação, o esgoto passa primeiramente por uma elevatória de recuperação de nível, por uma grade mecanizada, por um desarenador com remoção de fundo mecanizada e por um medidor de vazão ultrassônico localizado em uma calha Parshall.

Na sequência, o esgoto é distribuído igualmente para seis RALFs. Os efluentes dos reatores recebem a adição de peróxido de hidrogênio para oxidação do sulfeto, evitando assim sua liberação para a atmosfera e, em seguida, são encaminhados para dois FADs que operam em paralelo.

O lodo excedente removido tanto dos reatores anaeróbios quanto dos flotadores é direcionado para o adensador, sendo, na sequência, encaminhado para uma centrífuga desaguadora. Após, o lodo é misturado com cal e é enviado para a ETE CIC Xisto, uma Unidade Gerenciadora de Lodo (UGL), para estocagem e posterior envio para a agricultura.

O biogás, gerado na digestão anaeróbia e acumulada nas câmaras de gás dos RALFs, é encaminhado para a combustão em queimadores abertos.

4.1.1 Gradeamento mecanizado

A ETE Santa Quitéria possui gradeamento mecanizado de dois braços, cujas grades de barras são curvas com espaçamento entre barras de 20 mm. A limpeza do gradeamento é realizada por dois rastelos localizados em extremidades opostas com acionamento mecânico de rotação temporizada, trabalhando 4 minutos e com paradas de 12 minutos. Os resíduos removidos são encaminhados, por meio de uma esteira, para uma caçamba onde são acondicionados.

A FIGURA 5 apresenta uma foto do sistema de gradeamento da ETE Santa Quitéria, bem como uma foto da caçamba onde os resíduos sólidos grosseiros removidos são armazenados.

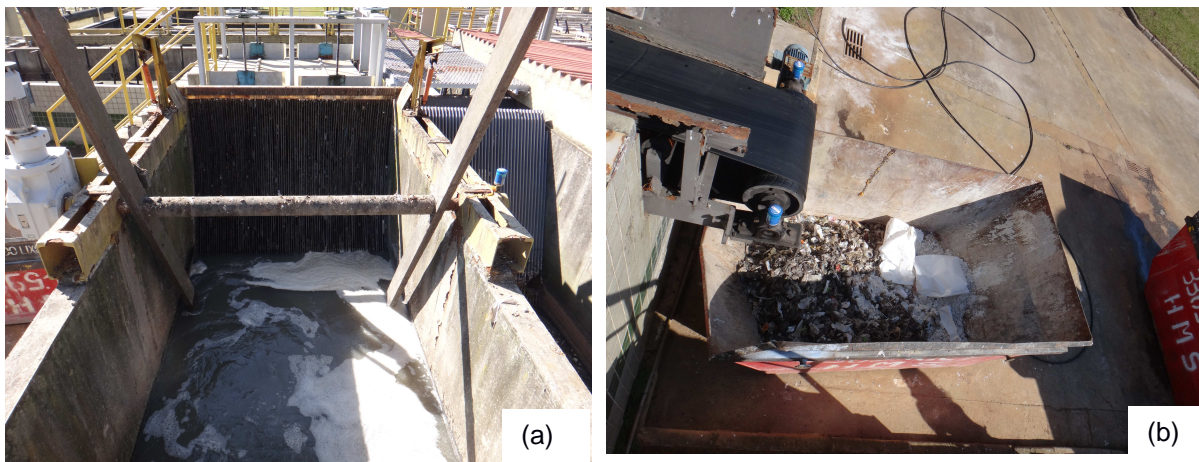


FIGURA 5 – (a) SISTEMA GRADEAMENTO E (b) ESTEIRA TRANSPORTADORA E CAÇAMBA DE RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS DA ETE SANTA QUITÉRIA

4.1.2 Desarenador

O sistema de remoção de areia da ETE Santa Quitéria é constituído por desarenador gravitacional quadrado do tipo “dorr Oliver” com remoção mecanizada da areia que por força gravitacional sedimenta no fundo do tanque. Existem pás defletoras reguláveis na entrada do tanque, que se adequadamente posicionadas, distribuem o esgoto uniformemente sobre toda a superfície do desarenador. Dois raspadores de fundo encaminham a areia sedimentada até o transportador inclinado que se encarrega de direcionar o material até a caçamba.

A FIGURA 6 apresenta as fotos do desarenador prismático de fluxo horizontal com limpeza de fundo mecanizada e do transportador inclinado que encaminha a areia até a caçamba, onde é armazenada temporariamente.



FIGURA 6 – SISTEMA DE REMOÇÃO DE AREIA DA ETE SANTA QUITÉRIA: (a) DESARENADOR COM LIMPEZA DE FUNDO MECANIZADA E (b) TRANSPORTADOR INCLINADO E CAÇAMBA DE AREIA

4.1.3 Reatores anaeróbios

A ETE Santa Quitéria possui seis RALFs de 2.000 m³ com dimensões de 21 m x 21 m x 5 m e capacidade para tratar 70 L / s de esgoto cada. Os reatores são totalmente enterrados e estão dispostos em duas linhas paralelas, sendo 4 reatores em uma linha e 2 reatores em outra linha (FIGURA 7).

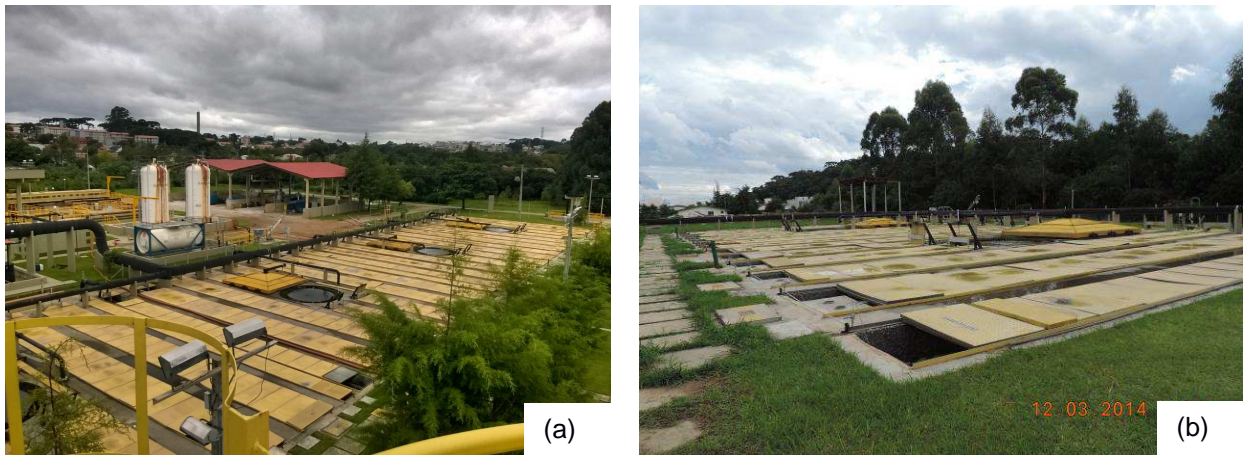


FIGURA 7 – RALFs DA ETE SANTA QUITÉRIA: (a) LINHA COM 4 REATORES E (b) LINHA COM 2 REATORES

O descarte de lodo em excesso é realizado por registros de fundo. O lodo descartado é enviado para o adensador de lodo por uma bomba submersível, para na sequência ser desaguado na centrífuga.

Atualmente, o sistema de coleta e queima do biogás é composto por um queimador para cada dois reatores e não há medição do volume de biogás que é captado e queimado. Na FIGURA 8 pode-se visualizar um dos queimadores abertos de biogás da planta. Esses queimadores são equipados com centelhadores elétricos automáticos, alimentados com energia solar. Para auxiliar no controle de maus odores é realizada a aplicação de peróxido de hidrogênio no efluente líquido dos RALFs. O peróxido de hidrogênio é armazenado em um tanque com volume de 17,5 m³.

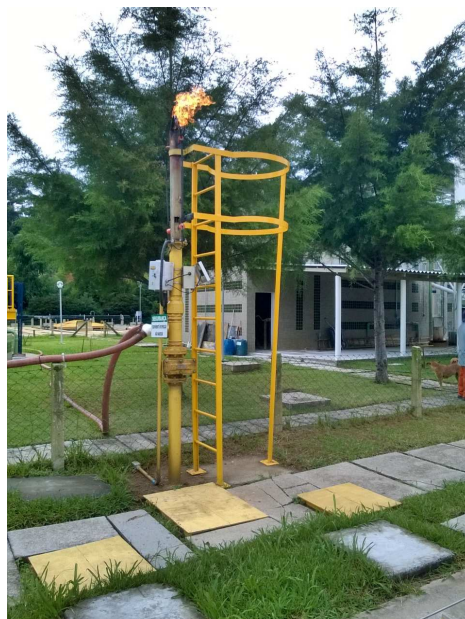


FIGURA 8 – FOTO DE UM DOS QUEIMADORES ABERTOS DE GÁS DA ETE SANTA QUITÉRIA

4.1.4 Flotação por ar dissolvido

Existem dois FADs que operam em paralelo na ETE Santa Quitéria. Como os RALFs encontram-se em uma cota inferior à cota dos flotadores, o efluente necessita passar por uma estação elevatória para recuperação de nível. Tal estação opera geralmente com duas bombas simultâneas. Cada flotador é composto por uma bomba dosadora de coagulante, um tanque de ar comprimido, um tanque de saturação, uma bomba de recirculação, uma bomba de recalque de lodo flotado, raspadores de lodo, uma câmara de mistura rápida, três câmaras de mistura lenta e dois tanques de flotação.

A capacidade nominal de cada flotador é de 280 L / s. O coagulante utilizado atualmente é o cloreto férrico, que é aplicado na terceira câmara de mistura lenta. O armazenamento do cloreto férrico é realizado em dois tanques com volume de 45 m³ cada.

O esgoto afluente é distribuído pela parte superior do tanque de flotação, enquanto a água saturada é inserida na parte inferior do tanque. Os sólidos contidos no esgoto e que flutam pelo processo são removidos pelos raspadores (FIGURA 9b), sendo encaminhados ao adensador de lodo.

A FIGURA 9 apresenta fotos dos FADs localizados na ETE Santa Quitéria.

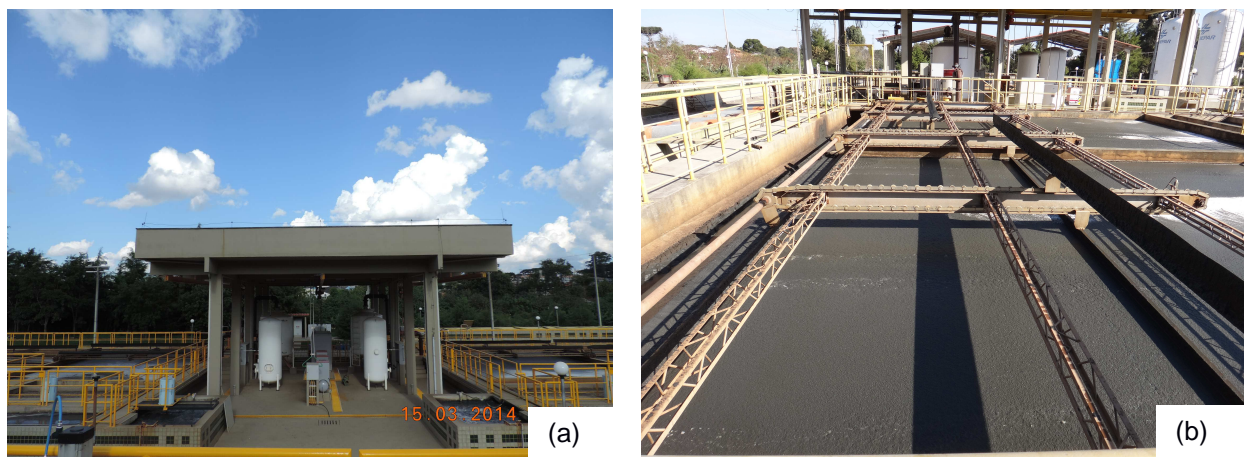


FIGURA 9 – FADs DA ETE SANTA QUITÉRIA: (a) VISTA GERAL E (b) VISTA DE UM DOS MÓDULOS DE FLOTAÇÃO COM LODO FLOTADO E RASPADORES

4.1.5 Sistema de desaguamento de lodo

O sistema de desaguamento de lodo é composto por um adensador de lodo e por uma centrífuga desaguadora com sistema de higienização de lodo. O lodo é recalcado do adensador para a centrífuga por meio de bomba helicoidal.

No ano de 2012, o sistema de desaguamento de lodo da ETE Santa Quitéria foi ampliado e a centrífuga foi substituída por outra com capacidade 30% maior. A nova centrífuga possui capacidade para desaguar até 6 m³ / h de lodo contendo de 3 a 5% de sólidos totais. Para melhorar o processo de desaguamento, um polímero catiônico de média carga, com concentração de 0,3%, é adicionado ao lodo ainda líquido. O polímero é preparado em um tanque de 3 m³ e dosado com bomba do tipo helicoidal ou bomba diafragma.

A FIGURA 10 ilustra a estrutura do desaguamento e higienização de lodo da ETE Santa Quitéria após a sua ampliação.

Na saída da centrífuga, a torta recebe adição de cal por meio de rosca dosadora e, na sequência, passa por um misturador para que os dois materiais sejam bem homogeneizados.

A cal virgem, utilizada para higienizar o lodo na ETE Santa Quitéria, é armazenada em um silo com capacidade para estocar até 15 toneladas do produto. O lodo higienizado é acondicionado temporariamente em 4 caçambas com 7 m³ cada, as quais, diariamente, são transportadas para a ETE CIC Xisto, também operada pela Sanepar, onde ocorre o transbordo do lodo para estocagem e cura.



FIGURA 10 – SISTEMA DE DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODOS DA ETE SANTA QUITÉRIA

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Estudo dos fluxos de materiais

A aplicação da AFM baseou-se na metodologia proposta por Brunner e Rechberger (2005). Para tanto, alguns termos comuns à metodologia foram empregados neste trabalho. O termo “material”, por exemplo, foi utilizado para designar todo insumo (produto químico) consumido e produtos e subprodutos gerados na ETE.

“Processo” foi o termo utilizado para definir a transformação, transporte ou armazenamento de materiais; e, “fluxo” para designar a quantidade de material que entrou ou saiu dos processos em determinado período de tempo. O termo “sistema” foi utilizado para descrever o objeto sob investigação da AFM.

Este estudo englobou os seguintes processos de tratamento da ETE Santa Quitéria: elevatória de recalque de esgoto bruto, gradeamento, remoção de areia, tratamento biológico composto pelos reatores anaeróbios, pós-tratamento por FADs e sistema de desaguamento e higienização de lodo. Conseqüentemente, os materiais (insumos, produtos e subprodutos) inerentes a estes processos foram identificados, o que deu origem ao fluxograma de materiais da ETE. Para quantificação dos materiais, utilizaram-se os dados históricos operacionais referentes ao ano de 2013.

Os fluxos de materiais identificados foram classificados em três categorias: fase sólida, fase líquida e fase gasosa. A representação gráfica desses fluxos juntamente com o limite de abrangência da AFM pode ser visualizada na FIGURA 11.

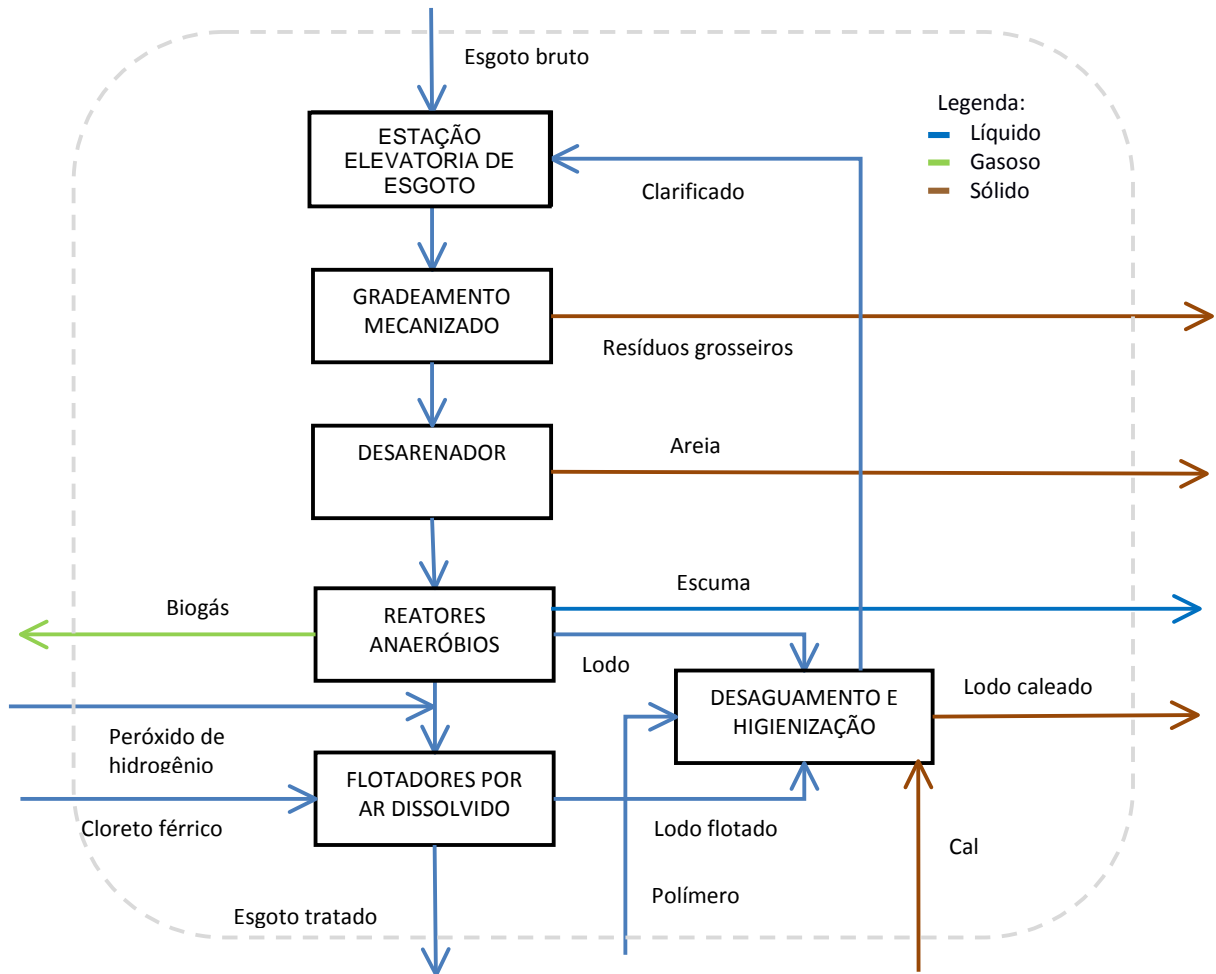


FIGURA 11 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO FLUXO DE MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA CLASSIFICADOS DE ACORDO COM O ESTADO FÍSICO DOS MATERIAIS

Com o intuito de assegurar consistência dimensional, as entradas, as saídas e os estoques de todos os materiais foram convertidos para unidade volumétrica (m^3) por ano. Isso porque esta é a unidade operacional predominantemente utilizada no setor de saneamento, principalmente para os registros da vazão de esgoto e de biogás, para a dosagem de produtos químicos e para a contratação e acompanhamento do transporte e destinação final dos resíduos sólidos grosseiros, areia, lodo e espuma.

A seguir são apresentados sucintamente os critérios utilizados para quantificação de cada material, consumido ou gerado, pelos processos existentes na ETE Santa Quitéria, além da forma como cada dado foi trabalhado e convertido para a unidade m^3 / ano.

4.2.1.1 Esgoto bruto

A vazão do esgoto que chega na ETE é mensurada por meio de um medidor ultrassônico posicionado na calha Parshall existente após o desarenador. Este medidor permite o acompanhamento da vazão pelos operadores a partir do supervisor da sala de controle. Tal medidor registra ainda o volume acumulado (em m³) em um *display* localizado no quadro de comando das bombas da elevatória de esgoto bruto. Diariamente às 0 h foi realizada a leitura neste *display* do volume acumulado, possibilitando o cálculo da vazão diária (em m³/dia), por meio do qual foi gerado o volume de esgoto tratado por mês pela ETE Santa Quitéria.

Como a medição ocorre após o desarenador, esta não incluiu o volume de resíduos removidos no gradeamento mecanizado e no desarenador, mas englobou o volume de clarificado do adensador e da centrífuga que retornou para o início do sistema na elevatória de recalque de esgoto bruto. Diante disso, do dado de volume de esgoto bruto tratado no ano de 2013, descontou-se o volume de retorno do clarificado do adensador e da centrífuga e adicionou-se o volume de resíduos retirados no gradeamento mecanizado e desarenador para compor o volume de esgoto bruto que chegou à ETE no ano de 2013.

4.2.1.2 Resíduos sólidos grosseiros

Os volumes de resíduos sólidos grosseiros foram medidos conforme o número de caçambas cheias do material que foram removidas da ETE para o aterro sanitário. Dessa forma, multiplicando-se o número de caçambas removidas por sua respectiva capacidade de armazenamento (5 m³), calculou-se o volume anual de resíduos sólidos grosseiros removidos.

4.2.1.3 Areia

Para a quantificação da remoção de areia, procedeu-se com o mesmo critério de medição apresentado para os resíduos sólidos grosseiros (número de caçambas multiplicado pela capacidade de armazenamento). Entretanto, como ocorreram paradas por quebra do equipamento eletromecânico responsável pela

raspagem da areia no fundo do tanque de desarenação, durante o período avaliado, foi necessária a realização de limpezas com caminhão de sucção nos períodos em que o equipamento ficou parado. Diante disso, a soma do volume de areia das caçambas foi acrescida do número de caminhões de sucção utilizados para limpeza do tanque de desarenação multiplicado pela capacidade de armazenamento de cada caminhão.

4.2.1.4 Escuma

A geração de espuma foi contabilizada a partir da quantidade de caminhões de sucção contendo reservatórios de 16 m³ necessários para remover e transportar a espuma a cada ciclo de limpeza, que aconteceu bimestralmente. A espuma foi empurrada manualmente até um poço, sendo posteriormente succionada e conduzida no interior de um mangote ligado ao reservatório do caminhão. O material retirado foi transportado para a ETE Belém, local onde foi tratado.

4.2.1.5 Lodo dos reatores anaeróbios

O lodo excedente dos RALFs foi removido de acordo com a capacidade de processamento da centrífuga desaguadora e com a altura do manto de lodo de cada reator, a qual foi verificada periodicamente. O volume removido foi registrado sempre que um descarte foi realizado, sendo quantificado pelo cálculo da diferença entre o nível de água inicial e final, multiplicada pela área do reator manobrado.

4.2.1.6 Peróxido de hidrogênio e cloreto férrico

O consumo de peróxido de hidrogênio, utilizado para controle de odor gerado pelo gás sulfídrico decorrente do tratamento anaeróbio, e de cloreto férrico, utilizado como coagulante nos FADs, foram contabilizados mensalmente verificando-se a diferença entre as entradas dos produtos desde o primeiro dia e o estoque existente no último dia de cada mês. Embora o monitoramento operacional desses produtos seja realizado em tanques com escala volumétrica, os pedidos de compra e controle de consumo mensal são realizados em unidade mássica. Portanto, os dados referentes ao consumo de produtos químicos sofreram conversão dividindo-

se a massa do produto químico por sua respectiva densidade, sendo 1,2 g / cm³ para o peróxido de hidrogênio a 50% e 1,4 g / cm³ para o cloreto férrico, de acordo com dados dos fabricantes Peróxidos do Brasil e Vitaquímica, respectivamente.

4.2.1.7 Biogás

A ETE Santa Quitéria ainda não possui dispositivos para mensurar o volume de biogás produzido por seus reatores anaeróbios. Sendo assim, utilizou-se o modelo proposto por Lobato et al. (2012) para estimar a produção de gás da ETE, o qual se baseia no balanço de massa da DQO. Tal balanço considera as parcelas envolvidas na digestão anaeróbia e as possíveis perdas do processo. A produção de biogás pode ser calculada, então, por meio das seguintes equações:

$$DQO_{rem} = Q_{média} \cdot DQO_{média_aplicada} \cdot E_{DQO} \quad (2),$$

em que:

DQO_{rem} é a massa diária de DQO removida do sistema (kg DQO / dia);

$Q_{média}$ é a vazão média diária de esgoto bruto (m³ / dia);

$DQO_{média_aplicada}$ é a DQO média diária do esgoto bruto (kg DQO / m³); e,

E_{DQO} é a eficiência de remoção de DQO (%).

$$DQO_{lodo} = DQO_{rem} \cdot Y \quad (3),$$

em que:

DQO_{lodo} é a massa diária de DQO convertida em lodo (kg DQO / dia)

DQO_{rem} é a massa diária de DQO removida do sistema (kg DQO / dia)

Y é o coeficiente de produção de sólidos no sistema (kg SV / kg DQO)

$$DQO_{SO_4} = Q_{média} \cdot C_{SO_4} \cdot E_{SO_4} \cdot K_{DQO-SO_4} \quad (4),$$

em que:

DQO_{SO_4} é a DQO utilizada pelas bactérias na redução do sulfato (kg DQO_{SO₄} / dia);

$Q_{média}$ é a vazão média diária de esgoto bruto (m³ / dia);

C_{SO_4} é a concentração média de SO₄ no afluente (kg SO₄ / dia);

E_{SO_4} é a eficiência de redução de sulfato (%);

K_{DQO-SO_4} é a DQO consumida na redução de sulfato ($0,667 \text{ kg DQO}_{SO_4} \cdot \text{kg DQO}_{SO_4}^{-2}$).

$$Q_{CH_4} = \frac{(DQO_{rem} - DQO_{lodo} - DQO_{SO_4}) \cdot R \cdot (273 + T)}{P \cdot K_{DQO} \cdot 1000} \quad (5),$$

em que:

Q_{CH_4} é a produção volumétrica teórica de metano (m^3 / dia);

R é a constante dos gases ($0,08206 \text{ atm} \cdot \text{L} / \text{mol} \cdot \text{K}$);

T é a temperatura operacional do reator ($^{\circ}\text{C}$);

P é a pressão atmosférica (1 atm);

K_{DQO} é a DQO correspondente a um mol de CH_4 ($0,064 \text{ kg DQO} / \text{mol}$).

$$Q_{W-CH_4} = Q_{CH_4} \cdot p_w \quad (6),$$

em que:

Q_{W-CH_4} é a perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (m^3 / dia);

p_w é o percentual de perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (%).

$$Q_{O-CH_4} = Q_{CH_4} \cdot p_o \quad (7),$$

em que:

Q_{O-CH_4} corresponde a outras perdas de metano na fase gasosa (m^3 / dia);

p_o é o percentual de outras perdas de metano na fase gasosa (%).

$$Q_{L-CH_4} = Q_{m\u00e9dia} \cdot p_L \cdot f_{CH_4} \cdot R \cdot \frac{(273 + T)}{P \cdot K_{DQO}} \quad (8),$$

em que:

Q_{L-CH_4} é a perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (m^3 / dia);

p_L é a perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente (kg / m^3);

f_{CH_4} é o fator de conversão de massa de metano em massa de DQO – coeficiente estequiométrico ($4 \text{ kg DQO} / \text{kg CH}_4$).

$$Q_{real-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_{W-CH_4} - Q_{O-CH_4} - Q_{L-CH_4} \quad (9),$$

em que:

$Q_{\text{real-CH}_4}$ é a produção real de CH_4 disponível para recuperação de energia (m^3 / dia).

Para estimativa da produção real de metano, adotaram-se, portanto, os seguintes parâmetros:

- concentração de sulfato no esgoto afluente (C_{SO_4}) de 60 mg / L;
- eficiência na remoção de DQO (E_{DQO}) da ordem de 60%;
- eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) de 75%;
- coeficiente de produção de lodo pelos reatores (Y) de 0,15 kg SV / kg DQO_{rem} ;
- coeficiente de conversão de DQO em biomassa de 0,213 kg DQO_{lodo} / kg DQO_{rem} ;
- temperatura operacional do reator de 25°C;
- perda de metano na fase gasosa com o gás residual da ordem de 5%;
- perda de metano na fase líquida de 20 mg / L; e,
- outras perdas de metano na fase gasosa de 5%.

A partir desses parâmetros e com base ainda nos dados de vazão média diária e a DQO média efluente da ETE Santa Quitéria foi realizado o cálculo da produção do biogás para cada mês de 2013.

4.2.1.8 Lodo dos flotores

Até o momento da finalização deste trabalho não havia equipamentos para medição da produção de lodo flotado na ETE Santa Quitéria. Diante disso, o volume de lodo gerado nos FADs foi estimado pelo tempo de funcionamento e frequência das bombas helicoidais de recalque de lodo flotado para o sistema de desaguamento da ETE. Pela capacidade nominal das bombas, alcançadas na frequência máxima de funcionamento das mesmas, foi possível estabelecer uma relação direta entre a frequência utilizada e o tempo de funcionamento, para calcular diariamente a produção de lodo flotado (em m^3). A este volume acrescentou-se ainda o volume de lodo que decantou nos tanques de coagulação e de flotação e que foi removido por meio de caminhões de sucção. Para quantificar o volume de

lodo de fundo removido, multiplicou-se o número de caminhões utilizados nas limpezas por suas respectivas capacidades de armazenamento em m³.

4.2.1.9 *Lodo adensado*

Antes de serem encaminhados à centrífuga desaguadora, o lodo dos RALFs e o lodo dos FADs passaram pelo adensador de lodo. A vazão de lodo adensado que alimentou a centrífuga foi mensurada por meio de medidor de vazão eletromagnético, dotado de um totalizador volumétrico. Diariamente, às 0h, foram realizadas leituras deste totalizador visando quantificar o volume de lodo adensado que alimentou a centrífuga no período de 24 horas.

4.2.1.10 *Esgoto tratado*

O volume de esgoto tratado no ano de 2013 pela ETE Santa Quitéria foi calculado pela soma do volume de esgoto bruto, dos clarificados do adensamento e do desaguamento de lodo, de cloreto férrico e de peróxido de hidrogênio e subtraído do volume de resíduos sólidos grosseiros, de areia e de lodo dos RALFs e dos FADs.

4.2.1.11 *Clarificado do adensador*

Como a ETE não possui um equipamento para medição de vazão do clarificado do adensador, o volume desse material foi calculado pela soma dos volumes de lodo dos RALFs e dos FADs, subtraído do volume de lodo adensado no período avaliado.

4.2.1.12 *Polímero catiônico*

O consumo de polímero foi calculado pela diferença entre o que entrou de produto desde o início do mês e o que ainda ficou estocado no fim do mês sob análise.

O controle do consumo e os pedidos de compra de polímero catiônico utilizado no processo de desaguamento de lodo foram realizados em unidade

mássica. Entretanto, o polímero catiônico entregue na fase sólida, foi manipulado antes de seu uso como floculante no desaguamento de lodo. Dessa forma, o polímero foi dissolvido em água a uma razão de três quilogramas para cada metro cúbico de água. Para este estudo considerou-se, então, a solução de polímero catiônico para composição da AFM. Conseqüentemente, o volume de água utilizado no preparo da solução foi computado no fluxo de materiais.

4.2.1.13 *Lodo desaguado*

A quantificação do lodo desaguado foi realizada com base no volume de lodo adensado processado na centrífuga desaguadora e seu respectivo teor médio de sólidos totais e no teor médio de sólidos totais do lodo desaguado.

4.2.1.14 *Óxido de cálcio*

Após passar pela centrífuga desaguadora, o lodo foi encaminhado para o processo de higienização, denominada estabilização alcalina prolongada, sendo posteriormente reutilizado na agricultura. Entretanto, durante o levantamento, verificou-se que este processo não pôde ser realizado na própria ETE Santa Quitéria em mais de 80% do período avaliado, devido às diversas paradas dos equipamentos eletromecânicos por reparos e adaptações exigidas. Diante disso, grande parte do lodo da ETE Santa Quitéria foi caleadado em pátio com pá carregadeira na ETE CIC Xisto juntamente com o lodo de outras ETEs.

O consumo de óxido de cálcio foi, então, estimado com base na aplicação de 57% de óxido de cálcio (praticado atualmente na Sanepar) sobre a quantidade de matéria seca do lodo desaguado da ETE Santa Quitéria. Como o cálculo do consumo é realizado em unidade mássica, a massa específica do material (920 kg/m³), encontrada em informações fornecidas por fabricante (QUALLICAL, 2013), foi utilizada para converter o consumo mássico anual para a unidade volumétrica.

4.2.1.15 Lodo caaleado

O lodo caaleado corresponde ao lodo que sai da centrífuga desaguadora e que recebeu a adição de cal virgem. Dessa forma, a soma do volume do lodo desaguado e do volume de cal virgem, necessário para higienizar o lodo, corresponde ao volume de torta caaleada. Toda torta produzida na ETE Santa Quitéria foi transportada para a ETE CIC Xisto, onde o material foi estocado.

O cálculo do consumo anual de todos os insumos, produtos e subprodutos do processo da ETE relacionados foi realizado com base no somatório dos consumos mensais registrados e das estimativas da produção ou consumo mensal dos materiais que não são atualmente medidos. O QUADRO 1 apresenta um resumo dos métodos utilizados para quantificar os materiais avaliados nos processos da ETE Santa Quitéria.

Processo	Material	Classificação	Método de quantificação
Estação elevatória	Esgoto bruto	Entrada	Somatória do volume acumulado no ano, totalizado a partir das leituras indicadas pelo sensor instalado na calha Parshall, acrescido do volume de resíduos removidos no gradeamento e no desarenador e deduzidos os volumes de retorno dos clarificados do adensamento e do desaguamento de lodo
Gradeamento	Resíduos sólidos grosseiros	Saída	Número de caçambas removidas com resíduos do gradeamento multiplicado pela capacidade volumétrica de armazenamento das caçambas
Desarenação	Areia	Saída	Soma entre o número de caçambas removidas multiplicado por sua respectiva capacidade de armazenamento e o número de caminhões de sucção multiplicado por sua respectiva capacidade de armazenamento
Tratamento biológico (RALFs)	Escuma	Saída	Número de caminhões de sucção multiplicado pela capacidade de armazenamento de cada caminhão
	Lodo	Saída	Soma do volume de cada descarte de lodo realizado, que é calculado pela diferença entre o nível da água no reator no início do descarte e o nível da água no final, multiplicado pela área da base do reator
	Peróxido de hidrogênio	Entrada	Quantidade de produto consumida em quilogramas dividida pela massa específica do material (1,2 g/cm ³)
	Biogás	Saída	Estimado de acordo com o método proposto por Lobato <i>et al.</i> (2012)

continua

QUADRO 1 - MÉTODOS UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR OS MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA

conclusão

Processo	Material	Classificação	Método de quantificação
Pós-tratamento (FADs)	Cloreto férrico	Entrada	Quantidade consumida em quilogramas dividida pela massa específica do material (1,4 g/cm ³)
	Lodo flotado	Saída	Estimado por meio da medição do tempo de funcionamento e das condições de operação das bombas que recalcam o lodo flotado até o adensador somado da quantidade de caminhões de sucção destinados à limpeza de fundo dos flotadores multiplicada pela sua respectiva capacidade de armazenamento
	Esgoto tratado	Saída	Soma entre os volumes de esgoto bruto, de peróxido de hidrogênio e de cloreto férrico, subtraído da soma entre os volumes de resíduos sólidos grosseiros, de areia, de lodo dos RALFs e de lodo retirado dos FADs
Adensamento	Lodo adensado	Saída	Volume totalizado fornecido por sistema de medição instalado antes da centrífuga desaguadora
	Clarificado do adensador	Saída	Soma entre os volumes dos lodos retirados dos RALFs e dos FADs, subtraído do volume de lodo adensado
Desaguamento do lodo	Solução de polímero a 0,3%	Entrada	Consumo de polímero dividido pela concentração do produto na solução (3 kg de polímero por 1 m ³ de água)
	Lodo desaguado	Saída	Quantidade de sólidos totais presentes no lodo desaguado (ST médio = 4,5%) multiplicado pelo volume de lodo adensado e dividido pelo teor de sólidos totais no lodo desaguado (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 ideal aplicada para higienização do lodo correspondente a 57% sobre a matéria seca da torta desaguada em quilogramas multiplicada pela massa específica do material (920 kg/m ³)
	Lodo caleado	Saída	Soma entre os volumes de lodo desaguado e de óxido de cálcio

QUADRO 1 - MÉTODOS UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR OS MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA

Para elaboração do fluxo de materiais da ETE Santa Quitéria foi utilizado o programa computacional STAN, versão 2.5, da Universidade Tecnológica de Viena. Esta ferramenta permitiu a representação dos fluxos na forma de diagramas de Sankey, proporcionais às quantidades de materiais transportados entre os processos.

A partir dos dados de consumo e geração de materiais, calculou-se um indicador específico de cada etapa do processo com o intuito de facilitar o monitoramento e controle da eficiência dos processos baseado no equivalente populacional da ETE.

O equivalente populacional foi estimado a partir da DQO média mensal aplicada ($DQO_{\text{média_aplicada}}$) e da vazão de esgoto afluyente (Q_{esgoto}) no período considerado, sendo matematicamente representado por:

$$EP = \left(\frac{CA}{DQO_{\text{percapta}}} \right) \quad (10),$$

em que:

EP é o equivalente populacional, expresso em número de habitantes (hab.);
 CA é a carga diária média anual de DQO afluyente da ETE, dada em kg/dia, a partir do produto entre $DQO_{\text{média_aplicada}}$ (kg / m³) e $Q_{\text{média}}$ (m³ / dia);
 DQO_{percapta} é DQO gerada por habitante por dia, sendo adotado neste estudo o valor de 0,120 kg / hab.dia (DWA, 2012).

O indicador de consumo e geração de materiais de um determinado processo foi calculado da seguinte maneira:

$$M = \left(\frac{V_{\text{anual}}}{EP} \right) \cdot 1000 \quad (11);$$

em que:

M é o indicador do consumo ou de geração de materiais de um determinado processo da ETE, dado em L / hab.ano;
 V_{anual} é o consumo ou geração anual de materiais de um determinado processo da ETE, em m³ / ano;
 EP é o equivalente populacional característico da ETE.

4.2.2 Estudo dos fluxos de energia

Para elaboração do fluxo de energia da ETE Santa Quitéria, inicialmente, obteve-se o histórico do consumo mensal de energia elétrica da planta para o ano

de 2013. Isso porque essa foi a única modalidade de energia requerida pelos processos da ETE durante o período do estudo.

TABELA 2 - EQUIPAMENTOS DA ETE SANTA QUITÉRIA POR PROCESSO DE TRATAMENTO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Processo	Equipamentos	Potência ativa (kW)	Fator de potência	Potência aparente (kVA)
Elevatória de recalque de esgoto bruto	Bomba 1	45,0	0,83	54,2
	Bomba 2	45,0	0,83	54,2
	Bomba 3	45,0	0,83	54,2
Gradeamento	Rastelo mecânico com rotação temporizada	0,75	0,71	0,95
	Esteira transportadora	0,75	0,71	0,95
Desarenação	Raspador de fundo	0,15	0,70	0,20
	Braço mecanizado	0,75	0,71	1,10
Elevatória de recalque dos flotores	Bomba 1	38,0	0,73	52,1
	Bomba 2	38,0	0,73	52,1
Sistema de desaguamento de lodo	Bomba de recalque de lodo para o adensador	22,8	0,80	28,5
	Raspador de fundo do adensador			
	Bomba de recalque de lodo para a centrífuga			
	Centrífuga desaguadora			
	Bomba dosadora de polímero			
	Agitador do tanque de preparo de polímero			
	Misturador lodo e cal			
Sistema de higienização	Rosca dosadora de cal	0,75	0,80	0,9
	Transportadora de cal	3,0	0,80	3,8
	Desagregador do silo de cal	0,37	0,80	0,5
FAD nº 1	Agitador 1	0,38	0,71	0,5
	Agitador 2	0,38	0,71	0,5
	Bomba de recirculação	60,0	0,86	69,8
	Secador	0,17	0,90	0,2
	Bomba dosadora	0,42	0,92	0,5
	Raspador 1	0,75	0,71	1,1
	Raspador 2	0,75	0,71	1,1
FAD nº 2	Agitador 1	0,38	0,71	0,5
	Agitador 2	0,38	0,71	0,5
	Bomba de recirculação	60,0	0,86	69,8
	Secador	0,17	0,90	0,2
	Bomba dosadora	0,42	0,92	0,5
	Raspador 1	0,75	0,71	1,1
	Raspador 2	0,75	0,71	1,1
Compressores	Compressor 1	3,0	0,92	3,3
	Compressor 2	3,0	0,92	3,3
Elevatória de lodo flotado	Bomba 1	3,1	0,85	3,6
	Bomba 2	3,1	0,85	3,6

Na sequência, foi realizado *in loco*, com o apoio da unidade responsável pela manutenção da ETE, o levantamento de todos os equipamentos existentes por unidade de tratamento, bem como suas principais características técnicas. A TABELA 2 apresenta os equipamentos identificados na ETE Santa Quitéria por processo de tratamento e seus respectivos dados de potência ativa, fator de potência e potência aparente.

Devido à dificuldade em se identificar individualmente a característica de cada equipamento inerente ao processo de desaguamento de lodo, os mesmos foram apenas relacionados na TABELA 2 e suas características agrupadas em apenas um único conjunto, por meio da medição da potência ativa na entrada do quadro de energia elétrica do processo.

O consumo de energia elétrica por processo de tratamento foi estimado, uma vez que não há medidores de consumo instalados na ETE para tal fim. Para tanto, foram utilizados os dados da TABELA 2 e o tempo de operação de cada equipamento por dia (em horas). Um fator de carga foi aplicado àqueles equipamentos que operaram com inversor de frequência e/ou foram parados para manutenção no período avaliado. Assim, o consumo de energia elétrica por processo foi calculado da seguinte maneira:

$$E_{\text{elétrica}} = P \cdot t \cdot F_c \cdot 365 \quad (12);$$

em que:

$E_{\text{elétrica}}$ é o consumo de energia elétrica de um determinado processo, dado em kWh_e/ano;

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

t é tempo de operação diária do equipamento, expresso em horas (h);

F_c é o fator de carga considerado, que varia de acordo com a observação de horas efetivas de funcionamento do equipamento, levando-se em consideração paradas para manutenção e o uso de inversor de frequência.

Com base nos dados do fluxo de materiais, foram calculados os potenciais energéticos que poderiam ser gerados com o reaproveitamento do biogás, do lodo e da espuma. Para tanto, foi utilizado o poder calorífico inferior (PCI) de cada material, de acordo com a TABELA 3.

TABELA 3 - PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA

Material	PCI	Referência
Metano (presente no biogás)	9,9 kWh _q /Nm ³	SGC (2012)
Lodo	3.856,59 kcal / kg, em base seca	Possetti (2013)
Escuma	1.884 kcal / kg, em base seca	Ross et al. (2013)

Para estimar o potencial energético do biogás, calculou-se a vazão média de metano anual, levando-se em consideração um teor de metano de 75% v/v presente no biogás da ETE Santa Quitéria. O valor obtido foi, então, multiplicado pelo PCI do metano que equivale a 9,9 kWh_q/Nm³, conforme informação reportada em SGC (2012), para estimar a energia química associada ao biogás produzido na ETE. A partir desta estimativa, calculou-se ainda a quantidade de energia elétrica que poderia ser produzida a partir do biogás, considerando um grupo motogerador com rendimento de 30% (DWA, 2013).

A estimativa do potencial energético do lodo e da espuma foi realizada com base na seguinte equação:

$$E_{\text{química}} = m_{\text{b.s.}} \cdot \text{PCI} \cdot F_{\text{conv}} \quad (13);$$

em que:

$E_{\text{química}}$ é a quantidade de energia química intrínseca ao material considerado, dada em kWh_q;

$m_{\text{b.s.}}$ é a massa do material em base seca, dada em kg;

PCI é o poder calorífico inferior do material, expressa em kcal/kg de base seca;

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

A estimativa do potencial energético do lodo da ETE Santa Quitéria utilizou como base o teor médio de sólidos totais presente no lodo desaguado em 2013 de

aproximadamente 20%, por meio do qual se calculou a quantidade de matéria seca (em kg) produzida durante a operação da ETE no período. O valor encontrado foi multiplicado pelo PCI do lodo para obter a quantidade de energia disponível neste material, caso o lodo fosse utilizado como biomassa para alimentar um combustor, por exemplo.

Da mesma forma, calculou-se a quantidade de matéria seca presente na espuma da ETE Santa Quitéria utilizando o teor de sólidos totais reportado por Ross et al. (2013) de 13,24% para a ETE Atuba Sul, devido a sua semelhança com a ETE estudada, uma vez que ambas possuem o mesmo tipo de reator anaeróbio e carga orgânica afluyente semelhante. Com esses valores, efetuou-se o mesmo cálculo aplicado para a estimativa do potencial energético do lodo.

Avaliou-se o cenário hipotético também da utilização do potencial energético do biogás, do lodo e da espuma para a secagem térmica do lodo gerado na ETE. Calculou-se, então, a demanda energética necessária operar um secador térmico, considerando que para cada quilograma de água a ser evaporada do lodo demanda 1.000 kcal de energia, de acordo com testes realizados com secador térmico rotativo na Sanepar. Para conversão da unidade kcal para kWh_q utilizou-se o mesmo fator apresentado anteriormente (1,16x10⁻³ kWh_q / kcal).

A partir dos dados de consumo de energia anual e dos potenciais energéticos dos subprodutos, construiu-se o fluxo de energia da ETE sob investigação, com base no fluxograma do processo, também utilizando o programa computacional STAN, versão 2.5, da Universidade Tecnológica de Viena. Foi realizada, na sequência, a análise mensal do consumo e do potencial de geração de energia, para verificar a autossustentabilidade da ETE sob o ponto de vista energético.

Com o intuito de criar indicadores que contribuam para o monitoramento e controle da eficiência energética dos processos de tratamento de esgoto, o consumo de energia anual de cada processo foi relacionado com o equivalente populacional da ETE (EP). Sendo assim, calculou-se para cada etapa do processo de tratamento de esgoto a seguinte taxa:

$$I_{\text{energia}} = \left(\frac{E_{\text{elétrica}}}{EP} \right) \quad (14),$$

em que:

I_{energia} é o indicador do consumo energético de um determinado processo da ETE, dado em $\text{kWh}_e / \text{hab.ano}$;

$E_{\text{elétrica}}$ é o consumo anual de energia elétrica inerente ao processo considerado, expresso em $\text{kWh}_e / \text{ano}$;

EP é equivalente populacional, calculado por meio da Equação (10).

4.2.3 Procedimento para aplicação da AFM e da AFE em ETEs

Ao final do estudo, um procedimento foi concebido com o intuito de explicitar as diretrizes para aplicação da AFM e da AFE na ETE sob estudo, em outros períodos, e em outras ETEs similares. Esse procedimento encontra-se apresentado no Apêndice B deste documento. Além disso, foi elaborada uma planilha eletrônica com o auxílio do programa computacional Excel[®], versão 97-2003, que possibilita o cálculo automático das quantidades e indicadores aqui propostos a partir da inserção de dados operacionais de rotina. A referida planilha encontra-se disponível em meio digital, no disco compacto (CD-ROM) anexo a este trabalho. Esses produtos foram concebidos para viabilizar a aplicabilidade dos resultados desta dissertação, um requisito desejável no âmbito de um curso de Mestrado Profissional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTUDO DO FLUXO DE MATERIAIS DA ETE

5.1.1 Balanço de massa anual na ETE

A AFM da ETE Santa Quitéria baseou-se nos volumes acumulados de esgoto tratado, consumo de insumos e geração de resíduos. Uma breve descrição dos valores gerados durante a operação e o fluxo obtido para o ano de 2013 é apresentada a seguir.

O volume de esgoto doméstico tratado pela ETE correspondeu a 12.283.786 m³. Do volume total tratado, 116 m³ de resíduos sólidos grosseiros e 237 m³ de areia foram removidos pelo tratamento preliminar e encaminhados para aterro sanitário.

Dos RALFs foram removidos 1.600 m³ de espuma e 4.017 m³ de lodo excedente, com teor médio de sólidos totais de 5,0%. A quantidade de biogás gerado nos reatores anaeróbios foi de aproximadamente 447.759 Nm³ no ano.

Para controle de odor da ETE foram utilizados 369 m³ de peróxido de hidrogênio a 50%. Já nos FADs foram consumidos 524,7 m³ de cloreto férrico como coagulante, que gerou 23.761 m³ de lodo flotado, com teor médio de sólidos totais de 3,9%.

No sistema de desaguamento de lodo foram utilizados 1.342 m³ de solução de polímero a 0,3% para desaguar 20.907 m³ de lodo, com concentração média de 4,5% de sólidos totais. O volume de lodo desaguado foi de 4.700 m³, com teor médio de sólidos totais de 20%.

Para higienizar o lodo, foram aplicados 580 m³ de óxido de cálcio, aumentando para aproximadamente 5.280 m³ o volume de lodo a ser estocado para posterior envio à agricultura.

A FIGURA 12 apresenta o diagrama de fluxo dos materiais da ETE Santa Quitéria para o período de estudo. Os processos que compõem a ETE estão

representados por retângulos brancos com bordas na cor preta. As setas que derivam desses retângulos indicam os sentidos dos fluxos de materiais que entraram (I – *import flow*) e/ou que saíram (E – *export flow*) de cada etapa do processo de tratamento de esgoto.

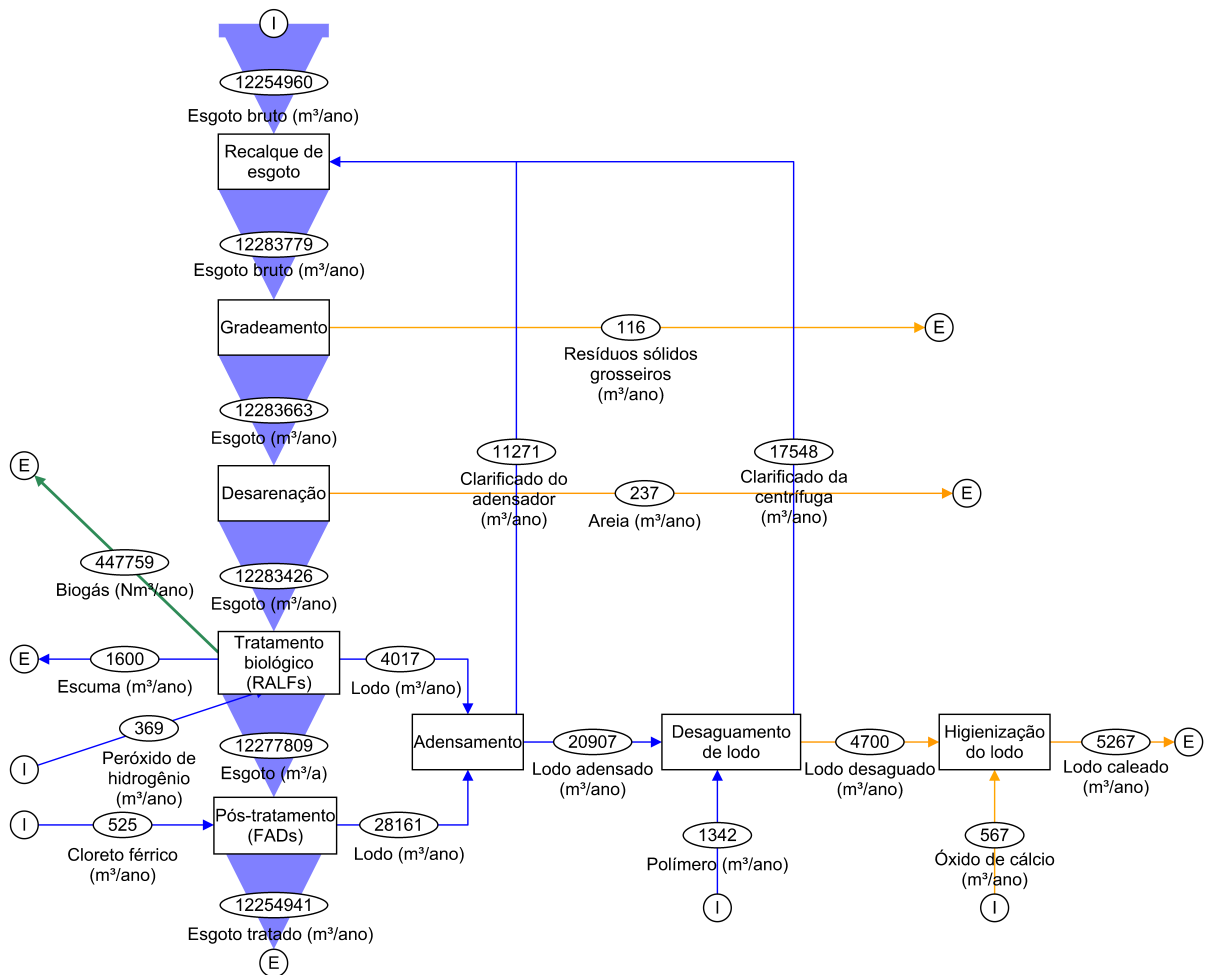


FIGURA 12 – DIAGRAMA DE FLUXO DE MATERIAIS DA ETE SANTA QUITÉRIA PARA O ANO DE 2013

5.1.2 Análise detalhada do desempenho operacional dos processos da ETE

A variação do volume mensal de esgoto tratado na ETE Santa Quitéria em 2013 pode ser visualizada na FIGURA 13. Os volumes apresentados contemplam o retorno do clarificado da centrífuga e o volume removido pelo gradeamento mecanizado e pelo desarenador.

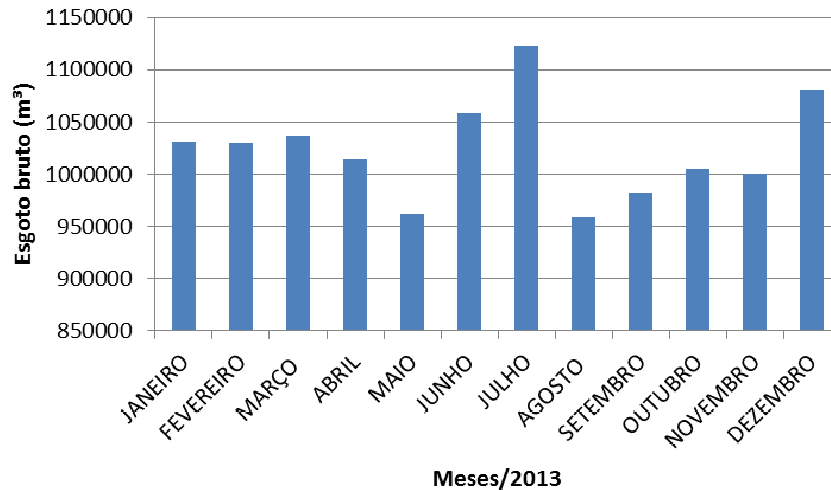


FIGURA 13 – GRÁFICO DO VOLUME MENSAL DE ESGOTO TRATADO NO ANO DE 2013 NA ETE SANTA QUITÉRIA

Durante o levantamento de dados da ETE Santa Quitéria para elaboração da AFM foi verificado que a vazão média mensal foi de aproximadamente $(1.023.618 \pm 48.105)$ m³/mês. Portanto, a variação da vazão em relação à media foi de apenas 4,7%. A maior vazão registrada ocorreu no mês de julho (1.122.985 m³/mês) e a menor em agosto (958.331 m³/mês).

De acordo com o levantamento, em 2013 foram removidos em média 9,7 m³ de resíduos sólidos grosseiros por mês. A variação do volume retirado no gradeamento mecanizado pode ser visualizada na FIGURA 14. Pode-se observar por meio desta ilustração que o volume máximo removido ocorreu em julho, que coincide com o aumento de vazão tratada verificada para o mesmo mês.

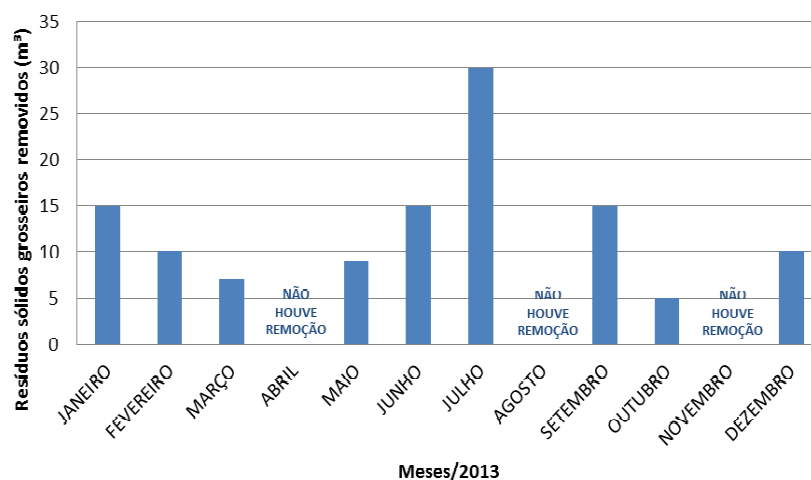


FIGURA 14 – GRÁFICO DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS REMOVIDOS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Nos meses de abril, agosto e novembro não houve remoção de caçambas de resíduos sólidos grosseiros. Entretanto, não foram registradas paradas do equipamento de gradeamento nesses períodos. Isso se deve à baixa remoção de resíduos do sistema, que pode ser explicada pela ineficiência do equipamento, ou pela baixa presença de resíduos no esgoto, o que leva a uma demora maior no enchimento da caçamba, a qual foi retirada somente no mês seguinte. Portanto, os resíduos removidos nos meses de abril, agosto e novembro, foram contabilizados em maio, setembro e dezembro, respectivamente.

Em relação ao volume tratado pela estação, o volume de resíduos grosseiros removido pela ETE representou apenas 9,5 L por 1.000 m³ de esgoto tratado. Esse valor é quatro vezes menor que aquele proposto por Jordão e Pessôa (2011) (38 L / 1.000 m³) para grades com espaçamento de 20 mm.

Em fevereiro de 2014, a grade existente foi substituída por uma peneira com 3 mm de espaçamento entre barras com o objetivo de melhorar a remoção de resíduos. No primeiro mês de operação dessa peneira, já foi possível observar um aumento no número de caçambas retiradas, que passou de uma para quatro.

A FIGURA 15 apresenta a quantidade de areia removida mensalmente na ETE Santa Quitéria em 2013 e considera as remoções do resíduo pelo desarenador e seu braço mecanizado e por limpezas com caminhão de sucção, tendo em vista as paradas dos equipamentos que ocorreram no período avaliado. A média de remoção mensal de areia foi de 19,75 m³.

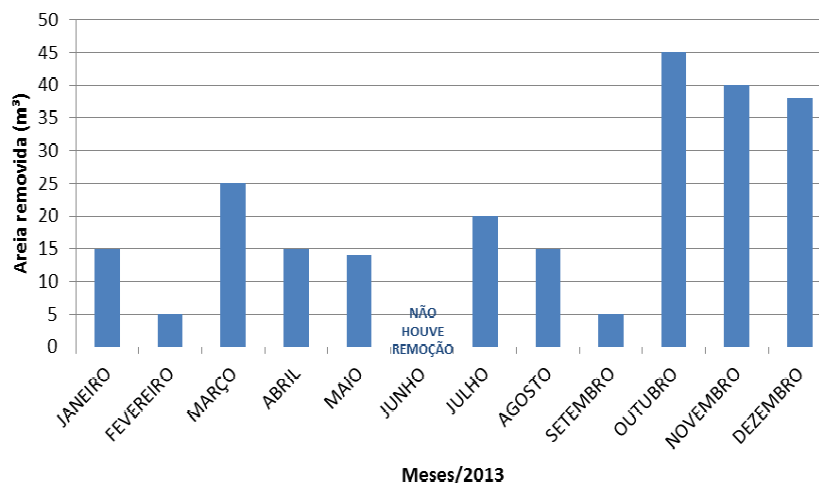


FIGURA 15 – GRÁFICO DO VOLUME DE AREIA REMOVIDO MENSALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

A máxima remoção de areia ocorreu no mês de outubro (45 m^3), quando a retirada, assim como em março, novembro e dezembro, foi realizada com caminhão de sucção. Nos demais meses a remoção de areia ocorreu pelo desarenador e seu braço mecanizado.

A quantidade média de areia removida no ano em relação ao volume de esgoto tratado na ETE, levando-se em consideração as duas formas de remoção, foi de $19,3 \text{ L} / 1.000 \text{ m}^3$ de esgoto tratado. Este valor encontra-se próximo da faixa de remoção de 20 a $40 \text{ L} / 1.000 \text{ m}^3$ sugerida por Jordão e Pessoa (2011).

Entretanto, considerando-se apenas o volume removido pelo desarenador e seu braço mecanizado e o volume de esgoto tratado no período correspondente à operação desses equipamentos, a quantidade média de areia removida é reduzida para aproximadamente $11 \text{ L} / 1.000 \text{ m}^3$ de esgoto tratado, valor que se encontra abaixo da faixa de remoção esperada, conforme sugerido por Jordão e Pessoa (2011).

Com relação à produção de espuma, esta foi mensurada de acordo com o volume retirado com caminhões de sucção nas limpezas que ocorreram bimestralmente. A FIGURA 16 apresenta os volumes de espuma removidos nas limpezas em 2013. A quantidade média removida por limpeza foi de $(320 \pm 66,39) \text{ m}^3 / \text{mês}$, com a maior quantidade retirada ocorrendo no mês de junho ($408 \text{ m}^3/\text{mês}$).

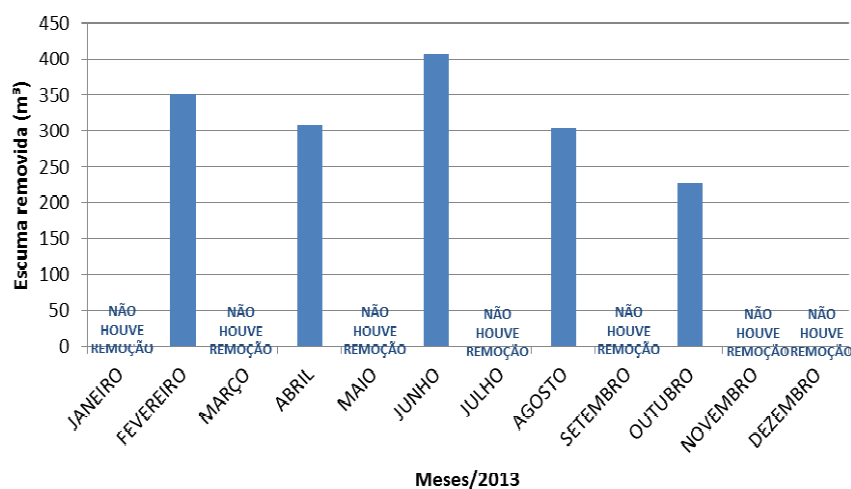


FIGURA 16 – GRÁFICO DO VOLUME DE ESCUMA REMOVIDA BIMESTRALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

De acordo com metodologia proposta por Souza (2006), para a DQO média aplicada de 436 mg / L observada em 2013 na ETE Santa Quitéria, o volume de espuma formado nas zonas de decantação dos reatores anaeróbios durante o ano, seria de aproximadamente 133 m³. Entretanto, o volume identificado na AFM (1.600 m³) é bem superior. Este valor elevado, provavelmente, ocorreu devido à abertura existente no separador trifásico do RALF diferentemente do que se encontra em um reator UASB convencional, que foi utilizado no trabalho do referido autor para estudo da espuma. Esta abertura no separador trifásico dos RALFs acaba favorecendo a saída de sólidos (lodo) e, conseqüentemente, sua incorporação na espuma.

Outro fator que pode ter contribuído significativamente para o elevado volume do material é a técnica utilizada para remover a espuma dos reatores UASB. Como a atividade é executada manualmente, além da remoção da espuma, há retirada de grande quantidade de líquido e, conseqüentemente, há um incremento significativo do volume do material a ser transportado com caminhão de sucção. Encontrar uma nova forma de retirar a espuma dos reatores, evitando ou minimizando a incorporação de líquido ao material é fundamental para reduzir o volume de material a ser transportado, bem como para reduzir os custos do gerenciamento desse resíduo. Alternativamente, recomenda-se que antes do transporte da espuma seja realizada uma etapa de desaguamento.

O volume de lodo excedente descartado dos reatores anaeróbios em 2013 pode ser visualizado na FIGURA 17. Observa-se que o maior descarte ocorreu no mês de novembro (692 m³ / mês) e o menor em fevereiro (88 m³ / mês). O volume médio descartado correspondeu a (334,71 ± 198,68) m³ / mês ou 55 m³ de lodo por mês por RALF.

A concentração média de sólidos totais do lodo dos reatores foi de (5,00 ± 0,95)%. A maior concentração de sólidos totais no lodo removido foi de 7,12% e a menor de 3,47%.

O montante removido equivale a apenas 25% da produção de lodo excedente estimada de acordo com o método proposto por Chernicharo et al. (1999). Portanto, acredita-se que uma maior quantidade de lodo possa ser removida dos RALFs, fazendo com que a quantidade de sólidos no efluente líquido seja minimizada. Entretanto, como a remoção do lodo interfere diretamente na qualidade

do efluente dos reatores, essa ação deve ser realizada com bastante cuidado e planejamento.

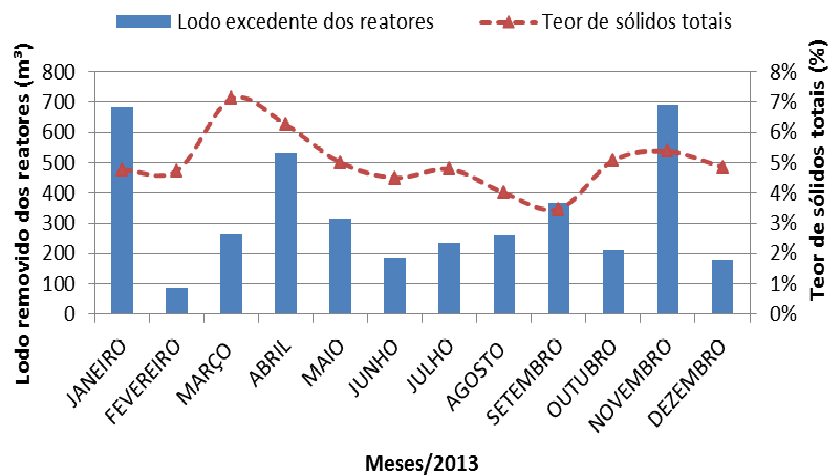


FIGURA 17 – GRÁFICO DO VOLUME DE LODO REMOVIDO MENSALMENTE DOS RALFs, E DE SEUS RESPECTIVOS TEORES DE SÓLIDOS, NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL

A variação da produção de biogás de acordo com estimativa, baseada modelo proposto por Lobato et al. (2012), pode ser observada na FIGURA 18. Observa-se que a maior produção ocorreu em março (58.195 Nm³) e a menor em janeiro (13.299 Nm³). Como a produção de biogás está diretamente relacionada com a carga orgânica aplicada nos reatores, justifica-se a maior produção de biogás em março devido à alta carga orgânica registrada no mês (534.693 kg) e a menor, conseqüentemente em janeiro (307.328 kg).

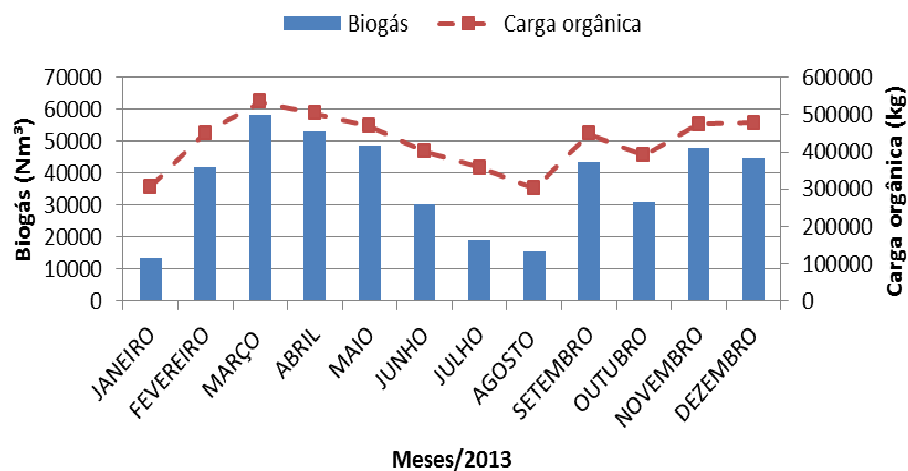


FIGURA 18 – GRÁFICO DA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO MENSAL DE BIOGÁS NA ETE SANTA QUITÉRIA NO ANO DE 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL

A produção média de biogás foi de $(37.313,27 \pm 15.095,94)$ Nm³ / mês. Como os valores aqui apresentados para a produção de biogás foram estimados, sugere-se a instalação de sistemas de medição de biogás na ETE a fim de quantificar o real potencial de geração deste material pelos RALFs.

Medições da vazão do biogás, em tempo real, realizadas por Possetti et al. (2013) na ETE Atuba Sul, que possui reatores similares aos da ETE Santa Quitéria, demonstraram que o biogás gerado por 4 RALFs na ETE possuía uma vazão média de 21,56 Nm³ / h, ou seja, aproximadamente 5,39 Nm³ / h por RALF. Caso uma vazão equivalente fosse encontrada também na ETE Santa Quitéria, a produção média de biogás seria de aproximadamente 23.284 Nm³ / mês, valor este um pouco superior a 60% do valor estimado segundo o modelo matemático proposto por Lobato et al. (2012).

A diferença encontrada entre a vazão estimada e a medida pode estar associada ao fato da metodologia proposta por Lobato et al. (2012) ter sido desenvolvida para reatores UASB convencionais (sem a abertura superior no separador trifásico presente nos RALFs). Tal abertura superior no separador trifásico dos RALFs favorece a saída de parte do biogás por essa passagem juntamente com o líquido e dificulta a pressurização do reator para captação do biogás gerado, o que pode contribuir para a diminuição da vazão do biogás e aumentar, conseqüentemente, a perda do mesmo para a atmosfera.

Para controle de odor da ETE foram consumidos mensalmente aproximadamente 30 m³ de peróxido de hidrogênio 50%. A FIGURA 19 apresenta a variação do consumo mensal do material ao longo do ano de 2013 e a concentração média mensal de sulfetos no efluente dos reatores. Observa-se que o maior consumo do peróxido de hidrogênio ocorreu em agosto (39,65 m³) e a menor em junho (19,45 m³). O consumo médio mensal observado foi de $(29,60 \pm 6,83)$ m³.

Observou-se que a dosagem de peróxido de hidrogênio não acompanha em alguns meses a concentração de sulfetos. Isso pode ser explicado pela utilização de dosagens excessivas ou insuficientes para a reação com os íons sulfetos e combate aos maus odores. Verifica-se, nesse caso, a necessidade de um maior controle de dosagem a fim de otimizar o consumo deste material.

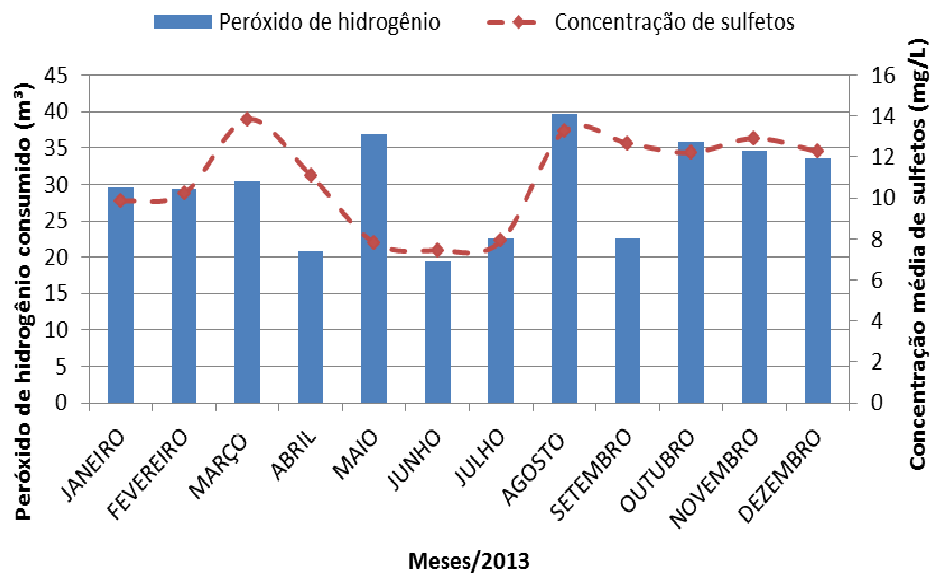


FIGURA 19 – GRÁFICO DO VOLUME DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO CONSUMIDO E CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE SULFETOS NO EFLUENTE DOS RALFs POR MÊS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL

De modo geral, constatou-se que, para oxidar uma concentração média de 11 mg / L de sulfetos presente no efluente dos reatores anaeróbios utilizou-se, em média, 1,63 kg de peróxido de hidrogênio para cada 1,0 kg de sulfetos. De acordo com Marin et al. (2013), é possível obter bons resultados na remoção de sulfeto de hidrogênio com dosagens a partir de 1,5 kg de peróxido de hidrogênio 50% para cada 1,0 kg de sulfetos presente no efluente dos RALFs. Logo, uma menor quantidade do material poderia ser utilizada, evitando-se desperdícios e reduzindo o custo de operação da ETE.

Melhores resultados poderiam ser obtidos com o aprimoramento do sistema de dosagem de peróxido de hidrogênio. Isso poderia ser realizado, por exemplo, pela instalação de um sistema automático e controlado de inserção do produto em função da vazão de esgoto e/ou da concentração de sulfetos.

No processo de flotação por ar dissolvido foram consumidos aproximadamente $(43,70 \pm 11,74)$ m³ de cloreto férrico por mês. A FIGURA 20 apresenta o consumo deste material durante o período avaliado, onde se visualiza que o maior consumo ocorreu em janeiro (65,6 m³) e o menor em julho (25,8 m³).

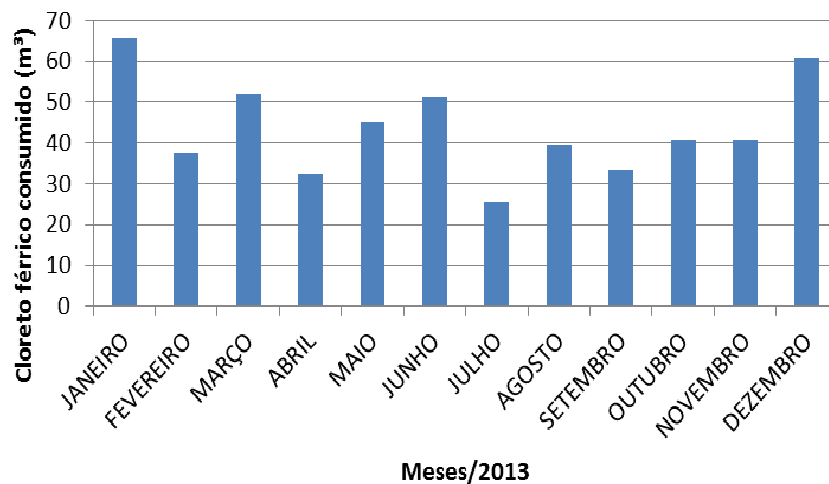


FIGURA 20 – GRÁFICO DO VOLUME DE CLORETO FÉRRICO CONSUMIDO MENSALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Considerando o regime operacional e de manutenção da ETE, a dosagem de cloreto férrico aplicada para o volume tratado de esgoto foi de aproximadamente 70 mL / m³, sendo o consumo mensal médio igual a 43,7 m³. As dosagens normalmente praticadas para remoção de sólidos em suspensão, sem remoção de fósforo, variam entre 20 e 40 mg / L de cloreto férrico, ou seja, entre 14 e 28 mL / m³ de esgoto tratado. Para a remoção de fósforo as dosagens padrão variam entre 40 e 60 mg / L, ou seja, entre 28 e 42 mL / m³ de esgoto tratado (Jordão e Pessôa, 2011). Logo, a dosagem praticada em 2013 na ETE estudada foi consideravelmente maior que aquela reportada na literatura. Essa dosagem, porém, foi necessária para assegurar a qualidade mínima exigida em legislação para lançamento do efluente final em corpos hídricos. Para evitar grandes consumos de produtos químicos é importante que a qualidade do efluente dos RALFs seja a melhor possível e, conseqüentemente, não exija que a dosagem de cloreto férrico nos FADs seja aumentada para atendimento dos padrões legais.

A alta dosagem do coagulante pode ainda estar relacionada com a baixa eficiência dos floculadores. Diante disso, faz-se necessária uma análise detalhada para identificar a causa do excesso de produto químico e quais as medidas cabíveis para que a dosagem de cloreto férrico seja reduzida.

A produção média de lodo removido dos flotadores foi de aproximadamente (2.346,8 ± 402,7) m³ / mês. Por meio da FIGURA 21 constata-se que a maior geração de lodo pela operação dos FADs ocorreu em setembro (3.165,0 m³) e a

menor geração ocorreu em fevereiro (1.727,4 m³). A maior geração de lodo dos flotadores em setembro pode ser justificada pela grande quantidade de lodo removido pela limpeza de fundo dos flotadores neste mês. Como as limpezas de fundo foram realizadas com caminhão de sucção, houve a necessidade de se inserir grande quantidade de água para que o lodo fosse diluído e a bomba dos caminhões conseguisse carrear o material, resultando no incremento do volume de lodo dos flotadores.

Devido à falta de contrato de serviços terceirizados com caminhão de sucção, nos meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro não foram realizadas limpezas de fundo dos FADs, contribuindo para a menor geração de lodo nesses períodos.

Durante o período avaliado, observou-se que a quantidade de lodo sedimentado no fundo dos tanques de flotação interferia na qualidade do efluente final (esgoto tratado) da ETE, exigindo com que a dosagem de cloreto férrico fosse aumentada com o intuito de que o padrão de lançamento fosse atingido.

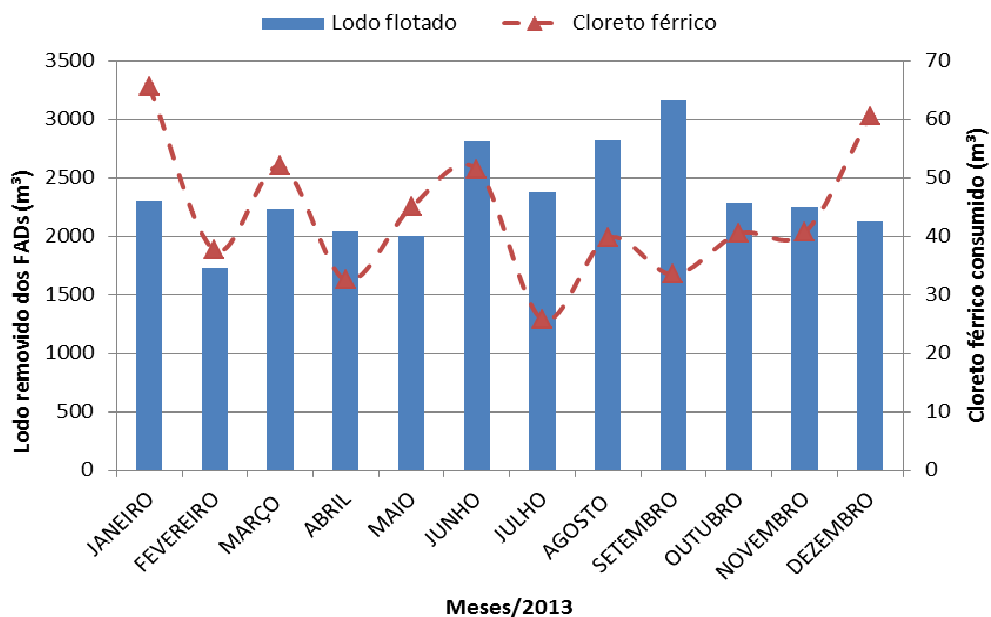


FIGURA 21 – GRÁFICO DO VOLUME DE LODO REMOVIDO DOS FADs E CONSUMO DE CLORETO FÉRRICO DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL

Comparando-se o consumo de cloreto férrico e a produção somente do lodo que flutuou no processo de FAD, observou-se que o volume de lodo produzido tende a aumentar com o incremento da dosagem de cloreto férrico aplicada. Diante disso,

evidencia-se novamente a necessidade de verificação das causas da alta dosagem do coagulante e propostas de ações que otimizem sua dosagem. Com isso, será possível obter três ganhos operacionais: a redução do consumo do produto químico, a redução da produção do lodo a ser gerenciado e, conseqüentemente, a redução de custos operacionais.

A FIGURA 22 ilustra o consumo mensal de polímero e os volumes mensais dos lodos adensado e desaguado durante o ano de 2013.

O consumo médio de polímero foi de $(112 \pm 21,09) \text{ m}^3/\text{mês}$. O maior volume consumido ocorreu em dezembro ($140,67 \text{ m}^3$) e o menor em maio ($68,17 \text{ m}^3$). O desaguamento adensado consumiu em média 64 mL de polímero por litro de lodo, sendo usualmente utilizado para uma boa floculação no mínimo 80 mL / L. A ausência do controle da dosagem do polímero pode ser um dos fatores que contribuem para o consumo abaixo do esperado deste material. A utilização de um medidor de vazão de polímero permitiria um maior controle do processo pelos operadores e melhores resultados.

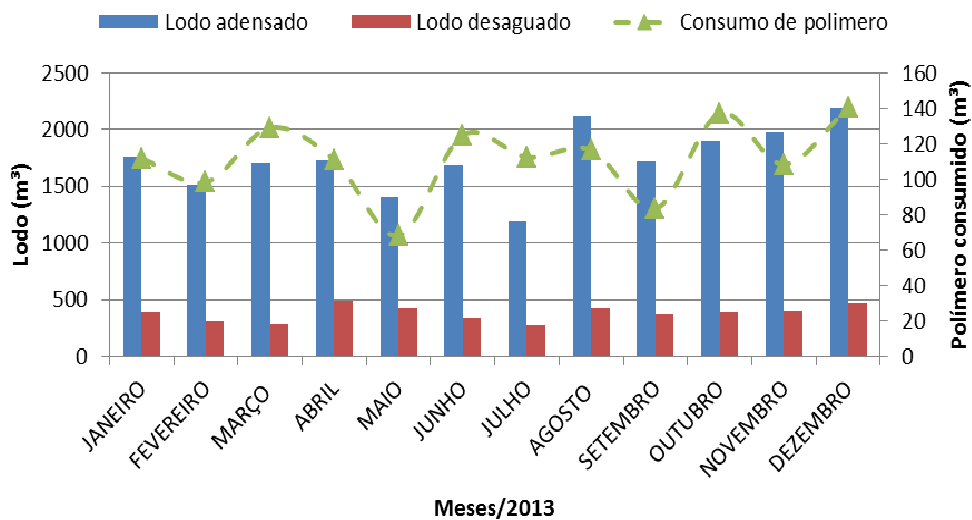


FIGURA 22 – GRÁFICO DO CONSUMO DE POLÍMERO E DOS VOLUMES DE LODO ADENSADO E DESAGUADO MENSALMENTE NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. A LINHA PONTILHADA É APENAS UM GUIA VISUAL

O volume médio de lodo adensado, processado mensalmente pela centrífuga desaguadora, foi de $(1.742,17 \pm 285,83) \text{ m}^3/\text{mês}$, sendo que o maior processamento de lodo pelo equipamento ocorreu em dezembro ($2.195 \text{ m}^3/\text{mês}$) e o menor em julho ($1.192 \text{ m}^3/\text{mês}$). O menor desaguamento de lodo ocorrido em

julho pode ser atribuído a problemas em equipamentos eletromecânicos. A concentração média de sólidos totais do lodo adensado foi de $(4,46 \pm 0,50)\%$, com o maior teor de sólidos de 5,00% e o menor de 3,00%. Este teor de sólidos totais está de acordo com a faixa prevista no manual do equipamento, que varia entre 3 e 5%.

A centrífuga gerou, em média, $(381,33 \pm 70,34)$ m³/mês de lodo desaguado. A maior produção ocorreu em abril (492 m³) e a menor em julho (275 m³), com concentração média de sólidos totais estimada em 20%.

O volume médio de cal virgem utilizado para higienizar o lodo desaguado foi de $(47,25 \pm 8,72)$ m³/mês. O mês de agosto foi responsável pelo maior consumo de cal virgem (60,97 m³) devido à maior produção de lodo desaguado. Conseqüentemente, o menor consumo ocorreu em março (34,08 m³).

Em 2013, caso o sistema de higienização do lodo da ETE Santa Quitéria estivesse operante, 5.143 m³ de lodo necessitariam ser transportados até a ETE CIC Xisto e lá armazenados até o período de cura do lodo necessário para envio à agricultura, tornando o gerenciamento deste resíduo oneroso.

A secagem térmica do lodo é uma técnica que poderia otimizar o processo de tratamento e destinação final, pois ela possibilita a obtenção de lodos granulares com teores de sólidos totais maiores que 90% e promove a higienização do material sem a adição de cal virgem (DAVID, 2002). O uso de um sistema de secagem térmica, por exemplo, poderia reduzir o volume de lodo desaguado de 4.700 m³/ano para menos de 1.000 m³/ano de lodo seco e higienizado sem produto químico. Isso reduziria os custos operacionais com gerenciamento de lodos em aproximadamente 85% no ano, mesmo com posterior destinação do lodo seco para a agricultura.

A TABELA 4 apresenta o resumo do desempenho de cada processo da ETE estudada e os valores de referência utilizados neste trabalho. Observa-se que os processos da ETE Santa Quitéria podem ser aprimorados, quando comparados com valores de referência encontrados em literatura.

TABELA 4 - RESUMO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO OPERACIONAL DOS PROCESSOS QUE COMPÕEM A ETE SANTA QUITÉRIA NO ANO DE 2013

Processo	Material	Valor médio realizado	Valor de referência	Unidade	Referência
Elevatória de recalque de esgoto bruto	Esgoto bruto	1.023.618	1.088.640	m ³ / mês	Capacidade nominal conforme projeto
Gradeamento mecanizado	Resíduos sólidos grosseiros	9,5	38	L / 1.000 m ³ de esgoto	Jordão e Pessôa (2011)
Desarenação	Areia	11	20 a 40	L / 1.000 m ³ de esgoto	Jordão e Pessôa (2011)
	Escuma	1600	133	m ³ / ano	Souza (2006)
Tratamento biológico (RALFs)	Biogás	37.313	24.730	Nm ³ / mês	Possetti et al. (2013)
	Lodo excedente	55	220	m ³ / mês/ RALF	Chernicharo et al. (1999)
	Peróxido de hidrogênio	1,63	1,5	kg / kg S ²⁻	Marin et al. (2013)
Pós-tratamento (FADs)	Cloreto férrico	70	14 a 28 (S/ remoção de P) 28 a 42 (C/ remoção de P)	mL / m ³	Jordão e Pessôa (2011)
	Lodo flotado	1.980	139	m ³ / mês	Aisse et al.(2001)
	Polímero	64	80	mL / L de lodo	Valor operacional
Desaguamento de lodo	Lodo adensado	4,46%	3 a 5%	Teor de sólidos totais	Recomendação do fabricante da centrífuga desaguadora
	Lodo desaguado	381	**	m ³ / mês	**
Higienização do lodo	Cal virgem	57%	30 a 50%	Sobre matéria seca	Andreoli et al. (2001)

** Não possui valores de referência

Em síntese, verifica-se que a vazão tratada em 2013 pela ETE Santa Quitéria encontra-se próxima à capacidade nominal prevista em projeto e que, o gradeamento mecanizado e o sistema de desarenação apresentaram desempenho abaixo do proposto em literatura especializada. A geração de espuma em 2013 demonstrou estar acentuadamente acima do proposto por Souza (2006). Já a estimativa de geração de biogás foi maior do que as medições realizadas por Possetti et al. (2013).

Além disso, observou-se que o volume de lodo removido dos RALFs correspondeu a 25% da produção de lodo, de acordo com o cálculo reportado por Chernicharo et al. (1999). A dosagem de peróxido de hidrogênio aplicada em 2013 para controle de odor foi superior ao sugerido por Marin et al. (2013), bem como a

dosagem de cloreto férrico para coagulação nos FADs sugerida por Jordão e Pessôa (2011).

O volume de lodo flotado foi superior ao valor calculado pelo método reportado por Aisse et al. (2001) e o consumo de polímero no sistema de desaguamento foi inferior ao valor operacional para a boa floculação dos sólidos. A concentração de sólidos no lodo adensado e a dosagem de óxido de cálcio praticada na higienização do lodo encontram-se dentro do recomendado pelo manual do fabricante do equipamento e por literatura especializada.

5.1.3 Cálculo dos indicadores específicos de materiais para os processos da ETE

Em 2013, os processos de tratamento da ETE Santa Quitéria produziram ou geraram materiais de acordo com os indicadores específicos relacionados na TABELA 5. Baseados no equivalente populacional (relação entre a DQO aplicada e a vazão de esgoto tratado) da ETE, estes indicadores permitiram verificar o volume de alguns insumos consumidos e resíduos gerados por habitante por ano.

TABELA 5 - INDICADORES ESPECÍFICOS PARA GERAÇÃO E CONSUMO DE MATERIAIS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Processo	Material	Indicador específico por material (L / hab.ano)
Recalque de lodo	Esgoto bruto	100.010,80
Gradeamento	Resíduos sólidos grosseiros	0,94
Desarenação	Areia	1,93
	Escuma	13,03
Tratamento biológico (RALFs)	Biogás	3.645,62
	Lodo	32,70
	Peróxido de hidrogênio	2,89
Pós-tratamento (FAD)	Cloreto férrico	4,27
	Lodo	229,29
Desaguamento de lodo	Lodo adensado	170,22
	Polímero	10,93
	Lodo desaguado	34,26
Higienização do lodo	Óxido de cálcio	4,61
	Lodo caleado	35,47

Por meio desses dados e da replicação dessa ferramenta será possível, nos próximos anos, verificar a existência de padrões na geração e consumo de materiais na ETE Santa Quitéria, gerando valores de referência para comparações futuras.

Dessa forma, será possível a identificação de desvios, que poderão requerer análises detalhadas do processo para verificar suas causas e que ações serão necessárias para sua melhoria.

Além disso, tais indicadores específicos, juntamente com a AFM, poderão ser calculados para outras ETEs e gerar dados que poderão ser utilizados, inclusive, para avaliar e comparar a eficiência de diferentes tecnologias e que poderão dar suporte à tomada de decisões.

5.2 ESTUDO DO FLUXO DE ENERGIA DA ETE

5.2.1 Balanço de energia anual da ETE

A ETE Santa Quitéria consumiu, em 2013, 1.369.358 kWh_e de energia elétrica. Deste valor, o processo de flotação por ar dissolvido foi responsável pelo consumo de aproximadamente 849.778 kWh_e, que corresponde a mais de 60% do consumo de energia no ano. A elevatória de recalque de esgoto bruto e o processo de desaguamento de lodo consumiram aproximadamente 380.403 kWh_e e 124.830 kWh_e, respectivamente. Esses processos juntos totalizaram cerca de 38% do consumo total de energia elétrica da ETE.

O gradeamento mecanizado, a desarenação e o sistema de higienização do lodo representaram os menores gastos de energia elétrica, sendo as quantidades consumidas aproximadamente iguais a 3.285, 5.519 e 4.511 kWh_e, respectivamente. Juntos esses processos corresponderam a apenas 1,33% do consumo total de energia elétrica da ETE. Ressalta-se, entretanto, que a estimativa do consumo do sistema de higienização do lodo levou em consideração o regime de operação e manutenção referente ao período avaliado, sendo o consumo total registrado consideravelmente baixo, aproximadamente 20% do consumo esperado em relação ao regime de operação registrado pelo sistema de desaguamento de lodo.

O percentual de consumo de energia elétrica de cada processo de tratamento de esgoto da ETE no ano de 2013 está representado na FIGURA 23.

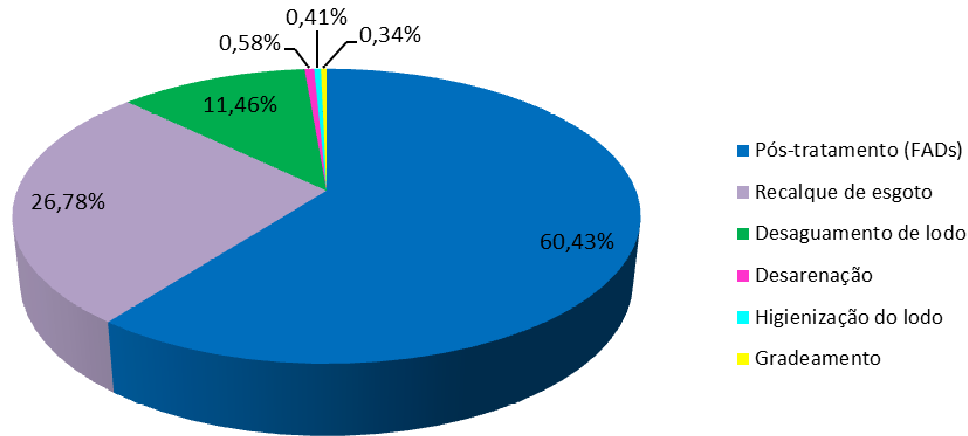


FIGURA 23 – GRÁFICO DA PARTICIPAÇÃO DOS PROCESSOS NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Considerando um teor de metano médio de 75% v/v, o biogás gerado na ETE Santa Quitéria em 2013 produziria uma vazão média de metano de 399.282,42 Nm³. Como o poder calorífico inferior do metano é de 9,9 kWh_q / Nm³ (SGC, 2012), a quantidade anual de energia química associada ao biogás produzido na ETE foi de 3.358.201 kWh_q. Levando-se em consideração que a conversão da energia química em energia térmica possui um rendimento de 80%, o biogás poderia gerar em 2013, aproximadamente 2.686.561,06 kWh_t.

Essa quantidade de energia poderia ser utilizada para produzir mais de 1.208.952,48 kWh_e / ano de energia elétrica, valor superior a 88% do consumo de energia elétrica da ETE (1.369.358 kWh_e / ano), se for considerado um rendimento de 36% na conversão da energia química do biogás para energia elétrica assumindo um motor ciclo Otto para a faixa de 101 e 250 kW_e (DWA, 2013).

O reaproveitamento energético da espuma removida dos reatores anaeróbios, com base nos dados apresentados por Ross et al. (2013), poderia disponibilizar 463.810,00 kWh_q de energia química por ano. Considerando que o rendimento da conversão da espuma seca em energia térmica é igual a 75%, então a quantidade de energia térmica que poderia ser gerada com a espuma é de 347.857,50 kWh_t / ano (ORTEGA et al., 2002). Assumindo que o rendimento da conversão da energia térmica em energia elétrica é igual a 10%, então seria possível gerar cerca de 46.381,00 kWh_e / ano a partir da combustão da espuma (VAN HANDEEL, 2009).

Já a quantidade potencial de energia química que poderia ser obtida a partir da queima do lodo (biomassa), caso ele fosse submetido ao processo de secagem

térmica após a centrífuga desaguadora, seria de, pelo menos, 4.094.279,35 kWh_q no ano, uma vez que o lodo da ETE estudada apresentou poder calorífico inferior de 3.856,59 kcal / kg em base seca, segundo a caracterização realizada por Possetti (2013). Considerando que o rendimento da conversão do lodo seco em energia térmica é igual a 75%, então a quantidade de energia térmica que poderia ser gerada com o lodo é de 3.070.709,52 kWh_t / ano (ORTEGA et al., 2002). Assumindo que o rendimento da conversão da energia térmica em energia elétrica é igual a 10%, então seria possível gerar cerca de 409.427,94 kWh_e / ano a partir da combustão do lodo (VAN HANDEEL, 2009).

Portanto, se a espuma e o lodo fossem utilizados como biomassa para a geração termelétrica, cujo rendimento característico é de 10% (VAN HANDEEL, 2009), então no ano de 2013 seria possível produzir cerca de 455.808,94 kWh_e. Esse valor corresponde aproximadamente 30% do consumo total de energia elétrica da ETE no ano do estudo.

Cabe destacar, no entanto, que a secagem térmica do lodo e da espuma exigiria o fornecimento de energia térmica para evaporação da água presente no lodo desaguado. Para fazer com que o teor de sólidos do lodo desaguado em 2013 na ETE chegasse a 85%, seriam necessários $3,50 \times 10^9$ kcal/ano, que equivalem a 4.059.181,18 kWh_t / ano. Para secar a espuma seriam necessários $1,39 \cdot 10^9$ kcal / ano ou 1.610.451,20 kWh_t / ano.

A FIGURA 24 apresenta o fluxo de energia da ETE Santa Quitéria obtido para o ano de 2013. Da mesma forma que para a AFM, as setas que derivam desses retângulos indicam os sentidos dos fluxos de energia que foram demandados pelos processos da ETE (*I – import flow*) e/ou que podem ser gerados com o reaproveitamento do potencial energético químico acumulado no biogás, no lodo e na espuma (*E – export flow*).

Os fluxos do esgoto e do lodo no processo de tratamento da ETE encontram-se representados nas setas pretas com o número zero no interior da elipse. As setas vermelhas representam a demanda de energia dos processos e as setas na cor verde representam o potencial de geração de energia a partir do biogás, espuma e lodo. Para a elaboração da AFE os fluxos de energia foram convertidos para a unidade kWh_e, com o intuito de normalizar os dados e facilitar sua avaliação. Para tanto, considerou-se o rendimento de 36% para conversão da

energia química do biogás em energia elétrica e 10% para conversão da energia química do lodo e da espuma em energia elétrica.

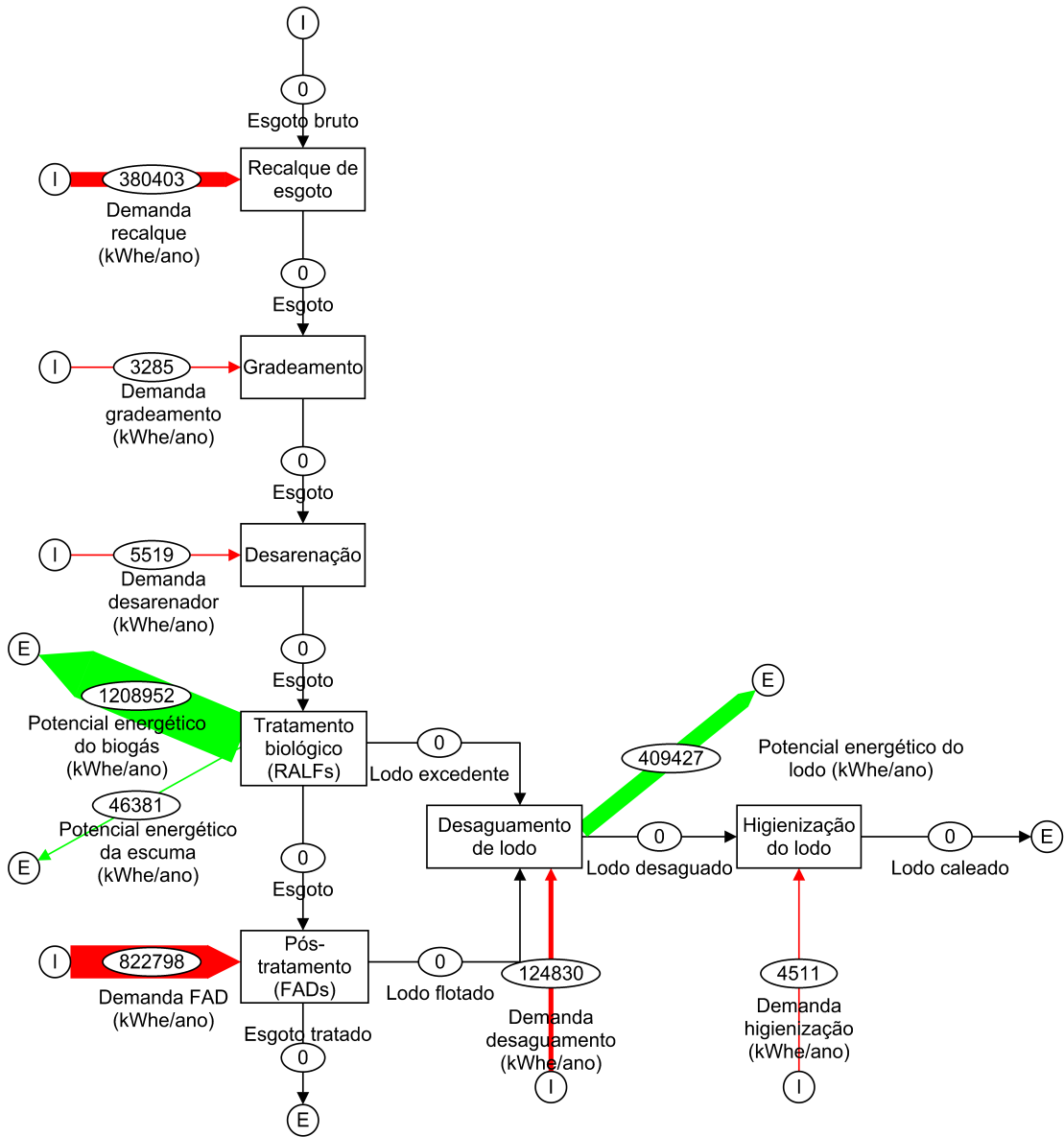


FIGURA 24 - DIAGRAMA DE FLUXO DE ENERGIA DA ETE SANTA QUITÉRIA PARA O ANO DE 2013

5.2.2 Análise detalhada do desempenho energético da ETE

A variação mensal do consumo de energia elétrica da ETE ao longo de 2013 pode ser visualizada na FIGURA 25.

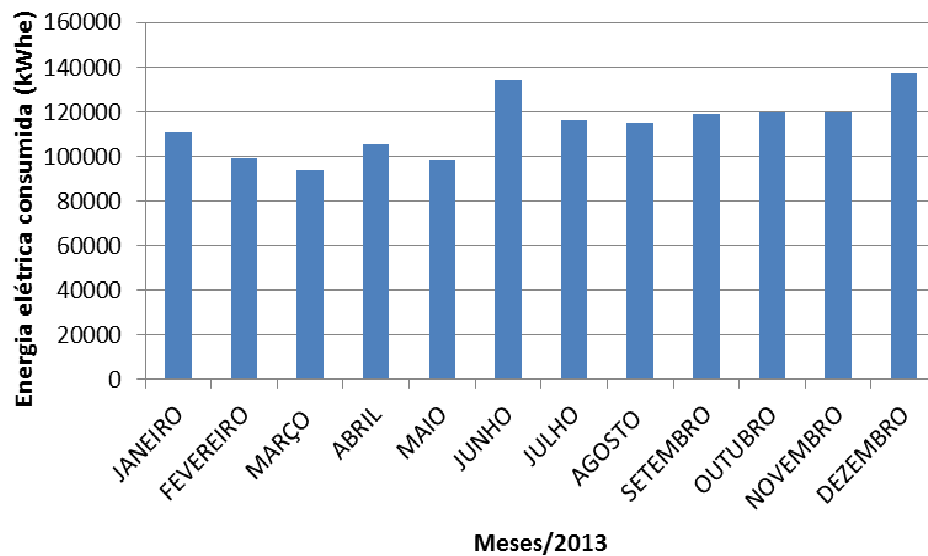


FIGURA 25 – GRÁFICO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA MENSAL DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

O maior consumo de energia ocorreu no mês de dezembro (137.455 kWh_e) e o menor em março (94.111 kWh_e), que pode ser explicado pelo alto consumo registrado em dezembro aos FADs, que operaram com maior regularidade neste período. A energia elétrica média consumida em 2013 na ETE foi de (114.113 ± 13.472) kWh_e / mês. Dessa forma, a variação do consumo mensal em relação à média foi de aproximadamente 12%.

A FIGURA 26 apresenta a estimativa da produção mensal de energia elétrica a partir do biogás, considerando um rendimento na conversão da energia química em energia elétrica da ordem de 36% para um motor ciclo Otto (DWA, 2013). Verifica-se que o menor potencial de energia, caso o biogás fosse reaproveitado para geração de energia elétrica, ocorreria no mês de janeiro (35.907,19 kWh_e) e a maior em março (157.126,77 kWh_e). A quantidade média de energia elétrica gerada a partir do biogás seria de (100.746,04 ± 40.758,76) kWh_e / mês. Portanto, há uma variação mensal da quantidade de energia elétrica que poderia ser produzida a partir da recuperação do biogás da ordem de 40% em relação à média.

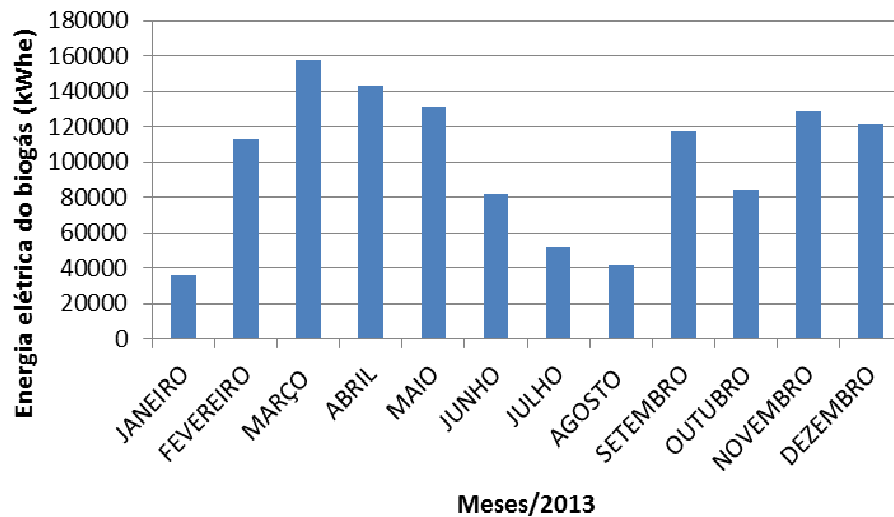


FIGURA 26 – GRÁFICO DA ESTIMATIVA DA QUANTIDADE MENSAL DE ENERGIA ELÉTRICA ASSOCIADA COM A RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Se a energia produzida a partir do biogás fosse convertida em energia elétrica, a variação da geração de energia ao longo de 2013 ocorreria conforme apresentado na FIGURA 27, que informa também a energia consumida pela ETE no mesmo período. É possível observar que em cinco meses do ano (fevereiro, março, abril, maio e novembro), a energia elétrica fornecida pelo biogás supriria a energia consumida pela ETE nesses períodos. Em março, por exemplo, a energia produzida a partir do biogás seria 67% superior à energia consumida no mesmo período, a maior produção observada no ano. A energia excedente gerada em março (63.015 kWh_e) poderia ser utilizada para abastecer a energia consumida pela ETE no mês de junho (52.375 kWh_e), por exemplo.

Para garantir o melhor reaproveitamento do biogás produzido nos RALFs para geração de energia elétrica ao longo do ano, seria importante a instalação de um gasômetro utilizado para regularizar e reservar a vazão do biogás garantindo uma autossustentabilidade da ETE sob o ponto de vista energético, durante pelo menos 7 meses do ano, uma vez que corresponde a mais de 88% da energia consumida na ETE em 2013.

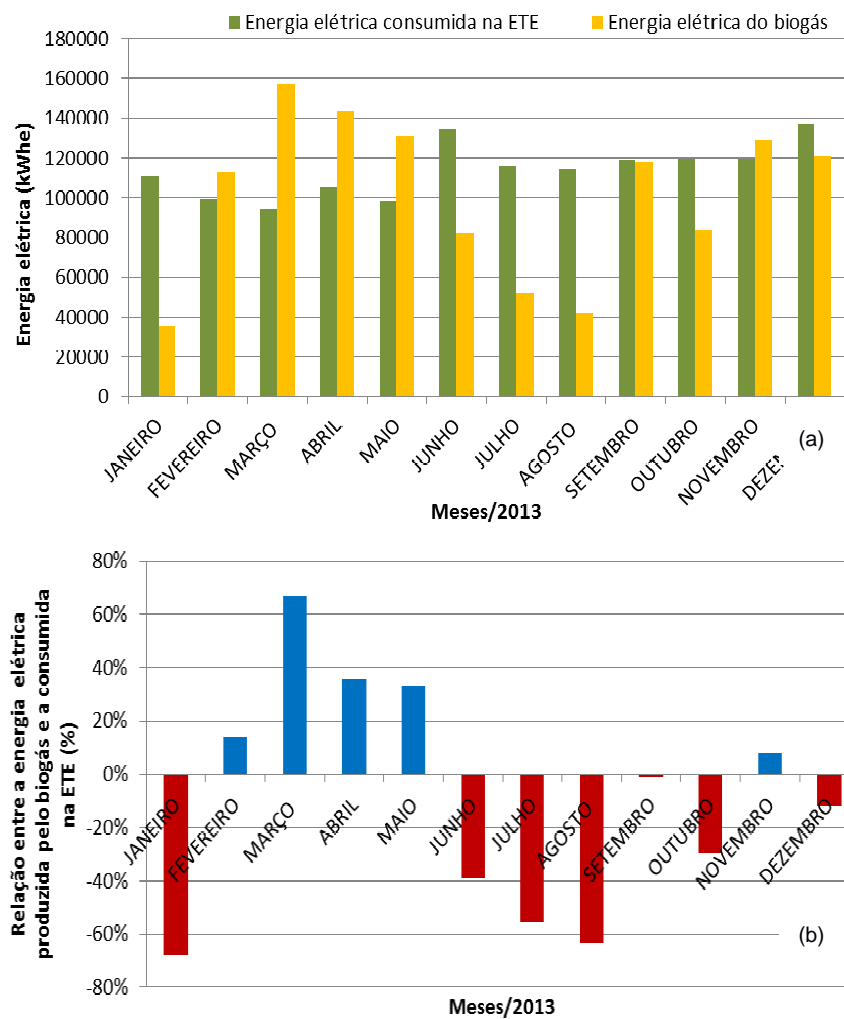


FIGURA 27 – (a) GRÁFICO DA COMPARAÇÃO MENSAL ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA E A ENERGIA ELÉTRICA QUE PODERIA SER GERADA A PARTIR DO BIOGÁS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. (b) GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA GERADA A PARTIR DO BIOGÁS E A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA

A combustão do lodo e da espuma também pode ser empregada com o intuito de gerar energia elétrica para a ETE (FIGURA 28). Considerou-se, para tanto, o rendimento de 10% para conversão da energia química desses materiais em energia elétrica (VAN HANDEEL, 2009). Nota-se pela FIGURA 28 que a energia elétrica produzida a partir da combustão do lodo e da espuma é insuficiente para manter a operação da ETE ao longo de todo o período avaliado. Entretanto, tal produção é suficiente para abastecer aproximadamente 33% da energia elétrica consumida pela ETE. A produção média de energia elétrica a partir da combustão do lodo e da espuma seria de $(37.985,08 \pm 6.949,70)$ kWh_e/mês.

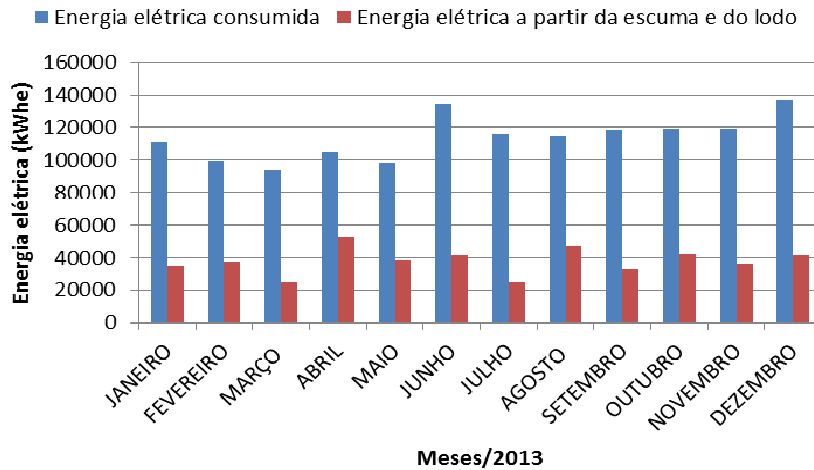


FIGURA 28 - GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA E A ENERGIA ELÉTRICA QUE PODERIA SER GERADA A PARTIR DA COMBUSTÃO DA ESCUMA E DO LODO

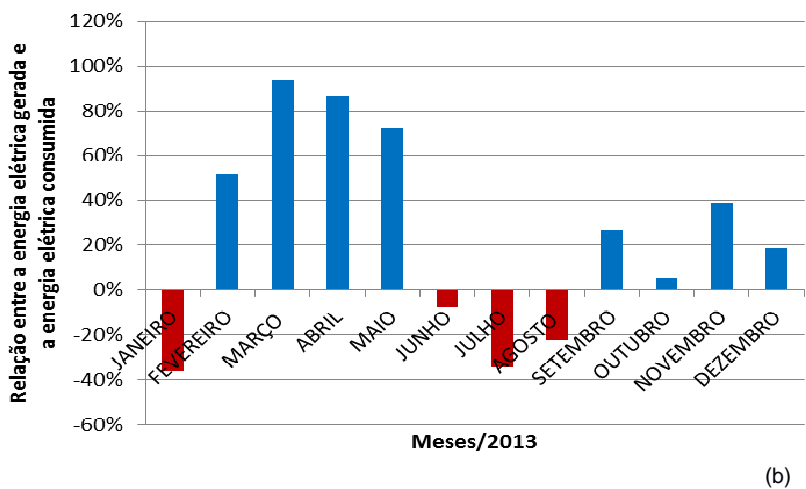
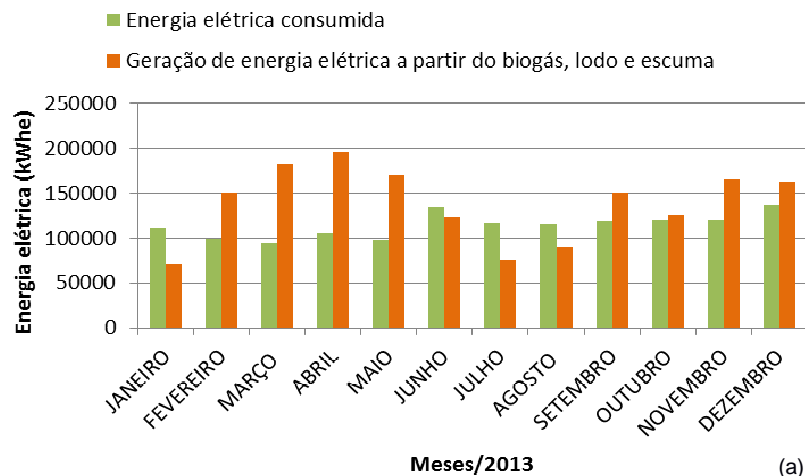


FIGURA 29 – (a) GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA E A ENERGIA ELÉTRICA GERADA A PARTIR DA RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS E DA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA. (b) GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA ELÉTRICA GERADA A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DO BIOGÁS, LODO E ESCUMA E A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NA ETE SANTA QUITÉRIA

Se o biogás, o lodo seco e espuma seca forem reaproveitados para geração de energia elétrica, então, seria possível fornecer energia em comparação com a consumida pela ETE Santa Quitéria em 2013, conforme pode ser observado na FIGURA 29. Verifica-se que nos meses de fevereiro, março, abril, maio, setembro, novembro e dezembro, a energia produzida supera a energia consumida pela ETE. A produção média, neste caso, seria de $(138.730,12 \pm 41.663,12)$ kWh_e / mês. O reaproveitamento do biogás, espuma e lodo para geração de energia elétrica seria suficiente para fornecer 21% de energia a mais que a energia elétrica consumida ao longo de 2013 pela ETE Santa Quitéria.

Cabe ressaltar que, para o cálculo da produção de energia elétrica a partir da combustão do lodo e espuma, considerou-se que ambos os materiais encontram-se secos, com teor de sólidos superior a 80%, e que o rendimento para conversão da energia química para energia elétrica é de 10% (VAN HANDEEL, 2009). Para o biogás considerou-se um rendimento de 36% na conversão da energia química para a energia elétrica (DWA, 2013).

Para regularizar a produção de energia com a energia demandada, sugere-se a instalação de gasômetro para reservar e regular a vazão do biogás e silos para armazenamento e controle da combustão da espuma e do lodo, garantindo desta forma o abastecimento do sistema de geração de energia nos meses em que o consumo de energia elétrica supera a geração dos materiais na ETE.

Outra forma de reaproveitamento energético dos materiais diz respeito à geração de energia térmica. O biogás, por exemplo, poderia ser utilizado como fonte de energia para o processo de secagem e higienização do lodo, processos importantes para minimização do volume de lodo que precisa ser transportado e corretamente destinado. A quantidade de energia térmica demandada para o processo de secagem do lodo previamente desaguado na centrífuga e a quantidade de energia térmica que poderia ser gerada com a recuperação do biogás para os meses de 2013 podem ser visualizadas na FIGURA 30.

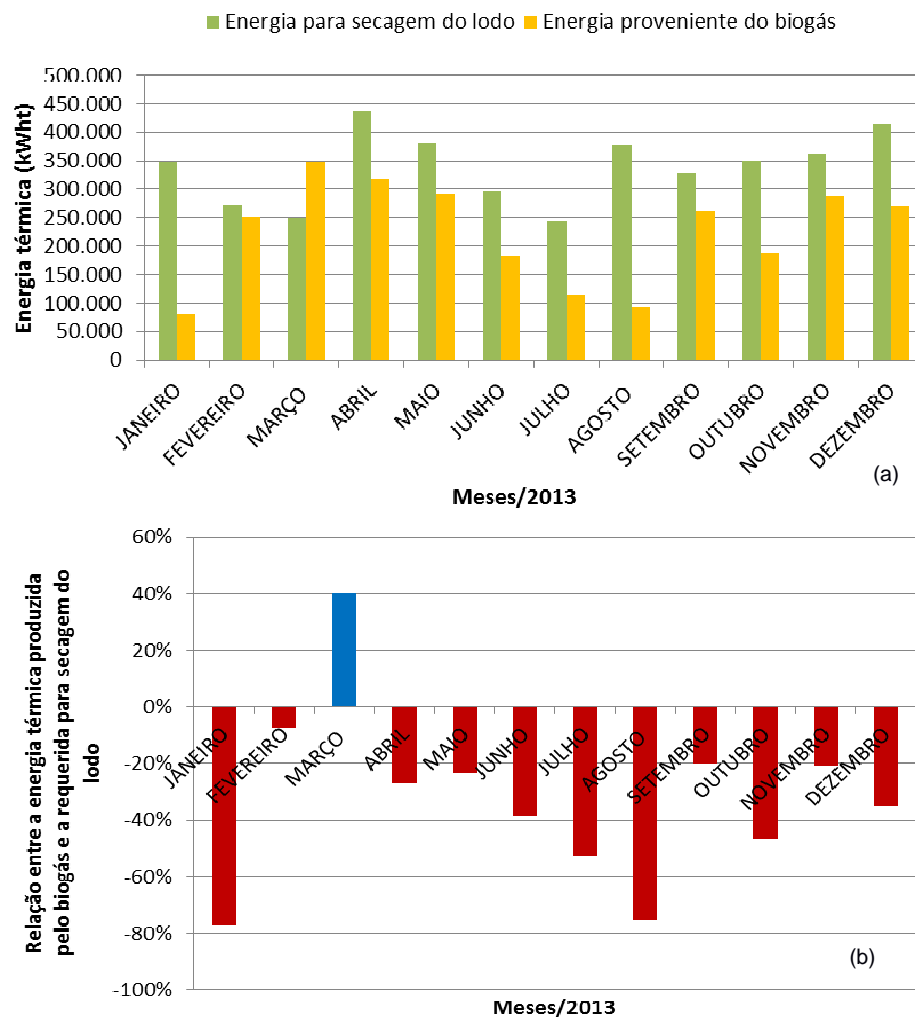


FIGURA 30 – (a) GRÁFICO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA TÉRMICA DEMANDADA PARA A SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO DO LODO E DA ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO DO BIOGÁS DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013. (b) RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA PELO BIOGÁS E A DEMANDADA PARA SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO DO LODO

Constatou-se, entretanto, que apenas no mês de março, a quantidade de biogás produzido seria suficiente para secar o lodo desaguado produzido na ETE. A energia média necessária para secar o lodo desaguado gerado em 2013 pela ETE Santa Quitéria foi de $(338.265,10 \pm 62.392,16)$ kWh_t / mês. A máxima energia demandada ocorreu em abril $(436.432,94)$ kWh_t e a menor energia requerida ocorreu em julho $(243.941,18)$ kWh_t.

Considerando um rendimento de 80% na conversão de energia química para energia térmica, a energia média produzida a partir da recuperação do biogás foi de $(223.880,09 \pm 90.575,02)$ kWh_t / mês (AL SEADI et al., 2008). A máxima energia térmica gerada foi de 349.170,61 kWh_t, em março, e a mínima foi de

79.793,75 kWh_t, em janeiro. O reaproveitamento do biogás forneceria aproximadamente 66% da energia requerida para secagem de todo lodo gerado em 2013 pela ETE Santa Quitéria.

Se além da secagem e higienização do lodo, o biogás fosse reaproveitado também para a secagem da espuma removida dos RALFs, visando a redução do volume deste material, a energia produzida em comparação com a energia demandada pelo sistema de secagem, seria verificada conforme a FIGURA 31. Neste caso, a energia térmica média demandada para secagem dos dois materiais seria de $(471.674,94 \pm 183.354,94)$ kWh_t / mês. Com a adição da espuma no processo de secagem, seria possível o fornecimento de aproximadamente 47% da energia requerida na secagem por meio da recuperação do biogás. Convém destacar que o processo de secagem poderá ser otimizado, se a espuma for previamente desaguada mecanicamente, com o intuito de aumentar o teor de sólidos na entrada do secador para acima de 20%, resultando, assim, em menor demanda de energia.

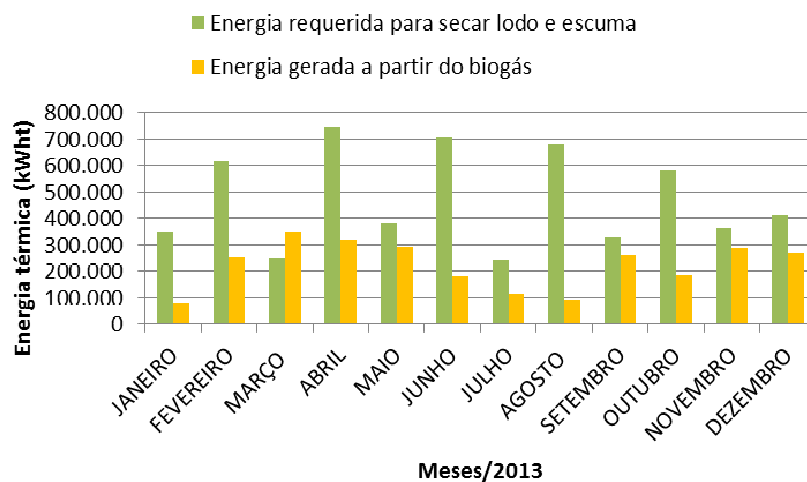


FIGURA 31 – GRÁFICO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DA ESCUMA E DO LODO E DA ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA PELO BIOGÁS NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Além do reaproveitamento do biogás, pode-se utilizar também a combustão do lodo e da espuma para geração de energia térmica visando a secagem do lodo e da espuma.

Com base na caracterização do lodo da ETE Santa Quitéria realizado por Possetti (2013), a quantidade de energia térmica que poderia ser gerada a partir da

combustão do lodo é de $(255.892,46 \pm 47.198,73)$ kWh_t / mês. A maior quantidade de energia térmica a ser recuperada a partir do lodo seco ocorreu no mês de abril $(330.154,96$ kWh_t) e a menor em julho $(184.537,83$ kWh_t).

Considerando um rendimento de 75% na conversão da energia química em energia térmica, verificou-se que em 2013, não seria possível secar o lodo utilizando-se somente da energia térmica proveniente da combustão do lodo seco, conforme explicitado na FIGURA 32 (ORTEGA et al., 2002). Entretanto, verificou-se que a energia fornecida pela combustão do lodo corresponde a aproximadamente 75% da energia requerida pelo processo de secagem do lodo gerado no período avaliado.

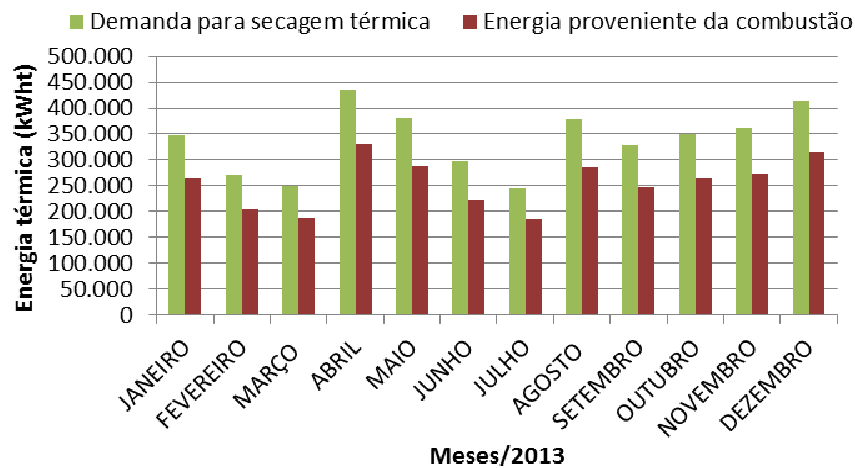


FIGURA 32 - GRÁFICO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA PELA COMBUSTÃO DO LODO DA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Alternativamente, propõe-se ainda a secagem do lodo e da espuma, por meio da combustão de ambos os materiais. Admitiu-se, para o lodo e para espuma, um teor de sólidos na saída do secador de 85% e rendimento de 75% para conversão da energia química em energia térmica (ORTEGA et al., 2002). Nesse cenário, a energia média requerida para secagem dos materiais seria de $(471.674,94 \pm 183.354,90)$ kWh_t / mês e a energia média gerada a partir da combustão do lodo e da espuma seria de $(284.880,58 \pm 61.043,04)$ kWh_t / mês. A combustão desses materiais não seriam suficientes para secar todo o lodo e espuma gerados em 2013, mas forneceria aproximadamente 60% da energia requerida no processo de secagem do lodo e da espuma.

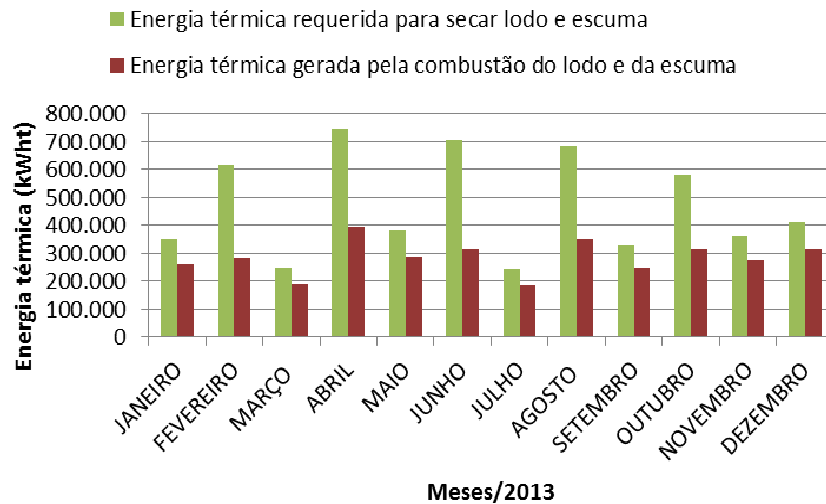


FIGURA 33 - GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E A ENERGIA TÉRMICA GERADA PELA COMBUSTÃO DO LODO E DA ESCUMA NA ETE SANTA QUIITÉRIA EM 2013

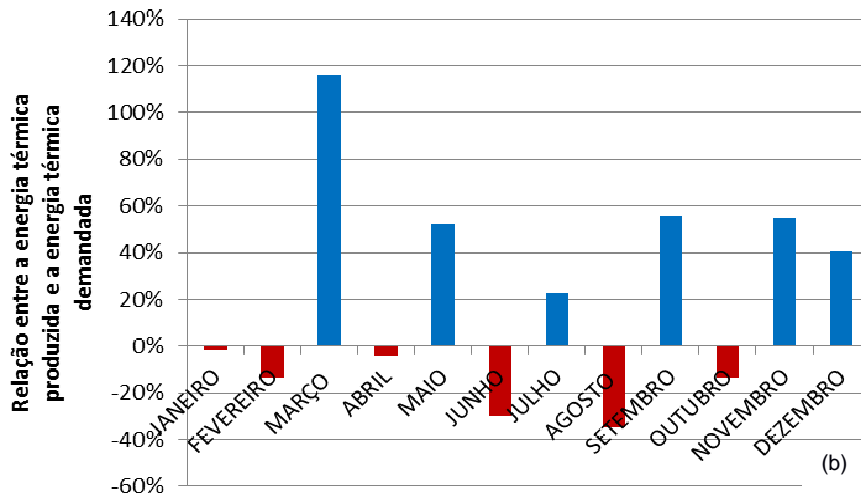
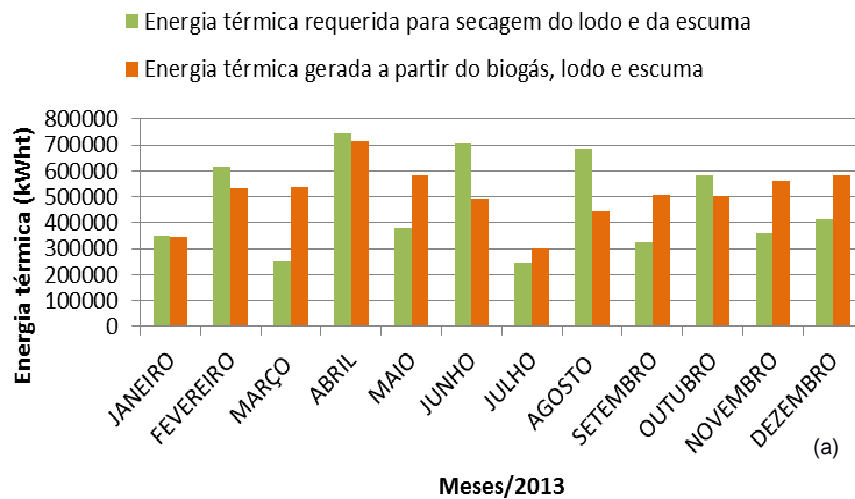


FIGURA 34 - (a) GRÁFICO DA COMPARAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA PARA SECAGEM DO LODO E DA ESCUMA E A ENERGIA GERADA PELO BIOGÁS, LODO E ESCUMA. (b) RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA PRODUZIDA E A ENERGIA TÉRMICA REQUERIDA NA ETE SANTA QUIITÉRIA EM 2013

Pode-se ainda adicionar a energia térmica proveniente da recuperação do biogás à energia gerada pela combustão do lodo e da espuma para a secagem destes dois materiais. Caso esta alternativa fosse adotada, a comparação entre a energia térmica produzida a partir dos três materiais para secagem do lodo e da espuma pode ser visualizada na FIGURA 34. A energia térmica média que poderia ser gerada com o reaproveitamento destes três produtos foi de $(508.760 \pm 109.856,95)$ kWh_t / mês, enquanto que a energia requerida para secagem do lodo e da espuma foi de $(471.674,94 \pm 183.354,90)$ kWh_t / mês. Com isso, seria possível secar todo lodo e espuma gerados em 2013, além de 445.028,77 kWh_t de energia térmica excedente que poderia ser aplicada em outros fins na própria ETE.

Como nas demais alternativas propostas anteriormente, sugere-se a instalação de silos e gasômetro para armazenamento e regularização da vazão dos materiais no processo de geração de energia a partir dos mesmos.

Como os valores aqui apresentados para a produção de biogás foram estimados e como os custos de implantação de sistemas de conversão de energia são altos, sugere-se a instalação de sistemas de medição de biogás na ETE a fim de quantificar os reais potenciais de aproveitamento desse material. Além disso, sugere-se que, ao calcular os potenciais de reaproveitamento de cada material, seja realizada a verificação preliminar dos rendimentos para conversão de energia, tendo em vista que estes valores podem variar de acordo com a tecnologia adotada para transformação da energia química em energia elétrica ou térmica.

Existem outras formas de se reaproveitar o potencial energético do lodo, da espuma e do biogás e, a cogeração é uma delas. Esta técnica associa a geração de energia elétrica por meio da conversão da energia química do material em energia elétrica e a geração de energia térmica por meio do calor produzido com o primeiro processo. Apesar de ser bastante atrativa, esta técnica não foi objeto deste trabalho. Sugere-se, portanto, a avaliação da cogeração de energia a partir dos subprodutos do processo de tratamento de esgoto.

5.2.3 Cálculo dos indicadores específicos de energia da ETE

Alguns indicadores específicos de energia inerentes aos processos da ETE Santa Quitéria para o ano de 2013 estão resumidos na TABELA 6. Para tratar esgoto ao longo de 2013 a ETE demandou 11,15 kWh_e / hab.ano. Esse valor foi requerido por menos de 10% das 3.493 ETEs da Alemanha que serviram de base para a elaboração da norma DWA-A 216. No entanto, isso não significa que a ETE é eficiente energeticamente, pois a norma em questão é aplicada às tecnologias de tratamento de esgoto existentes na Alemanha (em geral, compostas por tratamento aeróbio), onde há um consumo muito maior de energia elétrica por equivalente habitacional por ano, quando comparado a sistemas dotados de reatores anaeróbios como principal tratamento.

Os dados gerados podem ser utilizados como banco de dados para avaliação e comparação com a eficiência energética da própria ETE nos próximos anos ou com outras ETEs que possuem sistemas de tratamento similares. Dessa forma, consolidam-se, de forma inédita, dados de referência que permitirão avaliar a eficiência energética de cada um dos processos ao longo do tempo. Caso alguma ineficiência seja diagnosticada, então, recomenda-se a realização de análises energéticas detalhadas do processo sob investigação para que ações de otimização possam ser tomadas.

TABELA 6 - INDICADORES ESPECÍFICOS PARA O CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA NA ETE SANTA QUITÉRIA EM 2013

Processo	Indicador específico de energia (kWh _e / hab.ano)
Recalque de esgoto	3,10
Gradeamento mecanizado	0,02
Desarenador	0,04
Tratamento biológico (RALFs) - Biogás	9,84
Tratamento biológico (RALFs) - Lodo	3,33
Tratamento biológico (RALFs) - Escuma	0,38
Pós-tratamento (FADs)	6,92
Sistema de desaguamento de lodo	0,93
Higienização do lodo	0,03

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A partir da realização do estudo na ETE Santa Quitéria, conclui-se que a AFM e a AFE podem ser consideradas ferramentas de gestão para ETEs, pois permitiram apontar oportunidades de melhoria dos processos, oportunidades de redução de custos operacionais e oportunidades de reaproveitamento dos subprodutos do tratamento.

A aplicação da AFM possibilitou identificar e quantificar todos os insumos consumidos e subprodutos gerados no processo de tratamento da ETE Santa Quitéria ao longo do ano de 2013. Entre os materiais consumidos, citam-se, o esgoto bruto; o peróxido de hidrogênio que é aplicado no efluente dos RALFs para redução dos maus odores decorrentes do tratamento anaeróbico; o cloreto férrico utilizado como coagulante no pós-tratamento por FAD; o polímero usado como coagulante para auxiliar no processo de desaguamento de lodo; e o óxido de cálcio utilizado na higienização do lodo.

Dentre os subprodutos identificados e quantificados, elencam-se: os resíduos sólidos grosseiros removidos na grade mecanizada; a areia removida pelo desarenador; a espuma que flota e se acumula na superfície dos RALFs; o biogás formado durante o tratamento anaeróbico; o lodo excedente dos RALFs; o lodo proveniente do processo de FAD; o lodo caleado que recebe óxido de cálcio e que é posteriormente encaminhado para a reciclagem agrícola; o clarificado do processo de adensamento de lodo; o clarificado do processo de desaguamento de lodo; e o esgoto tratado.

A quantidade de cada material constante na AFM foi avaliada, o que permitiu realizar uma análise detalhada do desempenho operacional de cada processo. Por meio desta análise, verificou-se que a grade mecanizada existente removeu um volume de resíduos sólidos grosseiros quatro vezes inferior ao preconizado em literatura. Verificou-se ainda que, em 2013, a remoção de areia ocorreu por duas formas: caminhão de sucção e conjunto desarenador-braço mecanizado.

Considerando o volume de areia removido pelos dois métodos, a quantidade de areia removida foi próxima ao previsto em literatura. Contudo, considerando apenas o que foi removido pelo conjunto desarenador-braço mecanizado e a vazão correspondente ao mesmo período, o volume de areia removido pelo equipamento foi inferior ao reportado em literatura.

Observou-se que o volume de espuma produzido pela ETE é 12 vezes superior ao volume relatado por Souza (2006). Uma sugestão para redução deste volume seria a implantação de sistema de desaguamento antes do seu transporte, o que poderia diminuir o custo operacional com o transporte e destinação final deste resíduo. A remoção de lodo dos RALFs foi aproximadamente 25% inferior à produção de lodo excedente calculada de acordo com método proposto por Chernicharo et al. (1999).

Como a ETE ainda não dispõe de medidores de vazão de gás, a produção de biogás foi estimada segundo metodologia proposta por Lobato et al. (2012), que considera as perdas na geração ou deslocamento do material e, portanto, mais próximo da real produção deste material. Em 2013, estima-se que a ETE Santa Quitéria tenha gerado, aproximadamente, 447.759 Nm³ de biogás que poderia ser aproveitado para geração de energia elétrica ou térmica.

Além disso, observou-se que a dosagem de peróxido de hidrogênio para controle de odor superou o recomendado em literatura, o que acarreta em aumento do custo operacional da ETE. O consumo de cloreto férrico também superou a dosagem recomendada por Jordão e Pessôa (2001). No caso do peróxido de hidrogênio, a redução do consumo pode ser obtida com o aprimoramento do sistema de dosagem de produto. Já no caso do cloreto férrico, uma análise detalhada da causa do problema precisa ser realizada, uma vez que esta pode estar associada à qualidade do efluente dos RALFs, à eficiência dos floculadores ou ao sistema de dosagem do produto, por exemplo.

O alto consumo de cloreto férrico foi responsável ainda por aumentar a quantidade de lodo formado nos FADs e que precisa ser gerenciado, aumentando o custo operacional da ETE. A solução para a alta dosagem de cloreto férrico no sistema torna-se fundamental para economia de produto químico, minimização da produção de lodo e, por consequência, para a redução dos custos operacionais.

Para o gerenciamento do lodo desaguado, a análise detalhada indicou a secagem térmica do lodo como alternativa ao uso do óxido de cálcio para a higienização do lodo, o volume de lodo a ser transportado e destinado seria reduzido e eliminaria o gasto com produto químico.

A aplicação da AFE possibilitou identificar e quantificar todas as demandas de energia por processo e potenciais de reaproveitamento energético da ETE Santa Quitéria.

Por meio da AFE, verificou-se que os FADs são responsáveis pelo maior consumo energético da ETE Santa Quitéria, reduzindo uma das mais importantes vantagens do tratamento anaeróbio do esgoto que é o baixo consumo de energia. Sob este ponto de vista, torna-se relevante o reaproveitamento dos subprodutos do tratamento anaeróbio para geração de energia, como o lodo, o biogás e a espuma, que demonstraram, por meio da AFE, possuir um potencial energético suficiente para abastecer o consumo da ETE.

O recalque de esgoto é responsável pelo segundo maior consumo de energia elétrica na ETE, seguido do sistema de desaguamento de lodo. A grade mecanizada, o desarenador e o sistema de higienização do lodo correspondem aos menores consumos da ETE em 2013. Com relação à geração de energia, observou-se que o biogás é o que possui maior potencial para aproveitamento energético, seguido do lodo seco. Como os valores da produção de biogás foram estimados, recomenda-se a instalação de medidores de vazão de gás para verificação da produção real de biogás pela ETE.

Neste trabalho, foram realizadas algumas proposições de aproveitamento energético do biogás, do lodo e da espuma. Dessa forma, concluiu-se que o aproveitamento do biogás para geração da energia elétrica forneceria mais de 88% da energia consumida pela ETE Santa Quitéria em 2013. Caso o potencial energético da espuma e do lodo fossem utilizados para gerar energia elétrica a partir do processo de combustão, então, a energia produzida seria suficiente para abastecer, pelo menos, 33% da energia elétrica consumida pela ETE. Logo, se o aproveitamento do biogás, do lodo e da espuma fossem direcionados para a geração de energia elétrica, seria produzida energia elétrica suficiente para abastecer a operação da ETE Santa Quitéria no ano de 2013, ainda com um

excedente de 21%. Cabe destacar, no entanto, que nesse caso seria necessário dispendir energia no processo de secagem do lodo e da espuma.

Outra proposta avaliada neste trabalho foi o reaproveitamento do potencial energético do lodo, espuma e biogás para geração de energia térmica para a secagem e a higienização do lodo e da espuma. O aproveitamento do biogás para geração de energia térmica geraria aproximadamente 66% da energia requerida para secar o lodo gerado na ETE Santa Quitéria em 2013.

A combustão do lodo seco para gerar energia térmica para a secagem do lodo desaguado mostrou ser suficiente para gerar, pelo menos, 75% da energia requerida pelo processo. Se a espuma fosse acrescentada na combustão do lodo como combustível complementar e no processo de secagem, então, a energia da combustão dos materiais forneceria aproximadamente 60% da energia requerida para secagem do lodo e da espuma. Entretanto, se todo o lodo, a espuma e o biogás fossem direcionados para a secagem do lodo e espuma gerados pelo processo de tratamento, seria possível ainda gerar uma energia térmica excedente de 445.028,77 kWh_t em 2013.

Logo, conclui-se que se todos os materiais (lodo, espuma e biogás) fossem direcionados para geração de energia térmica, com foco na secagem do lodo e da espuma, ou de energia elétrica, a ETE Santa Quitéria, em 2013, teria sido autossuficiente, sob o ponto de vista energético.

Este trabalho propôs ainda, de forma inédita, indicadores específicos da AFM e da AFE para a ETE Santa Quitéria, baseados na DQO média anual de entrada da ETE e na vazão de esgoto tratado no ano e que poderão auxiliar o gerenciamento operacional dessa ETE. O cálculo anual desses indicadores permitiu gerar valores de referência para comparações futuras e avaliações da eficiência da ETE em questão. Isso facilitará o acompanhamento operacional da ETE pelo gestor responsável, que poderá identificar desvios no processo e propor análises detalhadas visando ações de melhorias.

Estes indicadores podem ainda ser aplicados em outras ETEs para acompanhamento operacional e gerar parâmetros, que possibilitarão a comparação da eficiência de diferentes processos de tratamento.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se a elaboração e comparação da AFM e AFE dos próximos anos para a ETE Santa Quitéria, com o intuito de levantar valores característicos de cada processo para comparação com os indicadores específicos propostos neste trabalho.

O procedimento proposto no Apêndice B deste trabalho também poderá ser aplicado futuramente em outras ETEs, com o intuito de gerar informações e alimentar um banco de dados nacional que poderá dar suporte ao gerenciamento de diversas ETEs

Recomenda-se avaliar ainda os reais impactos do separador trifásico modificado existente nos RALFs na geração do biogás, lodo e espuma, tendo em vista o número de reatores deste tipo empregados no estado do Paraná, e com o objetivo de gerar dados que servirão de referência para avaliação do desempenho operacional desse reator em específico e para elaboração de novos projetos.

Para facilitar a implementação da AFM e da AFE e melhorar a acurácia dos dados, sugere-se o aprimoramento dos sistemas de medição de materiais em ETEs, sobretudo porque alguns materiais relevantes para o processo, como o biogás, ainda não são medidos ou quantificados.

Sugere-se, também, a aplicação da análise do fluxo de materiais para a DQO e sólidos totais presentes no esgoto, visando avaliar a qualidade do efluente tratado de estações contendo reatores anaeróbios.

Recomenda-se, ainda, a avaliação da cogeração de energia como outra alternativa ao reaproveitamento do potencial energético dos materiais gerados na ETE Santa Quitéria.

REFERÊNCIAS

AISSE, M. M.; VAN HANDEEL, A.; VON SPERLING, M.; CAMPOS, J. R.; FILHO, B. C.; SOBRINHO, A. P. Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (coord). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

AISSE, M. M.; JURGENSEN, D.; SOBRINHO, P. A.; Avaliação do sistema reator RALF e flotação por ar dissolvido, no tratamento de esgoto sanitário. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coord). **Pós tratamento de reatores anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos**. Belo Horizonte: [s.n], 2001.

ALVEZ, H. B.; MOCHIDA, G. A.; CRUZ, G. J. G.; DUMA, M.; GOMES, C. S. Precipitação química e cloração para combate a maus odores em estações de tratamento de esgoto anaeróbias. **Sanare**. Revista Técnica da Sanepar, Curitiba, v.21, n.21, p. 19-32, jan./jun. 2004

AMOORE, J.; HAUTALA, E. Odor as aid to chemical safety: Odor threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. **J. Applied Toxicol.** 3 (6), 272-290.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Sanepar, 2001.

BARBOSA, A. J. S. **Gerenciamento operacional para estação de tratamento de esgoto**: Estudo da ETE Sideral, Belém/PA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

BAUER, D. Environmental policy: a growing opportunity for material flow analysis. **Journal of industrial ecology**, v. 13, n. 5, p. 666-669, 2009.

BERTRAM, M. MARTCHEK, K. J., ROMBACH, G. Material flow analysis in the aluminium industry. **Journal of industrial ecology**, v. 13, n. 5, p. 650-654, 2009.

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.

BORGES, E. S. M. **Tratamento térmico de lodo anaeróbio a partir da queima do biogás produzido em reator UASB objetivando a higienização e melhoria do biodisponibilidade e biodegradabilidade da fração orgânica.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa. **Ciência & Engenharia**, v. 17, n.1/2, p. 17-32, 2008.

BRASIL. Resolução CONAMA n. 430/2011. **Diário Oficial da União**, n.92, p. 89, 16 mai. 2011.

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.; Van HAANDEL, A.; AISSE, M. M; CAVALCANTI, P F. F. Reatores anaeróbios de manta de lodo. In: CAMPOS, J. R. (coord). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte, MG: UFMG, 2007.

DANTAS, A. M. M.; LEITE, V. D.; PRASAD, S.; LOPES, W. S.; ATHAYDE, J. B. JR.; SILVA, J. V. N. **Balanco de massa de DQO em reator anaeróbio de batelada tratando resíduos sólidos orgânicos.** Trabalho apresentado no 6. Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitória, 2002.

DAVID, A. C.; TSUTIYA, M. T. **Secagem térmica de bio sólidos na região metropolitana de São Paulo.** Trabalho apresentado no 21. Congresso Nacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, 2001.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di B., **Métodos e técnicas de tratamento de água.** v.1. São Carlos, 2005.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources.** 2 ed. Alemanha: Wiley-VCH, 2001.

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

ECKELMAN, M. J; CHERTOW, M. R. Using material flow analysis to illuminate long-term waste management solutions in Oahu, Hawaii. **Journal of industrial ecology**, 2009. Volume 13, número 5, páginas 758-774.

EPA – Environmental Protection Agency. **Biossolids technology fact sheet**: Alkaline stabilization of biossolids. Washington D. C., 2000.

EPA – Environmental Protection Agency. **Wastewater technology fact sheet**: Screening and grit removal. Washington D. C., 2003.

FAJARDO, P. A.; CORDEIRO, J. S. **Gestão ambiental integrada em ETES**: O caso da ETE Monjolinho – São Carlos/SP. Anais Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. V.5, N.1, 2013. Disponível em: <http://meioambientepocos.com.br/portal/anais/index.php>. Acesso em: 28/02/2014.

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

GOOGLE EARTH. **Imagem de satélite de 21 de maio de 2009**. Latitude 25°27'46.64"S, longitude 49°19'13.72". Acesso em 05/04/2014.

HERVA, M.; ÁLVAREZ, A.; ROCA, E. Combined application of energy and material flow analysis and ecological footprint for the environmental evaluation of a tailoring factory. **Journal of hazardous materials**, p. 231-239, 2012

IHLENFELD, R. G. K. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. A. (coord). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba, 1999.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro, 2009.

JUSTI, J.; ORTEGA, J. M.; JUSTI, E. B. L.; TEDESCO, M. V. **Viabilidade de geração de energia elétrica em estação de tratamento de esgoto urbanas baseado na REN 482/12**. Trabalho apresentado no 9. Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2013.

KHAN, A. A.; GAUR, R. Z.; TYAGI, V. K.; KHURSHEED, A.; LEW, B.; MEHROTRA, I.; KAZMI, A. A. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. **Resources, conservation and recycling**, 2011. Páginas 1232-1251.

KOVALTCHUK, G. E.; PILOTTO, J. S.; REIS, V. L. **Histórico dos RALFs e UASBs na Sanepar e remoção de espuma**. No prelo. 2006.

KOVALTCHUK, G. E. **Avaliação do Sistema de flotação por ar dissolvido como pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**: Estudo de caso. 194 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

KOWALSKI, F. M.; HUTTLER, W. Society's metabolism. **Journal of industrial ecology**, Massachusetts v. 2, n. 4, p. 107-136, 1999.

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. J. S. **Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético**. Trabalho apresentado no 2. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Londrina, 2011.

LIMA, P. L. **Energia no tratamento de esgoto**: Análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás. Dissertação (Mestrado em Programa de Interunidades de Pós Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização do lodo**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LINS, G. A. **Avaliação de impactos ambientais em estações de tratamento de esgotos (ETE)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

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

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science & Technology**, 2012. Volume 66, páginas 2745-2753.

MALDONADO, A. C. D.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R. Secagem de lodo de reator anaeróbio em secador rotativo com recheio de inertes. **FAZU em Revista**, 2009, n. 6, páginas 53-82.

MALTA, L. R. S.; TSUTIYA, M. T. **Otimização da Estabilização Cálctica do Biossólido Produzido na ETE Lavapés de São José dos campos / SP para o Uso Agrícola**. In: 22o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. Anais do 22o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2003. v. 1.

MARIN, C. A.; ISHISATO, E. M.; BONGIOLO, A. S.; ROSS, B. Z. 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.

MARTINS, O. S. **Aproveitamento de biomassa para s geração de energia elétrica**. In: 1. Seminário sobre utilização de energias renováveis para eletrificação rural do Norte e do Nordeste do Brasil, Brasília, 2004.

MASTELLONE, M. L.; BRUNNER, P. H.; ARENA, U. Scenarios of waste management for a waste emergency area. **Journal of industrial ecology**, v. 13, n. 5, 2009.

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

MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. 405 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica. São Paulo, 1998.

NAVAZO, J. M. V.; MENDEZ, G. V.; PEIRÓ, L. T. Material flow analysis and energy requirements of mobile phone material recovery processes. **Int J Life Cycle Assess**, n.19, p. 567-579, 2014.

NETO, C. O. de A.; CAMPOS, J. R. Introdução. In: CAMPOS, J. R. (coord). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNANDÉZ, J. E. Treatment of biogas produces in anaerobic reactor for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Science and Bio/Tecnology**, v.5, 2006.

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

ORTEGA, F. H. M.; ROSA, F. B.; SOUZA, J. F. **Geradores de água quente**, Universidade Estadual de Maringá, 2002.

PEGORINI, E.S.; ANDREOLI, C.V., SOUZA, M.L.P.; FERNANDES, F.; DOETZER, B; FERREIRA, A. C. **Produção e disposição final de lodo de esgoto na reciclagem agrícola da região metropolitana de Curitiba – PR**. Trabalho apresentado no 3. Simpósio sobre biossólidos no âmbito do Mercosul, São Paulo, 2003.

POSSETTI, G. R. C. P.; JASINSKI, V. P.; ANDREOLI, C. V.; BITTENCOURT, S.; CARNEIRO, C. **Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte**. In: Anais do 15. Simpósio luso-brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, Belo Horizonte, 2012.

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.

POSSETTI, G. R. C. P.; JASINSKI, V. P.; MESQUITA, N. C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. **Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico**. Trabalho apresentado no 27. Congresso Nacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013.

QUALLICAL. Cal hidratada e cal virgem. Disponível em: <http://www.quallical.com.br/Apostila%20cv.pdf>. Acesso em: 11/03/2013.

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 27. Congresso Nacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013.

RUSSI, D.; MARTINEZ, A. C. G.; MACHER, J. C. S.; GILJUM, S.; ALIER, J. M.; VALLEJO, M. C. Material flow in Latin America. **Journal of industrial ecology**, v. 12, n. 5/6, 2008.

SÁ, L. M. **Modelagem matemática da formação da emissão do gás sulfídrico no tratamento de esgotos domésticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

SCHOFIELD, T. **Sludge removal and dewatering process for dissolved air flotation systems**. Dissolved Air Flotation. International Conference. CIWEN: Londres, 1997. Páginas 309-322.

SERENOTTI, F. **A avaliação da secagem para redução do volume e inativação de microrganismos em lodo de ETE**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SGC – SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB. **Basic data on biogás**. Suécia: 2012.

SOUZA, C. L. **Estudo quantitativo e qualitativo de espuma acumulada em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SPELLMAN, F. R. **Handbook of water and wastewater treatment plant operations**. 3. ed. Florida: CRC Press, 2014.

TONINI, D.; DORINI, G.; ASTRUP, T. F. Bioenergy, material, and nutrients recovery from household waste: Advanced material, substance, energy, and cost flow analysis of a waste refinery process. **Applied energy**, n. 121, p. 64-78, 2014.

VAN HANDEEL, 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.

YOKOYAMA, K. M.; KUBO, H.; NAKAJIMA, K.; NAGASAKA, T. A material flow analysis of phosphorus in Japan. **Journal of industrial ecology**, 2009. Volume 13, número 5, páginas 687-705.

YOSHIDA, H.; CHRISTENSEN, T. H.; GUILDAL, T.; SCHEUTZ, C. A comprehensive substance flow analysis of a municipal wastewater and sludge treatment plant. **Chemosphere**, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.045>. Acesso em: 28/07/2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Brazil**: Health profile. Disponível em: <http://www.who.int/gho/countries/bra.pdf?ua=1>. Acesso em: 16/02/2014.

ZHANG, W.; XIAO, P.; LIU, Y.; XU, S.; XIAO, F.; WANG, D.; CHOW, C. W. K. Understanding the impact of chemical conditioning with inorganic polymer flocculants on soluble extracellular polymeric substances in relation to the sludge dewaterability. **Separation and purification technology**, 132, 2014, páginas 430-437.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES E PRODUTOS ASSOCIADOS COM ESTA DISSERTAÇÃO

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DOS FLUXOS DE MATERIAIS E DE ENERGIA EM ETES

APÊNDICE A

PUBLICAÇÕES E PRODUTOS ASSOCIADOS COM ESTA DISSERTAÇÃO

A.1 PUBLICAÇÕES EM ANAIS DE EVENTO

SHIRADO, J.; POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; ROSS, B. Z. L.; AMARAL, K. J. **Análise do fluxo de materiais em uma estação de tratamento anaeróbio de esgotos domésticos.** In: Anais do 34. Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Monterrey, 2014.

SHIRADO, J. POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; ROSS, B. Z. L.; AMARAL, K. J. **Análise do fluxo de energia em uma estação de tratamento anaeróbio de esgotos domésticos.** In: Anais do 29. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 2015 (submetido)

A.2 PRODUTOS TÉCNICOS

SHIRADO, J.; POSSETTI, G. R. C.; AMARAL, K. J. **Procedimento para análise dos fluxos de materiais e de energia em estações de tratamento anaeróbio de esgoto.** 2014.

SHIRADO, J.; POSSETTI, G. R. C.; AMARAL, K. J. Planilha eletrônica para avaliação e monitoramento do consumo e da geração de materiais e de energia em estações de tratamento anaeróbio de esgoto. 2014.

APÊNDICE B

PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DOS FLUXOS DE MATERIAIS E DE ENERGIA EM ETEs

OBJETIVO

Estabelecer procedimentos para elaboração da análise do fluxo de materiais e de energia em estações de tratamento de esgoto

TERMOS E DEFINIÇÕES

AFM – Análise do fluxo de materiais.

AFE – Análise do fluxo de energia.

AFME – Análise do fluxo de materiais e de energia.

ETE – Estação de tratamento de esgoto.

MATERIAL – Todo insumo, produto e subproduto consumido ou gerado no processo de tratamento de esgoto.

SISTEMA – Conjunto de processos alvo da AFM e da AFE.

PROCESSO – Local onde ocorre a transformação, transporte ou armazenamento de materiais.

FLUXO – Material ou energia que entrou ou saiu dos processos em determinado período de tempo.

PROCEDIMENTOS

1. ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAIS

1.1 ESCOLHA DO SISTEMA A SER AVALIADO

O sistema escolhido deverá abranger todos os processos de tratamento os quais se deseja avaliar, podendo o sistema englobar toda a ETE ou apenas parte dela.

1.2 IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Após a escolha do sistema a ser avaliado, todos os materiais (produtos químicos e resíduos) produzidos por cada etapa do processo de tratamento deverão ser identificados e classificados de acordo com a entrada ou saída.

1.3 QUANTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais identificados na etapa anterior deverão ser quantificados ao longo de um ano de operação e convertidos para a unidade volumétrica (m^3 / ano). A seguir são apresentados métodos para quantificação dos principais resíduos e produtos químicos encontrados em ETEs.

1.3.1 ESGOTO BRUTO

Calculado pela somatória do volume acumulado no ano, totalizado a partir das leituras indicadas pelo sensor instalado na calha Parshall, acrescido do volume de resíduos removidos no gradeamento e no desarenador (nos casos em que a calha Parshall encontra-se instalada à jusante da grade e do desarenador) e reduzidos os volumes de retorno dos clarificados do adensamento e do desaguamento de lodo (nos casos em que há retorno de clarificado dos leitos de secagem, adensador, centrífuga, filtro prensa, entre outros à montante da calha Parshall).

1.3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS GROSSEIROS

Calculado pelo número de caçambas removidas com resíduos do gradeamento no ano multiplicado pela capacidade volumétrica de armazenamento das caçambas.

1.3.3 AREIA

Calculado pela soma do número de caçambas removidas no ano, multiplicada por sua respectiva capacidade de armazenamento e/ou do número de caminhões de sucção utilizados para limpeza do desarenador multiplicado por sua respectiva capacidade de armazenamento.

1.3.4 ESCUMA

Número de caminhões de sucção utilizados na limpeza da espuma no ano multiplicado pela capacidade de armazenamento de cada caminhão.

1.3.5 LODO DESCARTADO DOS REATORES

Dado pela soma do volume de cada descarte de lodo realizado no ano, que é calculado pela diferença entre o nível da água no reator no início do descarte e o nível da água no final, multiplicado pela área da base do reator (utilizado com maior facilidade em ETEs que possuem reatores quadráticos ou circulares).

Nos locais onde há reatores do tipo tronco cônico, sugere-se que o cálculo seja realizado com base na operação de bombas de recalque de lodo ou pelo volume de poços intermediários entre o reator e sistema de desaguamento.

1.3.6 BIOGÁS

Caso não haja sistema de medição, pode-se estimar a produção de biogás de acordo com metodologia proposta por Lobato et al. (2012) para um cenário médio regular com expectativa de eficiência de remoção de DQO pelos reatores de aproximadamente 60%. Pode-se multiplicar o volume acumulado de esgoto tratado no ano (em m³) medido na calha Parshall de entrada da ETE pelo coeficiente 0,603 Nm³ de biogás / m³ de esgoto.

Em ETEs que possuem sistemas de medição, pode-se realizar a somatória do volume de biogás produzido diariamente em Nm³ no ano avaliado.

1.3.7 PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO

Nos locais onde se utiliza o peróxido de hidrogênio para controle de odor nos efluente dos RALFs, calcula-se pela quantidade de produto consumido no ano em quilogramas dividido pela massa específica do material (1,2 g / cm³)

1.3.8 CLORETO FÉRRICO

Nos locais onde se utiliza o cloreto férrico como coagulante, calcula-se pela quantidade de produto consumido no ano em quilogramas dividido pela massa específica do material (1,4 g / cm³).

1.3.9 LODO DOS FLOTADORES POR AR DISSOLVIDO

Pode ser estimado pela medição do tempo de funcionamento e das condições de operação das bombas que recalcam o lodo flotado e da soma quantidade de

caminhões de sucção destinados à limpeza de fundo dos flotores multiplicada pela sua respectiva capacidade de armazenamento.

1.3.10 SOLUÇÃO DE POLÍMERO

Consumo de polímero no ano em quilogramas dividido pela concentração do produto na solução (3 kg de polímero por 1 m³ de água).

1.3.11 LODO DESAGUADO

Calculado de acordo com a quantidade de sólidos totais presentes no lodo a ser desaguado multiplicado pelo volume de lodo antes do desaguamento e dividido pelo teor de sólidos totais no lodo desaguado.

1.3.12 CLARIFICADO DO DESAGUAMENTO

Soma entre os volumes de lodo a ser desaguado e de solução de polímero, subtraído do volume de lodo desaguado.

1.3.13 ÓXIDO DE CÁLCIO

Calculado pelo consumo de produto no ano em quilogramas dividido pela massa específica do material (920 kg / m³)

1.3.14 LODO CALEADO

Soma entre os volumes de lodo desaguado e de óxido de cálcio utilizado ao longo do ano.

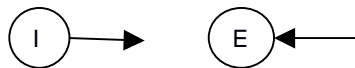
1.4 CONSTRUÇÃO DA AFM

Com os volumes dos materiais consumidos ou gerados no ano avaliado, deve-se construir o fluxo de materiais. Para tanto, sugere-se a utilização do programa computacional gratuito STAN, versão 2.5, da Universidade Tecnológica de Viena, que representam os fluxos proporcionalmente ao valor dos materiais transportado entre processos.

Os processos devem ser representados por retângulos com borda quadrada e identificados com o nome do processo em seu interior, conforme exemplo abaixo:

Nome do processo

Para melhor visualização e interpretação dos fluxos, sugere-se a representação dos mesmos com cores diferenciadas para materiais sólidos, líquidos e gasosos. Os fluxos contendo materiais de entrada do processo devem ser representados por um círculo contendo *I* – *import flow* e os de saída com *E* – *export flow*.



1.5 CÁLCULO DO INDICADOR ESPECÍFICO

Em seguida, deve-se dividir os volumes de consumo e geração de materiais do ano pelo equivalente populacional da ETE, cujo cálculo encontra-se representado na equação:

$$EP = \left(\frac{CA}{DQO_{\text{per capita}}} \right)$$

em que,

EP é o equivalente populacional em habitantes (hab.)

CA é a carga diária média anual de DQO afluente da ETE (kg/d)

$DQO_{\text{per capita}}$ é a DQO gerada por habitante por dia, sendo adotado neste estudo o valor de 0,120 kg / hab.d.

O indicador de consumo e geração de materiais pode ser calculado, então, da seguinte maneira:

$$M = \left(\frac{V_{\text{anual}}}{EP} \right) \cdot 1000 \quad (11);$$

em que:

M é o indicador do consumo ou de geração de materiais de um determinado processo da ETE, dado em L / hab.ano;

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

EP é o equivalente populacional característico da ETE.

Os indicadores específicos de cada processo serão representados na unidade $m^3 / \text{hab.ano}$.

1.6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E FREQUENCIA DE MONITORAMENTO

Sugere-se a realização anual da AFM e do cálculo dos indicadores em ETEs para análise crítica da operação do sistema. As informações geradas anualmente poderão ser comparadas com o intuito de avaliar o desempenho operacional da ETE sob investigação. Pode-se, ainda, comparar as informações com outras ETEs similares.

2. ANÁLISE DO FLUXO DE ENERGIA

2.1 ESCOLHA DO SISTEMA A SER AVALIADO

Recomenda-se a avaliação do mesmo sistema estudado na AFM.

2.2 LEVANTAMENTO DOS EQUIPAMENTOS ABRANGIDOS PELO SISTEMA

Deve-se realizar o levantamento de todos os equipamentos contidos nos processos de tratamento avaliados, bem como de suas características técnicas, como: potência ativa, fator de potência, a potência aparente (que corresponde à potência ativa dividida pelo fator de potência) e as horas de operação diárias de cada equipamento. Podem-se anotar as características de cada equipamento conforme exemplo a seguir:

Processo	Equipamentos	Potência ativa (kW)	Fator de potência	Potência aparente (KVA)

2.4 CONSUMO DE ENERGIA POR PROCESSO

Existem duas formas para cálculo do consumo de energia por processo que serão apresentados a seguir:

A primeira forma de medição consiste na instalação de medidor de consumo de energia na entrada do quadro de comando do processo. Dessa forma, é possível simular de forma mais sistemática o uso de inversores de frequência. Recomenda-se que a medição seja realizada em vários dias. O consumo médio diário da amostragem realizada deve ser posteriormente multiplicado por 365 dias por ano.

A segunda forma de medição é indireta e é realizada de acordo com as características levantadas no item anterior. O cálculo é realizado pela equação apresentada abaixo:

$$E_{\text{elétrica}} = P \cdot t \cdot F_c \cdot 365$$

em que:

$E_{\text{elétrica}}$ é o consumo de energia elétrica de um determinado processo, dado em kWh_e/ano;

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

t é tempo de operação diária do equipamento, expresso em horas (h);

F_c é o fator de carga considerado, que varia de acordo com a observação de horas efetivas de funcionamento do equipamento, levando-se em consideração paradas para manutenção e o uso de inversor de frequência, que pode variar de 0,1 a 1,0.

2.5 CONSUMO DE ENERGIA TOTAL DA ETE

Pode-se verificar o consumo de energia total do ano de duas formas:

- Pela soma dos consumos mensais registrados nas faturas fornecidas pela concessionária responsável pela distribuição de energia; ou
- Pela soma do consumo diário registrado pelos operadores diariamente às 0h no relógio da concessionária de energia.

A soma do consumo anual de cada processo deve ser equivalente ao consumo de energia total da ETE.

2.6 ENERGIA GERADA A PARTIR DOS SUBPRODUTOS DO PROCESSO

2.6.1 POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

A partir dos dados de geração de materiais obtidos com a elaboração da AFM, pode-se calcular o potencial energético de cada material, principalmente daqueles que possuem alto potencial de reaproveitamento, ou seja, o biogás, a espuma e o lodo. Para estimar o potencial energético do biogás, calcula-se a vazão média de metano anual presente no biogás, levando-se em consideração um teor de metano de 75% v/v. O valor obtido deve ser multiplicado pelo PCI do metano que equivale a 9,9 kWh_q/Nm³, para estimar a energia química associada ao biogás produzido na ETE.

2.6.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO E DA ESCUMA

A estimativa do potencial energético do lodo e da espuma deve ser realizada com base na equação que segue abaixo:

$$E_{\text{química}} = m_{\text{b.s.}} \cdot \text{PCI} \cdot F_{\text{conv}}$$

em que:

$E_{\text{química}}$ é a quantidade de energia química intrínseca ao material considerado, dada em kWh_q;

$m_{\text{b.s.}}$ é a massa do material em base seca, dada em kg;

PCI é o poder calorífico inferior do material, expressa em kcal/kg de base seca;

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

A estimativa do potencial energético do lodo deve utilizar como base o teor médio de sólidos totais presente no lodo desaguado no ano avaliado, por meio do qual se calcula a quantidade de matéria seca (em kg) produzida durante a operação da ETE no período. O valor encontrado é, então, multiplicado pelo PCI do lodo para obter a quantidade de energia disponível neste material.

Da mesma forma, calcula-se a quantidade de matéria seca presente na espuma utilizando a análise laboratorial para determinação de sólidos totais. Com este valor, efetua-se o mesmo cálculo aplicado para a estimativa do potencial energético do lodo.

Sugere-se a realização de análises laboratoriais para determinação do PCI da espuma e do lodo específicos da ETE estudada. Caso não seja possível, pode-se

utilizar os dados de caracterização realizados na ETE Atuba Sul em 2013 como referência. Tais dados encontram-se disponíveis na tabela a seguir.

Material	PCI
Lodo	2.000 kcal/kg b.s.
Escuma	1.884 kcal/kg b.s.

Os potenciais energéticos, associados com a energia química dos materiais e calculados com base na equação acima devem ser convertidos posteriormente para o potencial de geração de energia elétrica. Para o biogás, multiplica-se o valor encontrado por 36% e para a escuma e para o lodo, multiplica-se por 10%.

2.7 CONSTRUÇÃO DA AFE

A partir dos dados de consumo de energia anual e dos potenciais energéticos dos subprodutos pode-se construir o fluxo de energia da ETE sob investigação, com base no fluxograma da AFM, também utilizando o programa computacional gratuito STAN, versão 2.5, da Universidade Tecnológica de Viena.

2.8 CÁLCULO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para avaliação da eficiência energética dos processos de tratamento realizados na ETE em estudo, deve-se dividir o consumo anual de cada processo em kWh / ano pelo equivalente populacional calculado no item 1.5 deste documento.

2.9 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E FREQUENCIA DE MONITORAMENTO

A AFE e o cálculo dos indicadores de eficiência energética poderão ser realizadas ao menos 1 vez por ano. Os resultados contribuirão para monitorar a eficiência sob ponto de vista energético dos processos de tratamento com o intuito de otimizar a rotina operacional e dar suporte às tomadas de decisões da alta direção, principalmente com relação ao planejamento estratégico da empresa.