

“Desenvolvimento e Avaliação de Uma Miniestação Ecoeficiente de Tratamento de Esgoto e Reuso de Águas, com Sistema Registrador Queimador, para Baixas Vazões de Biogás e Cogeração de Energia”

EDERALDO GODOY JUNIOR

GUARATINGUETÁ
Julho de 2010



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA MINIESTAÇÃO
Ecoeficiente de Tratamento de Esgoto e Reuso de Águas,
com Sistema Registrador Queimador, para Baixas Vazões
de Biogás e Cogeração de Energia.**

EDERALDO GODOY JUNIOR

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na Área de Transmissão e Conversão de Energia.

**Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Co-orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino**

GUARATINGUETÁ
Julho de 2010

Godoy Junior, Ederaldo

G58
9d

Desenvolvimento e avaliação de uma miniestação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas, com sistema registrador queimador, para baixas vazões de biogás e cogeração de energia / Ederaldo Godoy Junior. - Guaratinguetá: [s.n.], 2010

158 f.: il.

Bibliografia: f. 111-118

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Co-orientador: Prof Dr. Marcio Marcelino Abud

1. Energia elétrica e calor – Cogeração 2. Biogás I.
Título

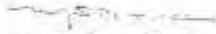
CDU 621.226

EDERALDO GODOY JUNIOR

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA


APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador


BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ LUIZ SILVEIRA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSLA
Unesp-Feg


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Unesp-Feg


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU


Prof. Dr. SEBASTIÃO CARDOSO
VSE/Lab. Motores

Julho de 2019

DADOS CURRICULARES

EDERALDO GODOY JUNIOR

Nascimento: 22.01.1970 - São Paulo (SP)

Filiação: Ederaldo Godoy
Maria Nilcéia Teixeira da Costa Godoy

1994/1998	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté
1999/2001	Mestrado em Ciências Ambientais Universidade de Taubaté
2005/2010	Doutorado em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista

PATENTES PUBLICADAS EM REVISTA DO INPI:

GODOY JUNIOR, E. SISTEMA COMPACTO DE BIODIGESTORES ANAERÓBIO-AERÓBIO-ANÓXIO PARA TRATAMENTO DE ESGOTO, 2003
Registro Patente de Invenção: PI – 0301475 – 4 (22) 09/05/2003.

GODOY JÚNIOR, E. SISTEMA MICTÓRIO PÚBLICO ECOEFICIENTE, 2006
Registro Patente de Modelo de Utilidade: MU – 8600199-0 09/02/2006

ARTIGOS PUBLICADOS EM REVISTAS:

GODOY JÚNIOR, E., MARCELINO, M.A., SILVEIRA, J.L., CAMARGO, J. R.,
Automated Burner and Biogás Register for Sewage Treatment Mini Stations, Defect
and Diffusion Forum Vols. 297-301 (2010), Trans Tech Publications, Switzerland,
pp 1097-1102, 2010.

CAMARGO, J. R. ; GODOY JÚNIOR, E. ; SILVA, N. P. . Performance Analysis of
a Rotary Wheel Dehumidifier Applied to Air Conditioning. International Journal of
Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering, v. 2, p. 186-190, 2006

CAMARGO, J. R. ; GODOY JÚNIOR, E. ; EBINUMA, C. D. . An Evaporative and
Desiccant Cooling System for Air Conditioning in Humid Climates. RBCM, v. Vol.
X, n. Nr. 3, p. 242-246, 2005

GODOY JUNIOR, E. ; CAMARGO, J. R. ; GIACAGLIA, G. E. O. ; SILVEIRA, J.
L. . Studies on technical and economical viability of biodigesters associated to water
reuse and energy cogeneration. Revista Ciências Exatas, v. 11, p. 2, 2005.

PROTI, L. M. B. C. ; CAMARGO, J. R. ; GODOY JÚNIOR, E. . ANALYSIS OF RAINFALL AND SOLAR ENERGY USE IN A SCHOOL BUILDING PLACED IN A BRAZILIAN CITY: A CASE STUDY. Revista SODEBRAS, v. 3, p. 3-3, 2008.

MENDES, D.H. ; PEREIRA, E.V. ; CARDOSO, S. ; GODOY JÚNIOR, E. . Biogas Use to Dry Sludge of Water Treatment and Electricity Energy Generation in a Brewery Industry. Revista Ciências Exatas, v. 14, p. 13-17, 2008.

ARTIGOS PUBLICADOS EM CONGRESSOS:

GODOY JÚNIOR, E., CAMARGO, J. R., MARCELINO, M. A., SILVEIRA, J. L. . AUTOMATED BURNER AND BIOGAS REGISTER for. In: DSL2009 - 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids Mass Transfer, Heat Transfer and Microstructure and Properties, ROMA, 2009.

GODOY JÚNIOR, E., SILVEIRA, J. L., GIACAGLIA, G. E. O.. SISTEMA RESIDENCIAL DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO SEGUIDO DE PÓS-TRATAMENTO AERÓBIO-ANÓXIO COLETIVO, SIDISA2004 - SIMPOSIO INTERNAZIONALE DI INGEGNERIA AMBIENTALE, TAORMINA, SICILIA, ITÁLIA, 2004.

GODOY JÚNIOR, E., SILVEIRA, J. L., GIACAGLIA, G. E. O., SISTEMA COLLETIVO DI MINIASTAZIONEÇÃO DI TRATTAMENTO DI REFLUE E RIUSO DI ACQUE ASSOCIÒ A LA UILIZZAZIONE ENERGETICA DI BIOGAS, In: SIMPOSIO INTERNAZIONALE DI INGEGNERIA SANITÁRIA AMBIENTALE, TAORMINA, SICILIA, ITÁLIA, 2004.

CAMARGO, J. R., GODOY JÚNIOR, E. AR CONDICIONADO POR RESFRIAMENTO EVAPORATIVO SOLAR, IV SIQA - IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL- GESTÃO AMBIENTAL URBANA E INDUSTRIAL, PORTO ALEGRE, RS, 2004,

GODOY JÚNIOR, E., SILVEIRA, J. L., GIACAGLIA, G. E. O., MINIASTAZÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E REUSO DE ÁGUA ASSOCIADA A COGERADOR COMPACTO DE ENERGIA A BIOGÁS, XI SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENEGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Natal, RN. 2004.

GODOY JÚNIOR, E., SILVEIRA, J. L., GIACAGLIA, G. E. O., TRATAMENTO ECOEFICIENTE DE ESGOTO SANITÁRIO PARA PEQUENAS

COMUNIDADES, 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, JOINVILLE, SC. 2003.

CAMARGO, J. R. ; OLIVEIRA, M. C. C. ; GODOY JÚNIOR, E. .
EXPERIMENTAL PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC MODULES
APPLIED TO AIR CONDITIONING. ENCIT - 12th Brazilian Congress of Thermal
Engineering and Sciences, ABCM, Rio de Janeiro, 2008.

GODOY JÚNIOR, E., GIACAGLIA, G. E. O., SILVEIRA, J. L., CAMARGO, J. R.
. Studies on Technical and Economical Feasibility of Digesters Anaerobic-Aerobic-
Anox to Sewage Treatment, Water Reuse and Use of Biogas. ECOS2007 - 20 th
International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and
Environmental Impact of Energy Systems, SGEEditoriali,, v. I. p. 769-776, Padova
Italy, 2007.

SANTOS, M. A. M. ; CAMARGO, J. R. ; GODOY JÚNIOR, E. . ENERGY
SAVINGS POTENTIAL USING BOILER'S EXHAUST GASES IN AN
EVAPORATIVE DESICCANT AIR CONDITIONING SYSTEM. COBEM2007 -
19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasilia. 2007.

GODOY JÚNIOR, E. ; GIACAGLIA, G. E. O. ; SILVEIRA, J. L. . SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE GÁS
NATURAL A BAIXA PRESSÃO E DE BIOGÁS DE ESGOTO. XII SILUBESA -
SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL, ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RECURSOS HÍDRICOS,
Figueira da Foz, Portugal, 2006.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Ederaldo e Nilcéia.

À minha estrela guia e esposa Liane, e aos meus filhos Juliane e Renan.

“ O homem racional adapta-se ao mundo,
o irracional tenta adaptar o mundo a si.
Portanto todo progresso depende
do homem irracional”
(Bernard Shaw, 1950).

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Taubaté, onde leciono, e à UNESP – Guaratinguetá, por me proporcionarem um ambiente ideal para o desenvolvimento de atividades de ensino e pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Luz Silveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Marcio Marcelino Abud a dedicação e o apoio.

Ao Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho o grande apoio na implantação da miniestação de tratamento de esgoto e reuso de águas na UNESP.

Aos professores Dr. José Rui Camargo, Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia, Dra. Valesca Alves Correa, Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes, Dr. Carlos Alberto Chaves, Dr. João de Oliveira e Msc. Aurélio Moreira da Silva Neto, da Universidade de Taubaté.

Aos professores Dr. Agnello Marotta Cassula e Dr. Júlio Santana, da UNESP.

Aos colegas de pós-graduação, Antonio Carlos Caetano e Marcio Evaristo.

Aos funcionários da UNESP, Regina, Cristina, Elisa, Mado, Sidnei, Sergio, Rogéria, Rodolfo e Fefeu.

À Diretoria do DMGroup, por me permitir conciliar as atividades de engenharia com as de pesquisa e inovação e aos meus colegas e amigos, Roberson Rodrigues da Silva e Pedro Henrique de Jesus.

A todos os amigos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu desenvolvimento.

A todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para criar dificuldades na minha vida e que, indiretamente, promoveram o meu desenvolvimento, o meu amadurecimento e a abertura de outras portas, para que eu pudesse e possa superar essas dificuldades criadas.

Aos meus irmãos de pesca, Dimitri Matoszko, Alex Ou, Francisco da Silva, Rodolfo Grellet Teixeira da Costa, Adriano da Costa Godoy, Andrey Matoszko e Rogério da Costa Godoy.

À minha esposa Liane, a sua dedicação, a paciência e o amor.

APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio logístico e financeiro de:

Santander Banespa;
TIGRE S.A. Tubos e Conexões;
FEHIDRO;
CNPq ;
UNESP;
Universidade de Taubaté;
SAEEG;
DM-Inspect ltda;
TRIGÁS Ltda;
KHOS.

GODOY JUNIOR, E. *Desenvolvimento e Avaliação de Uma Miniestação Ecoeficiente de Tratamento de Esgoto e Reuso de Água, com Sistema Automático de Queima, para Baixas Vazões de Biogás e Cogeração de Energia.* Guaratinguetá, SP, 2010. 128p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração em Transmissão e Conversão de Energia) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá.

RESUMO O presente trabalho trata do desenvolvimento, do processo construtivo, da implantação e da análise técnica, econômica e ambiental de uma miniEETERA (miniestação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas), em PVC e concreto armado, associada a um sistema de cogeração de energia a biogás e a um sistema registrador e queimador de biogás para baixas vazões. A miniETERA é composta por três digestores anaeróbios de fluxo ascendente, em manto de lodo, do tipo UASB (*upflow anaerobic slodge blanket*) modificado, dispostos em série, formando cascata, seguido de um digestor híbrido aeróbio (com ar) e anóxico (sem ar na presença de nitrato). Para efeito do trabalho foi avaliada a eficiência dos reatores UASB, cuja redução média da DQO (demanda química de oxigênio) do efluente foi de 80,1%, sem a utilização de elementos eletromecânicos. O biogás produzido pelo sistema apresentou concentração média de 57,99% de metano no UASB I, devida à hidrólise, e de 80,45% de metano no UASB II, devida essencialmente à atividade metanogênica. O sistema compacto de cogeração de energia desenvolvido é composto por um motogerador de potência nominal de 5,5 kW a gasolina, convertido a biogás e/ou gás natural a baixa pressão (GNBP), acoplado a um trocador de calor gás/água, para a geração de energia elétrica e água quente. O cogerador compacto foi testado experimentalmente, utilizando biogás oriundo do tratamento anaeróbio de resíduo avícola, com uma porcentagem de 60% de metano; obteve-se uma potência útil de 2,6 kW e, no caso do uso de GNBP, a partir de GNV (gás natural veicular) despressurizado, obteve-se uma potência útil de 4,2 kW. O reuso de água foi feito por meio de sistema de fertirrigação de um bosque em

formação, com o efluente tratado. A análise técnica e econômica da miniEETERA, em comparação com os sistemas tradicionais de tratamento de esgoto, mostrou-se interessante do ponto de vista ambiental, energético e econômico, pois permitiu conciliar o uso de energia renovável e o saneamento do esgoto e do biogás, uma vez que, no tocante ao efeito estufa, o metano presente no biogás é cerca de 21 vezes mais prejudicial que o gás carbônico. O sistema registrador queimador de baixas vazões de biogás a baixa pressão é composto por um gasômetro do tipo telescópico, como solução mecânica, conjugada a uma eletrônica, de forma que se promova a queima como última solução, quando é inviável, economicamente, o seu uso. O sistema de cogeração permite o aproveitamento energético do biogás produzido, convertendo, assim, o metano em gás carbônico, possibilitando, também, registrar o volume de biogás queimado, para passíveis créditos de carbono em mecanismos de desenvolvimento limpo. A associação da miniEETERA ao sistema de cogeração de energia mostrou-se inviável economicamente, devido à baixa produção de biogás, e a associação do queimador na miniEETERA mostrou-se bastante propícia ambiental e economicamente.

Palavras-chave: Biogás, Reuso de água, Cogeração, Tratamento anaeróbio de efluente.

GODOY JUNIOR, E. *Ministation of Treatment of Wastewater and Reuso of Water with Automatic Burns and System of Cogeneration of Energy the Biogas.* Guaratinguetá, SP, 2010. 116p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração em Transmissão e Conversão de Energia) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá.

ABSTRACT This paper deals with the development of the constructive process, and deployment of technical, economic and environmental dimensions of a EMSTWR (ecoefficient ministation of sewage treatment and water reuse), PVC and concrete, coupled with a cogeneration system to biogas energy system and a recorder and burner biogas for low flow. The Miniet is composed of two anaerobic digesters in upflow sludge blanket, UASB type (Upflow Anaerobic slodge blanket) modified, arranged in series forming cascade, followed by an aerobic digester Hybrid (air) and anóxico (no air in the presence nitrate) for the purpose of this study was to evaluate the efficiency of UASB reactors, whose average reduction of COD (chemical oxygen demand) of the effluent was 80.1% without the use of electromechanical components. The biogas produced by the system showed an average concentration of 57.99% methane in UASB I, due to hydrolysis, and 80.454% methane in UASB II, mainly due to methanogenic activity. The compact cogeneration power developed is composed of a motogenerator rated at 5.5 kW gasoline, or converted to biogas and natural gas at low pressure (NGLP) coupled to a heat exchanger gas / water for the generation electricity and warm water. The compact cogenerator was tested experimentally using biogas originating from anaerobic treatment of poultry manure, with a percentage of 60% methane, we obtained an output of 2.6 kW, and in case of using NGLP from NGV (Natural Gas Vehicle) depressurized, we obtained an output of 4.2 kW. Reuse of water was done through fertigation system in formation of a forest, with the treated effluent. A technical and economic analysis of EMSTWR compared with traditional systems of

sewage treatment, was interesting from the standpoint of environmental, energy and economic balance as it allowed the use of renewable energy, sanitation, sewage and biogas, a Since, in relation to the greenhouse effect, methane present in biogas is about 21 times more harmful than carbon dioxide. The system logger burner biogas low flow low pressure, is composed of a gas tank-type telescope, such as mechanical solution, coupled with an electron so that it promotes the burning when it is not feasible economically. The cogeneration system allows the energy use of biogas, thereby converting the methane into carbon dioxide, allowing also record the volume of biogas burned liable for carbon credits in clean development mechanisms. The combination of the system EMSTWR cogeneration Power to be uneconomical due to low production of biogás. The association of the burner in ministration of sewage treatment, proved well suited environmentally and economically, and can be displayed for the flaring of several ministration acting together.

Keywords: Biogas, Reuse of Water, Cogeneration, Treatment Waste Water.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

NOMENCLATURA

LISTA DE SÍMBOLOS e ABREVIACÕES

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	31
1.1 Considerações Iniciais.....	31
1.2 Objetivos.....	32
1.3 Estrutura da Tese.....	33
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO, UTILIZANDO BIODIGESTORES, DA PRODUÇÃO E DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO BIOGÁS.....	35
2.1 Tratamento de Esgoto no Brasil.....	35
2.2 Metabolismo Bacteriano nos Sistemas de Tratamento de Efluentes Orgânicos de Fácil Biodegradação.....	35
2.3 Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo.....	37
2.4 Biodigestores Aeróbios e Anóxicos.....	41
2.5 Sistemas Associados de Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente com Lodos Ativado Aeróbios.....	44
2.6 Estado da Arte da Geração de Biogás no Brasil.....	46
2.7 Impacto Ambiental Causado pela Emissão do Biogás e do Gás Natural e dos Seus Subprodutos na Atmosfera.....	46
2.8 Sistemas de Aproveitamento Energético de Biogás a Baixa Pressão.....	48
2.9 Sistemas de Purificação de Biogás.....	50
2.10 Sistemas de Armazenamento de Biogás a Baixa Pressão.....	52
2.11 Estado da Arte dos Sistemas Queimadores de Biogás Visando ao	

Saneamento Ambiental.....	54
CAPÍTULO 3 - REUSO DE ÁGUAS E METODOLOGIA DO PONTO MÍNIMO DE CONSUMO DE ÁGUA, O WATER PINCH.....	57
3.1 Reuso de Águas por Meio da Ferti-irrigação de Culturas com Esgoto Sanitário.....	57
3.1.1 Panorama Internacional.....	57
3.1.2 Panorama Brasileiro do Reuso de Águas.....	58
3.2 Estado da Arte do Ponto de Mínimo Consumo de Água em Uma Instituição de Ensino.....	60
3.3 Sistema de Reuso de Água Implantado e Aplicação da Metodologia do Ponto Mínimo de Consumo de Água.....	61
3.3.1 Configuração do Sistema de Reuso de Águas por Fertirrigação Implantado.....	61
3.3.2 Determinação do Ponto de Mínimo Consumo de Água com Reuso em Uma Instituição de Ensino – Estudo de Caso UNESP – Campus de Guratinguetá.....	62
3.3.3 Aplicação do Método Gráfico para a Determinação do Ponto de Mínimo de Consumo de Água na Instituição de Ensino em Estudo.....	62
3.3.4 Resultado da Aplicação do Método Gráfico para a Determinação do Ponto de Mínimo de Consumo de Água Com Reuso na Instituição de Ensino em Estudo.....	74
3.3.5 Comentários Referentes à Aplicação da Metodologia <i>pinch point</i> na Infraestrutura Predial – Estudo de caso UNESP Campus de Guaratinguetá.....	74
3.3.6 Sistema de Mictório Ecológico (ME) Desenvolvido para Promover o Reuso de Águas na Linha 1 – Reuso da Água do Lavatório na Descarga do Mictório.....	75
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E CONSTRUÇÃO DA miniEETERA.....	77

4.1 Condições Gerais.....	77
4.2. Configuração da miniEETERA.....	82
4.2.1 Sistema de Pré-tratamento.....	84
4.2.2 Sistema de Tratamento por Meio de Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente Otimizados.....	86
4.2.3 Sistema de Pós-tratamento por Meio de Biodigestor Aeróbio e Anóxico Tubular Vertical, com Aeração por Bolha Fina.....	89
4.2.4 Sistema de Lagoas para Complemento de Polimento e Armazenamento de Água de Ferti-irrigação.....	92
4.2.5 Detalhes Construtivos da miniEETERA em PVC e Concreto Armado...	92
4.2.6 Conclusões Referentes ao Sistema Construtivo da miniEETERA.....	93
CAPITULO 5 - SISTEMA DE COLETA, ARMAZENAMENTO E COGERAÇÃO DE ENERGIA A BIOGÁS.....	95
5.1 Configuração do Sistema de Coleta, Armazenamento e Filtragem de Biogás.....	95
5.2 Construção do Gasômetro em PVC e Concreto Armado.....	99
5.3 Sistema Compacto de Cogeração a Biogás e GNBP.....	100
5.4. Eficiência do Sistema Compacto de Cogeração a Biogás e a Gás Natural a Baixa Pressão.....	102
CAPÍTULO 6 - SISTEMAS QUEIMADORES DE GÁS E O QUEIMADOR AUTOMÁTICO DE BIOGÁS PARA PEQUENAS VAZÕES.....	103
6.1 Configuração do Gerador de Fâsca para o Sistema Queimador de Biogás Produzido por Miniestações de Tratamento de Esgoto.....	103
6.2 Sistema Registrador do Volume de Biogás Queimado.....	107
6.3 Descrição do Sistema Temporizador Inteligente.....	111
6.4 Viabilidade Técnica do Sistema Queimador Registrador de Biogás.....	111
6.5 Comentários Referentes à Viabilidade Técnica e Ambiental do Sistema	

Queimador Registrador de Biogás.....	112
CAPÍTULO 7 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA miniEETERA.....	114
7.1 Substrato.....	114
7.2 Partida da miniEETERA.....	114
7.3 Parâmetros Físico-químicos de Controle e Monitoramento da miniEETERA.....	115
7.3.1 Coleta das Amostras da Parte Líquida.....	115
7.3.2 Coleta das Amostras do Biogás.....	116
7.3.2.1 Procedimento de coleta das amostras do biogás a baixa pressão.....	117
7.3.2.2 Produção Estimada de Biogás.....	119
7.3.2.3 Determinação da Qualidade do Biogás.....	120
7.3.2.4 Resultados da Determinação da Qualidade do Biogás.....	121
7.3.2.5 Comentários Referentes a Qualidade do Biogás Produzido.....	125
7.3.3 Avaliação do pH.....	125
7.3.3.1 Resultados em Relação ao pH.....	125
7.3.4 Medida de Temperatura do Efluente.....	126
7.3.5 Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	126
7.3.5.1 Cálculo da Redução da DQO.....	127
7.3.5.2 Eficiência da miniEETERA na Remoção da Carga Orgânica Via Análise da Redução da DQO.....	127
7.3.5.3 Comentários Referentes ao Parâmetro DQO.....	130
CAPÍTULO 8 - ESTUDO ECONÔMICO DE CASO DE APROVEITAMENTO DE BIOGÁS NA miniEETERA.....	132
8.1 Análise Econômica da Associação Teórica da miniEETERA ao Sistema Compacto de Cogeração.....	132
8.2 Resultado da Análise Econômica da Associação Teórica da miniEETERA ao Sistema Compacto de Cogeração. Estudo de Caso: UNESP – Campus de Guaratinguetá.....	137
CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES.....	139

11.1 Considerações Finais e Propostas para Trabalhos Futuros.....	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
ANEXO I - Detalhes construtivos da miniEETERA em PVC e concreto armado.....	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho esquemático das variantes de respiração bacteriana.....	37
Figura 2.2 - Formas básicas para reatores UASBs.(fonte: VAN HAANDEL, 1994).....	40
Figura 2.3 – (A) Vista do reator fechado, indicando: 1 entrada do afluente, 2 saída do biogás, 3 saída do efluente tratado e 4 saída do lodo em excesso; (B) desenho esquemático do reator desenvolvido por GODOY JUNIOR (2001).....	41
Figura 2.4 - Desenho esquemático de sistema de tratamento aeróbio de esgoto por lodo ativado convencional.....	42
Figura 2.5 – Ilustração de sistema UASB IC + LA para tratamento de efluente da indústria cervejeira (Fotografado e montado pelo autor, Cervejaria Kaiser, Unidade Jacareí SP).....	45
Figura 2.6 – Vista de um flaire da ETE de uma cervejaria.....	49
Figura 2.7 – Gasômetro do tipo telescópico em aço para armazenamento de biogás em indústria cervejeira em operação.....	52
Figura 2.8– Gasômetro do tipo Zeppelin fora de operação por motivos de segurança.....	52
Figura 3.1 - Bosque em formação fertirrigado por gotejamento com o efluente tratado na miniEETERA.....	60
Figura 3.2 – Fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá, após a implantação da miniEETERA, sem considerar o reuso de água, utilizado como referência na construção da Tabela 3.1.....	63
Figura 3.3 – Gráfico da variação do contaminante com a carga sem reuso.....	66
Figura 3.4 – Fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá, após a implantação da miniEETERA, supondo o possível	

reuso de águas nas linhas 01 e 02, com aplicação da metodologia do ponto mínimo de consumo de água.....	67
Figura 3.5 – Gráfico da curva composta de concentração das utilizações de reuso em 1 e 2, efluente do lavatório utilizado na descarga do mictório.....	69
Figura 3.6 – Gráfico da curva composta de concentração das utilizações de reuso em 4 e 3, efluente do tratamento anaeróbio filtrado e clorado, utilizado na descarga do vaso sanitário.....	70
Figura 3.7 – Gráfico para a obtenção do ponto de mínimo consumo de água na linha de reuso do efluente do lavatório na descarga do mictório.....	72
Figura 3.8 – Gráfico para a obtenção do ponto de mínimo consumo de água na linha de reuso do efluente do tratamento anaeróbio, filtrado e clorado na descarga do vaso sanitário.....	72
Figura 3.9 – Desenho esquemático e maquete simulando a utilização do ME e vista da versão monobloco e da versão acoplável em mictórios já instalados....	75
Figura 4.1 – Fluxograma da veiculação original das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá, anterior à implantação da miniEETERA.....	77
Figura 4.2 - Planta esquemática da UNESP – Guaratinguetá anterior à implantação da miniEETERA.....	79
Figura 4.3 – Fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá após a implantação da miniEETERA e com possível aproveitamento de águas pluviais, visando à ecoeficiência predial.....	80
Figura 4.4 - Planta esquemática da UNESP – Guaratinguetá, dando ênfase à veiculação das águas após a implantação da miniEETERA e de possível aproveitamento de águas pluviais, visando à ecoeficiência.....	81
Figura 4.5 - Foto e desenho esquemático em 3D da miniEETERA.....	83
Figura 4.6 - Foto da miniEETERA com fluxograma da veiculação das águas, do biogás, do ar e da energia elétrica, no sistema implantado.....	83
Figura 4.7 – Desenho esquemático de funcionamento do sistema de pré-tratamento, desengorduramento, gradeamento, e desarenação.Fonte: GODOY	

JUNIOR (2003).....	83
Figura 4.8 – Grade em PVC confeccionada a partir de uma chapa de 3 mm em PVC.....	83
Figura 4.9 – Colocação das grades em PVC na caixa d’ água de 1.000 ℓ.....	86
Figura 4.10 – Vista do sistema retendo gorduras e sólidos grosseiros.....	86
Figura 4.11 – Desenho esquemático do Sistema Otimizado de Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo. Pat. Req. PI: 0301475-4	88
Figura 4.12 – Vista do sistema otimizado de biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente em manto de lodo implantado na UNESP - Guaratinguetá, com volume útil de 46 m ³	89
Figura 4.13 – Foto do sistema biodigestor aeróbio-anóxico implantado.....	90
Figura 4.14 – (A) Desenho esquemático do Sistema Otimizado Biodigestor Aeróbio e Anóxico Tubular Vertical, com Aeração Tipo Bolha Fina, pós-tratamento do efluente tratado anaerobiamente, (B) Biodigestor Aeróbio e Anóxico em 3D. Pat.Req.....	91
Figura 4.15 – Desenho esquemático das lagoas.....	98
Figura 5.1 – Desenho esquemático do sistema de armazenamento e purificação do biogás, associado ao sistema de cogeração de energia oriundo de estação de tratamento de efluentes de cervejaria.....	96
Figura 5.2 – Desenho esquemático do gasômetro em PVC Rib Loc. GODOY JUNIOR (2006).....	96
Figura 5.3 – (A) Gasômetro vazio; (B) Gasômetro com meia carga; (C) Gasômetro com plena carga.....	97
Figura 5.5 - Desenho esquemático do sistema de filtragem de biogás, por meio de filtros seqüenciais.....	98
Figura 5.6 - Filtro de biogás em PVC.....	98
Figura 5.7 – Concretagem e junção do concreto armado ao tubo de PVC.....	99
Figura 5.8 – Corte das chapas de PVC de 2 mm de espessura, no formato da	

tampa do gasômetro.....	99
Figura 5.9 – Colagem das duas chapas para formar a tampa do gasômetro, (A) aplicação de solução limpadora de PVC e (B) aplicação do adesivo de PVC....	99
Figura 5.10 – Chapas de PVC coladas para a formação da tampa do gasômetro.....	100
Figura 5.11 – Colagem da campânula do gasômetro.....	100
Figura 5.12 – Gasômetro acabado e conectado ao sistema biodigestor Anaeróbico, para a coleta e o armazenamento do biogás.....	100
Figura 5.13 - Sistema compacto de cogeração de 5,5 kW a gasolina e convertido a biogás e ou GNB, para a produção simultânea de energia elétrica e água quente. GODOY JUNIOR (2006).....	101
Figura 6.1 – Circuito do Ignitor da Brascabos.....	104
Figura 6.2 – Sistema de controle do queimador e registrador	106
Figura 6.3 – Sistema queimador registrador de biogás vazio, GODOY <i>et al</i> (2009).....	109
Figura 6.4 - Sistema queimador registrador de biogás na posição completo e em queima de biogás.....	109
Figura 6.5 – Desenho da maquete e protótipo do sistema queimador.....	110
Figura 7.1 – Inoculação, por meio de caminhão tanque, com lodo anaeróbico...	114
Figura 7.2 – Pontos de coleta das amostras do efluente na miniEETERA.....	115
Figura 7.3 – Pontos de coleta de biogás.....	116
Figura 7.4 – Foto ilustrativa dos pontos de coleta de biogás no UASB I e no UASB II.....	116
Figura 7.5 – Foto ilustrativa da pressão de 3cm de coluna de água nos pontos de coleta de biogás no UASB I e no UASB II.....	117
Figura 7.6 – Foto ilustrativa da coleta de biogás por meio de seringa plástica de 20 ml, nos pontos de coleta de biogás, no UASB I e no UASB II.....	118
Figura 7.7 – Foto ilustrativa da seringa cheia de biogás e lacrada por meio de elastômero termoplástico de uso em ortodontia.....	118

Figura 7.8 – Foto ilustrativa seqüencial da selagem da seringa cheia de biogás, por meio de elastômero termoplástico de uso em ortodontia.....	119
Figura 7.9 – Vista de tela de computador ilustrando os resultados na produção estimada de biogás, utilizando-se o software UASBWARE 1/98 – DESA (1998).....	120
Figura 7.10 – Gráficos da composição do biogás obtida pelo cromatógrafo a gás nas análises das amostras do biogás produzido pelo reator UASBI.....	123
Figura 7.11 – Gráficos da composição do biogás obtida pelo cromatógrafo a gás nas análises das amostras do biogás produzido pelo reator UASBII.....	124
Figura 7.12 - Gráfico comparativo da eficiência da miniETERA e da qualidade do biogás produzido, operando com biodigestores UASB, com um tempo de retenção hidráulica de 24 horas, conforme a Tabela 7.5.....	130
Figura 8.1 - Esquema de funcionamento do sistema tradicional por lodo ativado.....	132
Figura 8.2 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico.....	133
Figura 8.3 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico, com aproveitamento do biogás e fertirrigação com o efluente tratado.....	133
Figura 8.4 - Gráfico comparativo entre os três casos: Receita (US\$/ano) versus <i>payback</i> (anos).....	138

LISTA DE FIGURAS DO ANEXO I

Figura I.1 - Sequência de fotos da preparação do terreno e chegada dos tubos PVC.....	151
Figura I.2- Sequência de fotos da acomodação dos tubos, da vedação do fundo dos biodigestores, do ensaio de tancagem e da preparação da campânula.....	151
Figura I.3 - Sequência de fotos do corte das chapas em PVC, sua montagem e colagem nos tubos de PVC tipo Rib Loc.....	152
Figura I.4 - Fotos da sequência de fabricação dos sistemas de fixação das chapas de PVC no concreto armado, para estanqueidade e proteção corrosiva contra o gás sulfídrico presente no biogás.....	153
Figura I.5 - Fotos e descrição do procedimento de fixação do artefato na chapa de PVC e sua fixação nas ferragens da laje.....	154
Figura I.6 - Foto e desenho esquemático do artefato fixando a laje ao PVC Fonte: GODOY JUNIOR (2004).....	154
Figura I.7 - Foto do sistema de separação de fases sólida-líquida-gasosa em PVC.....	156
Figura I.8 - Foto da concretagem da tampa dos biodigestores anaeróbios e dos ensaios de tancagem e estanqueidade a gases.....	156
Figura I.9 - Ancoragem do tubo de PVC de 1.500 mm de diâmetro no concreto armado.....	157
Figura I.10 - Acomodação dos tubos de PVC de 2.500, 2.000, 1.500 e 1.200 mm de diâmetro.....	157
Figura I.11 - Reaterro do SOBAA.....	157
Figura I.12 - Ensaio de tancagem do SOBAA.....	158
Figura I.13 - Colocação das válvulas para retirada dos lodos aeróbio e anóxico..	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Eficiência do Sistema UASB e UASB-LA na remoção da carga orgânica de efluente de boa biodegradabilidade, adaptado de SILVA (1993).....	45
Tabela 3.1 – Irrigação com esgoto no Peru, BASTOS <i>et al</i> (2003).....	58
Tabela 3.2 - Informações gerais sobre os experimentos de utilização de esgoto tratado no Brasil, Edital 3, Tema 2 do PROSAB.....	59
Tabela 3.3 – Demanda de água para as utilizações na instituição de ensino em estudo, sem aplicação de reuso.....	67
Tabela 3.4 – Intervalos de concentração e carga de contaminantes.....	69
Tabela 3.5 – Carga de contaminante para todos os intervalos de concentração na linha de reuso do efluente do lavatório, na descarga mictória, denominada linha 1.....	69
Tabela 3.6 – Carga de contaminante para todos os intervalos de concentração na linha de reuso do efluente da miniEETERA, denominada linha 2.....	70
Tabela 6.1 – Descrição das funções do sistema de chaveamento do queimador	105
Tabela 7.2 – Análises de determinação da qualidade do biogás produzido no UASB I e no UASB II, com um tempo de retenção hidráulica de 24 horas, operando com efluente de suinocultura, segundo TOLEDO & LUCAS JÚNIOR (1997).....	121
Tabela 7.3 – Resultados das análises de determinação da qualidade do biogás produzido no UASB I e no UASB II, com um tempo de retenção hidráulica de 24 horas.....	122
Tabela 7.4 - Valores de pH observados em pontos de monitoramento do sistema durante a operação.....	126
Tabela 7.5 - Valores de DQO em mg/l, observados nos pontos de monitoramento da miniEETERA, durante a operação, e as temperaturas num	

TRH de 24 horas.....	128
Tabela 7.6 - Características comparativas de alguns parâmetros de reatores UASBs , conforme GIACAGLIA (1985), atualizada e ampliada, com o UASB estudado.....	129
Tabela 8.1. Dados das configurações das miniETEs, conforme Figuras 8.1, 8.2 e 8.3.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	metano	
$C_{i,\text{entra}}$	concentração de entrada	[mg/ℓ]
$C_{i,\text{saída}}$	concentração de saída	[mg/ℓ]
DBO	demanda bioquímica de oxigênio	[mg/ℓ de DBO]
DQO	demanda química de oxigênio	[mg/ℓ de DQO]
$f_{\text{H}_2\text{O}}$	fluxo de água	[t/h]
ℓ	litro	
Nm^3	normal metro cúbico	
Δm_i	carga de contaminante total transferida para a água	[kg/h]
$C_{i,\text{entra}}$	concentração sólidos solúveis de entrada	[mg/ℓ]
$C_{i,\text{saída}}$	concentração sólidos solúveis de saída	[mg/ℓ]
$f_{\text{H}_2\text{O}}$	fluxo de água	[t/h]
F_{min}	fluxo mínimo de água	[t/h]
$\Delta^*_{\text{mi,min}}$	ponto mínimo de consumo de água	[kg/h]
$C^*_{\text{i,min}}$	concentração de sais minerais na água de abastecimento	[mg/ℓ]
I_{pt}	custo de implantação	[US\$]
C_{et}	custo do esgoto tratado	[US\$/m ³]
C_{etS}	custo esgoto tratado pela consessionária	[US\$/m ³]
C_{oETE}	custo operacional da estação de tratamento de efluentes	[US\$/m ³]
C_{mETE}	custo de manutenção da estação de tratamento de efluentes	[US\$/m ³]
$C_{\text{tdL/mcct}}$	custo de transporte e descarte do lodo excedente por metro cúbico de esgoto tratado	[US\$/ m ³]
Q_{eb}	vazão de esgoto bruto	[m ³ /ano]
f	fator de anuidade	[1/ano]

q	coeficiente de retorno	[%]
r	taxa anual de juros	[%]
R	receita anual	[US\$/ano]
k	período de amortização de capital investido ou “ <i>pay back</i> “	[anos]
H	número de horas de operação por ano	[h/ ano]
I _{pt}	custo de implantação	[US\$]
P _{el}	custo de compra de energia elétrica	[US\$/kWh]
V _L	volume de lodo escedente	[m ³ /dia]
E _{req}	energia diária requerida pelos equipamentos de aeração e bombas	[kWh/dia]
E _p	energia diária produzida pelo cogrador	[kWh/dia]
TRH	tempo de retenção hidráulico	[horas e ou dias]

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

EEPROM	<i>electrical erasable programable read only memory</i>
ETE	estaco de tratamento de esgoto
GNBP	gás natural a baixa pressão
GNV	gás natural veicular
LA	lodo ativado
LED	diodo emissor de luz
miniEETERA	miniestaco de tratamento de esgoto e reuso de águas
miniETE	miniestaco de tratamento de esgoto
PVC	policloreto de vinilideno
RAFA	reator anaeróbio de fluxo ascendente
SOBAA	sistema otimizado de biodigestor aeróbio anóxio
UASB	<i>upflow anaerobic sludge blanket</i> , anaeróbio de fluxo ascendente em manto de lodo
UASBIC+LA	UASB com recirculao interna mais lodo ativado
UASB-LA	UASB seguido de reator de lodo ativado

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Nos últimos anos, a preocupação com a degradação do ambiente, especificamente com a qualidade das águas e do ar, vem aumentando, juntamente com a demanda crescente por energia e por água de boa qualidade.

Segundo o IBGE 2002, no Brasil, cerca de 60% do esgoto produzido é coletado, porém, uma pequena parcela de todo o esgoto produzido recebe algum tipo de tratamento antes de ser descartado nos corpos de água. Esta prática é responsável pela propagação de doenças hidrotansmissíveis, eutrofização das águas e desperdício do potencial energético do esgoto, como fonte geradora de biogás combustível e de biofertilizante, além do impacto ambiental causado pelo metano presente no biogás descartado na atmosfera.

O presente trabalho propõe um caminho ecoeficiente de utilização de um recurso energético rejeitado, permitindo utilizar o biogás para produzir; simultaneamente, duas formas de energias úteis: energia elétrica e térmica, e ainda, proporcionar saneamento ambiental de águas residuárias e do próprio biogás.

As demandas por energia e água de boa qualidade, de modo geral, relacionam-se com o aumento da população humana, e com a necessidade crescente de alimentos. Isso corrobora para o aumento da contaminação dos recursos hídricos, que, associado ao previsto aumento do custo da energia, apontam para o tratamento anaeróbio como alternativa viável para saneamento e geração de energia, a partir de materiais que foram, no passado, considerados descartáveis.

De acordo com Hespanhol (1997), nas regiões áridas e semi-áridas, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Planejadores e entidades gestoras de recursos hídricos têm procurado, continuamente, novas fontes de recursos para complementar a pequena disponibilidade hídrica. As águas de qualidade inferior, tais como esgotos,

particularmente os de origem doméstica, águas de drenagem agrícola e salobras devem, sempre que possível, ser consideradas fontes alternativas para usos menos restritivos. O uso de tecnologias apropriadas para o desenvolvimento dessas fontes constitui-se, hoje, em conjunto com a melhoria da eficiência do uso e do controle da demanda, uma estratégia básica para a solução do problema da escassez universal de água de boa qualidade.

O desenvolvimento de estações de tratamento de esgoto (ETEs) eficientes, associadas ao aproveitamento de biogás e com baixo custo operacional, é uma necessidade mundial, no tocante à conservação de recursos naturais de boa qualidade e de geração de energia. Em tempos de crise de energia, essa associação é uma variante bastante atrativa, uma vez que concilia saneamento com produção de energia.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e avaliar de uma miniestação de tratamento de esgoto e reuso de águas, associado ao aproveitamento e/ou à queima do biogás produzido, focando o aproveitamento energético e o seu saneamento ambiental.

Também são objetivos específicos deste trabalho:

- Criar condições para queimar e registrar pequenas vazões de biogás para mecanismos de desenvolvimento limpo;
- Colaborar com a descentralização do tratamento de esgoto sanitário;
- Apresentar as principais características operacionais e de projeto da unidade experimental construída;
- Avaliar o desempenho do sistema de miniEETERA (miniestação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas), em função da

remoção da carga orgânica, e a aplicação da metodologia do mínimo consumo no reuso de água;

- Avaliar econômica da viabilidade da implantação de miniEETERAs;
- Colaborar com o desenvolvimento sustentável e a disseminação da tecnologia desenvolvida.

1.3. Estrutura da Tese

A tese é constituída por 9 capítulos. Cada qual tem por finalidade expor os assuntos discutidos nos objetivos deste trabalho:

O Capítulo 1, “INTRODUÇÃO”, identifica o objeto de estudo, a miniEETERA associada à cogeração de energia e ao saneamento ambiental do biogás, em situações em que não é viável economicamente seu aproveitamento energético, principalmente devido ao volume de produção.

O Capítulo 2, “CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO, UTILIZANDO BIODIGESTORES, DA PRODUÇÃO E DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO BIOGÁS”, apresenta o estado da arte dessas tecnologias em regiões de clima quente.

O Capítulo 3, “REUSO DE ÁGUAS E METODOLOGIA DO PONTO MÍNIMO DE CONSUMO DE ÁGUA, O *WATER POINT*”, descreve o panorama dessas tecnologias em nível nacional e mundial, e o estudo de caso da UNESP – Campus de Guaratinguetá. Caracteriza o sistema de reuso de água para fins não potável implantado e descreve um estudo de caso de aplicação da metodologia na miniEETERA.

O Capítulo 4, “CARACTERIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA miniEETERA”, detalha a caracterização do sistema e o processo construtivo.

O Capítulo 5, “SISTEMA DE COLETA, ARMAZENAMENTO E COGERAÇÃO DE ENERGIA A BIOGÁS”, descreve o desenvolvimento e o processo construtivo do sistema desenvolvido.

O Capítulo 6, “SISTEMAS QUEIMADORES DE GÁS E O QUEIMADOR AUTOMÁTICO DE BIOGÁS PARA PEQUENAS VAZÕES”, descreve os sistemas queimadores de gás existentes e o sistema desenvolvido.

O Capítulo 7, “ESTUDO ECONÔMICO DE CASO DE APROVEITAMENTO DE BIOGÁS EM miniEETERA”, apresenta a análise econômica de um estudo de caso da miniEETERA associada ao aproveitamento de biogás, levando-se em conta a produção estimada teoricamente.

O Capítulo 8, “CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA miniEETERA”, apresenta os aspectos da partida da miniEETERA, sua operação e a metodologia de obtenção dos principais parâmetros de indicação da eficiência sanitária e da qualidade do biogás produzido.

No Capítulo 9, CONCLUSÕES GERAIS, são apresentadas as conclusões a respeito do desenvolvimento deste trabalho de tese e as sugestões de continuidade.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO, UTILIZANDO BIODIGESTORES, DA PRODUÇÃO E DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO BIOGÁS

2.1. Tratamento de Esgoto no Brasil

Segundo o IBGE (2000) e Alem Sobrinho *et al.* (1999), 66% dos distritos brasileiros possuem coleta de esgoto, porém, menos de 10% da população brasileira possui esgoto tratado. Dessa forma, 90% do esgoto produzido é descartado *in natura* nos corpos de água, causando a eutrofização das águas e a proliferação de doenças hidrotansmissíveis.

Conforme Fagundes (2003), cada dólar aplicado na coleta e no tratamento do esgoto sanitário pode valer até 100 dólares em saúde. Condição típica de países subdesenvolvidos (amebíase, cólera, esquistossomose, hepatite, infecções intestinais definidas, leptospirose, leishmaniose e outras). Nesta estimativa, são considerados os gastos com remédios e tratamento na rede pública, além da falta no trabalho, que os impede de produzir na cadeia produtiva. Chegou-se a uma média de 20 faltas ao longo de 30 anos, sem contar quando o trabalhador morre e acaba gerando um prejuízo maior ao Estado, com a falta de produção e as despesas previdenciárias. Além de que, a perda do chefe da casa acaba desestruturando a família, podendo levar os filhos à marginalidade e a outros problemas sociais.

O sistema de tratamento de esgoto mais utilizado no Brasil é o sistema de lodos ativados aeróbios, um sistema bastante seguro que, porém, produz muito lodo residual e consome muita energia elétrica para manter a aeração.

2.2. Metabolismo Bacteriano nos Sistemas de Tratamento de Efluentes Orgânicos de Fácil Biodegradação

O processo biológico de tratamento de efluentes depende do metabolismo, que, por sua vez, depende da respiração bacteriana. De acordo com Van Haandel

e Marais (1999), basicamente existem três tipos de respiração microbiológica: a aeróbia, a anóxia e a anaeróbia, ambas relacionadas com a ausência ou a presença de oxigênio dissolvido ou composto no efluente, na forma de nitrato ou fosfato. A Figura 2.1 mostra as variantes de respiração e de metabolismo bacteriano (aeróbia, anóxia e anaeróbia). Sempre que houver oxigênio dissolvido no meio aquático, as bactérias irão metabolizar primeiramente via respiração aeróbia, pois esse tipo de respiração é energeticamente mais rentável e produz mais massa bacteriana, ou seja, lodo.

Quando houver oxigênio dissolvido no meio aquático, as bactérias tendem a buscar para o seu metabolismo oxigênio via a respiração anóxia, utilizando-se de um aceptor de elétrons. A condição anóxia, significa uma condição sem oxigênio dissolvido, porém, na presença de um aceptor de elétrons, que pode ser, no caso, o NO_3 (nitrato), o NO_2 (nitrito), H_2PO_4 (fosfato), SO_2 (sulfato) ou o CO_2 (gás carbônico). O aceptor de elétrons é qualquer substância que receba elétrons em uma reação química, funcionando como agente oxidante. Na respiração anóxia, remove-se o nitrogênio e o fósforo, nutrientes causadores da eutrofização das águas.

Na total ausência de oxigênio dissolvido ou de aceptores de elétrons, as bactérias metabolizam via respiração anaeróbia, que disponibiliza apenas 10% da energia disponibilizada no processo aeróbio, o que reflete na reduzida produção de lodo, da ordem de apenas 25%, quando comparado com o processo aeróbio, além da produção de biogás (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

De forma geral, dependendo da disponibilização de oxigênio, as bactérias irão metabolizar o efluente na seguinte sequência: primeiro via aeróbia, segundo via anóxia, e, por terceiro, via anaeróbia. O metabolismo aeróbio e o anaeróbio são utilizados no tratamento de esgoto, para a remoção da carga orgânica, já o metabolismo anóxico é utilizado no pós-tratamento, para a remoção de nutrientes considerados agentes causadores da eutrofização das águas.

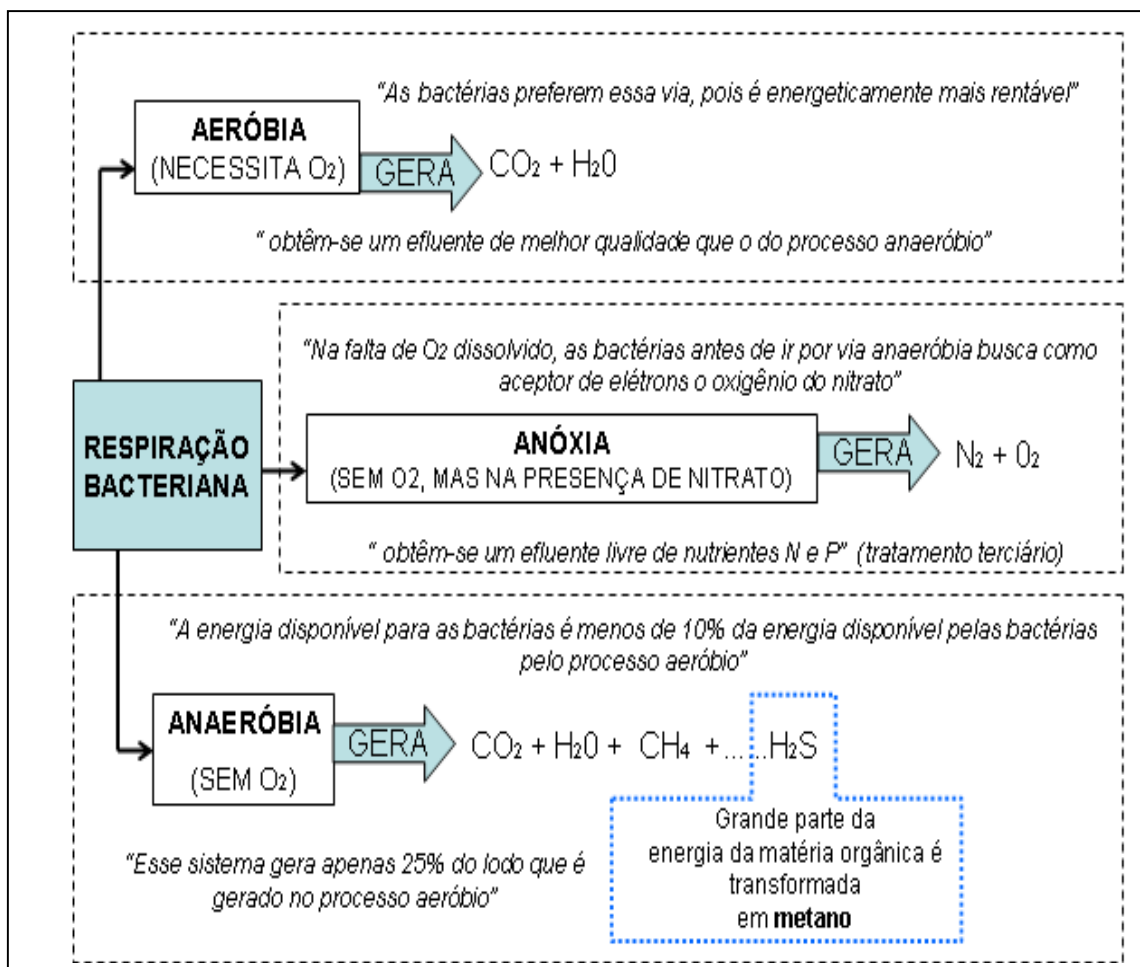


Figura 2.1 – Desenho esquemático das variantes de respiração bacteriana, adaptado de VAN HAANDEL e MARAIS (1999)

2.3. Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo

Os sistemas biodigestores podem ser naturais ou artificiais, e anaeróbios (sem a presença de ar) ou aeróbios (com a presença de ar).

Biodigestores anaeróbios naturais podem ser exemplificados como os pântanos, o leito de material em decomposição nos rios e lagos, e o intestino de animais de sangue quente, principalmente.

Biodigestores artificiais podem ser exemplificados pelos sistemas de biodigestores anaeróbios (Chinês, Indiano, Fossa Séptica, Filtros Anaeróbios, UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e outros sistemas citados na literatura).

O BAFA (biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente em manto de lodo), o UASB, também conhecido no Brasil como RAFA (reator anaeróbio de fluxo ascendente) ou DAFA (digestor anaeróbio de fluxo ascendente), foi desenvolvido por Gatze Lettinga e colaboradores, na Universidade de Wageningen, na Holanda, de 1970 a 1980. Os resultados experimentais nesse período foram bastantes animadores, mesmo quando submetidos a cargas orgânicas comparáveis àquelas aplicadas a processos aeróbios (lodos ativados), chegando-se a tempos de retenção hidráulica, tempo em que a massa de esgoto permanece no sistema de tratamento, da ordem de quatro horas. Os reatores UASB foram aplicados, com sucesso, no tratamento de vários tipos de águas residuárias de fácil biodegradação, variando de 100 a 1500 mg/ℓ de DQO (demanda química de oxigênio) (SILVA,1993 e VIEIRA *et al* 1987).

Segundo Chernicharo (1997), a utilização de reatores anaeróbios de fluxo ascendente em manto de lodo para o tratamento de esgotos domésticos, já é uma realidade no Brasil. As experiências bem sucedidas em diversas localidades no Paraná, São Paulo, Paraíba e Minas Gerais, com algumas estações já em operação e vários estudos, e projetos, contemplando este tipo de reator, são um forte indicativo do potencial desses biodigestores para o tratamento de esgotos domésticos.

As principais vantagens dos biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente, segundo Van Haandel & Lettinga (1994) e Chernicharo (1997), são:

- * sistema compacto, com baixa demanda de área;
- * baixo custo de implantação e de operação;
- * baixa produção de lodo;
- * baixo consumo de energia elétrica (apenas para a elevatória de chegada, quando for o caso);
- * satisfatória eficiência de remoção de DBO/DQO, da ordem de 65-85%;
- * possibilidade de rápido reinício, mesmo após longas paralisações;
- * elevada concentração do lodo excedente;
- * baixa produção de lodo excedente, quando comparado com o sistema tradicional de lodo ativado aeróbio;

- * boa desidratabilidade do lodo.

Embora os reatores UASB incluam amplas vantagens, principalmente no que diz respeito a requisitos de área, simplicidade e baixos custos de projeto, operação e manutenção, algumas desvantagens ainda são atribuídas aos mesmos, segundo van haandel & Lettinga (1994) e Chernicharo (1997):

- * possibilidade de emanção de maus odores, desde que o sistema não seja devidamente estanque;

- * baixa capacidade do sistema de tolerar cargas tóxicas;

- * elevado intervalo de tempo necessário para a partida do sistema, (2 a 4 meses), quando não se inocula lodo anaeróbio;

- * necessidade de uma etapa de pós-tratamento.

Os produtos do tratamento anaeróbio são um efluente líquido contendo restos sólidos do resíduo inicial e uma mistura gasosa chamada biogás, com poder calorífico por volta de 5.500 kcal/m^3 , dependendo da concentração de gás metano (CH_4) no biogás.

O gás gerado nesse processo é chamado de biogás, uma mistura de metano e dióxido de carbono, totalizando até 90 % em volume do biogás. A outra parcela (10%) é tipicamente formada por gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio molecular (N_2), hidrogênio molecular (H_2), metil-mercaptanas (CH_3SH), água (H_2O), amônia (NH_3), entre outros (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1996).

Em águas residuárias diluídas, de esgoto sanitário e de efluente de suinocultura, a carga hidráulica é o parâmetro mais importante na determinação da forma e tamanho do UASB.

O primeiro reator, em escala real com 200m^3 , (LETTINGA 1977), e a planta piloto da CETESB, em São Paulo, com 120m^3 (VIEIRA & SOUZA, 1986), apresenta uma forma pouco usual para um UASB: a área superficial da parte superior (decantador) é bem maior que a área da parte inferior (zona de digestão). Esse modo de projeto também foi usado nos RALFs, reator anaeróbio de leito fluidizado (sem separador de fase), no Paraná por GOMES (1985).

A grande área superficial do decantador favorece a decantação de lodo, o que é particularmente importante no caso de águas residuárias diluídas, quando se aplica uma alta carga hidráulica.

Por outro lado, no caso de águas residuárias concentradas, a carga orgânica normalmente é o fator limitante do projeto.

Nesse caso, a superfície do decantador pode ser menor que a da zona de digestão, sem que isso prejudique o desempenho do reator. Na prática, todos os UASBs, em escala real e em operação ou sendo construídos, têm paredes laterais verticais e, portanto, possuem áreas iguais nas zonas de digestão e de decantação, como mostra a Figura 2.2. (VAN HAADEL , 1994).

Pesquisadores brasileiros, empresas públicas e privadas, padronizaram a utilização da abreviatura UASB para todas as citações em artigos, projetos e normas que dizem a respeito aos biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente

A preferência recai nas construções com paredes laterais verticais e, por essa razão, discutir-se-á somente UASBs com paredes verticais.

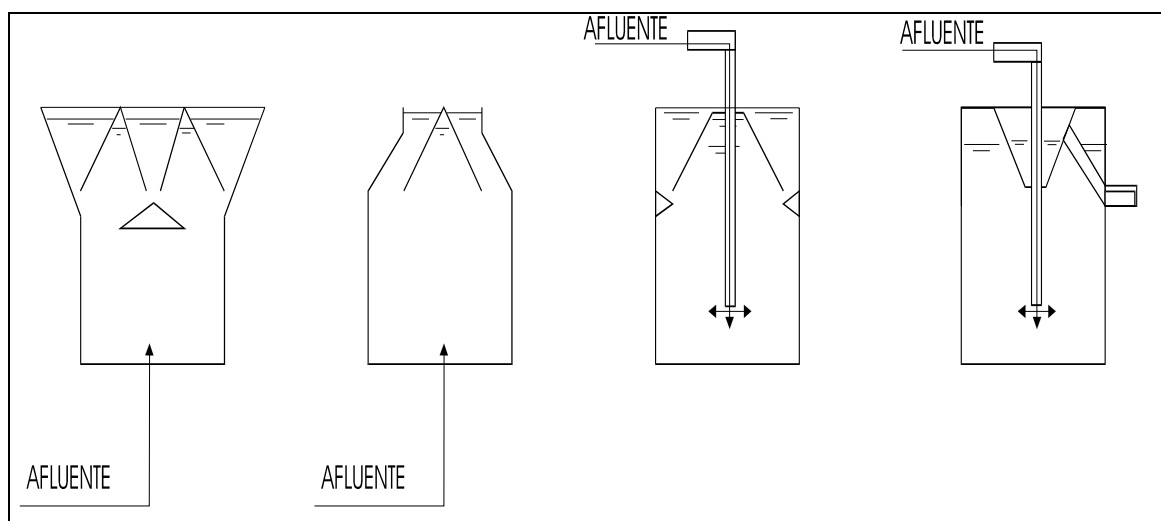


Figura 2.2 - Formas básicas para reatores UASBs (VAN HAADEL, 1994).

Godoy Junior (2001) desenvolveu um sistema otimizado de biodigestores UASB para o tratamento de efluente de suinocultura, composto por quatro reatores dispostos em série, formando cascata e utilizando separadores de fases em formato helicoidal. Obteve-se, em média, uma redução de 81,2% na DQO,

97,1% no NMP (número mais provável) de Coliformes totais e 92,8% no NMP de Coliformes fecais. O sistema biodigestor UASB otimizado operou sem a utilização de qualquer equipamento eletromecânico, apenas com a gradiente de gravidade entre a entrada do afluente e a saída do efluente tratado, o sistema está ilustrado na Figura 2.3.

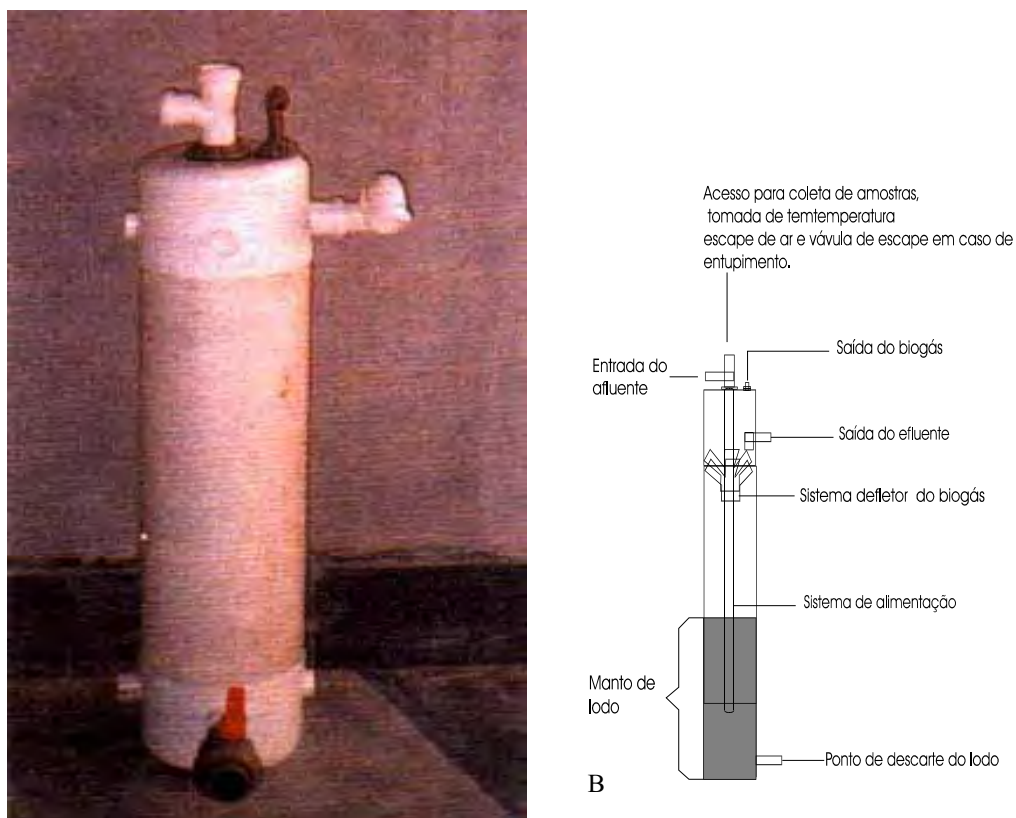


Figura 2.3 – (A) Vista do reator fechado, indicando: 1 entrada do afluente, 2 saída do biogás, 3 saída do efluente tratado e 4 saída do lodo em excesso; (B) desenho esquemático do reator desenvolvido por GODOY JUNIOR (2001)

2.4. Biodigestores Aeróbios e Anóxicos

Biodigestores aeróbios são reatores que operam na presença de oxigênio; os sistemas mais utilizados de reatores aeróbios são do tipo LA (lodo ativado). Sua configuração esta ilustrada na Figura 2.4.

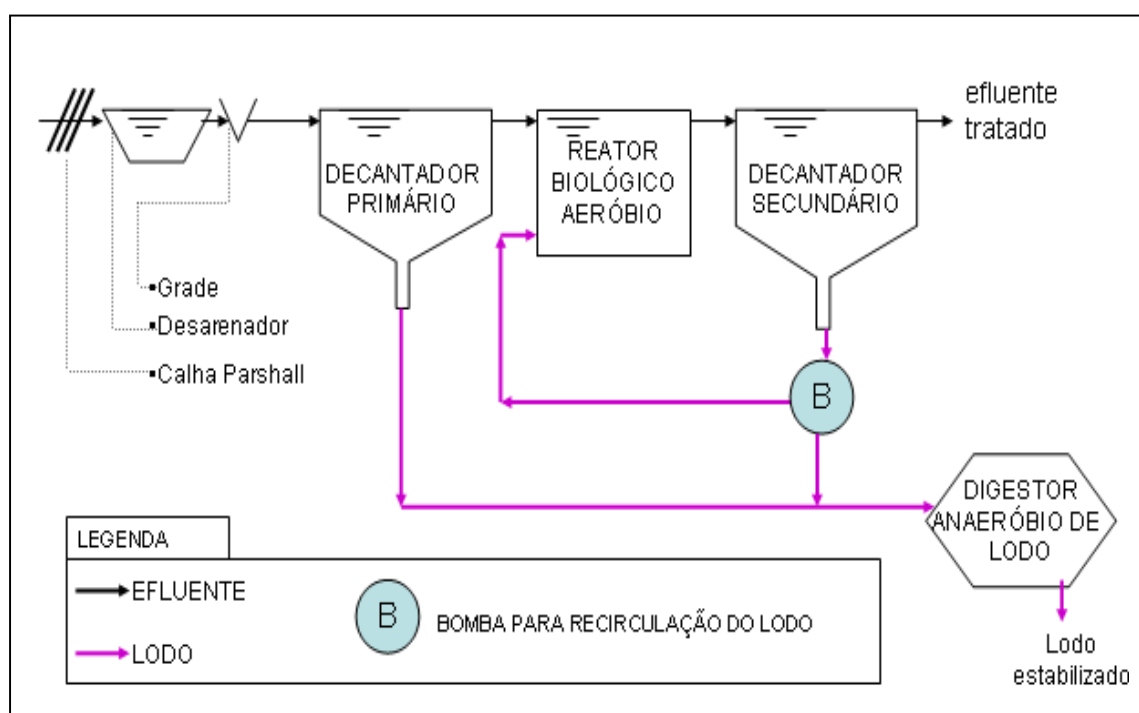


Figura 2.4. Desenho esquemático de sistema de tratamento aeróbio de esgoto por Lodo Ativado Convencional.

Ambiente anóxico é denominado um sistema sem a presença de ar, mas na presença de nitrato (VAN HAANDEL, 1994). Reatores anóxicos têm a função de remover biologicamente nitrogênio composto (nitrato e nitrito) do efluente, principais causadores junto ao fosfato da eutrofização das águas.

Segundo Van Haandel (1994), a remoção biológica de nitrogênio do esgoto ocorre na seguinte sequência: 1º) o nitrogênio orgânico presente no esgoto deve ser convertido em nitrogênio amoniacal (processo aeróbio ou anaeróbio); 2º) nitrogênio amoniacal deve ser convertido em nitrito (NO_2^-) (processo aeróbio); 3º)

o nitrito deve ser convertido em nitrato (NO_3^-) (processo aeróbio); e 4º) o nitrato deve ser convertido em nitrogênio gasoso (N_2) (processo anóxico), que é inerte.

Em regiões de clima quente, o tratamento anaeróbio de esgoto sanitário, por meio de reatores anaeróbios de fluxo ascendente em manto de lodo, tem se mostrado bastante eficiente na remoção da carga orgânica e de sólidos em suspensão. Isso, devido ao fato de consumir pouca ou quase nenhuma energia elétrica, dependendo do relevo da área de implantação, além de produzir biogás combustível que pode ser aproveitado *in situ*, como, por exemplo, na geração de energia elétrica para o acionamento de bombas ou aeradores de sistemas aeróbios de pós-tratamento. Porém o processo anaeróbio de tratamento é quase que insignificante no tocante à remoção dos micro-nutrientes (nitrogênio e fósforo). Com respeito à remoção de patógenos, não se consegue atingir uma qualidade mínima do efluente, capaz de atender a legislação vigente no caso de descarte em corpos de água.

Por isso, é necessário que o efluente passe por um pós-tratamento, para a remoção da DBO (demanda bioquímica de oxigênio) remanescente dos micro-nutrientes e dos patógenos. Como pós-tratamento de efluentes tratados anaerobiamente, podem utilizar vários processos, como os biológicos, químicos, físicos ou as suas combinações.

Cybis (2004) propõe remover nitrogênio em lodos ativados, tratando esgoto doméstico com DQO baixa, sem gastos, com uma fonte de carbono para estabelecer a desnitrificação, não comprometendo a qualidade do efluente.

Já Van Haandel & Lettinga (1994) propõe a remoção de nitrogênio do efluente, através dos processos biológicos sequenciais de nitrificação e de desnitrificação. Em regiões de clima quente, o desenvolvimento da nitrificação, no sistema de lodo ativado é praticamente inevitável, e, por essa razão o tratamento terciário não é opcional, pois sem ele não se pode garantir boa eficiência, pois as perdas periódicas de lodo darão ao sistema um desempenho irregular.

Em VAN HAANDELL & MARAIS (1999), uma das finalidades da subdivisão da zona anóxia é a otimização da remoção de nitrogênio através da desnitrificação em dois reatores: um de pré-desnitrificação e um de pós-desnitrificação,

lembrando-se de que um reator de pré-desnitrificação sempre tem uma capacidade de desnitrificação maior que um reator de pós-desnitrificação de tamanho comparável.

2.5 Sistemas Associados de Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente com Lodos Ativados Aeróbios

Segundo Van Haandel & Lettinga (1994) e Von Sperling (1997), no sistema integrado anaeróbio-aeróbio, o efluente é tratado, primeiramente, por reatores anaeróbios de fluxo ascendente; em seguida, passa por reator aeróbio para pós-tratamento. Esse processo gera um volume de lodo residual, cerca de 70% menor que a quantidade gerada pelo lodo ativado, pois grande parte desse lodo volatiliza na forma de biogás combustível, que pode ser aproveitado energeticamente, para diminuir os custos operacionais no tocante à compra de energia elétrica.

Silva (1993), por meio de experimento utilizando um reator anaeróbio de fluxo ascendente, UASB, seguido de um reator aeróbio do tipo lodo ativado (LA) convencional, e, levando em consideração que os períodos para a análise do comportamento do sistema de LA não são totalmente coincidentes com os UASB, recalculou os valores médios para vários parâmetros do UASB, nos mesmos intervalos de tempo, de forma a se poder avaliar a eficiência do sistema como um todo.

A eficiência do sistema UASB-LA, nos parâmetros físico-químicos, são resumidos na Tabela 2.1, que mostra a eficiência do sistema UASB e UASB-LA na remoção da carga orgânica de esgoto sanitário e efluente de indústria alimentícia de boa biodegradabilidade.

Uma variante atual e otimizada de UASB-LA, utilizada na indústria cervejeira, o sistema UASBIC+LA (UASB com recirculação interna mais LA), é capaz de remover em média 98% de DQO. O sistema, composto por um UASB seguido de um reator de oxidação, um LA otimizado, é mostrado na Figura 2.5.

Tabela 2.1 – Eficiência do Sistema UASB e UASB-LA na remoção da carga orgânica de efluente de boa biodegradabilidade, adaptado de SILVA (1993).

C o n d i ç ã o	Tempo de Retenção Hidráulica [h]		Eficiência do UASB [%]						Eficiência do Sistema Associado UASB-LA [%]					
	U A S B	U A S B + L A	D Q O	D Q O _M	D B O	D B O _M	S S T	S S V	D Q O	D Q O _M	D B O	D B O _M	S S T	S S V
1	9,0	12,0	72,5	78,8	89,4	93,5	81,8	85,6	88,9	89,6	-	-	94,2	96,4
	Total	21,0												
2	7,7	10,7	76,9	82,9	86,8	93,1	84,4	84,6	88,0	89,8	94,8	97,3	94,3	96,1
	Total	18,4												
3	6,4	9,4	62,7	-	76,7	-	78,9	80,0	78,2	82,1	95,6	98,8	88,6	91,7
	Total	15,8												



Figura 2.5 – Ilustração de sistema UASB IC + LA para tratamento de efluente da indústria cervejeira (Fotografado e montado pelo autor, Cervejaria Kaiser, Unidade Jacareí SP).

2.6 Estado da Arte da Geração de Biogás no Brasil

Segundo o IBGE (2000), no Brasil são produzidos cerca de 64.000.000 Nm³ de biogás por dia. Na produção de biogás, além do aspecto energético, o processo de digestão anaeróbia apresenta dois benefícios: o controle da poluição ambiental e a obtenção de um biofertilizante, cuja utilização possibilita a diminuição do consumo de fertilizantes químicos (PRADELLA & ALVES, 1999).

No Brasil já se tentou desenvolver programas de energização comunitária por biogás. Tais iniciativas datam de mais de trinta anos, tendo, aparentemente, perdido interesse dos órgãos responsáveis. Dentre esses, cita-se o Ministério de Minas e Energia através do “Departamento de Estudo de Novas Fontes Alternativas de Energia”, do projeto RONDON, da extinta EMBRATER e suas regionais, além de algumas secretarias estaduais de agricultura (COELHO et al., 2000).

Os efluentes, como os esgotos domésticos, comerciais e aqueles das indústrias alimentícias, de bebidas e de papel e celulose, possuem alto teor de matéria orgânica, o que propicia um alto potencial para emissão de metano. Por outro lado, o aumento desordenado da população e o desenvolvimento de grandes núcleos urbanos, sem planejamento adequado, dificultam as ações de manejo de resíduos sólidos e líquidos.

A necessidade de disposição e tratamento é reconhecida, mas, por falta de recursos, essas ações costumam ser postergadas, provocando grandes problemas de saúde nas populações e degradação do meio ambiente, não permitindo o uso energético racional do biogás e do biofertilizante que também é produzido, e que acaba sendo responsável pela eutrofização das águas e, posteriormente, mais produção de biogás.

2.7 Impacto Ambiental Causado pela Emissão do Biogás e dos Seus Subprodutos na Atmosfera

O efeito estufa é o aprisionamento de calor na atmosfera, impedindo sua perda para o espaço. Sem o efeito estufa, a terra seria aproximadamente 33 °C mais fria do que é, tornando-se inabitável (SCHIFFER & UNNINAYAR, 1991). O problema de nosso planeta agora é o aumento potencial do efeito estufa devido à alta concentração, na atmosfera, de gases como o metano, o gás carbônico, entre outros. Esses gases são, em grande parte, de origem antropogênica, e suas concentrações estão maiores do que em épocas passadas.

As fontes do efeito estufa são: (1) a produção de gás carbônico (CO₂) pela queima de combustíveis fósseis e biomassa (queimadas), e pelo uso de terra; (2) a produção de metano (CH₄) de várias fontes; (3) a produção industrial de gases, como os clorofluorcarbonos, que também implicam na redução do ozônio estratosférico; (4) a liberação de óxido nitroso (NO_x), principalmente pela aplicação de fertilizantes em terras cultiváveis; e (5) a produção de ozônio troposférico. Há outros 30 gases identificados que causam o efeito estufa, mas eles não acrescentam muito ao efeito global.

MILICH (1999) afirma que o gás metano contribui cerca de 21 vezes mais que o gás carbônico para o efeito estufa, e sua combustão é vista com vantagem, tanto para o meio ambiente, quanto para a geração de energia. A concentração do metano (CH₄), na atmosfera, pode ser controlada pela sua reação com o íon OH, na troposfera, que é o principal reservatório de metano, conforme a reação 2.1.



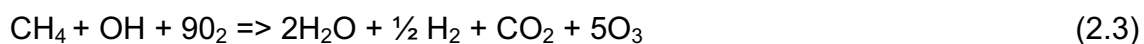
A quantidade final de metano atmosférico é sensível a fatores que afetam as concentrações de OH, incluindo as concentrações de vapor d'água e de ozônio. O efeito estufa causa um aumento de vapor d'água e, também, de OH, causando, assim, maior taxa de obtenção de metano. Enquanto a decomposição do metano conduz a uma produção de vapor d'água na troposfera, o mesmo não ocorre na estratosfera. Quando o metano atinge a estratosfera, ocorre um processo de

oxidação, gerando monóxido de carbono, que agrava o efeito estufa, conforme a reação 2.2 (MILICH,1999).



A formação do vapor de água na parte superior da estratosfera pode ser o agente responsável pelo desenvolvimento das nuvens geladas estratosféricas (polares) que agem como catalisadoras na destruição do ozônio estratosférico. A interação química entre o CH₄ e o ozônio (O₃) é bem conhecida.

Na troposfera, na presença de óxido nítrico (N₂O), o CH₄ produz O₃ de acordo com a reação 2.3.



Na região superior da troposfera, encontram-se as emissões dos motores a jato, que são fontes de óxido nítrico.

O ozônio não é um gás extremamente eficaz, quando se trata do efeito estufa, mas, em concentrações suficientes (60 ppb, parte por bilhão, de acordo com a *Environmental Protection Agency-EPA dos EUA*), ele age de forma despercebida, danificando a saúde humana e os ecossistemas.

Já, na região mais baixa da estratosfera, as mesmas reações produzem moléculas de ozônio, mas, desta vez o resultado passa a ser benéfico, pois a camada de ozônio é refeita. O metano também possui a característica de controlar o ataque dos átomos cloro-derivados sobre o ozônio, produzindo ácido clorídrico (HCl), que age como um reservatório inerte para o cloro, através da reação 2.4.



2.8 Sistemas de Aproveitamento Energético de Biogás a Baixa Pressão

Na grande maioria dos casos onde o biogás não é aproveitado energeticamente, ele é apenas queimado por meio de *flaires*, para evitar problemas como os maus odores do SO_2 e também devido a questões da legislação ambiental, evitando assim a emissão de metano direto no meio ambiente.

Segundo Cassini *et al.* (2003), as emissões naturais de CH_4 têm se mantido constantes, enquanto as antropogênicas têm aumentado consideravelmente, para as quais o tratamento de esgoto contribui com aproximadamente 7% das emissões de CH_4 para a atmosfera.

A Figura 2.6 mostra o desperdício energético por meio da queima de biogás, em um *flaire* (sem aproveitamento energético), em uma estação de tratamento anaeróbio de efluentes de uma cervejaria que produz cerca de 3.000 Nm^3 de biogás por dia.



Figura 2.6 – Vista de um *flaire* da ETE de uma cervejaria.

As concentrações dos constituintes do biogás dependem da natureza do resíduo digerido e do tipo de tratamento anaeróbico utilizado, mas pode-se considerar que o biogás possui características térmicas similares ao gás liquefeito de petróleo (GOVERNO DE PERNAMBUCO,1980).

O biogás não é venenoso e pode ser usado para cozimento, iluminação e aquecimento, além de refrigeração e geração elétrica, com uso de motores de combustão (MACINTYRE,1996).

Primeiramente, o biogás deve ser conduzido até um gasômetro, para armazenamento e estabilização da pressão do biogás produzido ao longo do dia; depois ele deve ser filtrado por meio de sistemas de filtro, para a retenção de SO_2 , quando se pretende operar com sistemas de combustão.

De acordo com U. S. DEPARTMENT OF ENERGY (1996), uma das aplicações mais simples do biogás é a combustão direta, geralmente empregando equipamentos modificados, originalmente projetados para outros combustíveis (GLP ou gás natural).

O emprego do biogás em motores de combustão interna requer uma adaptação dos equipamentos, para receber o novo combustível, de menor poder calorífico. Os motores a gás natural são os mais adaptáveis ao uso do biogás, devido à similaridade entre esses combustíveis, seguidos pelos motores a gasolina.

Existem algumas maneiras de se aproveitar a energia contida no biogás, como sua utilização em queimadores ou motores de combustão. Com respeito à geração de energia elétrica, pode-se empregar além de motores de combustão interna, turbinas a gás, caldeiras, célula de combustível e outros sistemas. Para tal, deve-se realizar algum processo de purificação antes do processamento do gás, proporcionando assim uma série de vantagens sobre o gás sem tratamento.

2.9 Sistemas de purificação de biogás

A purificação inicial do biogás visa, principalmente, à eliminação de substâncias quimicamente agressivas aos equipamentos nos quais o biogás será

processado. Ao sair do reator, o biogás pode ser usado diretamente em queimadores ou motores, embora existam certos componentes que, se forem retirados, causam uma melhora nas condições de uso do biogás.

Essas substâncias são basicamente o CO_2 , o H_2S e o H_2O , que podem ser retiradas por meio de processos simples e de baixo custo, quando se deseja um biogás de baixa qualidade, no caso de caldeiras, motores *Stirling* e de combustão interna, e sofisticados e caros, quando se deseja um biogás de alta qualidade, como é o caso das turbinas a gás.

A presença de compostos formadores de ácidos e de óxidos deve ser minimizada, pois esses podem causar processos de corrosão, resultando na deterioração antecipada dos equipamentos, exigindo aumento das atuações de manutenção e ocasionando a diminuição da vida útil do equipamento.

O tratamento visa, também, à eliminação de substâncias odoríferas e à redução de compostos poluentes. Esse processo faz com que se aumente a concentração de metano no biogás, causando a diminuição da concentração de compostos não-combustíveis, aumentando assim o poder calorífico da mistura gasosa.

Segundo o MANUAL DE INSTRUÇÕES PARA O USO DO BIOGÁS do GOVERNO DE PERNAMBUCO (1980), para a retirada de CO_2 do biogás, basta fazê-lo borbulhar em uma solução de água e cal, a uma concentração de 80:1, em massa. Isso diminuirá sensivelmente a concentração de CO_2 no biogás, aumentando o seu poder calorífico, pois o CO_2 não é combustível e só ocupa volume.

De acordo com a CAEEB (1981), para se retirar o H_2S do biogás, deve-se passá-lo por um tubo contendo óxido de ferro, que se converte em sulfeto de ferro e, novamente, em óxido de ferro por exposição ao ar ou mediante tratamento térmico. Pode-se, também, fazê-lo borbulhar em uma solução de soda cáustica (30%), contendo um pouco de sulfato de cobre (CuSO_4). O vapor de água do gás pode ser retirado mediante sifões de dreno, com saída para água. Já a umidade do gás pode ser retirada, fazendo-a passar por um tubo de cloreto de cálcio

(CaCl₂), sendo esse posteriormente recuperável por evaporação da água absorvida.

No PROSAB - PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (1999), a adsorção em carvão ativado utiliza um dos sólidos mais empregados na remoção de odores. Leitos rasos de carvão ativado, projetados para alta vazão de gases podem ser usados por longos períodos antes de serem trocados. A área superficial do sólido adsorvente é um parâmetro essencial na capacidade de captura do composto odorífero, sendo essa a principal razão do sucesso do carvão ativado e de alguns outros materiais utilizados na remoção de odor (por exemplo, alumina, bauxita, sílica gel e carvão de lenha; ainda que esses materiais tenham sua eficiência de adsorção reduzida pela fácil absorção de umidade).

O carvão ativado pode ser reutilizado após o seu saturamento, com a reativação feita em um forno apropriado, a cerca de 600°C, sendo que outros materiais possuem processos de regeneração problemáticos. Nos processos de adsorção, a umidade relativa do efluente deve ser mantida abaixo de 50%, e a temperatura não deve exceder 52°C, pois acima desses valores os gases não são facilmente adsorvidos.

Lucas Júnior (2002), na UNESP – Jaboticabal SP, purifica o biogás com o auxílio de um filtro de óxido de ferro, para retirada dos gases sulfurosos, e depois injeta o biogás na parte inferior de uma coluna de água, para retenção do CO₂.

2.10 Sistemas de Armazenamento de Biogás a Baixa Pressão

A maioria dos sistemas de gasômetros em operação é do tipo telescópico e construído em aço naval tratado com revestimento epóxi. Tal composição é uma proteção que prolonga a vida útil da campânula, porém não a livra de manutenções, no tocante aos danos causados pela corrosão. Também existem os sistemas infláveis, como os do tipo Zeppelin, porém menos utilizados devido aos altos riscos de segurança.

A Figura 2.7 ilustra um gasômetro em aço, e a Figura 2.8 ilustra um gasômetro do tipo Zeppelin, ambos localizados na estação anaeróbia de tratamento de efluentes em uma cervejaria no Município de Jacareí - SP.



Figura 2.7 – Gasômetro do tipo telescópico em aço para armazenamento de biogás em indústria cervejeira em operação.



Figura 2.8 – Gasômetro do tipo Zeppelin fora de operação por motivos de segurança.

2.11 Estado da Arte dos Sistemas Queimadores de Biogás, Visando Saneamento Ambiental

De acordo com TURNS (2000), para que uma mistura de biogás-oxigênio atinja o ponto de fulgor, é necessária que haja uma temperatura mínima suficiente para o enriquecimento da mistura. Existem 3 formas práticas de se conseguir essa fonte de calor: por chama piloto, por filamento incandescente ou por faísca.

A chama piloto não é recomendada para uma produção intermitente de biogás, devido aos custos energéticos para mantê-la acesa. O filamento incandescente, mesmo dentro de uma lâmpada, com gás especial, tem vida útil muito reduzida. Na atmosfera devido à ação dos ventos e da intempérie, o filamento se desprende, reduzindo assim, ainda mais a vida útil.

Existem diversos tipos de acendedores cuja fonte de calor é a faísca, incorporados a fogões a gás; o modelo mais comum proporciona a faísca por meio do impacto de uma haste contra um cristal piezoelétrico, que gera uma pequena corrente elétrica, passível de criar uma centelha suficiente para desencadear a combustão do gás combustível.

Outros tipos conhecidos de acendedores empregam um transformador que eleva a tensão da rede elétrica domiciliar a valores bastante altos; esta tensão é aplicada a dois eletrodos convenientemente dispostos, provocando a ionização do ar entre ambos. A isolação imposta pelo ar (3kV/mm) deixa momentaneamente de existir entre os eletrodos, e, em consequência, produz uma descarga elétrica que incandesce a mistura ar-gás.

Em geral, os faiscadores são conhecidos como ignitores. Os modelos convencionais de ignitores contínuos provocam o fenômeno desejado eletromecanicamente, quando acionado através de um par de contatos que alimenta o transformador. A comutação mecânica através de chave ou interruptor, comandado por bobina, produz transitório elétrico com elevada amplitude, induzindo alta tensão no secundário. Mas, como todo sistema de manobra possui baixa confiabilidade. Esses dispositivos têm vida útil curta, além de gerarem elevados ruídos eletromagnético e sonoro no ambiente. Em geral esses ignitores geram em torno de 240 faíscas por segundos (GODOY JUNIOR et. al. 2009).

Atualmente existem os ignitores que produzem a faísca, utilizando dispositivos de estado sólido. São os faiscadores eletrônicos que utilizam semicondutores na comutação. Isto gera um grande aumento na vida útil do dispositivo e também reduz substancialmente os ruídos eletromagnéticos e sonoros gerados. Em geral, esses ignitores geram em torno de 30 a 60 faíscas/seg..

Os faiscadores eletrônicos possuem expressiva redução no consumo de energia elétrica e são isolados por meio de resina, reduzindo o risco de explosão, devido a vazamento indesejado de gás.

Os primeiros circuitos utilizavam o centelhador a gás e, embora fossem melhores que os dispositivos de manobra, o índice de falha ainda continua elevado.

Entre outros circuitos, os faiscadores que realizam o chaveamento através de um SIDAC (*silicon diodo for AC*), que é um componente com curva característica equivalente a de uma lâmpada NEON, porém, é de estado sólido e bidirecional, e são muito eficientes, tendo em vista que o centelhador a gás tem um custo muito maior que um SIDAC, segundo SEMI SHINDENGEN (2007) e LITTELFUSE (2007).

Em geral, os faiscadores são alimentados com a tensão AC da rede, entre 90 a 240 Vrms. O circuito, através de um dobrador de tensão, armazena carga em um capacitor durante alguns ciclos da rede, sendo que, ao atingir a tensão de disparo do SIDAC, o primário de um transformador é alimentado com aproximadamente 270 V, induzindo no secundário algo em torno de 20 kV. Quem determina a tensão no secundário é o distanciamento entre os eletrodos. Cada eletrodo está distanciado de 4 mm do fio terra (NOBREGA 1993).

Os ignitores comerciais são produzidos para alimentarem sucessivamente de 4 a 6 bocas de um fogão, além do forno. Isto totaliza de 5 a 7 faíscas simultâneas. Um problema muito comum em ignitores de fogão é que, devido ao acúmulo de gordura nos eletrodos, muitas vezes a faísca encontra isolação maior que a de algum caminho alternativo, mesmo dentro do ignitor. Com um processo repetitivo, por este caminho interno, o ignitor acaba sendo danificado.

Para se evitar o rompimento interno da isolação, um caminho alternativo é oferecido à faísca, através de um orientador construído com um pedaço de condutor de cobre. Este orientador para faísca fica entre os eletrodos, distanciado duas vezes a distância nominal entre eles, porém localizado na carcaça do ignitor (8 mm). Ou seja, quando existir qualquer impedimento para a faísca romper o ar, nas extremidades dos eletrodos, ela encontrará um caminho alternativo, externamente ao ignitor, protegendo assim os componentes internos do mesmo. Isto aumenta ainda a vida útil do ignitor, que, em condições normais de operação, é especificado para suportar no mínimo 100.000 operações, com ciclos de: 3 segundos ligado e de 12 segundos desligado, conforme INVENSYSAPPLIANCE (2008) e MARCELINO (2006).

CAPÍTULO 3 - REUSO DE ÁGUAS E METODOLOGIA DO PONTO MÍNIMO DE CONSUMO DE ÁGUA, O *WATER PINCH*.

3.1 Reuso de Águas por Meio da Ferti-irrigação de Culturas com Esgoto Sanitário

3.1.1 Panorama internacional

De acordo com Bastos *et al.* (2003), a irrigação com esgoto sanitário tratado é praticada tanto em países industrializados quanto em países em desenvolvimento. Em vários países, essa prática é regulamentada em legislação específica e faz parte de programas governamentais de irrigação e gestão de recursos hídricos, como é o caso de Israel e do México.

Em Israel, por volta de 2010, estima-se que os esgotos tratados responderão por quase 30% de toda a água disponibilizada para a agricultura. Também é notável a experiência na Cidade do México, onde cerca de 45 m³/s de esgoto sanitário tratado, combinados com 10 m³/s de águas pluviais, são utilizados em 80.000 ha de culturas irrigadas de forrageiras e cerealíferas, não sendo oficialmente permitido o cultivo de hortaliças.

Conforme León & Moscoso (1996) citado por Bastos *et al.* (2003), no Peru, em 1985, o Programa Nacional de Reuso de Águas para a Irrigação previa a implantação por etapas de 18.000 ha de área irrigada. Entretanto, dados de 1996 registravam que 4.300 hectáres irrigados, cerca de 70%, eram utilizados para o cultivo de hortaliças, em sua grande maioria com águas residuárias brutas, conforme é mostrado na Tabela 3.1.

Já no Chile, de acordo com registros de 1986, todo o esgoto de Santiago era usado para fertirrigação em áreas vizinhas à cidade. Teoricamente este seria um caso de uso indireto, pois, em tese, a água utilizada para irrigação provém de corpos receptores de águas residuárias.

Os exemplos citados revelam que, apesar da utilização controlada de esgoto sanitário, ainda persistem situações não recomendáveis ou de total descontrole com imposição de sérios riscos à saúde pública. Entretanto, tais

situações não podem ser creditadas ao mero acaso, pois, muitas vezes, são frutos de imposições, como escassez de água, a restrição econômica e a necessidade de subsistência de pequenos agricultores, os quais, cientes do potencial fertilizante dos esgotos sanitários, não guardam reservas quanto à sua utilização diante das óbvias vantagens (BASTOS *et al.* 2003).

Tabela 3.1 – Irrigação com esgoto no Peru, BASTOS *et. al.* (2003).

CULTURA	PRODUTIVIDADE (kg/ha)	ÁREA (ha)	PRODUÇÃO (t/ano)	EFLUENTE
Algodão	3.500	200	100	Tratado
Milho	10.500	600	3.700	Tratado+Bruto
Cana-de-açúcar	18.000	260	4.700	Bruto
Alfafa	20.000	20	400	Tratado
Hortaliças	40.000	2.900	116.000	Bruto

Fonte: LÉON & MOSCOSO (1996).

3.1.2 Panorama Brasileiro do Reuso de Águas

O Edital 3, Tema 2 do PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico), apresentou, como tema, desinfecção de efluentes sanitários, remoção de patógenos e substâncias nocivas, visando à aplicação para fins produtivos, como agricultura, piscicultura e hidroponia.

Essa experiência acumulada e seus resultados foi apresentada por Bastos *et al.* (2003).

Os experimentos com ferti-irrigação e hidroponia envolveram a avaliação da produtividade alcançável e comparativa. A Tabela 3.2 mostra os experimentos utilizando esgoto tratado nas principais instituições brasileiras.

Tabela 3.2 - Informações gerais sobre os experimentos de utilização de esgotos tratados no Brasil, Edital 3, Tema 2 do PROSAB.

Instituição	Cultura irrigada	Método de irrigação	Hidroponia	Piscicultura	Alimentação animal com capim irrigado com esgotos
UNICAMP	Milho	Sulcos			
UNICAMP	Gramínea Tifton 85 (<i>Cynodon</i> sp.)	Inundação (escoamento superficial)			
UFCG	Algodão	Rega manual			
UFCG	Pimenta, mamona	Gotejamento			
UFPE	Milho, acerola	gotejamento			
UFRN	Capim, milho, arroz, girassol, gergelim, sorgo	Inundação superficial	Flores, milho forrageiro		
UFV	Milho e feijão	Rega manual	Milho forrageiro	Tilápia do Nilo	Caprinos e ovinos
UFV	Hortaliças: alface, couve, espinafre, pimentão, rúcula	Rega manual			
UFV	Brachiaria	Inundação		Tilápia do Nilo	
USP	Milho, girassol	Gotejamento	Flores	Tilápia do Nilo	

Fonte: BASTOS *et al.* (2003).

3.2 Estado da Arte do Ponto de Mínimo Consumo de Água em Uma Instituição de Ensino

Para maximizar o potencial de reuso de água e minimizar a geração de efluentes, em uma infraestrutura predial, deve-se realizar a análise do ponto de mínimo consumo de água, o “*water pinch*” (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

Para a implantação da ferramenta “*water pinch*”, devem ser levantados dados inerentes a infraestrutura predial existente, (MANN & LIU, 1999), na que são mais relevantes os seguintes levantamentos: Qual é o potencial para o máximo reuso e a mínima geração de efluentes no local em estudo? Como seria a adequação da estrutura existente? Qual a mínima vazão no sistema existente? Como desenvolver ou modificar o sistema existente para atingir a mínima vazão? Como o processo de utilização das águas no local em estudo deve ser modificado para maximizar o reuso de água e minimizar a geração de efluentes?

De acordo com Mierzwa & Hespanhol (2005), a metodologia de determinação do ponto de mínimo consumo de água permite definir a mínima demanda de água para um sistema. Pode-se determinar a rede de distribuição de água, por meio da alocação adequada dos fluxos de água limpa e de reuso. É importante destacar que a metodologia *water pinch* não inclui os procedimentos para a otimização do uso da água nos processos de utilização e nem leva em consideração a questão da viabilidade técnica e econômica para a implantação da infraestrutura necessária para promover a alocação dos fluxos, definidas em diagramas de distribuição das águas nos sistemas a serem estudados.

Dessa forma, exige-se o desenvolvimento de trabalhos complementares, que envolvem a avaliação no campo da viabilidade de implantação das alterações necessárias em cada caso.

A metodologia *water pinch* é uma ferramenta, por meio da qual primeiramente se analisa a demanda de água para as utilizações na infraestrutura predial, e levanta-se a variação do contaminante com a carga e a carga acumulada, sem a aplicação de reuso. Em seguida, determinam-se os intervalos de concentração e as cargas contaminantes, e as possibilidades de reuso dessas águas. Constróem-se gráficos da curva composta de concentração de

contaminantes, no fluido, e, finalmente, se obtêm o fluxo mínimo de água via a aplicação de equação apropriada, se leva em conta o ponto mínimo de consumo de água e a concentração de sais minerais na água de abastecimento.

3.3 Sistema de Reuso de Água Implantado e Aplicação da Metodologia do Ponto Mínimo de Consumo de Água

Caracteriza-se o sistema de reuso de águas para fins não potáveis implantado e desenvolve-se um estudo de caso de aplicação da metodologia do ponto de mínimo de consumo de água na infraestrutura predial da UNESP – Campus de Guaratinguetá.

3.3.1 Configuração do Sistema de Reuso de Águas por Fertirrigação

A fertirrigação com o biofertilizante líquido, o efluente tratado, é feita por meio de uma rede de tubulações com sistema de gotejamento próximo às raízes das mudas de árvores nativas de um bosque em formação, em área verde, nas dependências da UNESP - Campus de Guaratinguetá, conforme mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1 - Bosque em formação fertirrigado por gotejamento com o efluente tratado na miniEETERA.

3.3.2 Determinação do Ponto de Mínimo Consumo de Água com Reuso em Uma Instituição de Ensino.

Para maximizar o potencial de reuso de água e minimizar a geração de efluentes, na infraestrutura predial da UNESP – Campus de Guaratinguetá, foi realizada a análise do ponto de mínimo consumo de água, o *water pinch*, (MIERZWA & HESPANHOL, 2005).

Para a situação em estudo, nem todos os processos necessitam de água isenta de contaminantes, ou seja, água potável, como nos casos da descarga dos vasos sanitários, da descarga dos mictórios e da irrigação das áreas verdes, no que, pode-se utilizar o efluente gerado em um determinado processo diretamente em outro. Como por exemplo: o efluente dos lavatórios na descarga das micções; o efluente da miniEETERA, depois de clorado na descarga dos vasos sanitários; o efluente da miniEETERA na fertirrigação de áreas verdes. Simultaneamente, ocorrerá a redução da demanda de água e da geração de efluentes, ressaltando-se que a carga dos contaminantes não será alterada.

Para tanto, Mierzwa & Hespanhol (2005) recomendam dois métodos: o gráfico e o tabular, que determinam o ponto mínimo de consumo de água e conduzem ao mesmo resultado.

3.3.3 Aplicação do Método Gráfico para a Determinação do Ponto de Mínimo de Consumo de Água na Instituição de Ensino em Estudo

Este método consiste na construção de um gráfico que relaciona a variação da concentração do contaminante na água utilizada nos processos com a carga transferida para a água, denominada de curva composta de concentração. A determinação desta curva se divide em quatro etapas.

Primeiro, constrói-se um gráfico, considerando todos os processos nos quais a água é utilizada, relacionando a concentração do contaminante em função da carga acumulada, a variação da concentração é absoluta, enquanto a carga de

contaminante é relativa, significando que um processo é iniciado no ponto em que o anterior foi encerrado.

Na segunda etapa, o eixo das coordenadas y do gráfico, no qual estão representados os valores da concentração do contaminante, deve ser dividido em intervalos que correspondem às concentrações de limite do contaminante na entrada e saída de cada processo. Na terceira etapa, determina-se a carga de contaminante para cada intervalo de concentração definido e se constrói uma nova curva de variação da carga de contaminante.

Por fim, na quarta etapa as curvas compostas de concentração podem ser construídas, eliminando assim, as curvas originais de variação da concentração do contaminante com a carga, mantendo apenas os intervalos nos quais as curvas não se sobrepõem.

Para a construção da Tabela 3.1, que mostra a demanda de água para as utilizações na instituição de ensino em estudo sem a aplicação de reuso, foram desconsiderados os vazamentos e os períodos em que as válvulas de descarga dos mictórios mantiveram-se abertas sem a utilização, por esquecimento dos usuários ou problemas de manutenção.

A Figura 3.2 ilustra o fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá, após a implantação da miniEETERA, sem considerar o reuso de água, o qual foi utilizado como referência para a construção da Tab. 3.1.

Vale a pena salientar que, como o reuso de água, por meio da fertirrigação das áreas verdes, já era feito desde a implantação da miniEETERA, foi desconsiderado na determinação do ponto de mínimo de consumo de água.

Para a determinação da carga de contaminante total transferida para a água é utilizada a Equação 3.1.

$$\Delta m_i = f_{H_2O} (C_{i,saída} - C_{i,entra}) \quad (3.1)$$

Onde:

Δm_i = Carga de contaminante total transferida para a água = (kg/h);

$C_{i,entra}$ = Concentração sólidos solúveis de entrada (mg/ℓ);

$C_{i,saída}$ = Concentração sólidos solúveis de saída (mg/l);

f_{H_2O} = fluxo de água (t/h).

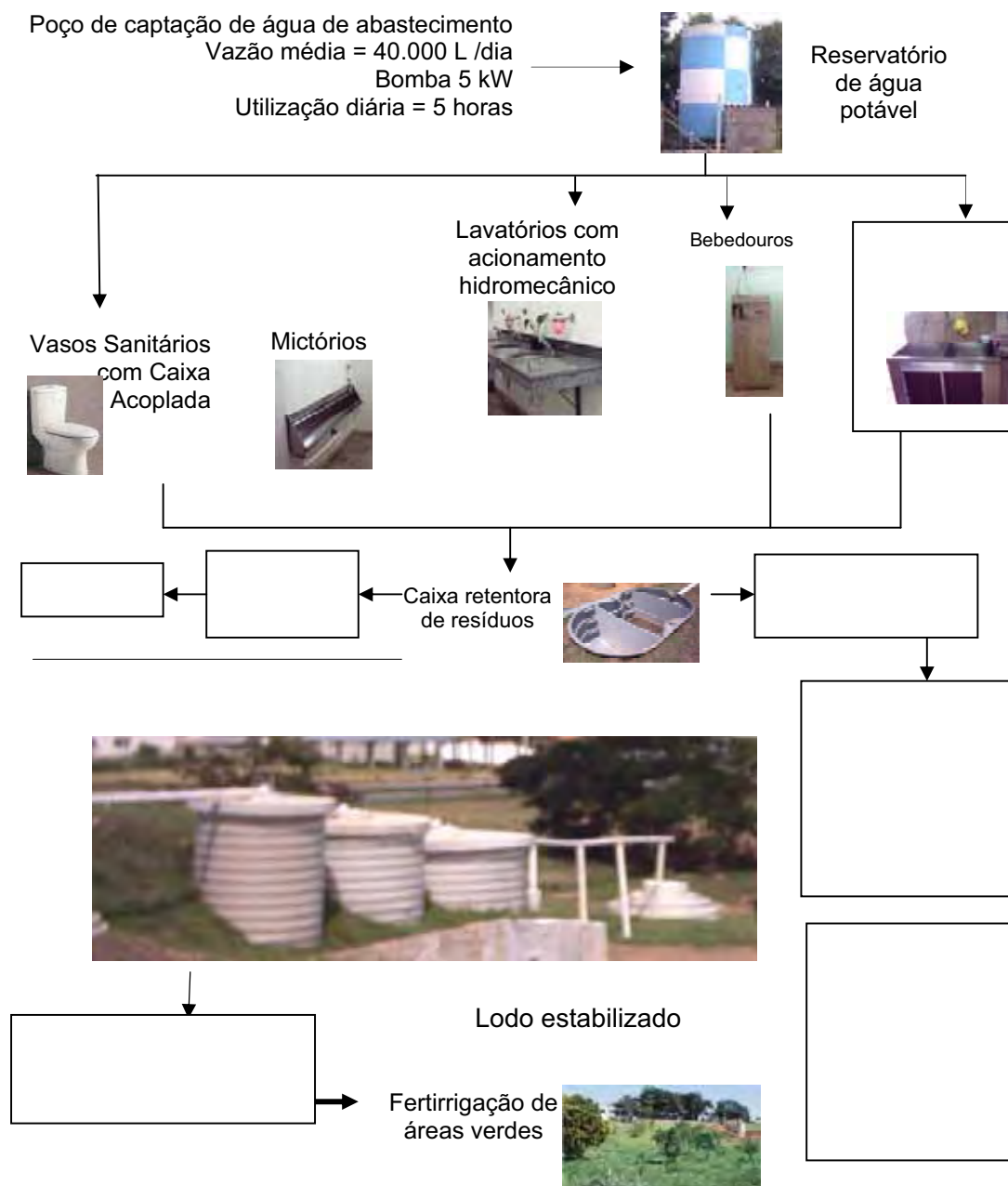


Figura 3.2 – Fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá após a implantação da miniEETERA, sem considerar o reuso de água, utilizado como referência na construção da Tabela 3.1.

Para os cálculos da demanda de água no lavatório, foram adotados: uma concentração sólidos solúveis de entrada de 0 mg/l de sais na água oriunda do poço da unidade em estudo e uma concentração de saída de 150mg/l, referente à água utilizada na lavagem das mãos, acrescida das impurezas das mãos mais o sabão utilizado. Dessa forma, considerou-se e adotou-se a massa específica da água de abastecimento de 1.000 kg/m³.

Para a descarga dos mictórios, só foram levados em conta os banheiros masculinos existentes na Instituição em estudo. Adotou-se uma população masculina de dois terços de um montante de 1200 pessoas. E, ainda, considerando que fora adotado, na jornada diária de cada indivíduo, em média utilizasse lavatório pelo menos 2,4 vezes por dia, consumindo em média 1,2 litros por acionamento das torneiras no ato de lavagem de higienização das mãos e na escovação dos dentes.

Nos 32 lavatórios existentes nos banheiros masculinos, o fluxo de água consumido pelos 800 indivíduos, nessa utilização, foi considerado de 2.304 litros, o equivalente aproximado de 2,4 toneladas de água por dia. Considerando que a instituição funcione do período das 8 às 22 horas, o fluxo de água médio nos lavatórios será de 0,172 t/h. Sendo assim, foi considerada como a carga de contaminante total transferida para a água no lavatório 0,0258 kg/h.

Para os cálculos no mictório, foi adotada uma concentração de entrada de 0 mg/l de sais na água oriunda do poço da unidade em estudo e uma concentração de saída de 220mg/l referente à água utilizada na descarga da micção acrescida de urina.

Para a descarga dos mictórios, só serão levados em conta os banheiros masculinos existentes na Instituição em estudo, e que fora adotado uma população masculina de dois terços de um montante de 1200 pessoas.

E, ainda, considerando que fora adotado na jornada diária que cada indivíduo em média utilizasse o mictório pelo menos 3 vezes por dia, consumindo em média 1,2 litros por acionamento das descargas dos mictórios. Nos 14 mictórios existentes nos banheiros masculinos, o fluxo de água consumido pelos

800 indivíduos nessa utilização é de cerca de 2.880 litros, o equivalente aproximado de 2,9 toneladas de água. Considerando que a instituição funcionasse do período das 8 às 22 horas, o fluxo de água médio nos mictórios será de 0,207 t/h. Sendo assim a carga de contaminante total transferida à água no lavatório será de 0,0455 kg/h.

Para os cálculos no vaso sanitário, foram adotados concentração de entrada de 0 mg/l de sais na água oriunda do poço da unidade em estudo e uma concentração de saída de 1.400mg/l referente à água utilizada na descarga do vaso sanitário acrescida de dejetos.

Tendo em vista que, para a descarga dos vasos sanitários, serão levados em conta todos os banheiros masculinos e femininos existentes na Instituição em estudo. E que fora adotado uma população de 1200 pessoas, e, considerando que ainda fora adotado na jornada diária que cada indivíduo em média utilize o vaso sanitário pelo menos 0,8 vezes por dia. Consumindo em média 18 litros por acionamento das descargas dos vasos sanitários, nos 52 vasos sanitários existentes nos banheiros, o fluxo de água consumido pelos 1200 indivíduos nessa utilização seja de cerca de 17.280 litros, o equivalente aproximado de 17,3 toneladas de água por dia. Considerando que a Instituição funcione 14 horas por dia, o fluxo de água médio nos vasos sanitários será de 1,234 t/h. Sendo assim a carga de contaminante total transferida para a água no vaso sanitário será de 1,7276 kg/h.

Para os cálculos no tratamento anaeróbio, na miniEETERA, foram adotados concentrações médias de entrada de 422,66mg/l de DQO no esgoto oriundo da unidade em estudo e uma concentração de saída de 76,66mg/l de DQO referente ao efluente tratado anaerobiamente.

Tendo em vista que a miniEETERA trata em média 40.000 litros por dia, referente ao esgoto produzido por cerca de 1200 pessoas, e considerando que a Instituição funcione 14 horas por dia, o fluxo médio de esgoto na miniEETERA será de 2,9 t/h. Sendo assim, a carga de contaminante média total retirada do esgoto sanitário será de 1,0034 kg/h.

A Tabela 3.3 mostra a demanda de água para as utilizações na Instituição de ensino em estudo, sem a aplicação de reuso.

Tabela 3.3 – Demanda de água para as utilizações na Instituição de ensino em estudo, sem a aplicação de reuso.

Utilização	Descrição da Utilização	Δm_i [kg/h]	$C_{i,entra}$ [mg/ℓ]	$C_{i,saida}$ [mg/ℓ]	f_{H_2O} [t/h]
1	Lavatório	0,0258	0	150,00	0,172
2	Descarga do mictório	0,0455	0	220,00	0,207
3	Descarga do Vaso Sanitário	1,7276	0	1.400,00	1,234
4	Tratamento Anaeróbio	-1,0034	422,66	76,66	2,900

Utilizando-se a Tabela 3.3, construiu-se o gráfico da curva composta de concentração de contaminantes, que é ilustrado na Figura 3.3, que mostra claramente que a maior contribuição de carga orgânica é do vaso sanitário.

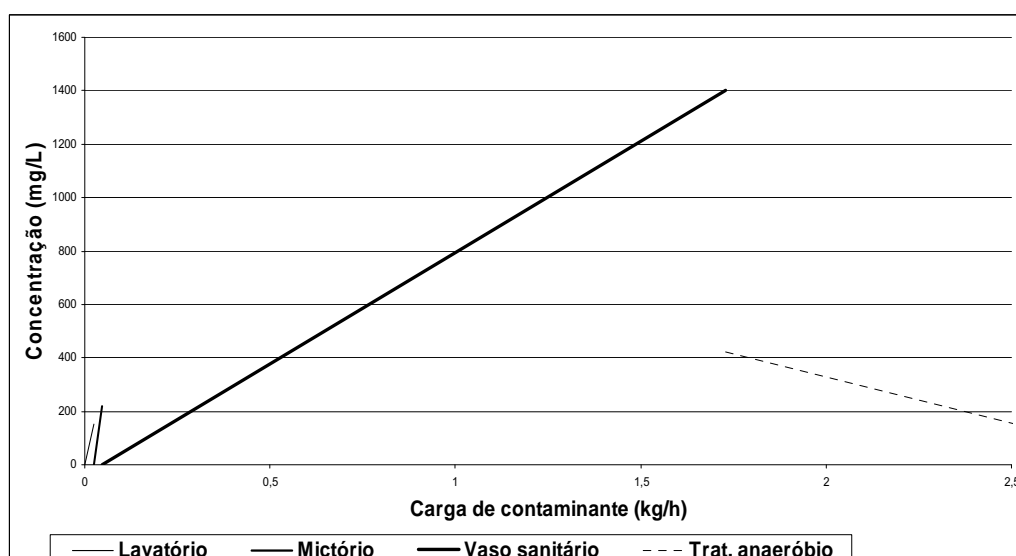


Figura 3.3 – Gráfico da variação do contaminante com a carga sem reuso.

A Figura 3.4, ilustra o gráfico da veiculação das águas na infraestrutura predial em estudo, com a aplicação de reuso de água nas descargas dos mictórios e dos vasos sanitários. Vale à pena salientar que este fluxograma serve de referência para melhor visualizar a construção das Tabelas 3.4 e 3.5.

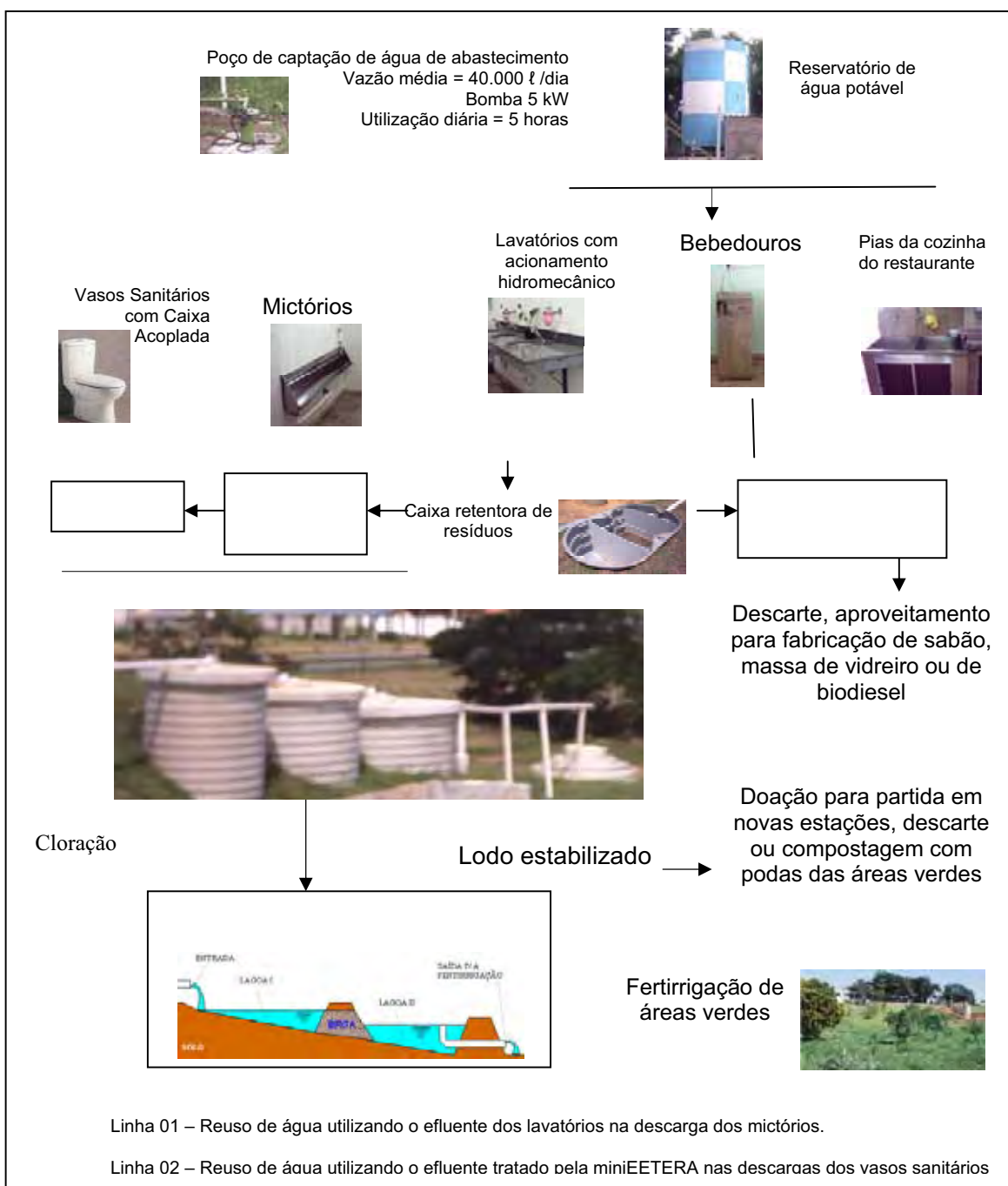


Figura 3.4 – Fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá após a implantação da miniEETERA, supondo o possível reuso de águas nas linhas 01 e 02, com aplicação da metodologia do ponto mínimo de consumo de água.

As duas primeiras etapas do método gráfico, para a determinação do ponto de mínimo de consumo de água na Instituição de ensino em estudo, referem-se aos intervalos de concentrações de contaminante e à carga acumulada nas utilizações, para a construção do gráfico ilustrado, por meio da Figura 39.3, utilizando-se dos dados fornecidos pela Tabela 3.4.

A terceira etapa refere-se à determinação da carga de contaminante, para cada intervalo de concentração. Para tanto, como existem duas linhas de reuso no caso em estudo, sendo a linha 1 referente a da utilização do efluente do lavatório na descarga do mictório, mostrado por meio da Tabela 3.5, e a linha 2 referente ao efluente da miniEETERA, filtrado por meio de filtro barreira de areia, seguido de cloração, utilizado na descarga de vasos sanitários, mostrado por meio da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Intervalos de concentração e carga de contaminantes.

Utilização	Descrição da Utilização	$C_{i,entra}$ (mg/ℓ)	$C_{i,saída}$ (mg/ℓ)	Δm_i (kg/h)	Carga acumulada (t/h)
1	Lavatório	0	150,00	0,0258	0,0258
2	Descarga Mictório	0	220,00	0,0455	0,0713
3	Descarga Vaso Sanitário	0	1.400,00	1,7276	1,8389
4	Tratamento Anaeróbio	422,66	76,66	-1,00567	0,8355

Tabela 3.5 – Carga de contaminante para todos os intervalos de concentração na linha de reuso do efluente do lavatório na descarga mictória, denominada linha 1.

Utilização	Descrição da Utilização	Intervalo de concentração	f_{H_2O} Fluxo (t/h)	Carga de contaminante (kg/h)	Carga acumulada (kg/h)
1	Lavatório	0 - 150	0,172	0,0258	0,01386
2	Descarga Mictório	150 - 370	0,207	0,0713	0,0971
Demanda total na linha 1			0,379		

Tabela 3.6 – Carga de contaminante para todos os intervalos de concentração na linha de reuso do efluente da miniEETERA, denominada linha 2.

Utilização	Descrição da Utilização	Intervalo de concentração	f_{H_2O} Fluxo [t/h]	Carga de contaminante [kg/h]	Carga acumulada [kg/h]
4	Tratamento Anaeróbio seguido de filtragem com areia e cloração	422,66 - 76,66	2,90	0,27434	0,27434
3	Descarga Vaso Sanitário	76,66 – 1406,66	1,234	1,64122	1,91556
Demanda total na linha 2			1,234		

Por fim, a quarta etapa refere-se à construção do gráfico da curva composta de concentração, que, devido à existência de duas linhas de reuso de água, em paralelo, foi necessária a construção de dois gráficos ilustrados, por meio das Figuras 9.5 e 9.6, que utilizaram as Tabelas 3.5 e 3.6.

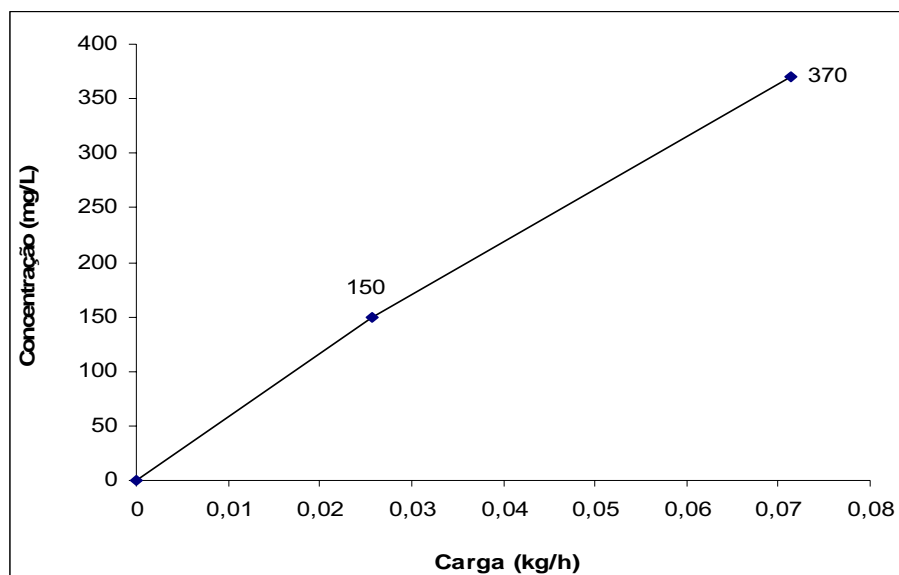


Figura 3.5 – Gráfico da curva composta de concentração das utilizações de reuso em 1 e 2, efluente do lavatório utilizado na descarga do mictório.

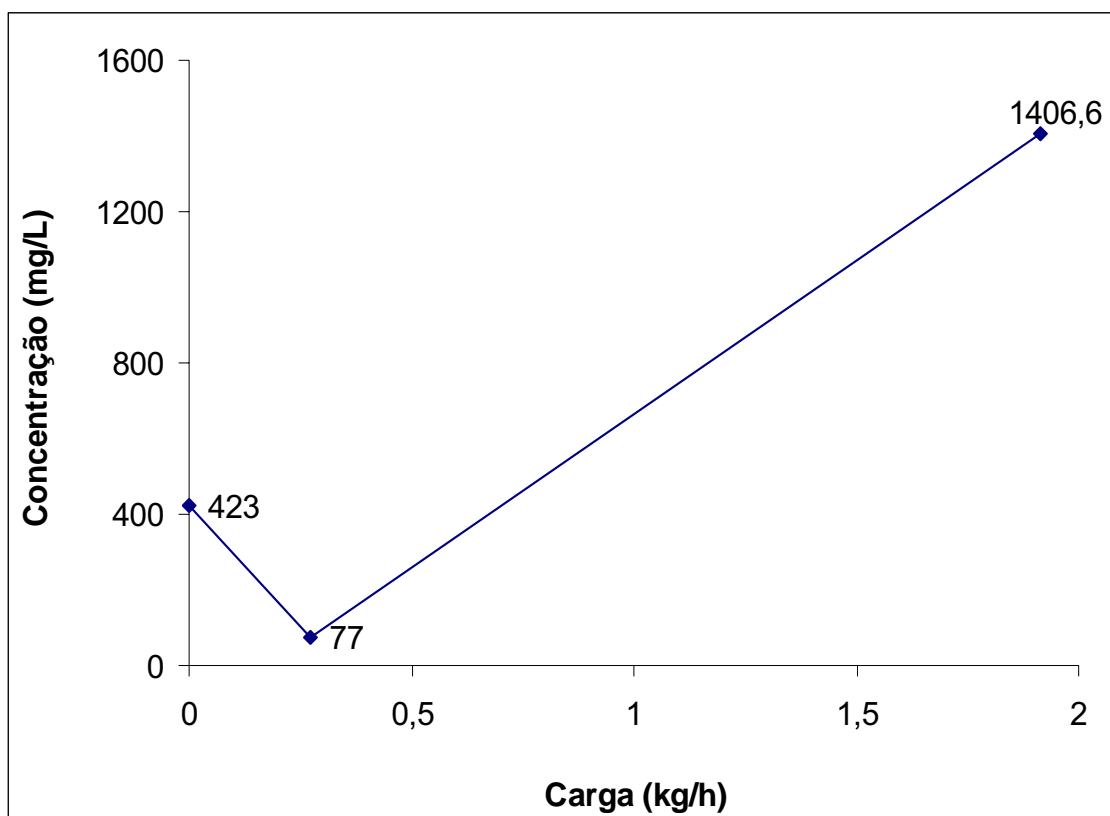


Figura 3.6 – Gráfico da curva composta de concentração das utilizações de reuso em 4 e 3, efluente do tratamento anaeróbio filtrado e clorado utilizado na descarga do vaso sanitário.

A curva relacionada à água de alimentação passa pela origem, ou seja, considerou-se a concentração inicial do contaminante igual a zero, e vai aumentando à medida que a água das duas linhas de reuso, do gráfico ilustrado por meio da Figura 3.5 e do gráfico ilustrado por meio da Figura 3.6, incorporam os contaminantes. Quanto menor a vazão da água de abastecimento utilizada no sistema, para a mesma carga de sais transferida, maior será a inclinação da curva de alimentação.

Na Figura 3.6, nota-se que a concentração decresce, devido a tratamento anaeróbio-aeróbio, seguido de filtragem por areia e cloração que se é aplicado ao esgoto. Depois, na utilização como descarga sanitária, a concentração volta a crescer.

Dessa forma, quanto mais próxima da curva composta de concentração estiver a curva de alimentação, menor será a necessidade de água limpa, ressaltando-se que a curva de água de alimentação deve permanecer abaixo ou ao mesmo nível da curva composta de concentração, para que o contaminante possa ser transferido.

Seguindo ainda a metodologia de MIERZWA & HESPANHOL (2005), uma vez definida a curva composta de concentração, determina-se o ponto mínimo de consumo de água, construindo uma curva que representa a variação da concentração do contaminante na água utilizada no sistema em função da carga de contaminante acumulada. Como no caso são duas linhas de reuso de água, temos: a linha 1, linha de reuso da água de lavagem das mãos no lavatório na descarga dos mictórios, conforme a Figura 3.7, e a linha 2, linha de reuso do efluente da miniEETERA devidamente tratado e clorado na descarga de vasos sanitários, ilustrado por meio do gráfico da Figura 3.8.

Com base nesses conceitos descritos por MIERZWA & HESPANHOL (2005), quando a curva de água de alimentação sofre uma rotação em relação à origem, aproximando-se da curva composta de concentração, o ponto de mínimo consumo de água será aquele em que a curva de alimentação tangencia a curva composta de concentração.

Essa condição indica que não é necessário adicionar água limpa ao sistema acima do ponto de mínimo consumo de água. A leitura dos valores relacionados à carga de contaminante e à respectiva concentração proporciona a mínima vazão de água a ser alimentada.

Pelo gráfico da Figura 3.7, a carga de sais acumulada até o ponto de mínimo consumo de água é de 0,04491 kg/h e a concentração do contaminante na água é de 213 mg/l. Assim sendo, o fluxo mínimo de água será determinado pela Equação 3.2.

Pelo gráfico da Figura 3.8, a carga de sais acumulada até o ponto de mínimo consumo de água é de 0,27434 kg/h, e a concentração do contaminante na água é de 77 mg/l. Assim sendo, o fluxo mínimo de água, também, será determinado pela Equação 3.2.

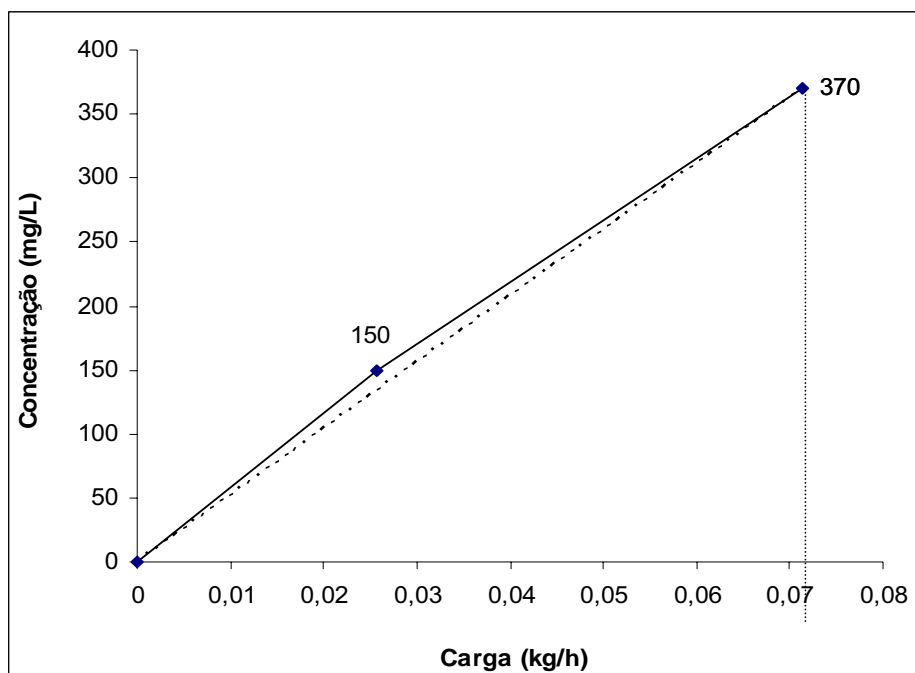


Figura 3.7 – Gráfico para a obtenção do ponto de mínimo consumo de água na linha de reuso do efluente do lavatório na descarga do mictório.

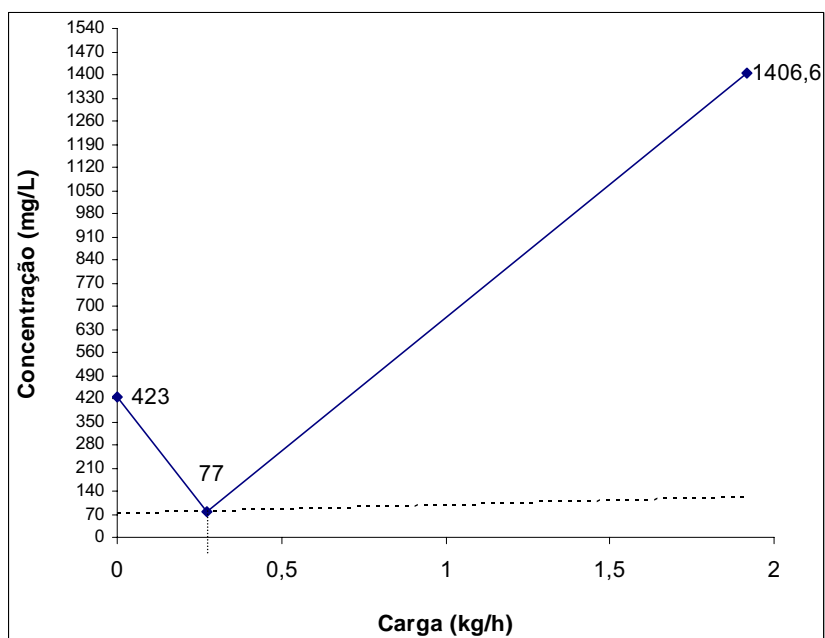


Figura 3.8 – Gráfico para a obtenção do ponto de mínimo consumo de água na linha de reuso do efluente do tratamento anaeróbico filtrado e clorado na descarga do vaso sanitário.

$$F_{\min} = \frac{\Delta_{mi,\min}^* \cdot 10^3}{C_{i,\min}^*} \quad (3.2)$$

Onde:

- F_{\min} - Fluxo mínimo de água [t/h]
 $\Delta_{mi,\min}^*$ - Ponto mínimo de consumo de água [kg/h]
 $C_{i,\min}^*$ - Concentração de sais minerais na água de abastecimento [mg/l]

3.3.4 Resultados da Aplicação do Método Gráfico para a Determinação do Ponto de Mínimo de Consumo de Água na Instituição de Ensino em Estudo

A demanda total na linha 1, referente a da utilização do efluente do lavatório na descarga do mictório, uma vez que esta linha não necessita de água potável, é de 0,379 t/h. Na linha 2, referente a da utilização do efluente da miniEETERA filtrado por meio de filtro barreira de areia, seguido de cloração para posterior utilização na descarga de vasos sanitários é de 1,234 t/h.

Pela Equação 3.2, foi obtido um valor de fluxo mínimo de água na linha 1 da ordem de 0,3347 t/h. Em comparação com a demanda de água utilizada inicialmente, verificou-se que a adoção da prática de reuso proporcionou uma redução no consumo de água na linha 1 igual a 11%.

Pela Equação 3.2, foi obtido um valor de fluxo mínimo de água na linha 2 da ordem de 1,2879 t/h. Em comparação com a demanda de água utilizada inicialmente, verifica-se que a adoção da prática de reuso proporcionou um aumento no consumo de água na linha 2 igual a 4,33%

Na linha 2, houve aumento do consumo, devido ao fato que não é toda a vazão de água da linha 2 que é utilizada no vaso sanitário, pois grande parte do excedente é utilizada na fertirrigação de um bosque em formação. Pelo fato de não haver controle dessa demanda, não pode ser computado.

3.3.5 Comentários Referentes à aplicação da metodologia *water pinch* na infraestrutura predial – Estudo de caso UNESP Campus de Guaratinguetá.

Pode-se concluir que a aplicação da metodologia do ponto mínimo de consumo de água em parte da infraestrutura predial da UNESP - Campus de Guaratinguetá – SP é conveniente. Tendo em vista que teoricamente é possível no reuso do efluente dos lavatórios na descarga dos mictórios, linha 1 do fluxo de veiculação das águas. Assim, ocasiona redução do consumo de água potável da ordem de 11%, o que representa uma economia considerável, tanto econômica como ambiental, disponibilizando a água potável economizada para fins mais nobres.

3.3.6 Sistema de Mictório Ecológico (ME) Desenvolvido para Promover o Reuso de Águas na Linha 1 – Reuso da Água do Lavatório na Descarga do Mictório.

Como complemento para viabilizar o reuso de águas na linha 1 do trabalho, foi desenvolvido um sistema mictório ecológico. Trata-se de um mictório inovador, ambientalmente amigável, que promove simultaneamente reuso de água e higiene pessoal de forma segura e econômica. Um lavatório é acoplado a um mictório que reusa a água da lavagem de higienização das mãos na descarga sanitária da urina.

Esse sistema oferece, como principais benefícios, o aumento na economia com a consequente redução no consumo de água potável, além de segurança sanitária, aliada a baixo custo operacional e fácil instalação, devido à simplicidade do dispositivo e ao fato de poder ser implantado em sistemas já existentes.

O sistema promove economia de água potável através do uso racional, ou seja, da não utilização de água potável para a descarga do mictório e reutilização da água utilizada na lavagem das mãos, podendo ainda ser instalado em qualquer tipo de ambiente de banheiro institucional de escolas, repartições públicas, hospitais, estádios, comércios, rodoviárias, aeroportos com grande circulação de pessoas, bares, e outros ambientes públicos.

A água utilizada para a lavagem de higienização das mãos, antes e depois da utilização do mictório, é utilizada na descarga das micções, promovendo assim

o uso racional da água, por meio do reuso da água de lavagem das mãos, e melhor higienização, protegendo tanto o indivíduo como os seus próximos de contaminações veiculadas no uso de mictórios.

Destina-se a todos que acreditam que é necessário promover o uso racional e o reuso de águas como forma de utilizar água potável para fins mais nobres que a sua utilização como descarga sanitária.

A Figura 3.9 ilustra o funcionamento do ME. A idéia simplifica a vida das pessoas, porque a pessoa pode lavar as mãos e urinar sem ter que sair do lugar, evitando assim, que após a micção, tenha que entrar em outra fila para lavar as mãos e use isso como desculpa para não lavar as mãos e cumprimentar outras pessoas, com as mãos e assim contaminá-los com urina, secreções do falo e patógenos.



Figura 3.9 – Desenho esquemático e maquete simulando a utilização do ME e vista da versão monobloco e da versão acoplável em mictórios já instalados.

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E CONSTRUÇÃO DA miniEETERA

Este Capítulo faz a caracterização do sistema e o processo construtivo da miniEETERA.

A miniEETERA, objetivo deste trabalho, foi construída nas instalações da UNESP – Campus de Guaratinguetá, SP, nas coordenadas geográficas: 22° 48'49" latitude sul e 45° 11' 40" longitude oeste; altitude de 537 metros em relação ao nível do mar. O clima da região, segundo a classificação KOPPEN é caracterizado como clima quente e seco, com inverno seco e verão úmido, com precipitação anual de 1.800 mm e temperatura média anual próxima de 23°C.

4.1 Condições Gerais

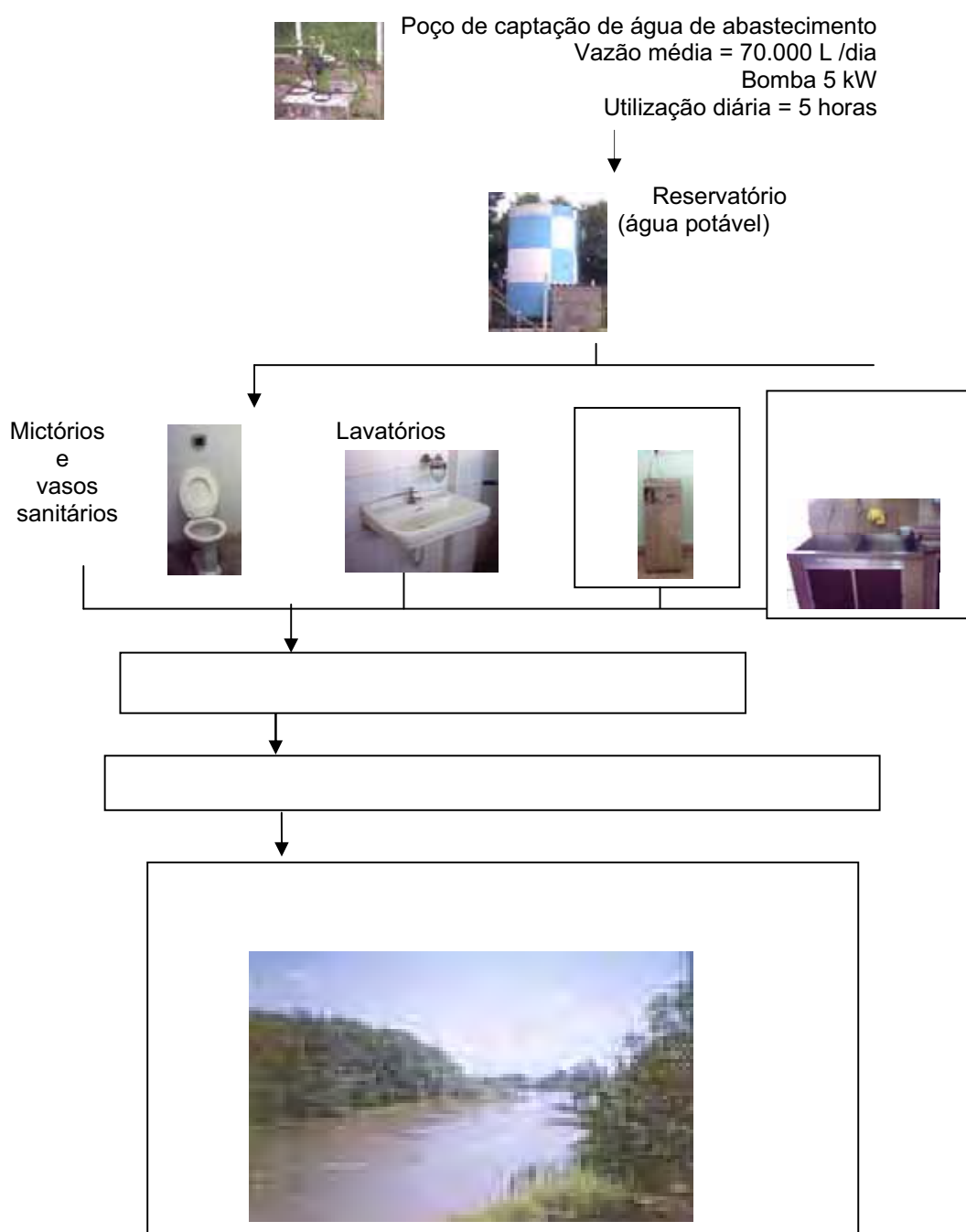
O fluxograma da veiculação das águas, nas condições anteriores da UNESP – Campus de Guaratinguetá, é ilustrado na Figura 4.1.

Trata-se de um sistema que consome em média 70.000 litros por dia de água de poço e utiliza os serviços da SAEG para coleta e tratamento de esgotos, totalizando uma média mensal de gastos na faixa de R\$ 3.500,00 a R\$ 5.000,00.

A Figura 4.2 mostra um desenho esquemático, em planta, das condições anteriores da UNESP – Guaratinguetá.

A Figura 4.3 mostra o fluxograma das águas com a implantação da miniEETERA, com fluxograma acoplado de possível aproveitamento de águas pluviais, para fins não potável, como a descarga de mictório e de vaso sanitário.

A Figura 4.4 mostra, em planta, a locação da miniEETERA na UNESP-Guaratinguetá, SP.

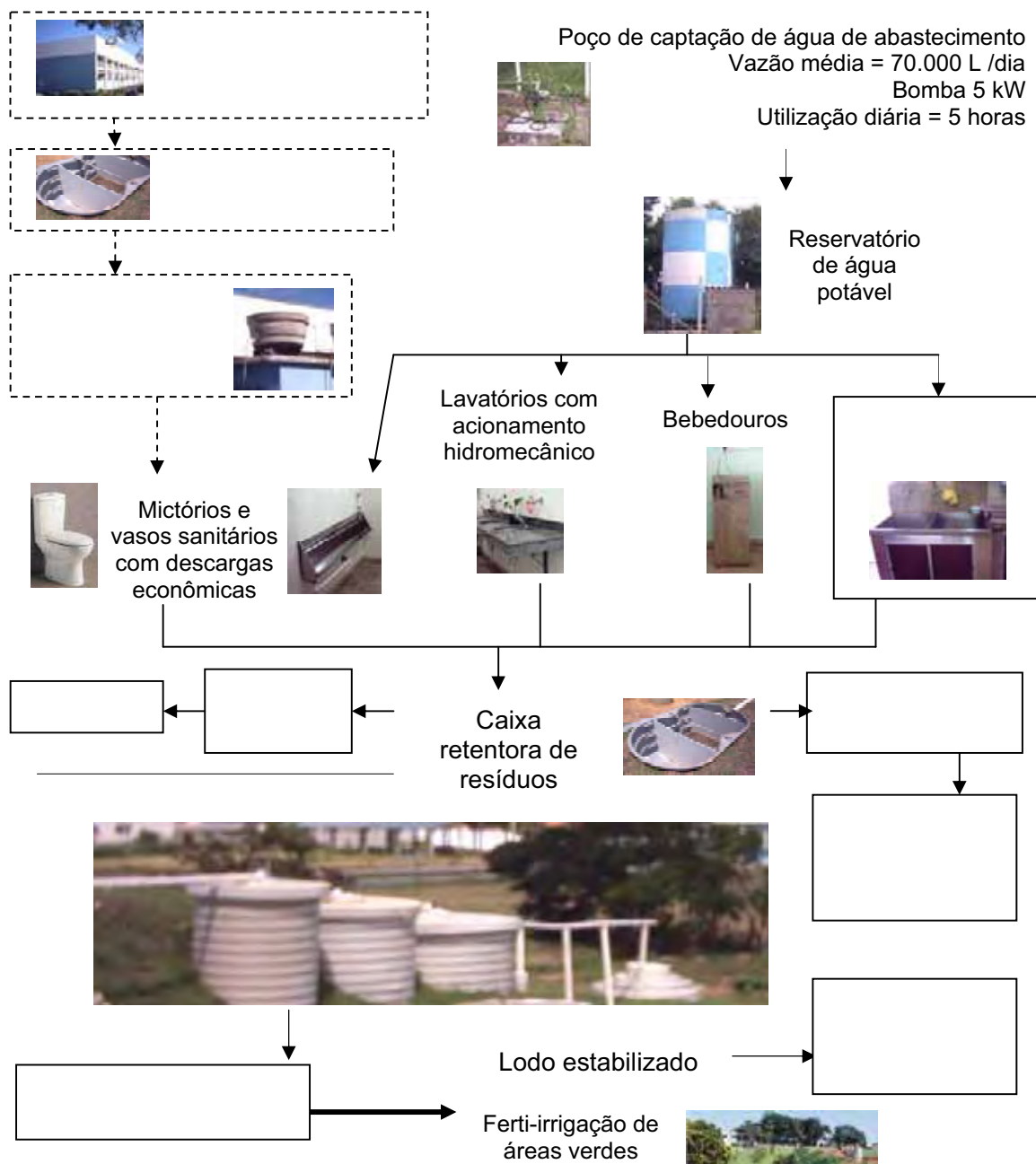


Linha do fluxo de veiculação das águas

Figura 4.1 – Fluxograma da veiculação original das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá, anterior à implantação da miniEETERA



Figura 4.2 - Planta esquemática da UNESP – Guaratinguetá, SP, anterior à implantação da miniEETERA.



Linha do fluxo de veiculação das águas implantado
Linha do fluxo de veiculação das águas de possível aproveitamento de águas pluviais

Figura 4.3 – Fluxograma da veiculação das águas nas instalações da UNESP-Guaratinguetá, SP, após a implantação da miniEETERA, e com possível aproveitamento de águas pluviais, visando à ecoeficiência predial.



Figura 4.4 - Planta da UNESP – Guaratinguetá, ênfase na veiculação das águas, após a implantação da miniEETERA, e possível uso ecoeficiente de águas pluviais.

4.2. Configuração da miniEETERA

A miniEETERA foi dimensionada a partir das dimensões disponíveis de tubos do tipo Rib Loc em PVC (policloreto de vinilideno) disponíveis no mercado nacional, no caso, em diâmetros entre 1.000mm e 2.500mm, além de chapas em PVC, *fiber glass*, caixas em polietileno injetado e concreto armado. Os detalhes construtivos da miniEETERA em PVC e concreto armado encontram-se no ANEXO I.

A miniEETERA é composta por três sistemas: o de pré-tratamento, o de tratamento e o de pós-tratamento, conforme é ilustrado na Figura 4.5.

O pré-tratamento é feito por meio de um sistema de retenção de resíduos, ou seja, um sistema que retém sólidos grosseiros, tais como areias, óleos e gorduras do efluente. Os sólidos grosseiros são retidos por meio de grade fina em PVC. A areia é precipitada no fundo de uma caixa de 1.000ℓ em Polietileno. Os óleos e gorduras são retidos por meio de um sistema de barreira e dreno da camada de óleo sobrenadante, conforme é ilustrado nas Figuras 4.9 e 4.10.

O tratamento é feito por meio de um sistema de biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente, em manto de lodo, UASB, dispostos em série, formando cascata e com um sistema de separação de fases em formato helicoidal, confeccionados basicamente em PVC e concreto armado.

Os biodigestores UASB possuem, juntos, um volume de tancagem de 46 m³, e foram dimensionados, adotando-se um TRH (tempo de retenção hidráulica) do sistema de 24 horas, para assim proporcionar maior coleta de biogás e estar apta a suportar um possível aumento de vazão de até 12 horas de TRH, o que representa dobrar a população atendida de 1.200 pessoas para 2.400 pessoas.

O pós-tratamento é feito por meio de um biodigestor aeróbio anóxico, também confeccionado em PVC e concreto armado, e possui um volume de tancagem de 9m³.

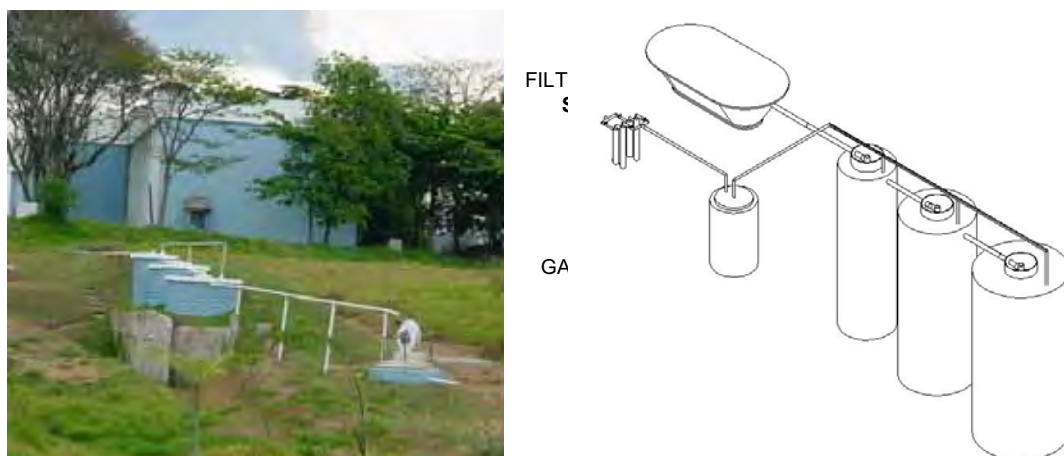


Figura 4.5 - Foto e desenho esquemático em 3D da miniEETERA.

Entrada de
esgoto bruto

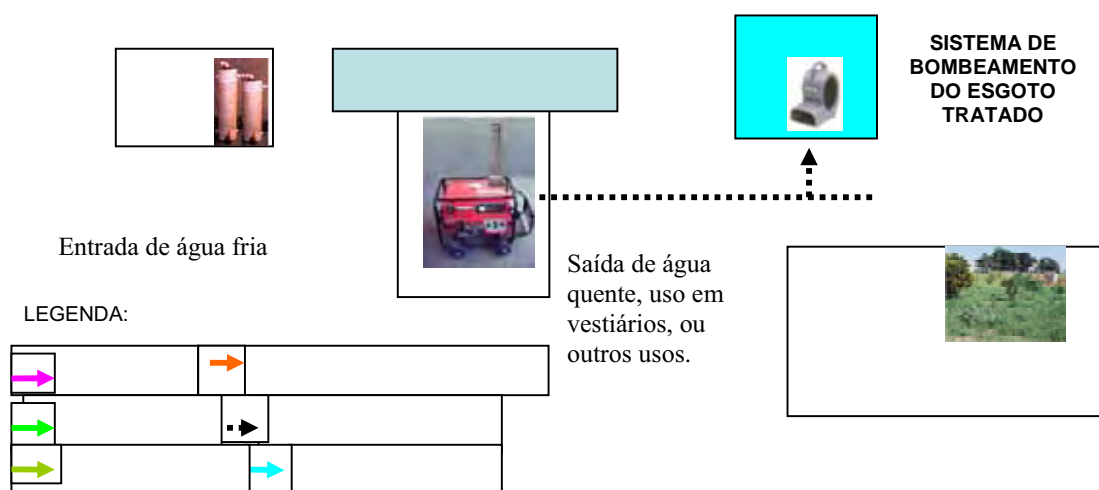


Figura 4.6 - Foto da miniEETERA com fluxograma da veiculação das águas, do biogás, do ar e da energia elétrica, no sistema implantado.

4.2.1 Sistema de pré-tratamento

A função do sistema de pré-tratamento é reter sólidos grosseiros (pontas de cigarro, hastes plásticas de limpeza de orelhas, cabelos e outros corpos), areia, óleos e gorduras.

Segundo GODOY 2003, a descrição detalhada do funcionamento do sistema de pré-tratamento é ilustrada na Figura 4.7, que mostra o desenho esquemático de funcionamento, no qual: 1º) o esgoto bruto entra por um tubo situado na parte superior do sistema e, devido à redução da velocidade e à diferença de densidade, ele se separa em três fases: óleos que tendem a flutuar, água e sólidos grosseiros que tendem a precipitar; 2º) o fluxo se depara com um sistema de grade que forma uma barreira na superfície, retendo as substâncias graxas, que são drenadas automaticamente, por meio de um cano rasgado na superfície onde se depositam; 3º) caso a vazão do efluente seja alta, a ponto de arrastar óleos, passando pela primeira retentor, há um segunda barreira e dreno para o mesmo; 4º) o efluente isento de óleos, areia e sólidos grosseiros, sai por meio de um duto de saída. Esse sistema foi confeccionado a partir de uma caixa d' água de 1.000ℓ, em polietileno, chapas de PVC em formato de grade fina, tubos e conexões em PVC.

A Figura 4.8 mostra uma das grades em PVC, dando ênfase aos rasgos para passagem do efluente e retenção dos sólidos grosseiros. A Figura 4.9 mostra a colocação das grades em PVC na caixa d' água em polietileno de 1.000 ℓ.

A Figura 4.10 ilustra o sistema de retenção de gordura, dando ênfase ao ponto de acumulação dos resíduos no sistema.

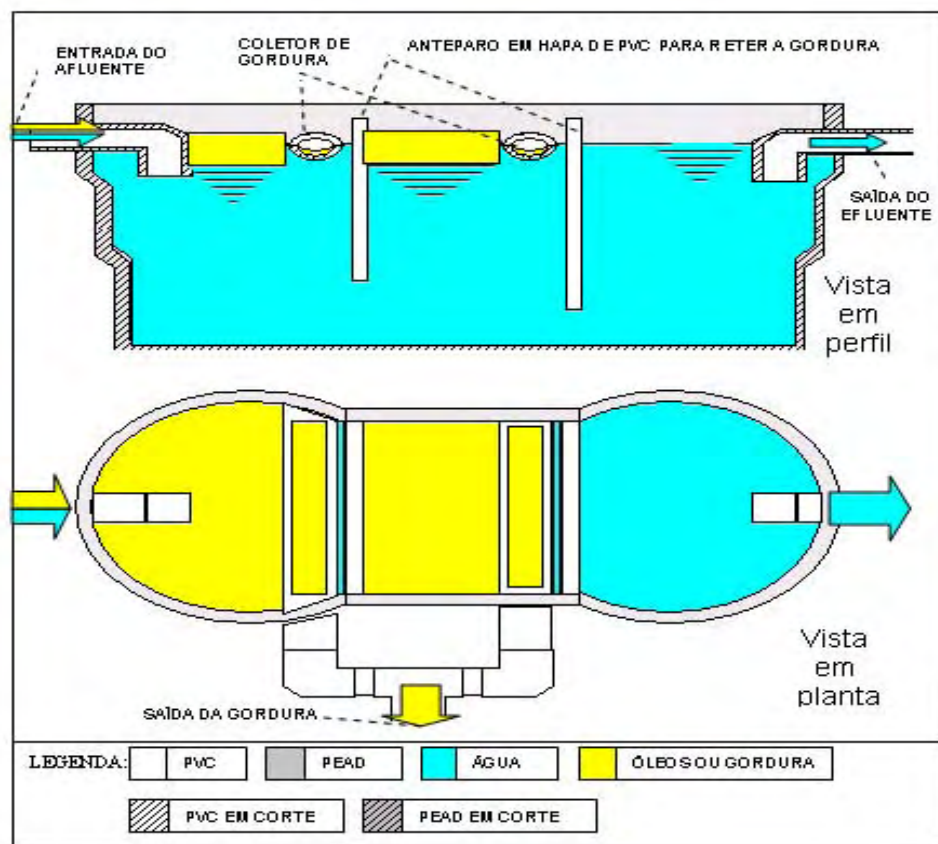


Figura 4.7 – Desenho esquemático do sistema de pré-tratamento, desengorduramento, gradeamento e desarenação (GODOY JUNIOR 2003).



Barreira para retenção de óleos

Grade para a retenção de sólidos grosseiros

Figura 4.8 – Grade em PVC confeccionada a partir de uma chapa de 3 mm em PVC



Figura 4.9 – Colocação das grades em PVC na caixa d' água de 1.000 ℓ



Figura 4.10 – Vista do sistema retendo gorduras e sólidos grosseiros.

4.2.2 Sistema de tratamento por meio de biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente.

O desenho esquemático e a descrição detalhada do processo de tratamento anaeróbio de efluentes, no Sistema de Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo, segundo GODOY JUNIOR (2003) e GODOY JUNIOR (2005), é ilustrada na Figura 4.11, na qual:

1º) o efluente pré-tratado (desengordurado, gradeado e desarenado) é alimentado por meio de uma tubulação que entra pela parte superior e libera o esgoto na parte inferior do manto de lodo do primeiro biodigestor UASB;

2º) conforme o efluente atravessa o manto de lodo (zona de digestão), os microorganismos anaeróbios presentes nesse lodo granular floculento digerem a matéria orgânica presente no efluente, produzindo, assim, mini bolhas de biogás na superfície dos grânulos de lodo; aumentando dessa forma sua flutuabilidade;

3º) dependendo da velocidade ascendente do fluxo do efluente, o manto de lodo se expande, e alguns grânulos de lodo floculento gaseificados podem ser arrastados em direção à superfície;

4º) na zona de separação de fases sólida-líquida-gasosa, por meio de um separador de fases em formato helicoidal, o efluente é direcionado para a saída do biodigestor, os grânulos de lodo gaseificados são desgaseificados no separador de fases, provocando a sua precipitação e seu retorno ao manto de lodo, as bolhas de biogás são direcionadas para a campânula de coleta de biogás;

5º) em seguida, o efluente passa pelo manto de lodo e sistema de separação de fases do segundo e do terceiro biodigestor UASB disposto em série, formando cascata.

A planta piloto do sistema em escala real implantado na UNESP – Campus de Guaratinguetá, SP, obteve eficiência média na remoção de DQO de 80,1 %, operando com um tempo de retenção hidráulica de 24 horas e tratando esgoto sanitário que possuía uma DQO média de 490 mg/l de DQO, oriundo do efluente de vasos sanitários, mais lavatórios, mictórios e da pia da cozinha da cantina e refeitório do Campus.

A Figura 4.12 mostra uma foto do sistema de biodigestores UASB implantado na UNESP – Campus de Guaratinguetá, dando ênfase aos três UASBs e ao gasômetro, e à noção da proporção de sua dimensão.

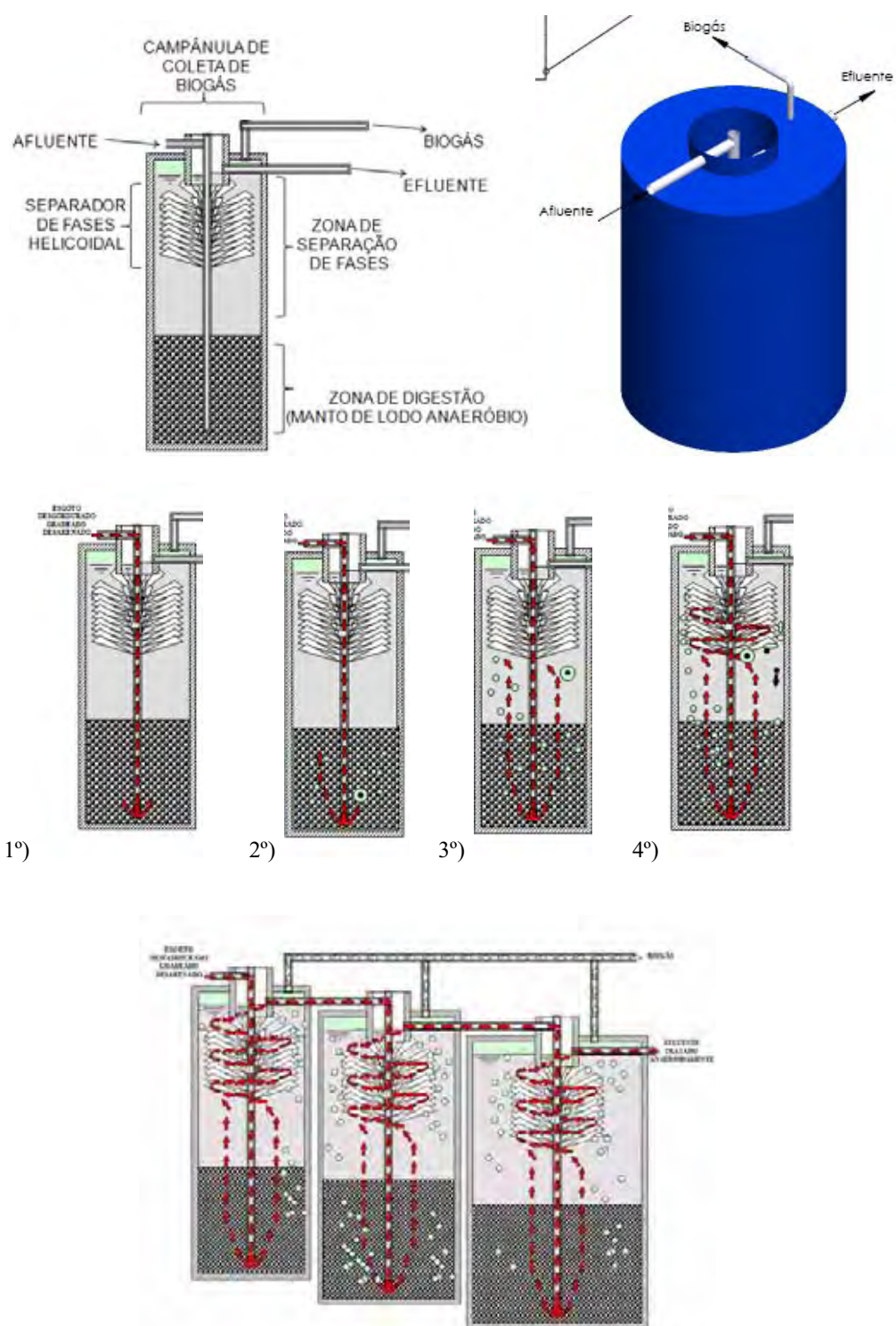


Figura 4.11 – Desenho esquemático e detalhamento operacional do Sistema Otimizado de Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo.

Pat. Req. PI: 0301475-4.



Figura 4.12 – Vista do sistema otimizado de biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente em manto de lodo implantado na UNESP - Guaratinguetá, SP, com volume útil de 46 m³.

As dimensões dos biodigestores são: o primeiro UASB possui diâmetro de 1,5 m e altura de 5 m, o segundo UASB possui diâmetro de 2 m e altura de 5 m, o terceiro UASB possui diâmetro de 2,5 m e altura de 5 m. Os UASBs foram projetados nessas dimensões devido à disponibilidade dessas dimensões de tubos de PVC no mercado, e também devido ao fato de que se procurou reduzir a velocidade ascendente do esgoto dentro dos UASB, adotando-se o aumento gradual dos diâmetros dos biodigestores. Respectivamente, seus volumes são de 8.831 ℓ no primeiro UASB, 15.700 ℓ no segundo UASB e de 24.531 ℓ no terceiro UASB, o que totaliza um volume interno total no sistema de 49.000 ℓ e um volume interno útil de tancagem de líquido no sistema de 46.000 ℓ.

4.2.3. Sistema de Pós-tratamento por Meio de Biodigestor Aeróbio e Anóxico Tubular Vertical, com Aeração por Bolha Fina.

A Figura 4.13 mostra a foto do biodigestor aeróbio – anóxico implantado na UNESP Campus de Guaratinguetá, SP.



Figura 4.13 – Foto do sistema biodigestor aeróbio-anóxico implantado.

De acordo com GODOY JUNIOR (2003), a descrição detalhada do processo de tratamento de efluentes, no Sistema de Biodigestores Aeróbios e Anóxico Tubular Vertical, com Aeração por Bolha Fina, é ilustrada na Figura 4.14, na parte B, onde: 1º) o efluente tratado anaerobiamente é alimentado na parte superior do tubo central e, em fluxo descendente, atravessa um manto de lodo aeróbio com aeração por bolha fina, e, por meio de uma passagem na parte inferior do tubo central, entra na parte inferior de um tubo de maior diâmetro, em fluxo ascendente, atravessa o manto de lodo aeróbio desse segundo tubo e entra em uma zona de decantação; 2º) os microorganismos aeróbios presentes nesse lodo digerem a matéria orgânica que não foi digerida no sistema anaeróbio, além de promover a nitrificação do nitrogênio amoniacal em nitrato; 3º) em seguida, o efluente é alimentado na parte superior de um terceiro tubo de diâmetro, maior que o segundo, atravessa em sentido descendente um manto de lodo anóxico, entra na parte inferior de um quarto tubo de diâmetro ainda maior que os tubos anteriores, atravessa em sentido ascendente o manto de lodo anóxico do quarto tubo, passa pela zona de decantação e é conduzido para fora do sistema aeróbio e anóxico; 4º) os microorganismos anóxicos, presentes nesse lodo, desnitrificam os nitratos na forma de nitrogênio gasoso e removem parte do fósforo na forma de biomassa bacteriana do lodo. O sistema ainda oferece a vantagem de não

depender de mão-de-obra especializada para a sua operação, além de possuir um potencial elevado para a automação do seu funcionamento.

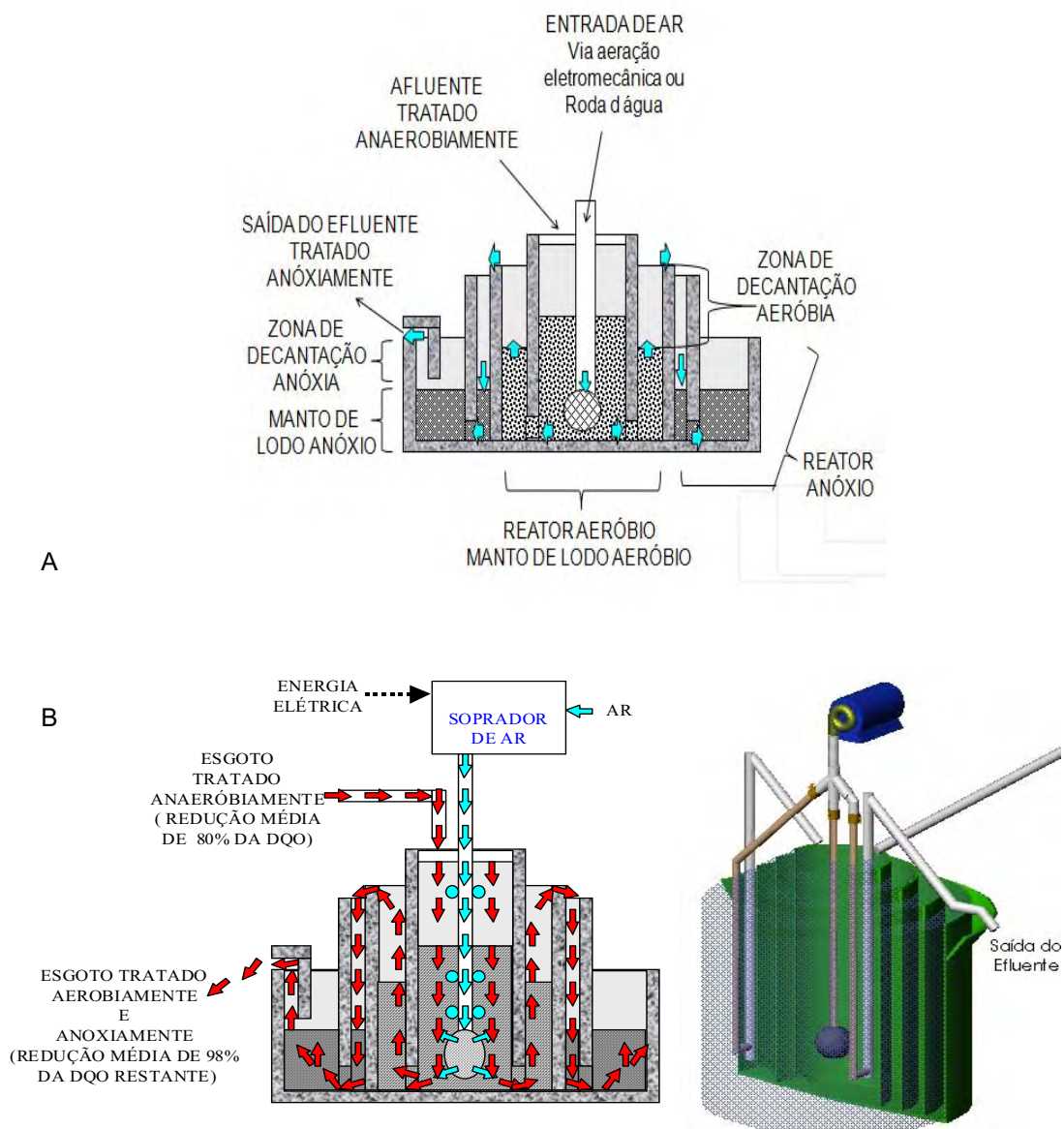


Figura 4.14 – (A) Desenho detalhando as principais partes do sistema aeróbio anóxico, (B) Desenho esquema operacional do Sistema Otimizado Biodigestor Aeróbio e Anóxico Tubular Vertical com Aeração Tipo Bolha Fina, pós-tratamento do efluente tratado anaerobiamente, (C) Biodigestor Aeróbio e Anóxico em 3D.

Pat.Req. PI: 0301475-4.

4.2.4 Sistema de Lagoas para Complemento de Polimento e Armazenamento de Água de Fertiirrigação.

O sistema de lagoas apresentado foi implantado a jusante do biodigestor aeróbio-anóxico, da miniEETERA da UNESP Campus de Guaratinguetá, e composto por duas lagoas em série, cuja principal função é o armazenamento do efluente tratado anaerobio, aerobio e anoxicamente, antes da fertirrigação das áreas verdes. As lagoas estão localizadas a jusante do biodigestor aeróbio-anóxico. A lagoa I tem capacidade para 10 m³, e a lagoa II tem capacidade para 10 m³. A Figura 4.15 mostra o desenho esquemático das lagoas.

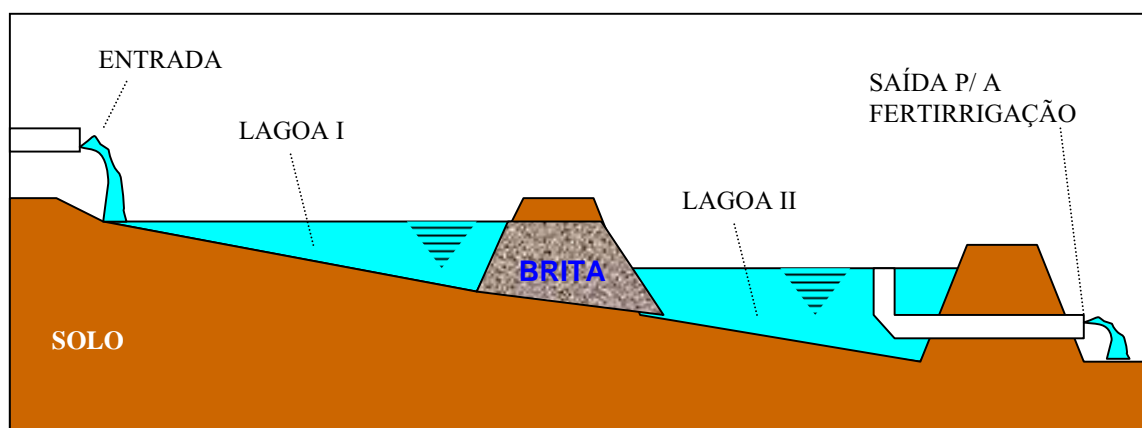


Figura 4.15 – Desenho esquemático das lagoas

4.2.5 Detalhes Construtivos da miniEETERA em PVC e Concreto Armado

Visando conferir estanqueidade a líquidos e gases, e, ainda, resistência à corrosão causada pelo esgoto e seus gases de putrefação, foram utilizados, na construção da miniEETERA, na UNESP – Campus de Guaratinguetá, SP, chapas e tubos de PVC e adesivos de PVC, e de epóxi. Também foi utilizado concreto armado, para conferir resistência mecânica nas bases e nas campânulas dos biodigestores, de forma a suportar o peso de um operador, uma vez que os tubos

de PVC utilizados são auto-portantes, ao contrário das chapas de PVC, que revestem a parte interna da campânula.

O processo de construção e soldagem dos biodigestores ocorreu a frio, utilizando-se apenas ferramentas portáteis, como serra circular e furadeira de mão. Na construção, foram utilizados, basicamente, tubos plásticos em PVC de diâmetros de 100 mm a 2.500 mm.

Os detalhes construtivos da parte anaeróbia, o SOBAFA (sistema otimizado de biodigestão anaeróbia por fluxo ascendente), são ilustrados conforme a sequência de fotos e desenhos apresentados, por meio do Anexo I, nas Figuras de I.1 a I.8.

Os detalhes construtivos da parte aeróbia-anóxia, o SOBAA (sistema otimizado de biodigestão aeróbia e anóxia), são ilustrados, por meio do Anexo I, nas Figuras de I.9 a I.13.

Empiricamente observou-se que o crescimento do lodo aeróbio é consideravelmente mais rápido que o crescimento do lodo anaeróbio e do lodo anóxico. Adotou-se, então, e recomenda-se a remoção de 1/3 do volume de lodo anaeróbio, ao sinal de curto circuito hidráulico, fluxo da entrada diretamente para a saída, em qualquer um dos reatores, ou a cada 6 meses para o aeróbio, e a cada 12 meses para o anaeróbio e o anóxico.

4.2.6 Conclusões Referentes ao Sistema Construtivo da miniEETERA

Pode-se concluir que o sistema construtivo da miniEETERA, em PVC e concreto armado, é de fácil reprodução, desde que se treine previamente a equipe de construção, uma vez que não utiliza equipamentos pesados e eletromecânicos, exceto para a acomodação dos tubos de grandes diâmetros da faixa de 1.500 a 2.500 mm, pois o sistema construtivo ocorre a frio, e utiliza apenas ferramentas e equipamentos portáteis e/ou manuais.

A construção em PVC e concreto armado é bastante conveniente, pois na miniEETERA, as partes de concreto são protegidas pelas partes em PVC, contra a

corrosão causada pelo ambiente agressivo do esgoto sanitário e seus gases de putrefação.

Na confecção de uma nova miniEETERA ou na utilização da miniEETERA, para trabalhos futuros, recomenda-se efetuar revestimento interno na campânula dos UASB, por meio de aplicação de fibra de vidro e resina epóxi ou fenólica isofitálica, visando assim evitar fissuras e porosidades na colagem do PVC do tubo com o PVC das capas na campânula, e em registros de saída e coleta de efluente e lodo, onde se utilizou no experimento resina epóxi com carga mineral.

CAPITULO 5 - SISTEMA DE COLETA, ARMAZENAMENTO E COGERAÇÃO DE ENERGIA A BIOGÁS

5.1 Configuração do Sistema de Coleta, Armazenamento e Filtragem de Biogás.

O sistema de coleta, armazenamento e filtragem de biogás é composto por três subsistemas: 1) o coletor, composto por uma rede de tubulações em PVC rígido e flexível, cuja função é coletar o biogás na campânula dos biodigestores UASB e conduzi-lo até o gasômetro; 2) o gasômetro, composto por um tanque tubular vertical em PVC e concreto armado e uma campânula em PVC, cuja função é armazenar, nas campânulas dos biodigestores UASB, o biogás coletado pelo sub-sistema coletor; 3) o filtro, composto por tubos em PVC, preenchidos com cavaco e palha de aço oxidada, cuja função é a retenção do gás sulfídrico.

A maioria dos sistemas de gasômetros, em operação, é do tipo telescópico em chapa de aço carbono 1020, tratado com revestimento epóxi. Tal composição é uma proteção que prolonga a vida útil da campânula, porém não a livra de manutenções no tocante à corrosão.

Quanto ao aproveitamento energético do biogás gerado, foram sugeridas três implantações: 1) armazenamento do biogás, por meio de um gasômetro; 2) filtragem do gás sulfídrico por meio de um filtro de óxido de ferro; 3) conversão energética do biogás em energia elétrica e água quente, por meio de um sistema cogenerador compacto convertido a biogás. Esse sistema é ilustrado na Fig. 5.1, no qual primeiro o biogás é armazenado, depois filtrado e em seguida aproveitado.

A Figura 5.2 ilustra o desenho esquemático do gasômetro, e a Figura 5.3 ilustra o funcionamento do sistema de gasômetro telescópico do tipo “João Bobo”, que, à medida que acumula biogás, a campânula do gasômetro sobe telescopicamente.

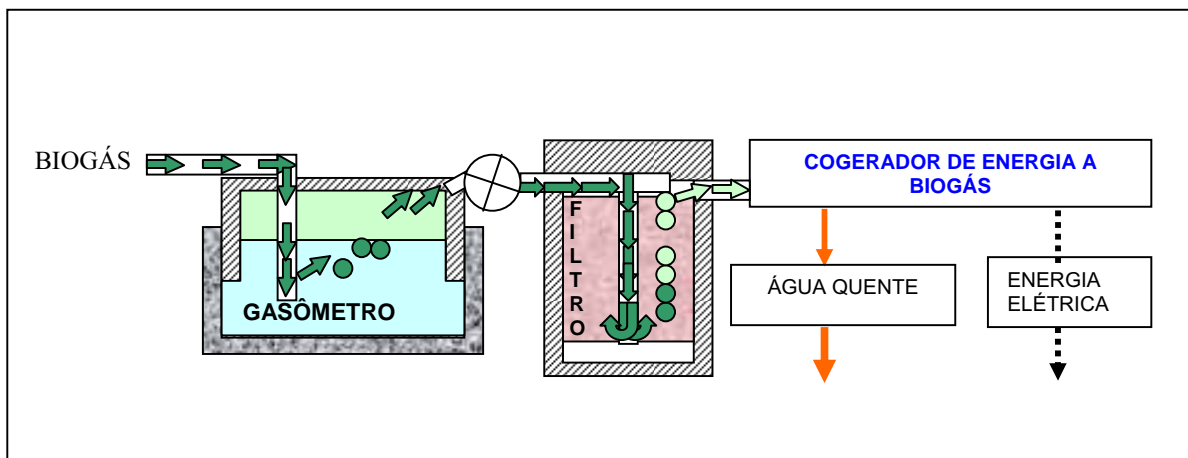


Figura 5.1 – Desenho esquemático do sistema de armazenamento e purificação do biogás, associado ao sistema de cogeração de energia.

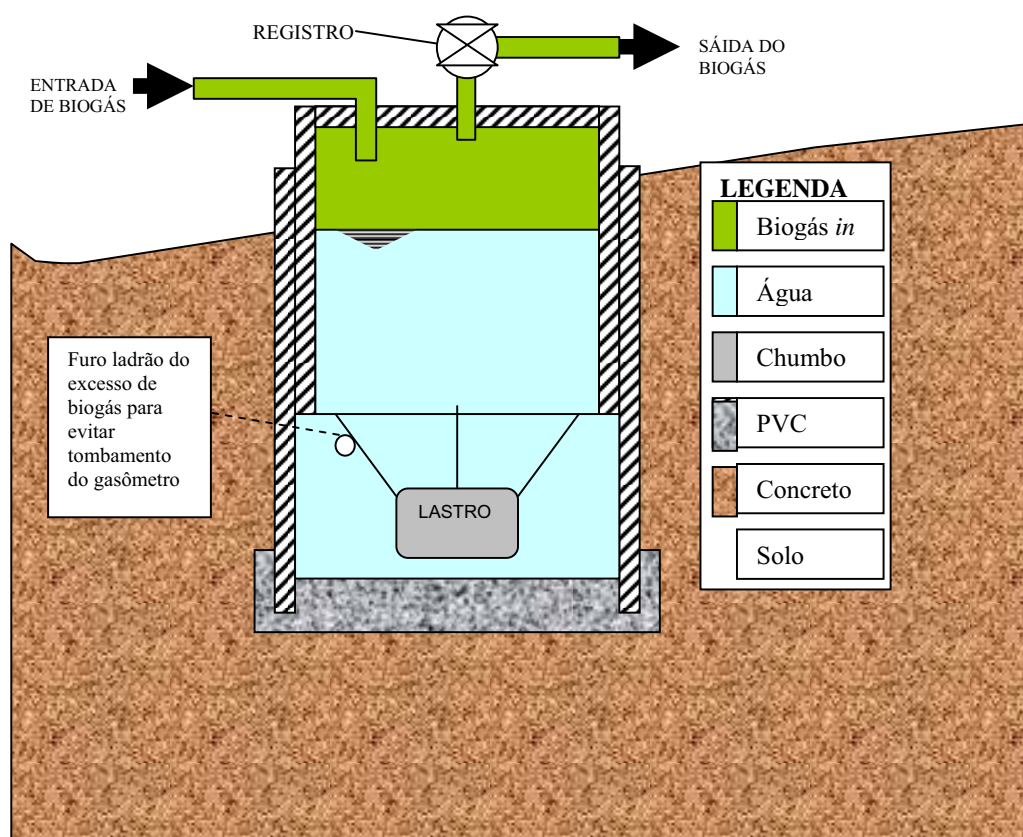


Figura 5.2 – Desenho esquemático do gasômetro em PVC Rib Loc. GODOY JUNIOR (2006).

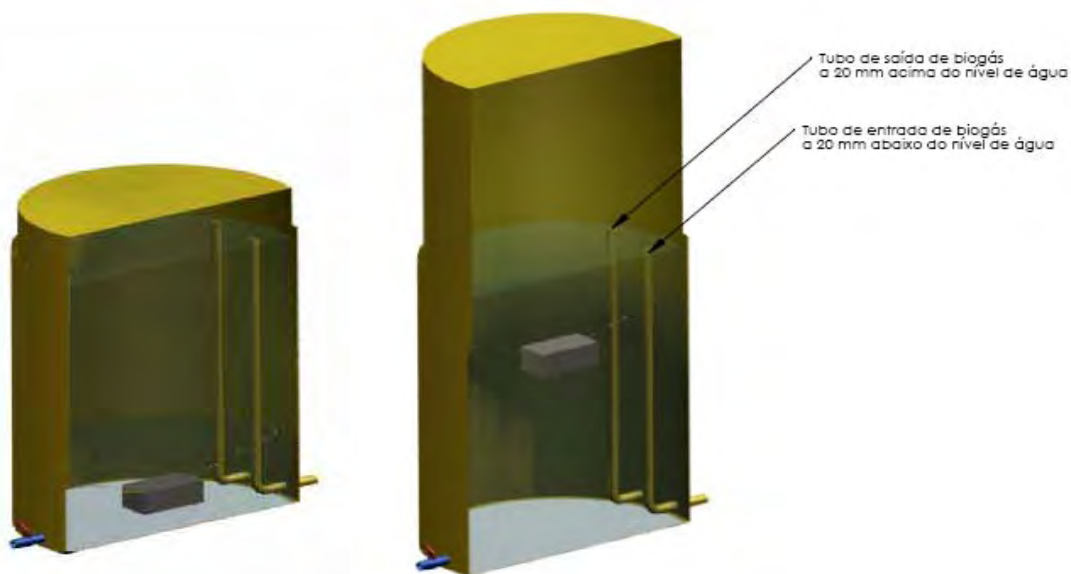


Figura 5.3 – (A) Gasômetro vazio; (B) Gasômetro com meia carga; (C) Gasômetro com plena carga.

A Figura 5.4 mostra o desenho esquemático do sistema de filtragem de biogás por meio de filtros seqüenciais, utilizando como material filtrante, no primeiro filtro, cavacos de aço oxidados oriundos de usinagem e, no segundo, palha de aço oxidada. A parte estrutural dos filtros é composta por meio de tubos de PVC de 150 mm de diâmetro, conexões e chapas de PVC de 5 mm de espessura e de um filtro aberto, expondo o material filtrante.

A descrição detalhada do processo de filtragem é ilustrado na Figura 5.5, na qual: 1º) o biogás *in natura* entra pelo centro do filtro na parte inferior; 2º) o biogás atravessa uma camada de cavacos de aço oxidado compactado, oriundo de usinagem, retendo parte do gás sulfídrico por processo de redução; 3º) o biogás

sai pela parte superior de filtro; 4º) entra pela parte inferior de um segundo filtro; 5º) atravessa uma camada de palha fina de aço oxidado compactada, para retenção do gás sulfídrico remanescente, e sai pela parte superior do segundo filtro.

A Figura 5.6 ilustra o filtro, mostrando a entrada do biogás *in natura*, a saída do biogás filtrado e a válvula de recondicionamento do elemento filtrante, por meio de sua abertura para a entrada de oxigênio, e assim oxidar novamente.

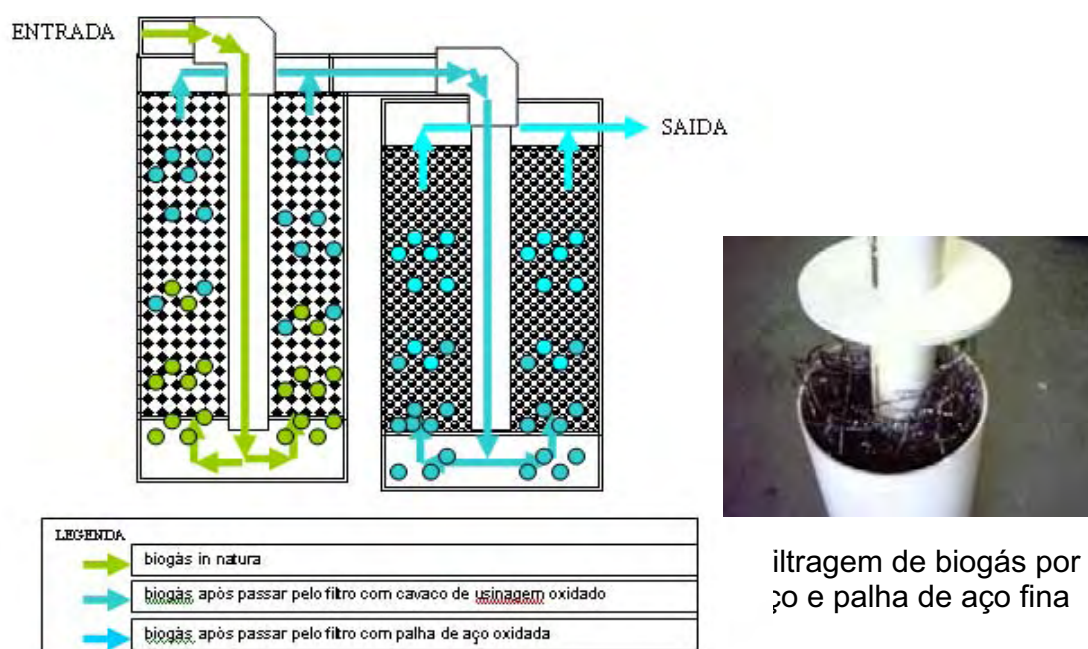


Figura 5.5 - Desenho esquemático do sistema de filtragem de biogás por meio de filtros sequenciais.

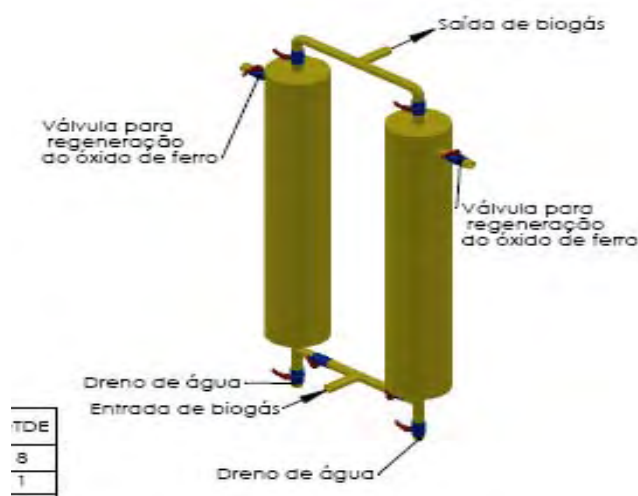


Figura 5.6 - Filtro de biogás em PVC.

5.2 Construção do Gasômetro em PVC e Concreto Armado

Para a construção do sistema de gasômetro, foram utilizados basicamente tubos e chapas de PVC e concreto armado na base.

As Figuras de 5.7 até 5.12 mostram a construção detalhada do gasômetro.



Figura 5.7 – Concretagem e junção do concreto armado ao tubo de PVC



Figura 5.8 – Corte das chapas de PVC de 2 mm de espessura, no formato da tampa do gasômetro



Figura 5.9 – (A) Colagem das duas chapas para formar a tampa do gasômetro, (B) aplicação de solução limpadora de PVC e (C) aplicação do adesivo de PVC

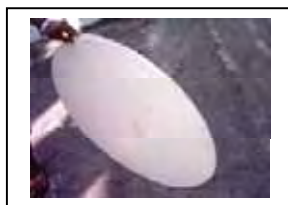


Figura 5.10 – Chapas de PVC coladas para a formação da tampa do gasômetro.



Figura 5.11 – Colagem da campânula do gasômetro



Figura 5.12 – Gasômetro acabado e conectado ao sistema biodigestor anaeróbio para a coleta e o armazenamento do biogás

5.3 Sistema Compacto de Cogeração a Biogás e GNBP.

O sistema compacto de cogeração foi desenvolvido na UNESP – Campus de Guaratinguetá. Ele é composto por meio de um motogerador a gasolina, de potência nominal de 5,5 kW. A conversão a biogás e/ou GNBP foi feita pela empresa TRIAGAS, de Bento Gonçalves, RS, e, posteriormente, acoplado a um trocador de calor gás/água, na forma de mini caldeira, aproveitando os gases de

escape do motogerador, A mini caldeira foi desenvolvida na Universidade de Taubaté, para assim, o sistema produzir simultaneamente energia elétrica e água quente. O sistema é ilustrado na Figura 5.13.

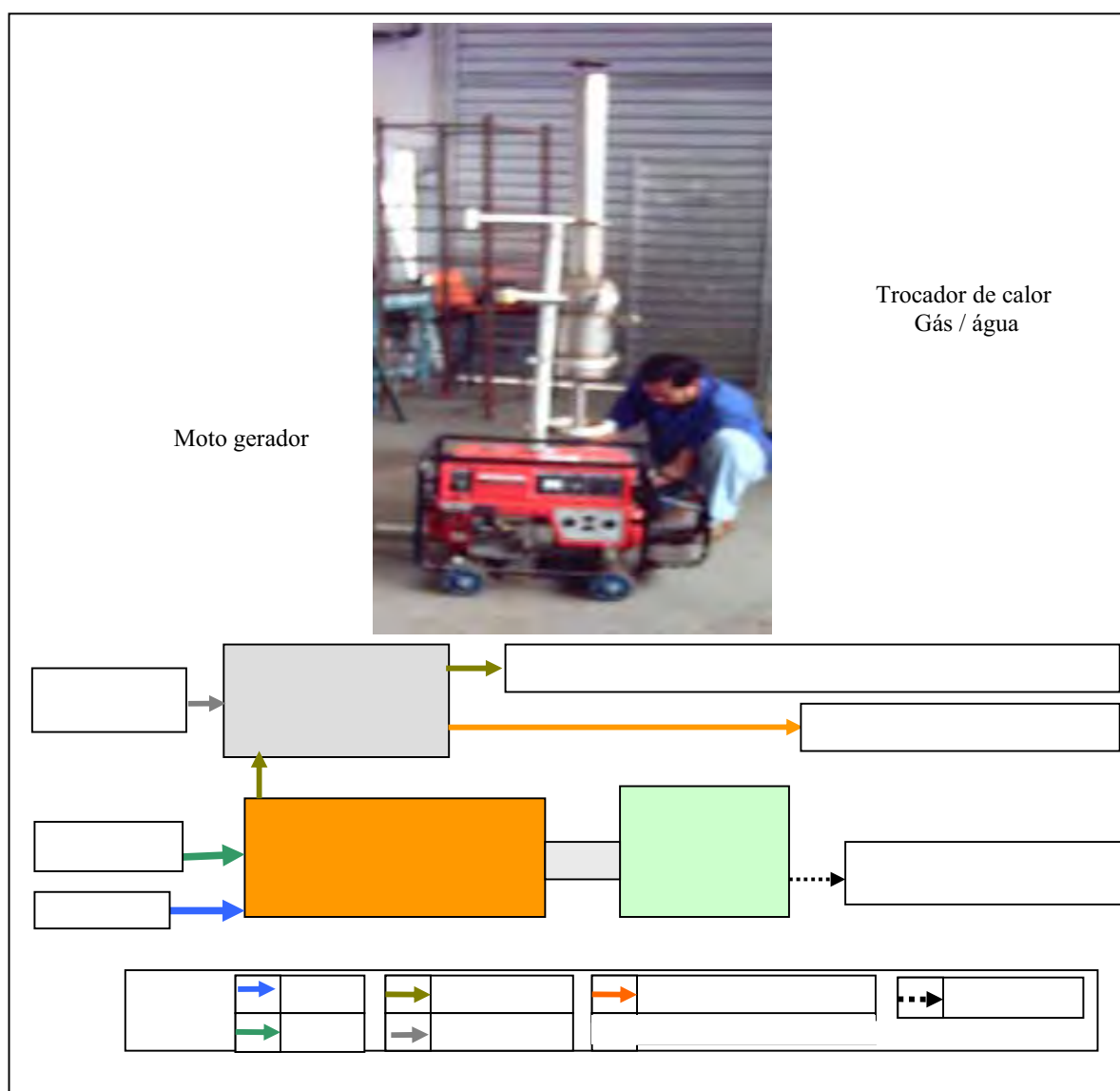


Figura 5.13 - Sistema compacto de cogeração de 5,5 kW a gasolina e convertido a biogás e ou GNB, para a produção simultânea de energia elétrica e água quente.

GODOY JUNIOR (2006).

5.4 Eficiência do Sistema Compacto de Cogeração a Biogás e a Gás Natural a Baixa Pressão.

O sistema de compacto cogeração de energia foi desenvolvido na UNESP, em Guaratinguetá, SP, e enviado à empresa TRIGÁS, de Caxias do Sul para a sua conversão à biogás e testes de eficiência.

Vale a pena salientar que a potência nominal do motogerador do cogerador de energia é de 5,5 kW, quando operado com gasolina.

Foi testado, inicialmente, utilizando biogás oriundo de avicultura, em um biodigestor em início de operação, com uma concentração de 60% de metano, e obteve-se, em média, uma potência de saída de 2,8 kW.

Utilizando GNPB, em uma pressão de 0,1 MPa, com 95% de metano, obteve-se em média uma potência de saída de 4,2 kW no sistema de cogeração compacto, na mesma empresa, e com o mesmo motogerador.

CAPÍTULO 6 - SISTEMAS QUEIMADORES DE GÁS E DESENVOLVIMENTO DO QUEIMADOR AUTOMÁTICO DE BIOGÁS PARA PEQUENAS VAZÕES

6.1 Configuração do Gerador de Faísca para o Sistema Queimador de Biogás produzido por Miniestações de Tratamento de Esgoto.

Em situações com produção de biogás em que é inviável o aproveitamento energético do biogás, devido a baixas vazões, e considerando o potencial do impacto ambiental causado pela somatória de diversas situações em que é inviável energeticamente o aproveitamento desse gás, o sistema queimador e registrador de biogás, apresentado neste trabalho, é uma solução.

Para utilização do ignitor, em um queimador de biogás, com uma composição média na faixa de 60 a 85% de metano e 40 a 15% de gás carbônico produzido em miniestações de tratamento de esgoto, os três principais aspectos a serem analisados são: 1º) tempo de vida útil - Isto porque, mesmo depois de ter gerado a faísca e ter iniciado o processo de queima do gás, o ignitor terá que continuar a gerar a faísca, pois se a chama apagar, por qualquer motivo deverá, em seguida ser acesa; 2º) geração da faísca - O ignitor terá que gerar apenas uma faísca por vez, ao invés de 5 ou 7, como nos fogões. Isto permite que a energia armazenada no capacitor seja entregue a apenas um eletrodo. Como as dimensões não precisam ser reduzidas, como um eletrodoméstico para esta aplicação, um carretel especial para o transformador poderá ser desenvolvido; 3º) instalação dos eletrodos - O ignitor pode ser equipado com os eletrodos, sendo instalado próximo ao ponto de saída do gás. Isto permite a redução do comprimento dos condutores com isolações especiais. No fogão, eles são necessários, para que o ignitor fique distante da calor gerada nas bocas e do forno.

A Figura 6.1 ilustra o circuito do ignitor da empresa Brascabos Componentes Elétricos e Eletrônicos Ltda., já adaptado para um único bico (MARCELINO, 2006).

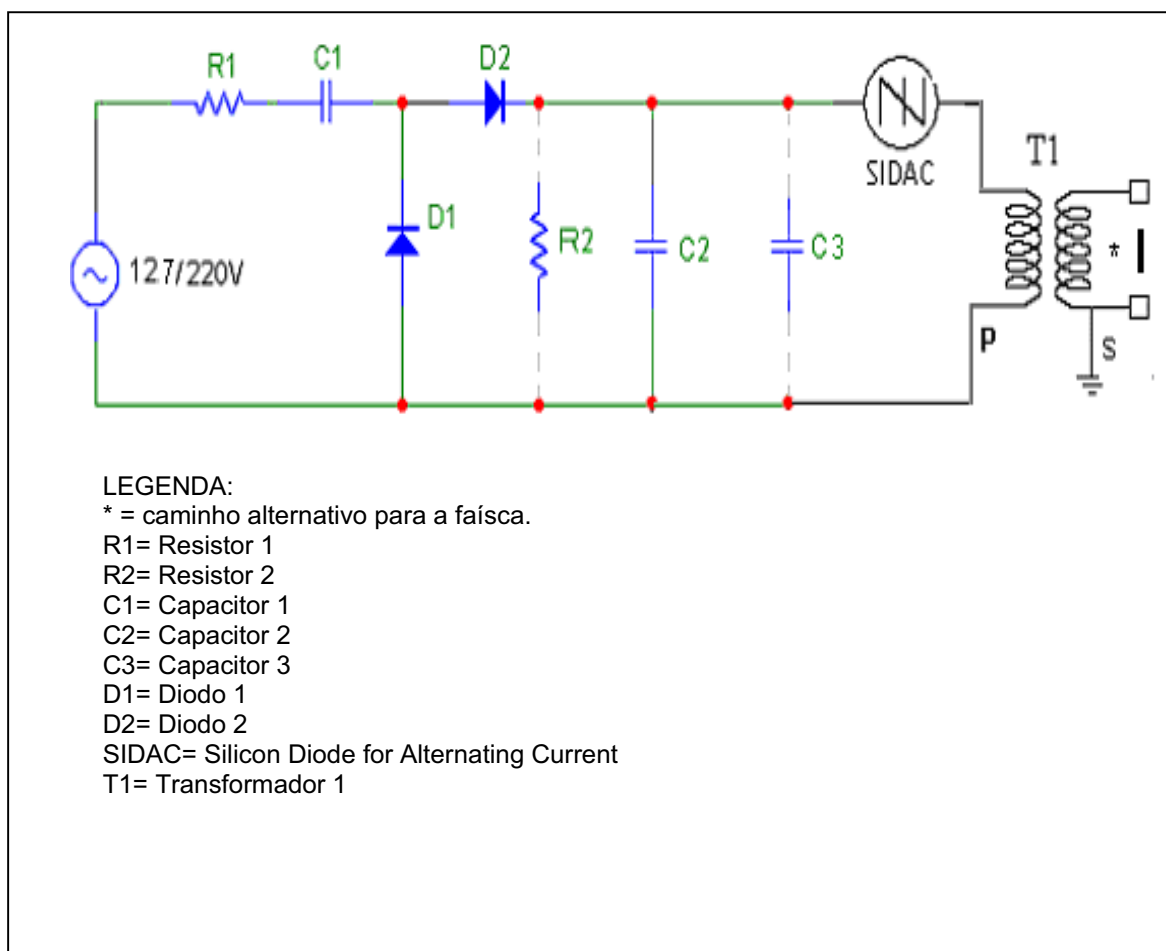


Figura 6.1 – Circuito do Ignitor da Brascabos.

O gasômetro, apresentado na Figura 6.2, é equipado com duas microchaves: uma que sente o fim de curso, instalada na parte superior do gasômetro, que indica que o mesmo está cheio (GC); e outra que sente o início de curso, instalada na parte inferior, que indica que o mesmo está com pouco gás (GV). (GODOY JUNIOR *et al.* 2009, MARCELINO & GODOY JUNIOR *et al.* 2009).

Uma válvula com acionamento elétrico está instalada na saída do gasômetro. Ela é sempre ligada, juntamente com o ignitor, quando a chave GC for acionada.

Nesses momento, por meio de uma operação biestável, um temporizador é habilitado (E) e aciona o ignitor, com um período de 5 segundos, sendo: 1 - ligado

e 4 - desligado. Essa operação se manterá mesmo que a chave GC desligue, indicando que já não está totalmente cheio, até que a chave GV seja acionada, indicando que está vazio, ou quase vazio.

Neste momento, além do ignitor, a válvula também será desligada (fechada). Mesmo que a chave GV desligue (indicando que o gasômetro já não está mais vazio), o sistema somente será acionado novamente, se a chave GC for acionada.

Para que a histerese, ou seja, a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou, seja realizada com sucesso, é necessário que exista um filtro de hardware para se eliminar os repiques mecânicos das chaves e dos ruídos eletromagnéticos. Este filtro está contemplado pela operação biestável tipo SR.

O processo descrito pelas chaves GC e GV resume uma operação de um multivibrador biestável tipo SR (Set/Reset), e a Tabela 6.1 descreve essa função.

Tabela 6.1 – Descrição das funções do sistema de chaveamento do queimador

Entradas		Saídas	
Set (GV)	Reset (GV)	Válvula	Ignitor
on	off	on	1on/4off
off	on	off	off
off	off	(estado anterior)	(estado anterior)
on	on	(estado proibido)	(estado proibido)

A condição de estado proibido estará mecanicamente garantida no gasômetro, conforme é ilustrado por meio da Figura 7.3, e a condição das duas chaves desligadas é a condição em que o gasômetro está com volume de gás e em processo de queima.

A Figura 6.2 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle do registrador queimador.

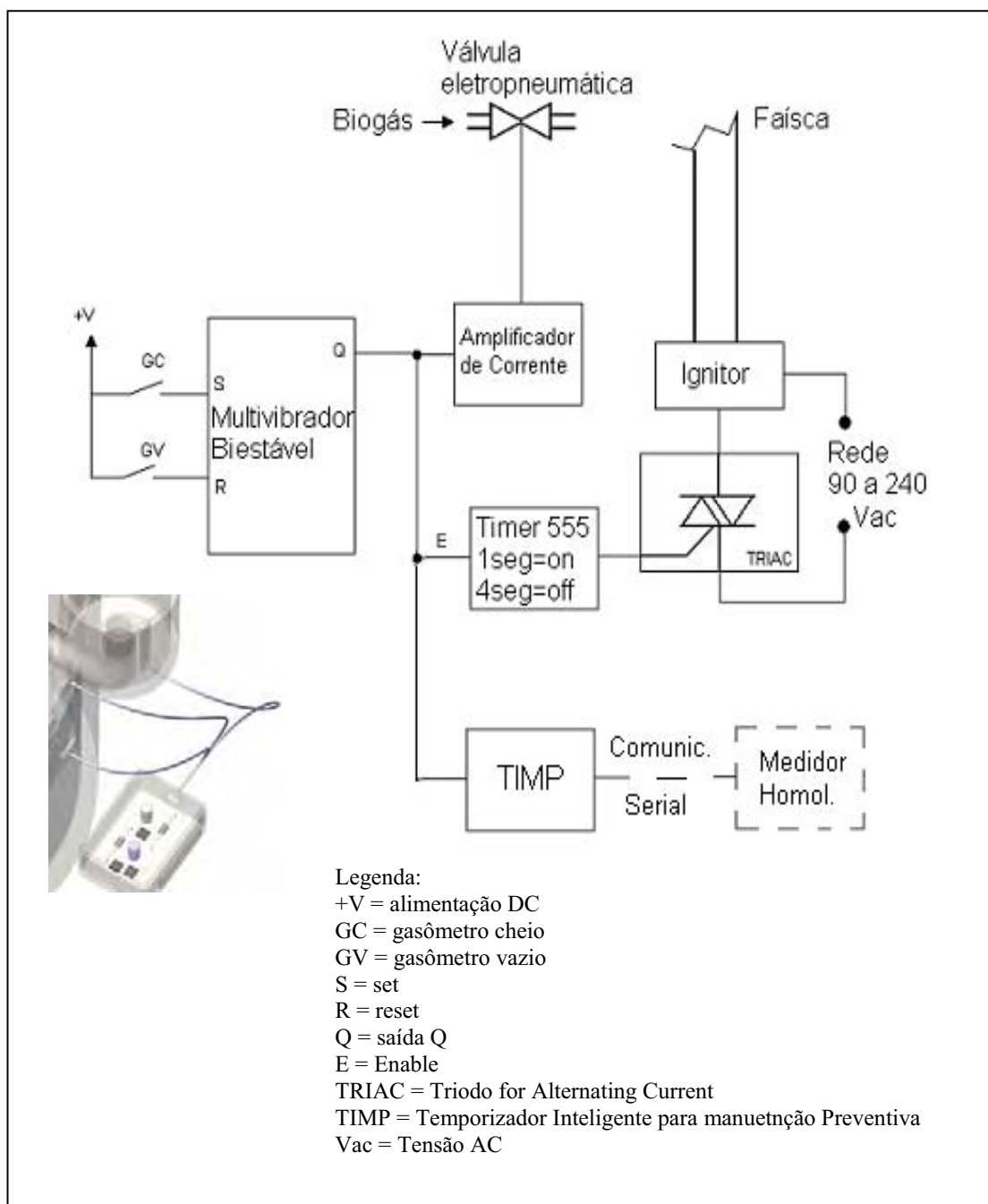


Figura 6.2 – Sistema de controle do queimador e registrador

Como solução mecânica do protetor de chama, foi concebido um sistema para que a chama somente seja apagada quando a válvula for fechada. Qualquer apagamento acidental será suprido pela faísca seguinte, em um tempo inferior a 4 segundos.

6.2 Sistema Registrador do Volume de Biogás Queimado

Para registrar o volume de biogás queimado e poder obter os créditos de carbono, pretende-se adaptar o TIMP (temporizador inteligente com sinalização para manutenção preventiva), segundo MARCELINO (2007). O sistema conta o número de vezes que o gasômetro encheu de biogás e foi esvaziado, com a respectiva queima. O sistema ainda tem garantia de contagem de volume mínimo queimado, uma vez que, durante a queima, pode estar entrando biogás, já que a totalização do volume queimado será feita pelo número de vezes que a chave GC é fechada.

No futuro, para sistemas com maior produção de biogás, para se ter uma maior precisão no volume de biogás queimado, um sistema queimador auxiliar poderá ser instalado em paralelo ao sistema queimador principal. Uma válvula eletropneumática será instalada entre os dois. Esta válvula somente estará fechada quando o processo de queima estiver ativado.

Para sistemas com pequeno volume de biogás, não há necessidade de se garantir o volume queimado com exatidão, bastando apenas a garantia do volume mínimo queimado. Isto se justifica, uma vez que o processo de queima é muito rápido, se comparado ao tempo de enchimento do gasômetro.

O temporizador inteligente que contabiliza o número de transições “0”, para “1” na saída “Q” do multivibrador biestável, permanece, por comunicação serial, solicitando autorização para o envio do total contabilizado. Se não existir resposta autorizando o envio, ele permanece contabilizando. Caso um equipamento, devidamente homologado pelo sistema pagador de créditos de carbono, seja conectado à comunicação serial e autorize a transmissão do número total de vezes que o gasômetro foi descarregado, e se a comunicação foi efetuada com sucesso, o totalizador é zerado, para reinício de contagem da queima do biogás no sistema.

A Figura 6.3, de acordo com GODOY et al (2009), ilustra o funcionamento eletromecânico do sistema registrador do volume de biogás queimado, representando o sistema em estado vazio, sem biogás, em que: (1) é a tubulação

de entrada do biogás; (2) é a parte inferior do gasômetro; (3) é o lastro em chumbo para manter a campânula do gasômetro na posição vertical; (4) é um furo na parte inferior do gasômetro (5), para que, na ausência de energia elétrica, o biogás seja liberado sem a queima, se o volume ultrapassar a capacidade máxima do gasômetro; (6) é um ímã permanente que aciona as microchaves (7) na posição vazio de biogás e (8) na posição cheio de biogás; (9) é um tubo flexível na posição alongado, que leva o biogás até a saída (10) que se conecta à válvula (12) que controla a saída do biogás para a queima; (11) é o centelhador, (13) são os orifícios para a entrada de ar na mistura combustível; (14) é o protetor da chama; (16) é o bico queimador e (15) é o eletrodo do centelhador.

A Figura 6.4, de acordo com GODOY et al (2009), ilustra o sistema cheio, completo de biogás e na operação de queima, e no registro do biogás queimado, onde: (5) representa o gasômetro cheio de biogás; (6) representa o ímã permanente na posição superior acionando a micro chave (8), que fornecerá um sinal para registrar o volume de biogás e acionar a abertura da válvula (12), e o acionamento do centelhador (11); (9) representa o tubo flexível na posição retraída, conduzindo o biogás até a saída (10) que se conecta a válvula (12), que controla a saída do biogás para a queima, o qual está na posição aberta; (11) representa o centelhador funcionando; (17) é a chama queimando o biogás; (18) são as bolhas de biogás que encherão o gasômetro (5).

A Figura 6.3, quando comparada à Figura 6.4, ilustra claramente o funcionamento do sistema registrador queimador de biogás, desde a posição de vazio até a posição de cheio, com o início da queima e a quantificação do biogás queimado, sem visar ao aproveitamento energético, apenas visando ao saneamento ambiental do biogás.

A Figura 6.5 ilustra a maquete virtual e um dos protótipos rudimentar do sistema queimador.

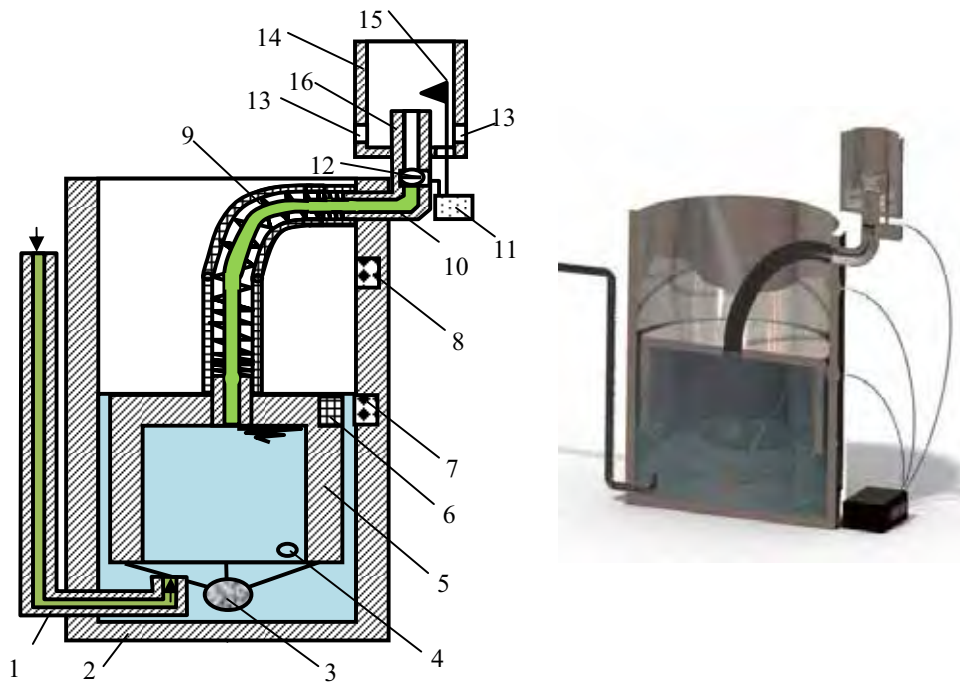


Figura 6.3 – Sistema queimador registrador de biogás vazio.

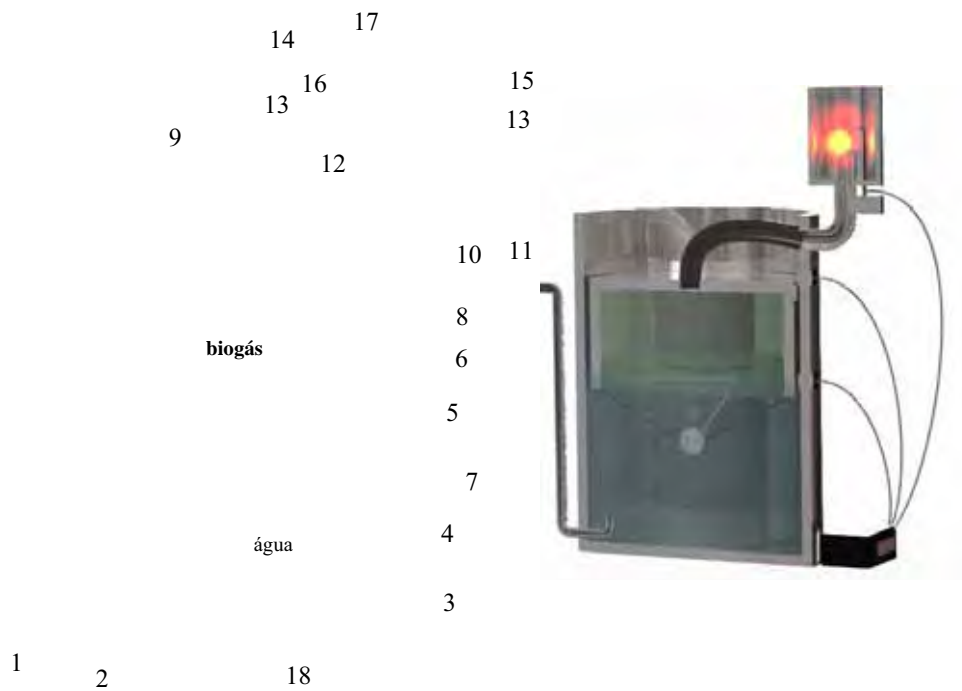


Figura 6.4 - Sistema queimador registrador de biogás na posição completo e em queima de biogás

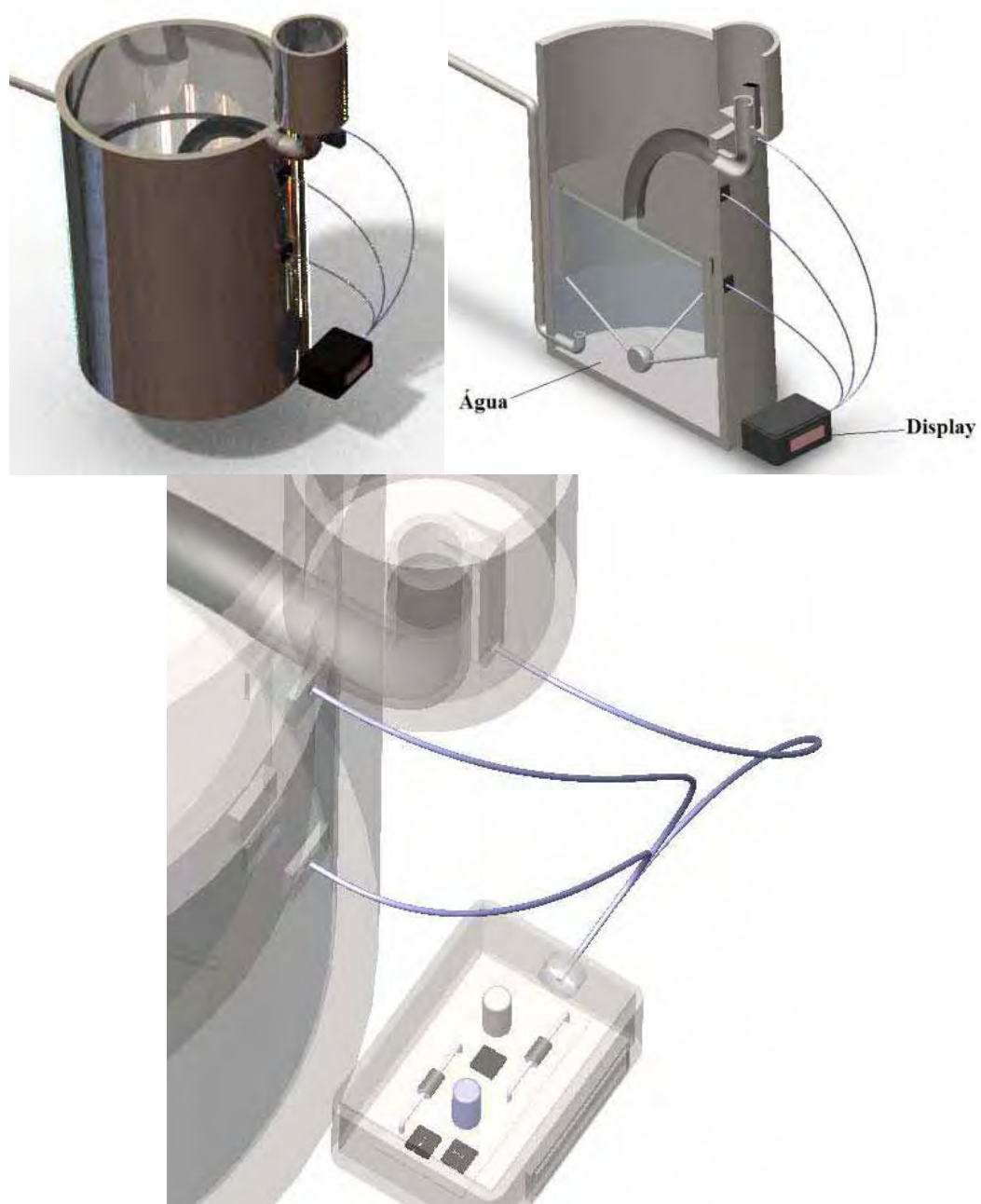


Figura 6.5 – Desenhos da maquete do queimador dando ênfase ao sistema de controle e registro.

6.3 Descrição do Sistema Temporizador Inteligente

O sistema temporizador inteligente, com sinalização para manutenção preventiva, é montado em uma placa de circuito impresso, com dimensões reduzidas e de baixo custo. É construído com um microcontrolador comercial de 8 pinos, equipado com memória não-volátil de programação e apagamento elétrico, o EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory), além de relógio interno para geração de base de tempo. Dependendo da necessidade de precisão de tempo para a manutenção preventiva, a base de tempo pode ser externa ao microcontrolador.

A alimentação do sistema recebe energia da rede, 127 ou 220 VAC, sendo efetuada por um conversor de tensão, consistindo de um retificador de tensão e um abaixador capacitivo e regulador de tensão. A sinalização de operação é efetuada por meio de um LED, que, em situação normal de operação, está sempre ligado, representando que o volume de biogás está sendo contabilizado.

O sistema é equipado com uma chave *reset* do tipo *push-button*, que serve para inicializar a contagem de tempo através de processo manual. Isto porque ela também é inicializada sempre que o equipamento externo, que faz a contabilização periódica, recebe com sucesso a comunicação do total.

6.4 Viabilidade Técnica do Sistema Queimador Registrador de Biogás.

Com uma produção esperada de cerca de 9 Nm³ de metano por dia, na miniEETERA em estudo, conforme Figura 7.9, fica inviável técnica e economicamente o aproveitamento energético do biogás produzido, ficando viável apenas a sua quantificação e a sua queima.

A expectativa é que esse sistema viabilize a queima e a quantificação do biogás em pequenas produções, quando for inviável o seu aproveitamento energético.

O gás metano, presente no biogás produzido a partir da biodigestão anaeróbia do esgoto sanitário de pequenas estações de tratamento de esgoto, pode deixar de ser emitido para a atmosfera com o queimador automático

apresentado neste trabalho. Isto porque o mesmo é transformado em gás carbônico, com a possibilidade de ser quantificado, habilitando a empresa ou instituição a obter créditos de carbono no mercado internacional, conforme as diretrizes estabelecidas no Protocolo de Kyoto, cuja meta é a redução de gases de efeito estufa até 2012.

Com base nos dados que podem ser obtidos por uma rede interligada de sistemas queimadores e registradores de biogás, instalados em pequenas estações de tratamento de esgoto, será possível levantar o potencial energético e econômico, no tocante a créditos de carbono, disponível nesta rede de miniestações de tratamento, e analisar a possibilidade de replicar a iniciativa em outros sistemas de tratamento de esgoto e saneamento ambiental do biogás de pequeno porte espalhados pelo País.

6.5 Comentários Referentes à Viabilidade Técnica e Ambiental do Sistema Queimador Registrador de Biogás

Pode-se concluir que o sistema proposto é perfeitamente viável do ponto de vista ambiental, uma vez que evita a emissão indesejável do metano presente no biogás da atmosfera, convertendo-o em gás carbônico. Nesse equipamento, a queima do biogás pode ser quantificada, com garantia de queima do biogás, processo necessário para transformar o metano em dióxido de carbono, com significativamente menor potencial de geração de efeito estufa.

Embora o sistema queimador automático tenha sido concebido com base em circuitos eletrônicos de baixo custo, com soluções mecânicas simples e de fácil instalação, a viabilidade econômica do sistema depende da interação com outros sistemas. No caso, quando uma empresa responsável pela coleta do esgoto contabilizar o montante de metano convertido em gás carbônico e reivindicar os créditos de carbono obtidos pelos sistemas instalados, a viabilidade econômica será garantida.

Os benefícios do sistema proposto não são perceptíveis em um sistema isolado, considerando que o alvo, sendo instalações de pequeno porte, não

representam volumes expressivos de gases de efeito estufa pontuais. Em uma análise superficial, percebe-se que, embora o pequeno porte dessas estações de tratamento, quando contabilizado o montante de biogás produzido e seu impacto ambiental, ou devido à própria conscientização da população, elas podem representar um número expressivo em um futuro próximo. E, em conjunto, elas poderão gerar proteção significativa para a redução do efeito estufa, se estiverem equipadas com versões do queimador automático proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 7 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA miniEETERA

Apresenta os aspectos da partida da miniEETERA, sua operação e a metodologia de obtenção dos principais parâmetros de indicação da eficiência sanitária e da qualidade do biogás produzido.

Desde 10/02/2007, o sistema vem operando sem qualquer equipamento eletromecânico, utilizando apenas a força da gravidade e o metabolismo bacteriano para acionamento dos reatores.

7.1 Substrato.

O substrato utilizado foi esgoto sanitário acrescido de restos alimentares triturados, apresentando uma Demanda Química de Oxigênio de 422,66 mg/l.

7.2 Partida da miniEETERA.

A partida se deu em 10/02/2007, inoculando-se lodo anaeróbico floculento, proveniente de tratamento anaeróbico de efluente de cervejaria. No caso, com lodo doado oriundo da Unidade da Kaiser, em Jacarei, SP.

A Figura 7.1 ilustra a inoculação de 12 m³ do lodo por meio de caminhão limpa fossa.



Figura 7.1 - Inoculação por meio de caminhão tanque, com lodo anaeróbico oriundo de estação de tratamento de efluentes de cervejaria

7.3 Parâmetros Físico-químicos de Controle e Monitoramento da miniEETERA.

As análises da DQO foram realizadas por empresa terceira, as tomadas de pH e temperatura foram efetuadas pelo próprio autor, com equipamentos portáteis, e a análise de determinação da qualidade de biogás foi realizada na UNESP – Jaboticabal.

7.3.1 Coleta das Amostras da Parte Líquida.

Para as análises, 600 ml de amostras de água que foram coletadas, em três pontos do sistema (1, 2 e 3), estando localizadas em: 1) saída do pré-tratamento; 2) saída do biodigestor UASB I; 3) saída do biodigestor UASB II.

A localização dos pontos de coleta das amostras é ilustrada na Figura 7.2.

Todas as análises foram realizadas conforme: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 20ªEd, 1998 - APHA, AWWA, WEF; NBR 9896 – Poluição das Águas – Terminologia; NBR 9897 – Planejamento de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores; NBR 9898 – Preservação e Técnicas de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores; Legislações CETESB – Lei 997 Decreto 8468 Artigo 19-A de 31/05/1976.

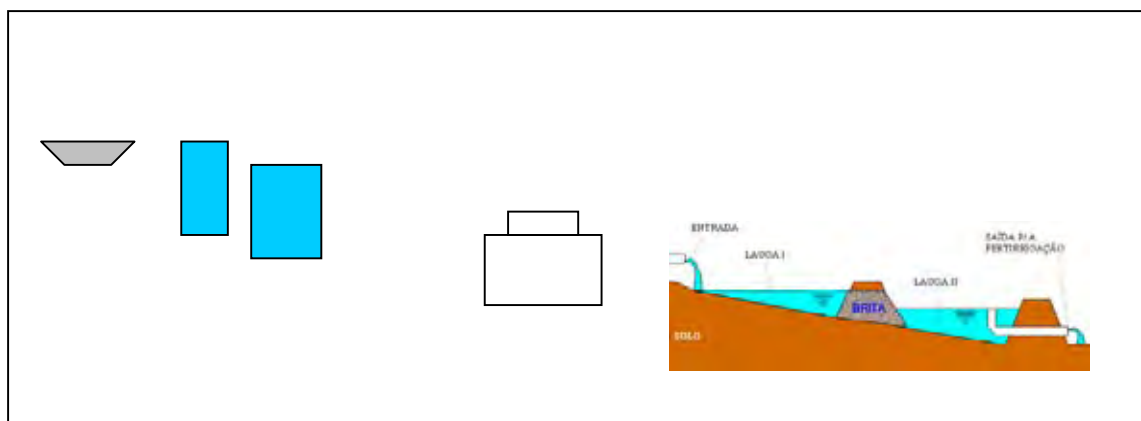


Figura 7.2 – Pontos de coleta das amostras do efluente na miniEETERA.

7.3.2 Coleta das Amostras do Biogás.

As amostras de biogás foram retiradas diretamente das respectivas campânulas dos reatores UASB I e UASB II, conforme é ilustrado nas Figuras 7.3 e 7.4 e instruções de Lucas Junior (2007).

1g 2g

Pré-
tratamento

UASB I

UASB II

Figura 7.3 – Pontos de coleta de biogás



Figura 7.4 – Foto ilustrativa dos pontos de coleta de biogás no UASB I e no UASB II

7.3.2.1 Procedimento de Coleta das Amostras do Biogás a Baixa Pressão.

Devido à baixa pressão do biogás obtida nas campânulas dos UASBs, em média 3 cm de coluna de água, foi necessária a coleta do biogás por meio de seringas plásticas de 20 mL, comumente encontradas em farmácias. A Figura 7.5 ilustra o ponto de coleta de biogás, na qual se ilustra a pressão do gás que está sendo exercida diretamente na coluna de água do recipiente pressurizados. A Figura 7.6 ilustra a coleta do biogás por meio de seringa plástica. As Figuras 7.7 e 7.8 ilustram a selagem da seringa para transporte da amostra desde a UNESP no Campus de Guaratinguetá, SP, até ao Campus em Jaboticabal, SP, para as análises de determinação da qualidade do biogás produzido na miniEETERA.

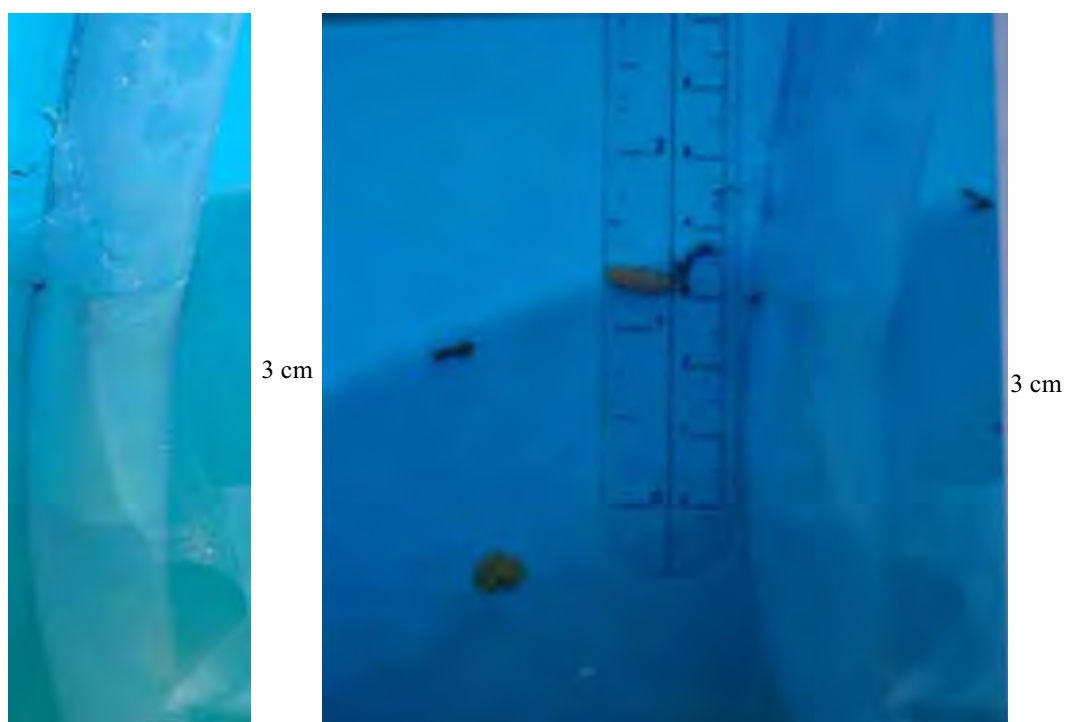


Figura 7.5 – Foto ilustrativa da pressão de 3 cm de coluna de água nos pontos de coleta de biogás no UASB I e no UASB II

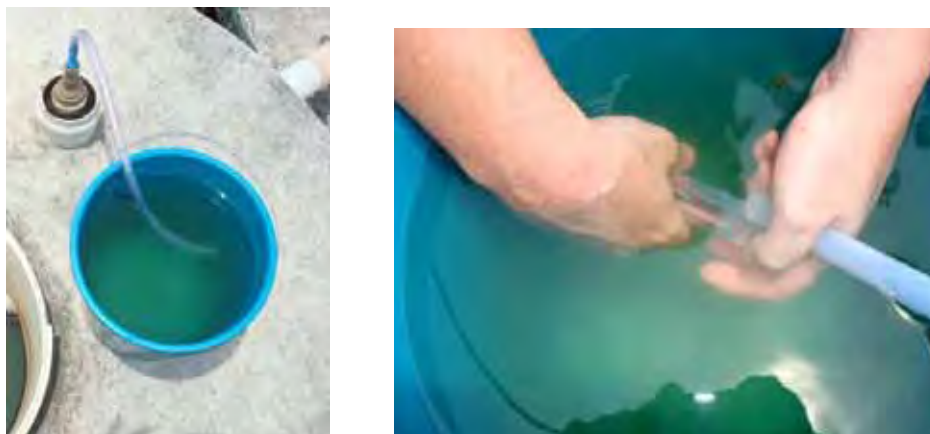


Figura 7.6 – Foto ilustrativa da coleta de biogás por meio de seringa plástica de 20 ml nos pontos de coleta de biogás no UASB I e no UASB II



Figura 7.7 – Foto ilustrativa da seringa cheia de biogás e lacrada por meio de elastômero termoplástico de uso em ortodontia



Figura 7.8 – Foto ilustrativa sequencial da selagem da seringa cheia de biogás por meio de elastômero termoplástico de uso em ortodontia

7.3.2.2. Produção Estimada de Biogás.

Para o cálculo estimado de produção de biogás da unidade em estudo, utilizou-se, segundo DESA (1998), o software UASBWARE 1/98 desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da EE UFMG, e obteve-se uma estimativa de produção teórica de biogás de $15 \text{ Nm}^3/\text{dia}$ e produção esperada de biogás de $9 \text{ Nm}^3/\text{dia}$, ilustrado na Figura 7.9, que mostra a tela de computador rodando o programa UASBWARE1/98. Para efeitos de cálculos, considerou-se

uma DQO de entrada de 422 mg/l e uma DQO de saída de 76 mg/l. Por subtração, obtém-se uma DQO consumida de 346 mg/l. A vazão média diária de esgoto sanitário utilizada foi de 46.000 l.

UASB Pré-Dimensionamento - BioGás\Tubo de Distribuição

Constantes

Altitude Local (m)	537	Tubo de Distribuição do Afluente : Diâmetro Interno (mm)	100
Porcentagem Taxa de Metano no Biogás (%)	80		
Concentração para o lodo de descarte (%)	4		
Temperatura do Esgoto (o C)	23		
Densidade do lodo (kgSST/m3)	1020		
Coefficiente de Produção de sólidos Y (kgSST/kgDQOapl)	0.346		

Cálculo

Resultados

Produção Teórica Metano - CH4 (m3/dia)	12	Velocidade do Afluente no tubo de distribuição (m/s)	0.06
Produção Esperada Metano - CH4 (m3/dia)	7	Comprimento do tubo (m)	4.39
Produção Teórica BioGás (m3/dia)	15		
Produção Esperada BioGás (m3/dia)	9		
Taxa de liberação BioGás (m/h)	0.27		
Produção de Lodo (kgSST/dia)	37		
Produção volumétrica de Lodo (m3/dia)	0.9		

Créditos Sair Ajuda Voltar Continuar

Vazões 2 / TDH / Digestor / Decantador / Desenho 1 / Desenho 2 / BioGás/Tubo de Distribuição / Relatório

Figura 7.9 – Vista de tela de computador ilustrando os resultados na produção estimada de biogás, utilizando-se o software UASBWARE 1/98 – DESA (1998)

7.3.2.3 Determinação da Qualidade do Biogás.

A determinação da qualidade do biogás foi por meio de um cromatógrafo a gás existente na UNESP – Campus de Jaboticabal.

7.3.2.4 Resultados da Determinação da Qualidade do Biogás.

A qualidade do biogás foi determinada via cromatografia gasosa, por meio de um cromatógrafo a gás da marca SHIMATZU – modelo G-14, existente na UNESP – Campus de Jaboticabal, utilizando-se de metodologia descrita pela CETESB, sendo operado nas seguintes condições: coluna Porapak Q, gás de arraste nitrogênio, detector de condutividade térmica, temperatura no detector igual a 76°C, temperatura na coluna igual a 70°C e temperatura no vaporizador igual a 72°C.

A Tabela 7.1 mostra a qualidade do biogás *in natura* produzido pelo primeiro reator UASB e o produzido pelo segundo reator UASB disposto em série.

TOLEDO & LUCAS JÚNIOR (1997) relatam que, para a digestão anaeróbia de efluente de suinocultura, operando com um tanque imhoff para hidrólise e dois reatores UASB em cascata, com um TRH de 24,66 horas, na análise do biogás produzido, foram obtidos os seguintes teores de metano (CH₄) e CO₂ e, respectivamente, os seguintes valores; no primeiro reator, 82,71 % e 5,48 %, e, no segundo, 83,04% e 5,15%.

A Tabela 7.2 mostra os resultados no teor do biogás obtidos por TOLEDO & LUCAS JÚNIOR (1997).

Tabela 7.2 – Análises de determinação da qualidade do biogás produzido no UASB I e no UASB II, com um tempo de retenção hidráulica de 24 horas, operando com efluente de suinocultura, UNESP – Campus de Jaboticabal, segundo TOLEDO & LUCAS JÚNIOR (1997).

Componentes do biogás	UASB I	UASB II
CO ₂ [%]	5,48	5,15
CH ₄ [%]	82,71	83,04

Tabela 7.3 – Resultados das análises de determinação da qualidade do biogás produzido no UASB I e no UASB II, com tempo de retenção hidráulica de 24 horas.

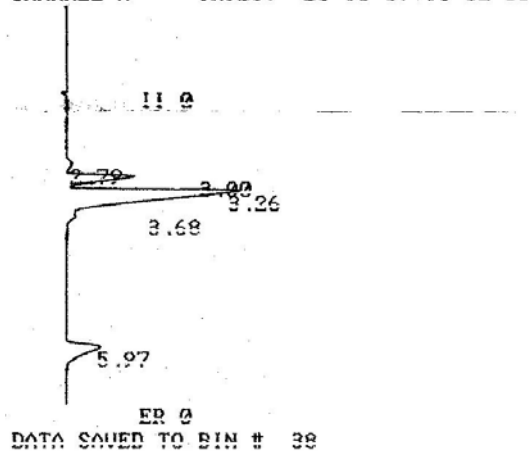
Componentes do biogás	UASB I	UASB II
CO ₂ [%]	Amostra 1 = 4,616 Amostra 2 = 3,770 Amostra 3 = 4,897 Média = 4,437	Amostra 1 = 7,440 Amostra 2 = 7,155 Amostra 3 = 7,155 Média = 7,248
O ₂ [%]	Amostra 1 = 2,144 Amostra 2 = 2,424 Amostra 3 = 1,458 Média = 2,008	Amostra 1 = 0,167 Amostra 2 = 0,241 Amostra 3 = 0,241 Média = 0,216
N ₂ [%]	Amostra 1 = 38,203 Amostra 2 = 41,066 Amostra 3 = 27,388 Média = 35,552	Amostra 1 = 11,333 Amostra 2 = 12,452 Amostra 3 = 12,452 Média = 12,079
CH ₄ [%]	Amostra 1 = 55,007 Amostra 2 = 52,733 Amostra 3 = 66,257 Média = 57,999	Amostra 1 = 81,060 Amostra 2 = 80,152 Amostra 3 = 80,152 Média = 80,454

SILVA (1993) relata que todas as amostras analisadas de biogás oriundo do tratamento anaeróbio de esgoto doméstico hidrolisado o teor de H₂S, foi sempre inferior a 0,01%. A Figura 7.10 ilustra o gráfico da composição do biogás obtido pelo cromatógrafo a gás no reator UASB I.

A Figura 7.11 ilustra o gráfico da composição do biogás obtido pelo cromatógrafo a gás no reator UASB II.

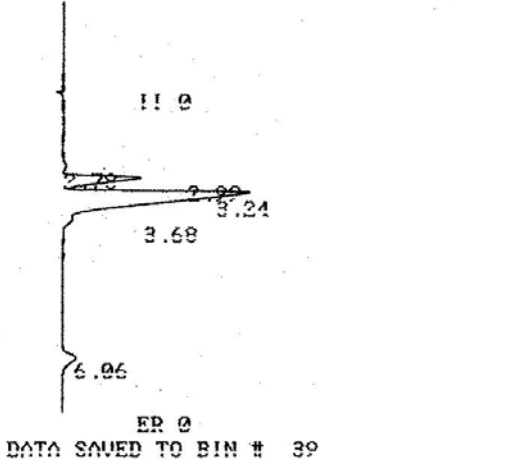
Comparando-se os gráficos da Figura 7.10 com os da Figura 7.11, observa-se que, no UASB II, a concentração de metano no biogás produzido é consideravelmente maior que a concentração no produzido pelo UASB I. Isto está relacionado à hidrólise acentuada no UASB I e à metanogênese acentuada no UASB II.

CHANNEL A INJECT 23-10-07 16:02:06



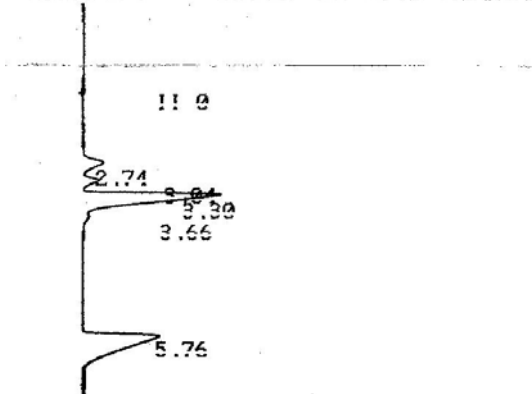
NAME	%
CO2	4.646
O2	2.144
N2	38.203
H	0.
CH4	55.007
TOTALS	100.

CHANNEL A INJECT 23-10-07 16:10:17



NAME	%
CO2	8.777
O2	2.424
N2	41.066
H	0.
CH4	52.733
TOTALS	100.

CHANNEL A INJECT 23-10-07 16:26:37



NAME	%
CO2	4.897
O2	1.458
N2	27.388
H	0.
CH4	66.257
TOTALS	100.

Figura 7.10 - Gráficos da composição do biogás obtida pelo cromatógrafo a gás nas análises das amostras do biogás produzido pelo reator UASBI

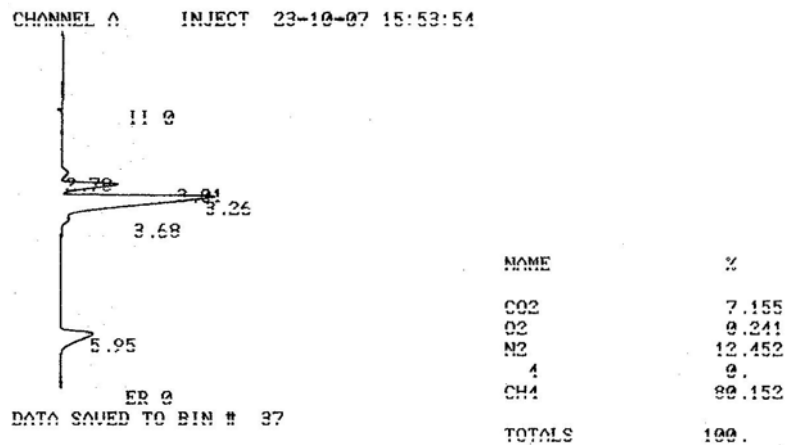
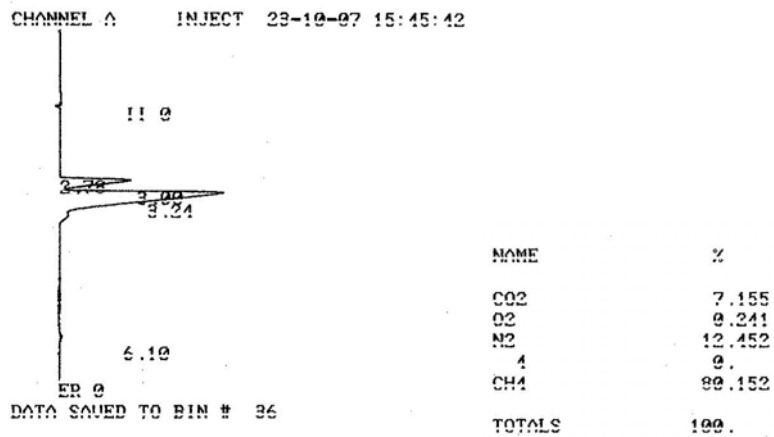
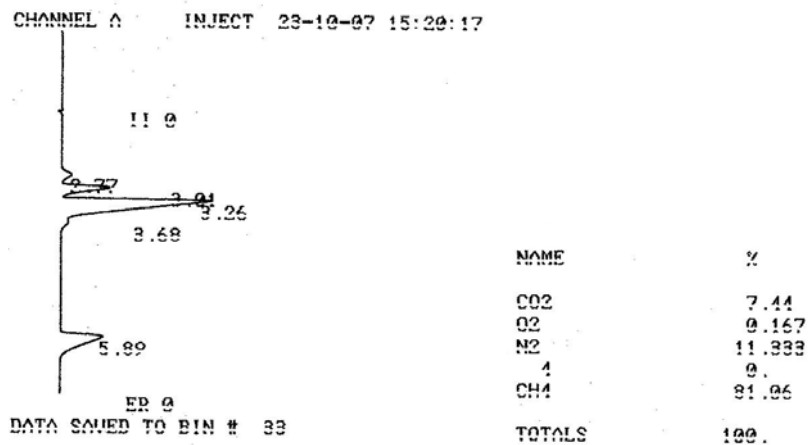


Figura 7.11 - Gráficos da composição do biogás obtida pelo cromatógrafo a gás nas análises das amostras do biogás produzido pelo reator UASBII.

Os picos laterais nos gráficos das Figuras 7.10 e 7.11 indicam a concentração de CH₄, obtida nas análises das amostras de biogás coletadas na miniEETERA e realizadas na UNESP unidade de Jaboticaba, SP.

7.3.2.5 Comentários Referentes à Qualidade do Biogás Produzido

Observou-se que o teor de CH₄ de 80,454%, no biogás produzido no UASB II, está bem próximo do teor obtido por SILVA (1993) e por LUCAS JÚNIOR (1994) e caracteriza um reator onde se está ocorrendo predominantemente a metanogênese.

Já a concentração de 57,99% de no UASB I indica a ocorrência de hidrólise, que facilita a metanogênese no reator seguinte.

7.3.3 Avaliação do pH.

Para medir o pH, foi utilizado um peagâmetro portátil Quimis, do tipo caneta, modelo Q-400A, que analisa as amostras coletadas em intervalos de dez dias, durante seis meses.

7.3.3.1 Resultados em Relação ao pH.

Como pode ser observado na Tabela 8.4, nos valores obtidos do pH, houve variação entre um valor máximo de 7,5 e um valor mínimo de 7,1, obtendo-se uma média na faixa de 7,21 a 7,39 pH, ou seja, fora da faixa crítica de tamponamento metanogênico, que é abaixo de 7 e acima de 8,5, segundo Van Haandel (1994), além de estar atendendo à CETESB – Decreto 8468 – Artigo 19^a, onde o pH deve estar entre 6,0 e 10.

Tabela 7.4 - Valores de pH observados em pontos de monitoramento do sistema durante a operação.

Valores pH (0 - 14)			
n° da amostra	01 SAÍDA DO PRÉ- TRATAMENTO	02 SAÍDA O UASB I	03 SAÍDA DO UASB II
1	7,1	7,3	7,3
2	7,2	7,2	7,5
3	7,2	7,4	7,4
4	7,2	7,3	7,5
5	7,3	7,5	7,5
6	7,3	7,3	7,5
7	7,3	7,3	7,3
8	7,2	7,4	7,3
9	7,2	7,3	7,3
10	7,1	7,3	7,3
MÉDIA	7,21	7,33	7,39

7.3.4 Medida de Temperatura do Efluente.

Na coleta das amostras para a DQO, também se mediu a temperatura média do efluente, utilizando-se para a medida de temperatura um medidor térmico portátil constituído por termopar, com haste medidora de 70 cm, para alcançar o núcleo dos biodigestores. Essas medidas foram efetuadas em intervalos de dez dias, durante seis meses. A temperatura média nos dias de coleta de amostras para DQO são mostradas na Tabela 7.5, e manteve-se em faixa de temperatura propícia para bactérias metanogênicas mesotérmicas.

7.3.5 Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO).

A DQO foi determinada em amostras coletadas em intervalos quinzenais, durante seis meses, de acordo com os Padrões e as Normas Técnicas da CETESB – L 5.721 - Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), e Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition (2000) - 5220 - Chemical Oxygen Demand (COD). Basicamente da DQO, indica-se a capacidade de remoção da carga orgânica do efluente pelo sistema.

7.3.5.1 Cálculo da Redução da DQO.

O cálculo da redução da DQO foi efetuado considerando os valores da DQO na entrada (alimentação) e na saída (efluente), conforme a Equação 7.1.

$$\% \text{ redução DQO} = ((\text{DQO}_1 - \text{DQO}_2) \times 100) / \text{DQO}_1 \quad (7.1)$$

onde:

DQO_1 = DQO da alimentação (mg/ℓ).

DQO_2 = DQO do efluente (mg/ℓ).

7.3.5.2 Eficiência da miniEETERA na Remoção da Carga Orgânica Via Análise da Redução da DQO

A matéria total oxidável de um volume de resíduo orgânico determinada pela DQO, em uma amostra, permitiu a avaliação da quantidade de oxigênio das águas que seria consumida se esse volume fosse lançado em um rio, determinando, portanto, o grau de agressividade ao ambiente do resíduo como um todo. A determinação da DQO forneceu o consumo químico de oxigênio para a degradação de um determinado volume de material orgânico.

A Tabela 7.5 indica os valores obtidos nas análises de DQO, de acordo com os seguintes valores médios: 422,66 mg/ℓ na entrada e 76,66 mg/ℓ na saída do sistema, demonstrando uma redução média de 80,1% sem utilizar qualquer equipamento eletromecânico.

Analisando-se os dados médios mensais do sistema adotado, com uma vazão média 46 m³/dia e TRH de 24 horas, houve dificuldades para a regularização do fluxo, mas o sistema de amortecimento de picos de vazão mostrou-se satisfatório, pois não apresentou arraste de lodo no UASB II.

Lucas Junior (1994), utilizando um sistema composto por 2 UASB dispostos em série, formando cascata, com separador de fases na forma de um tronco cônico invertido e controle da vazão efetuado por uma bomba d'água elétrica,

relata, no tratamento de água residuária de pocilga, uma eficiência de 77,55% na redução da DQO, onde o afluente entrava com uma DQO média de 949 mg/ℓ e o efluente saía com uma DQO média de 213 mg/ℓ.

Tabela 7.5 - Valores de DQO em mg/ℓ, observados nos pontos de monitoramento da miniEETERA, durante a operação, e as temperaturas em um TRH de 24 horas.

Amostras compostas coletadas ao longo do dia 8:00 /17:00 Número Data	Valores DQO (mg/ℓ)			Redução (%)	TEMP MÉD EFLUENTE (C°)	TEMP MÉD AMBIENTE (C°)
	01 SAÍDA PRÉ-TRATAMENTO	03 SAÍDA UASB I	04 SAÍDA UASB II	01 À 04		
1 (20/05/2007)	260	111	75	71,10%	20	21
2 (11/09/2007)	518	239	83	83,97%	22	23
3 (23/10/2007)	490	211	72	85,30%	21	22
Valores médios	422,66		76,66	80,10%	21	22

Na Tabela 7.5, desprezaram os valores das DQO obtidas durante os meses de junho, julho e agosto, devido ao período de férias escolares e aos recessos que comprometeram os resultados das análises, por apresentarem baixa vazão e pouca carga orgânica. A Figura 7.12 ilustra o gráfico comparativo entre os 6 sistemas UASB de outros autores, com o da miniEETERA, dando ênfase à remoção da DQO, ao TRH e a porcentagem de metano produzido pelos reatores UASB dos sistemas em estudo, conforme mostrado por meio da Tabela 7.5.

Conforme a Tabela 7.6, o resíduo utilizado neste experimento, o esgoto sanitário, oriundo exclusivamente de lavatórios, vasos sanitários, mictórios e de pias de uma cozinha industrial de restaurante, apresentou, nas análises, os seguintes valores médios: 422,66 mg/ℓ na entrada e 76,66 mg/ℓ na saída do sistema, demonstrando uma redução média de 80,1% sem utilizar qualquer equipamento eletromecânico. Possui uma baixa concentração em função da DQO obtida, fazendo com que se aproxime o bastante das características do esgoto doméstico relatado por Souza (1986), 500 mg/ℓ de DQO.

Tabela 7.6 - Características comparativas de parâmetros de reatores UASBs, conforme GIACAGLIA (1985) atualizada e ampliada, com o UASB estudado.

Ref.	Volume (m ³)	Tempo (h)	Taxa aplicação de DQO (kg/m ³ .d)	Remoção DQO	DQO Afluentes (mg/L DQO)	DQO Efluentes (mg/L DQO)	Biogás gerado (Nm ³ /d)	Teor biogás	Nº estações	Obs.	Temp. média anual (°C)
Pretorius (1971)	2	24,0	0,5	90%	500				2	Esgoto sanitário; recirculação 2 UASB	20
CETESB (1985)	0,106	4,7	2-15	65%	316			70% CH ₄ 8% CO ₂	1	Esgoto sanitário; hidrolizado na rede; 1 UASB	20
Cali Haskoning (1989)	64	6,0		65%	321	109			1	Esgoto sanitário hidrolizado na rede; 1 UASB	25
Kampur Haskoning & Euroconsult (1990)	1200	6,0		67%	239	79				Esgoto sanitário hidrolizado na rede; 1 UASB	20-23
CETESB São Paulo Vieira e Garcia (1991)	120	6,1		70%	458	135				Esgoto sanitário hidrolizado na rede; 1 UASB	20-22
CETESB São Paulo Vieira e Garcia (1991)	120	6,1		56%	188	83	13,6	70% CH ₄ 8% CO ₂	1	Esgoto sanitário hidrolizado na rede; 1 UASB	20-22
Bucaramanga Schellinkhout & Collazos (1991)	6600	5,0		72%	595	166			1	Esgoto sanitário hidrolizado na rede; 2 UASB em paralelo de 3.300 m ³ cada	
Pirai do Sul Gomes (1989)	820	20,0		66%	426	145				Esgoto sanitário hidrolizado na rede; 2 UASB em paralelo de 3.300 m ³ cada	
Pirai do Sul Gomes (1989)	820	20,0		93%					3	Esgoto sanitário; 1Dec.prim, 1Tq Imhoff, 1UASB	20
Silva (1993)	0,45	6,4		66%	631	213		71% CH ₄ 4%CO ₂	1	Esgoto sanitário hidrolizado, 1UASB	20-22
Silva (1993)	0,45	21,6		82%	968	171		85% CH ₄ 6%CO ₂	1	Esgoto sanitário hidrolizado, 1UASB	20-22
Campina Grande VanHaandel & Lettinga (1994)	160	17,0		85	783	117			1	Esgoto sanitário sedimentado, 1UASB	24-26
Lucas Júnior (1994)	1,41	24,66		81,02%	2850		0,28	82,7%CH ₄ 6,54%CO ₂	3	Efluente suinocultura hidrolizado em tanque Imhoff, 2 UASB em série de 0,705 m ³ cada	20-21
Godoy Junior miniETE UNESP (2007) *Obs.: Sistema estudado	45	24,0		80,1%	422,66	76,66	9	UASB hidrólise 82,71%CH ₄ 5,48%CO ₂ UASB tratamento 83,04%CH ₄ 5,15%CO ₂	2	Esgoto sanitário fresco; 2 UASB em série, UASB hidrólise com 15,7 m ³ e UASB tratamento com 24,5 m ³	20-22
Godoy Junior Jacarei Cervejaria (2007)	4.200	8,0	2,57	92,38%	2468	188	2092	UASB 1 83,884 % CH ₄ 15,533 % CO ₂	2	Efluente de cervejaria com adição esgoto sanitário, 99% Industrial e 1% Sanitário, 1 reator de hidrólise e estabilização química com 2.200 m ³ seguido UASB em aço com 2.000 m ³	Entrada 33-38 Saída 30-32
MÉDIA				74%				77,6%CH ₄			

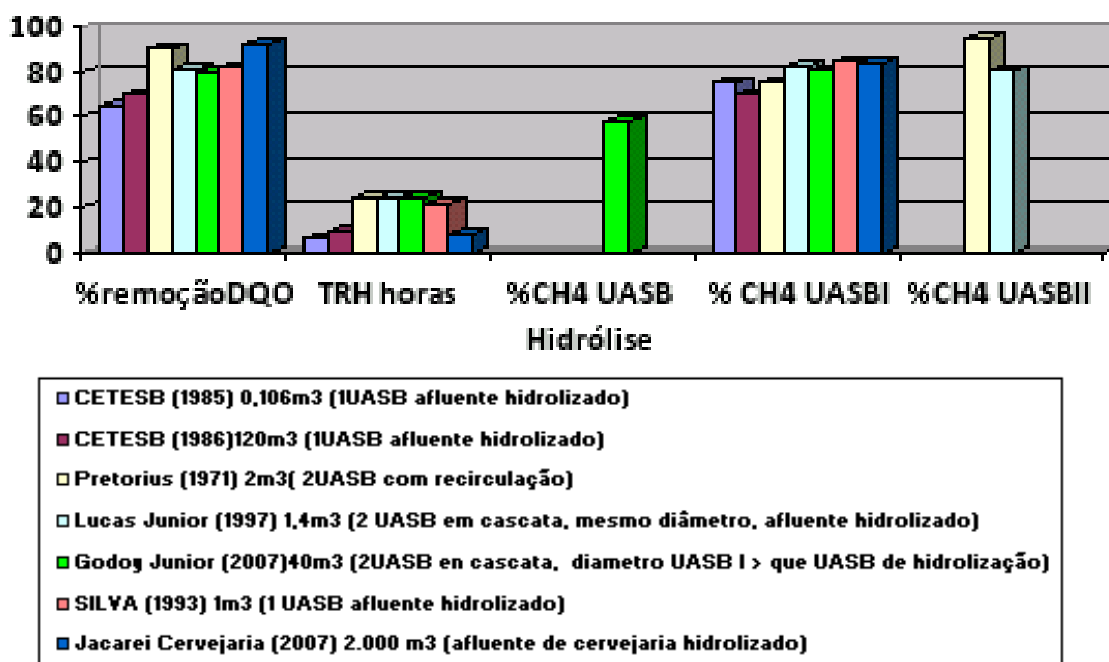


Figura 7.12 - Gráfico comparativo da eficiência da miniEETERA e da qualidade do biogás produzido, operando com biodigestores UASB, com um tempo de retenção hidráulica de 24 horas, conforme a Tabela 7.5.

O resíduo também se aproxima de algumas DQOs relatadas por Lucas Júnior (1994), que operou com efluente de suinocultura diluído, utilizando dois UASB, dispostos em série, formando cascata, onde obteve, na entrada do UASB I 621 mg de DQO/l e uma remoção de 81,02 % da DQO na saída do UASB II. Vale à pena salientar que ambos os UASB possuíam o mesmo volume de tancagem, e o afluyente passava antes por um tanque Imhoff (LUCAS JÚNIOR, 1994).

7.3.5.3 Comentários Referentes ao Parâmetro DQO

O sistema composto por dois biodigestores UASB dispostos em série, formando cascata, atende à legislação vigente no tocante à remoção de DQO, na ordem de 80,1%.

De fato, a remoção de 80,1% confere com resultados de outros autores, operando com um tempo de retenção hidráulico (TRH) próximo de 24 h, estando

próxima dos resultados obtidos por Silva(1993), de 82%, e por Lucas Junior (1994), de 81,2%.

CAPÍTULO 8 - ESTUDO ECONÔMICO DE CASO DE APROVEITAMENTO DE BIOGÁS EM miniEETERA

Apresenta a análise econômica de um estudo de caso da miniEETERA associada ao aproveitamento de biogás, levando-se em conta a produção teórica estimada.

8.1 Análise Econômica da Associação Teórica da miniEETERA ao Sistema Compacto de Cogeração.

A miniEETERA implantada possui um volume útil de $46 \text{ m}^3/\text{dia}$, sua capacidade é para o tratamento do esgoto produzido por uma população aproximada de 1.200 usuários.

Esse sistema proposto, denominado caso 3, será comparado a dois outros casos: o primeiro, caso 1, sistema tradicional por lodo ativado; e o segundo, caso 2, sistema integrado anaeróbio-aeróbio-anóxico. As Figuras de 8.1 a 8.3 ilustram o funcionamento nos três casos.

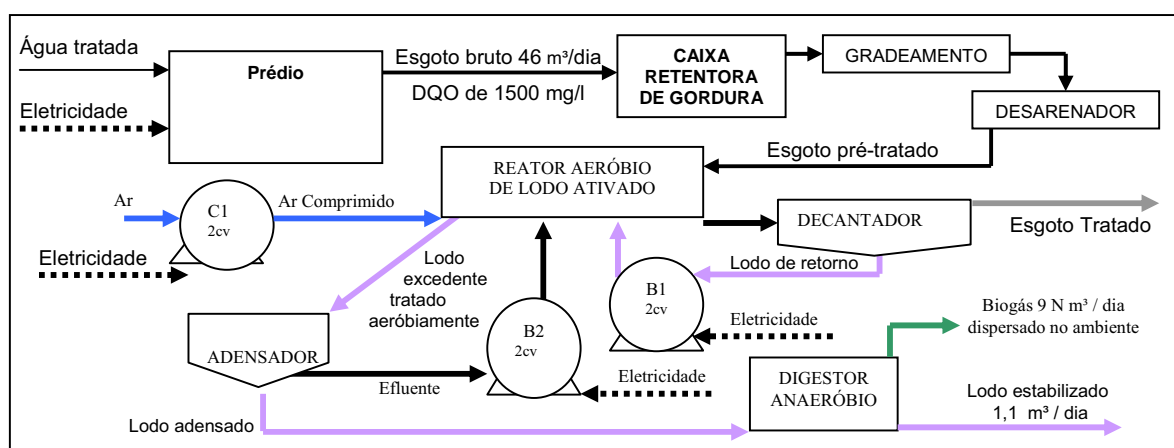


Figura 8.1 - Esquema de funcionamento do sistema tradicional por lodo ativado.

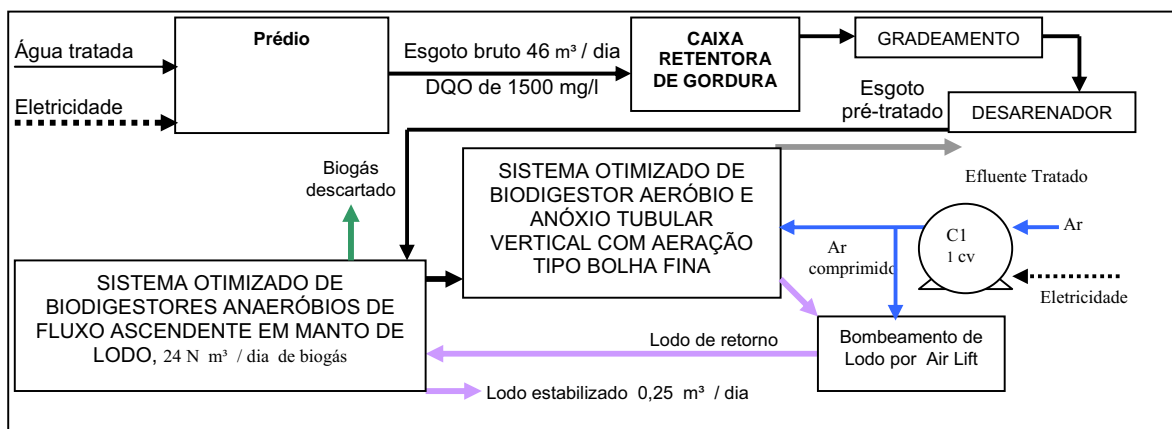


Figura 8.2 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico.

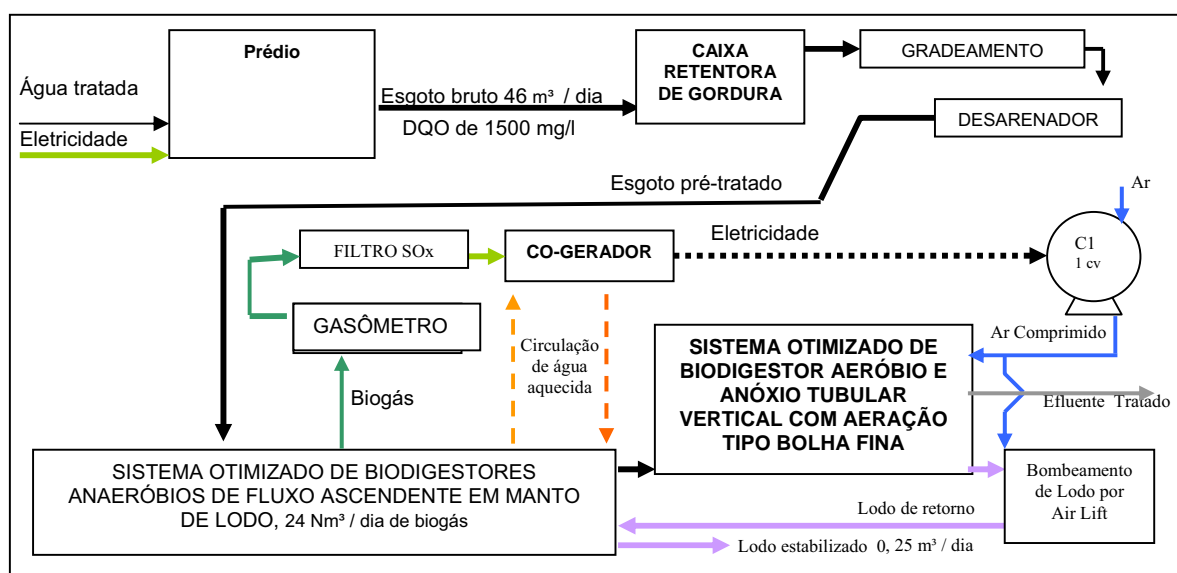


Figura 8.3 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico, com aproveitamento do biogás e fertirrigação com o efluente tratado.

Foram adotados os seguintes valores: P_{el} (custo da energia elétrica) = 0,167 US\$/kWh (Tarifa Bandeirantes Energia S.A – comercial); $C_{tdL/mcet}$ (custo do transporte de descarte do lodo) = 5 US\$/m³; DQO média do esgoto de 1500 mg/l; r (taxa de retorno) = 12% aa; H (horas de funcionamento durante o ano) = 8.760 h/ano; custo de manutenção para o lodo ativado = 0,003% do I_{pt} (custo de implantação); custo de manutenção para os RAFAs = 0,0001% do I_{pt} ; custo de manutenção do cogerador = 0,003% do I_{pt} ; C_{etS} (custo do esgoto tratado pela SAEG) = 2,83 US\$/m³ (tarifa categoria comercial pública).

Esses valores foram dimensionados com base nos dados locais, onde foram instaladas as unidades de estudo em suas configurações características.

Para efeito de cálculos, estimou-se a utilização de um efluente com DQO média de 1.500 mg/l, cuja produção teórica, utilizando o software UASBWARE 1/98, foi de 24 Nm³ de biogás/dia. A Tabela 8.1 mostra os dados das configurações das miniETEs, conforme Figuras 8.1, 8.2 e 8.3.

Tabela 8.1. Dados das configurações das miniETEs, conforme Figuras 8.1 a 8.3.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3		
Produção de biogás [Nm ³ /dia]	9	24	24		
Q _{eb} [m ³ /dia]	46	46	46		
P _L [m ³ /dia]	1,10	0,25	0,25		
C _{ST} [US\$/mc]	0,0786	0,0179	0,0179		
E _p [kWh/dia]	0	0	7		
E _{req} = Energia requerida por dia pelos equipamentos [kWh/dia]					
Casos	Equip	hp	kW	h/dia	kWh/dia
Caso1	C1	2	1,470998	24	35,3039
	B1	2	1,470998	6	8,82598
	B2	2	1,470998	12	17,6519
Total					61,7819
Caso2	C1	1	0,735499	24	17,6519
Caso3	C1	1	0,735499	24	17,6519
I _{pl} = investimento total da planta [US\$]					
Casos	Equipamentos	US\$			
Caso1	Lodo ativado	60,000.00			
Caso2	UASB	30,000.00			
	aerobico-anoxico	15,400.00			
	fertirrigação	8,400.00			
Total		53,800.00			
Caso3	UASB	30,000.00			
	aerobico-anoxic	15,400.00			
	fertirrigação	8,400.00			
	TOTEM7	9,000.00			
Total		62,800.00			
C _{mETE} = Custo de manutenção do tratamento do esgoto [US\$/m ³]					
Casos	Equipamentos	% ITP	US\$		
Caso1	Lodo ativado	0,04	0.342		
Caso2	UASB	0,002	0.008		
	aerobico-anoxico	0,08	0.176		
	fertirrigação	0,013	0,0156		
Total			0.1996		
Caso3	UASB	0,002	0.008		
	aerobico-anoxico	0,08	0.176		
	fertirrigação	0,013	0,0156		
	TOTEM7	0,22	0,282		
Total			0,4816		

O custo de implantação é definido como o custo de construção das plantas mais os custos dos equipamentos eletromecânicos. O custo de operação é definido como o custo dos insumos mais os serviços para o destino final do efluente tratado e do lodo excedente. O custo estimado da planta instalada (I_{pi}) compreende o custo das instalações civis, dos equipamentos, do cogerador e do sistema de fertirrigação, quando for o caso. Temos, então, pela Equação (8.1) o custo do esgoto tratado, e pela (8.2) o custo do transporte e do descarte do lodo produzido por metro cúbico de esgoto tratado, que fora adaptada ao caso, juntamente com as Equações de 8.3 até a 8.9, que se basearam a partir das equações de análise econômica de Silveira (1994), adaptado de Kehlhofer (1987) e Boehn (1987).

$$C_{et} = \frac{I_{pt} * f}{H * Q_{eb}} + C_{oETE} + C_{mETE} \quad (8.1)$$

$$C_{tdL/mcet} = \frac{C_{et} * V_L}{H * Q_{eb}} \quad (8.2)$$

Onde, o fator de anuidade é obtido pela Equação (8.3).

$$f = \frac{q^k * (q-1)}{q^k - 1} \quad (8.3)$$

O coeficiente q é obtido pela Equação (8.4)

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (8.4)$$

Sendo:

C_{et} – custo do esgoto tratado [US\$/m³]

- C_{etS} - custo esgoto tratado pela concessionária [US\$/m³]
 C_{oETE} – custo operacional da estação de tratamento de efluentes [US\$/m³]
 C_{mETE} – custo de manutenção da estação de tratamento de efluentes [US\$/m³]
 $C_{tdL/mcet}$ – custo de transporte e descarte do lodo excedente por metro cúbico de esgoto tratado [US\$/ m³]
 Q_{eb} – vazão de esgoto bruto [m³/ano]
 f – fator de anuidade [1/ano]
 q – coeficiente de retorno
 r – taxa anual de juros [%]
 R – receita anual [US\$/ano]
 k – Período de amortização de capital investido ou “ *pay back* “ [anos]
 H – número de horas de operação por ano [h/ ano]
 I_{pt} – custo de implantação [US\$]
 P_{el} – custo de compra de energia elétrica [US\$/kWh]
 V_L - volume de lodo escedente [m³/dia]
 E_{req} - energia diária requerida pelos equipamentos de aeração e bombas [kWh/dia]
 E_p - energia diária produzida pelo cogador [kWh/dia]

Para ambos os casos, tem-se a receita pela Equação 8.5 :

$$R = \frac{H * Q_{eb} * (C_{etS} - C_{et})}{24} \quad (8.5)$$

Para o caso 1, Tratamento Convencional (Aeróbio por lodo ativado), tem-se a Equação 8.6 para o cálculo do custo operacional:

$$C_{oETE} = \frac{E_{req} * P_{el}}{Q_{eb}} + C_{tdL/mcet} = 0,066 \text{ US\$/m}^3 \quad (8.6)$$

Para o caso 2, Tratamento Alternativo (Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico), tem-se a Equação 8.7 para o cálculo do custo operacional:

$$C_{oETE} = \frac{E_{req} * P_{el}}{Q_{eb}} + C_{tdL/mcet} = 0,037 \text{ US\$/m}^3 \quad (8.7)$$

Para o caso 3, Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico + Cogrador + Reuso, tem-se a Equação 8.8 para o cálculo do custo operacional:

$$C_{oETE} = \frac{-(E_p * 10/24 - E_{req}) * P_{el}}{Q_{eb}} + C_{tdL/mcet} = 0,033 \text{ US\$/ m}^3 \quad (8.8)$$

Destaca-se que o caso 3 tem o custo operacional de 10% do custo operacional do caso 1, devido ao fato de o aproveitamento energético do metano e por prevalecer 80% de sistema anaeróbio no tratamento do esgoto, e de 20% no tratamento aeróbio.

8.2 Resultado da Análise Econômica da Associação teórica da miniEETERA ao Sistema Compacto de Cogeração. Estudo de Caso: UNESP – Campus de Guaratinguetá.

Observa-se, na Figura 8.4, que o caso 1 (lodo ativado convencional) é praticamente inviável, pois sua receita será sempre negativa.

No caso 2 (UASBs, seguido de pós-tratamento por lodo ativado), o investimento se amortiza em sete meses.

No caso 3 (UASBs, seguido de pós-tratamento por lodo ativado e associado a sistema de cogeração para aproveitamento *in situ* do biogás produzido) que considerada a queima do biogás, o investimento se amortiza em sete anos, podendo este caso ser interessante do ponto de vista da oferta de energia elétrica.

Deve-se destacar que a implantação se amortiza também para outros valores de juros, mas, para efeito de apresentação, neste trabalho, só foi mostrada para o caso de 12% aa.

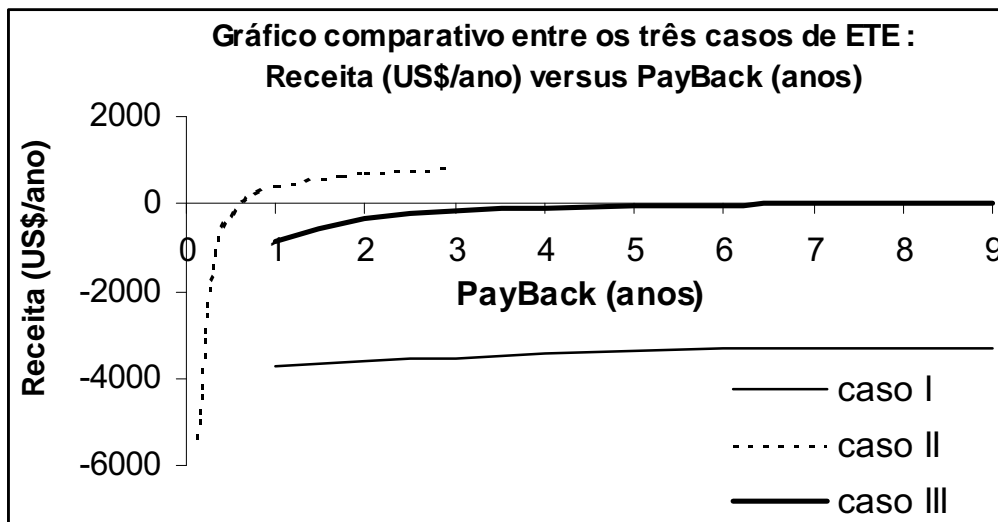


Figura 8.4 - Gráfico comparativo entre os três casos: Receita (US\$/ano) versus *payback* (anos).

CAPÍTULO 9- CONCLUSÕES

9.1 Considerações Finais e Propostas para Trabalhos Futuros.

No tocante às conclusões referentes à análise econômica da implantação de uma miniEETERA, com produção mínima de biogás, para viabilizar o seu aproveitamento energético, pode-se concluir que:

- Para o caso 1, sistema de lodo ativado convencional, uma primeira conclusão leva a crer que o sistema é praticamente inviável econômica e energeticamente, pois consome muita energia elétrica na forma de aeração, porém é seguro ambientalmente.

- O caso 2, a miniEETERA, com um *payback* de sete meses, mostra-se como um sistema extremamente vantajoso em termos econômicos, pois seu custo operacional é bastante reduzido, além de gerar cerca de 75% a menos de lodo que no caso 1.

- O caso 3, a miniEETERA mais o sistema de cogeração a biogás, possui o maior custo de implantação, devido ao alto custo do sistema cogerador que atualmente é importado e não é encontrado comercialmente em uma potência menor, porém possui o menor custo operacional, podendo, em um futuro próximo, ser totalmente nacionalizado e encontrado em menores potências, ou aguardando uma provável expansão da planta, desde que a produção de biogás seja considerável.

No caso de uma ETE de indústria alimentícia e/ou agro-indústria, com efluente com maior concentração orgânica, os custos operacionais tendem a diminuir com o aumento na produção de biogás, resultando até em um *superavit* elétrico, que poderá ser aproveitado em processo industrial local.

Associação de unidades de tratamento de efluentes geradoras de biogás, associada a sistemas de cogeração de energia, quando se produza um volume viável de aproveitamento energético, é bastante interessante do ponto de vista

ecológico e energético, pois é uma alternativa que concilia saneamento ambiental e produção de energia renovável.

Pode-se concluir que, no tocante ao destino do biogás, em pequenas produções, a melhor opção é a do saneamento ambiental via queima, seguida da quantificação para posteriores créditos de carbono. Vale à pena ressaltar que, em estações de tratamento de esgoto e biodigestores rurais, que promovem o aproveitamento energético de biogás, ainda há a necessidade de outra unidade destinada à queima do biogás excedente, que não é possível armazenar.

Também, vale a pena salientar que o sistema é passível de ser aplicado em plataformas de exploração e navios de prospecção de petróleo e gás natural.

Assim, o queimador de biogás para baixas vazões e para a queima de biogás excedente é uma necessidade ambiental, e a possibilidade de transformar o excedente de biogás em crédito de carbono viabiliza economicamente essa boa prática ambiental, que não elimina o impacto causado pelo metano, mas promete a redução de pelo menos 21 vezes.

As miniEETERAS podem colaborar com o saneamento ambiental do esgoto a baixos custos e ainda proporcionar a descentralização do tratamento em grandes ETEs aeróbias de alto custo operacional, uma vez que a utilização de dois UASB em série foram suficientes para adequar conforme a legislação vigente a qualidade do esgoto tratado pela miniEETERA.

O processo de fabricação da miniEETERA a frio, em PVC, é viável desde que se tenha mão-de-obra treinada para se construir *in situ*. Recomenda-se, portanto, para a implantação de novas miniEETERAs, a sua confecção em Fiber Glass, com entrega pronta no local de implantação, bastando à mão-de-obra local apenas serviços de escavação, acomodação e interligação hidráulica dos UASBs, seguido de reaterro adequado ao perfil e tipo de solo.

Para futuros trabalhos, pode-se desenvolver algo correlato a cogeneradores de energia a biogás, com potência inferior a 2 kW, e que consumam menos biogás, visando à otimização da construção e do controle das miniEETERAs.

Como no trabalho foi avaliada a utilização de dois biodigestores UASB em série formando cascata, em trabalho futuro pode-se analisar a utilização de 3 biodigestores UASB, uma vez que a miniEETERA possui flexibilidade para tal.

Considerando que a parte da Instituição onde foi realizado o estudo de caso (prédios da direção, salas de aula e cantina da UNESP – Campus de Guaratinguetá, SP), é abastecida com água oriunda de poço, pagando-se junto à ANA (Agencia Nacional de Águas), pela captação da água, pagando-se energia elétrica para o bombeamento dessa água, pagando-se para a SAEG (Companhia de Serviço de Água, Esgoto e Resíduos de Guaratinguetá), pela coleta e pelo tratamento de esgoto.

Uma redução de consumo de água potável em 11 % e a não utilização dos serviços da SAEG para os serviços, uma vez que o efluente da miniEETERA depois de tratado é utilizado na fertirrigação de bosque em formação, é bastante oportuna, e estima-se uma economia de pelo menos U\$ 3.000,00 por mês.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEM SOBRINHO, P., TSUTIYA, M.T., Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário, 1ª edição, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 548p., 1999.

BASTOS, R.K.X., et al, Utilização de Esgotos Tratados em Fertirrigação, hidroponia e piscicultura, ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 267p., 2003.

BOEHN, R.F., “Design Analysis of Thermal Systems”, John Wiley, New York, 1987.

CAMPOS et al, Tratamento de Esgoto Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo, ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 464p.,1999.

CHERNICHARO, C. A. L.. “Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores Anaeróbios” , V.5, Belo Horizonte - MG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 246p.,1997.

CHRISTENSEN, T.H., COSSU, R.; STEGMANN, R., Landfilling of Waste: Biogas, e.FN SPO, London, England, 840p., 1992.

CAEEB – COMPANHIA AUXILIAR DE EMPRESAS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, O Biogás e sua Tecnologia, Ed. Depto. de Estudos de Novas Fontes Alternativas de Energia, Rio de Janeiro, RJ, 53p.,1981.

CASSINI, S.T., Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás, PROSAB 3, Ed. ABES, Rio de Janeiro, RJ, 210p., 2003.

COELHO, S. T., PALETTA, C. E. M. e FREITAS, M. A. V. (eds). Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica. Brasília, Dupligráfica. 222 p., 2000.

CYBIS, L. F. A., Santos, A. V. & Gehling, G.R., Eficiência do reator seqüencial em batelada (RSB) na remoção de nitrogênio no tratamento de esgoto doméstico com DQO baixa. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.9, n. 3, p.260-264, 2004.

DESA – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, software UASBWARE 1/98 - Pré-dimensionamento de reatores UASB, subProjeto 1, Tema 2 do PROSAB, UFMG, Belo Horizonte, 1998.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA/EUA, www.epa.gov, consultado em 17/05/2005.

FAGUNDES, M.V.M., Universo das Populações Atendidas pelo Programa de Despoluição da Baía de Guanabara, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária), Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 130p., 2003.

FERNANDES, J.A., Estudo Sobre a Aplicabilidade de um Reator UASB-AF no Tratamento de Águas Residuárias de Indústria de Conservas de Tomate, (Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESSC, São Carlos, 112p.,1985.

GIACAGLIA, G.E.O. Características comparativas de alguns parâmetros de reatores UASBs já implantados, São Paulo, 1p., 1985.

GODOY JÚNIOR, E. "Sistema otimizado de reator anaeróbio de fluxo ascendente para tratamento de efluente de suinocultura". Dissertação (Título de Mestre em Ciências Ambientais) Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 52p., 2001.

GODOY JÚNIOR, E. "Caixa retentora de resíduos". Prêmio Universidade Tigre 1º Lugar, Tigre tubos e conexões, São Paulo, SP, 10p., 2003.

GODOY JÚNIOR, E. "Sistema compacto de biodigestores anaeróbio-aeróbio-anóxico para tratamento de esgoto", patente INPI PI: 0301475-4, Rio de Janeiro, RJ, 11p., 2003.

GODOY JÚNIOR, E.; SILVEIRA, J. L.; GIAGAGLIA, G.E.O., Studies on technical and economical viability of biodigesters anaerobic-aerobic-anox to water reuse and use of biogas. In: III Conferencia Internacional Sobre Uso Y Gestion Eficiente Del Agua Urbana, Santiago, Chile. Proceedings III EFFICIENT. Santiago : IWA, p. 384-392, 2005.

GODOY JÚNIOR, E.; GIACAGLIA, G.E.O.; SILVEIRA, J.L.. Sistema de armazenamento e aproveitamento energético de GNB (gás natural a baixa pressão e de biogás de esgoto). In: xii SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Figueira da Foz. Resumo das Comunicações do XII SILUBESA. Lisboa, Portugal: ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2006.

GODOY JÚNIOR, E. ; MARCELINO, M. A. ; CAMARGO, J. R. ; SILVEIRA, J. L. ; CORREA, R.C. ; HENRIQUE, L. F. N. . Automated Burner and Biogas Register for Sewage Treatment Mini Stations. DSL-2009-5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids – Roma, Itália, 2009.

GOMES, C.S., Research at SANEPAR and State of Paraná, Brazil, with anaerobic treatment of domestic sewage in full scale and pilot plants, In: Proceedings of

Seminar Anaerobic of Sewage, Ed. Schwitzenbaum M.S., University of Massachusetts, Amherst, USA, 1985.

GOVERNO DE PERNAMBUCO, *Manual de instruções para o uso do biogás*, Coordenadoria de Energia, Secretaria dos Transportes, Energia e Comunicações, 1980.

HESPANHOL, I, Reuso Integrado à Gestão de Recursos Hídricos – Bases para Planejamento, Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, pág. 77-84, Vitória, ES, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, PNSB 2000, www.ibge.gov.br, consultado em 12/05/2002.

INVENSYSAPPLIANCE, disponível no site: www.invensysappliance.com.br acesso em 10/10/2008.

KEHLHOFER, R., “ A Comparison of Power Plants for Cogeneration of Heat and Electricity” BBC Brown Boveri, Zurich, 1987.

LEÓN, S.G., MOSCOSO, J.C., Curso de tratamiento y uso de águas residuales, OMS-OPS-CEPIS, Lima, Peru, 151p.,1996.

LETTINGA, G., PETTE, K.C.H., VLETTER, R., WIND, E. Purificação anaeróbia de resíduos da industria açucareira em escala semi industrial, 1977.

LETTINGA, G. et al, Use of the Upflow Sludge Blanket (UASB) Reactor Concept for Biological Wastewater treatment Especially for Anaerobic Treatment, *Biotechnology and Bioengineering*, v.22, n.4, p.699-734, apr. 1980.

LITTELFUSE, disponível no site www.littelfuse.com, acesso em 15/02/2007.

LUCAS JÚNIOR, comunicação pessoal na Universidade Estadual Paulista – Campus de Jaboticabal SP, 2002.

MACINTYRE, A.J., Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, RJ, 740p., 1996.

MANN, J.G., & Liu, Y.A., Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization, Mc Graw-Hill, New York, 1999, 547p.

MARCELINO, M. A., Relatório das Especificações de Usinas de Acendimento, Contrato FUNEP/Brascabos 1040/06, Setembro, 2006.

MARCELINO, M. A., Temporizador Inteligente com Sinalização para Manutenção Preventiva, Req. Pedido de Patente junto ao INPI, PI000703940-9, 7p., Brasil, Julho, 2007.

MARCELINO, M. A.; GODOY JÚNIOR, E., Sistema Queimador com Registro de Volume de Biogás Queimado, Pedido de Patente junto ao INPI, PI0902381-0, 9p., Brasil, 2009.

MIERZWA, J.C. & Hespanhol, I., Água na Indústria: Uso Racional e Reuso, Oficina de Textos São Paulo, 145p., 2005.

MILICH, L., The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused? Global Environmental Change, 1998.

NÓBREGA, S. J., Equipamento de Ignição Eletrônica de Fogão, Processo e Composição de Resina para Encapsulamento, Revista de Patentes Industriais, RPI 1195, PI9204709, 1993.

PRADELLA, D. Z. A. e ALVES, J. W. 1999. Mudanças Climáticas e o Incremento da recuperação de uso de Biogás. Revista digital da ANBIO (Associação Nacional de Biosegurança) Available at <http://www.anbio.org.br/>, consultado em 17/06/2005.

PRETORIUS, W.A., Anaerobic Digestion of Raw Sewage, Water Research, 5, p. 681 a 687, 1971.

PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 464p., 1999.

RUSSOMANO, V.H., Introdução à Administração de Energia na Indústria, Ed. Da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 263p.,1987.

SCHIFFER, R. A., UNNINAYAR,S., 1991, The Detection of Climate Change Due to the Enhance Greenhouse Effect. A synthesis of findings based on the GEDEX atmospheric workshop, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, Columbia, Maryland, 9-11 July 1991.

SHINDENGEN, disponível no site www.shindengen.co.jp, acesso em 10/02/2007.

SILVA, S.M.C.P., Desenvolvimento de uma Nova Concepção de Tratamento de Águas Residuárias pela Associação de Processos Anaeróbios e Aeróbios, (Tese de Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 472p., 1993.

SILVEIRA, J.L., Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário, Tese de doutorado, Unicamp, Campinas SP, 193p., 1994.

SOUZA, M.E. "Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactor. In: Seminário Internacional Sobre Tratamento Anaeróbio em Países Tropicais, São Paulo, 16p., 1986.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition - 5220 - Chemical Oxygen Demand (COD), 2000.

Standard Methods for the Examination of Water e Wasterwater, 20th Edition - 9211 - Rapid Detection Coliform Methods, 2000.

TOLEDO, A. A. G. F., LUCAS JUNIOR, J.. Produção de Biogás a partir de águas residuárias de pocilgas utilizando reatores UASB sob quatro tempos de retenção hidráulica. Energia na Agricultura, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 49-55, 1997.

TURNNS, S.R., An Introduction to Combustion – Concepts and Applications, second edition, Mc Graw-Hill, International Editions, 2000.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, *Handbook of biogas utilization*, Southeaster Regional Biomass Energy Program, 2^a ed., 204p., 1996.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGA, G., Tratamento Anaeróbio de Esgotos - Um manual para Regiões de Clima Quente, V.1, Campina Grande - PB, Universidade Federal da Paraíba, 252 p., 1994.

VAN HAANDEL, A. C. & MARAIS, G., O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado– Teoria e aplicações para projetos e operações. EPGRAF, V.1, Campina Grande - PB, Universidade Federal da Paraíba, 488 p., 1999.

VIEIRA, S.M.M. & SOUZA, M.E., Development of Technoloy for the Use of the UASB Reactor in Domestic Sewage Treatment, In: Proceedings of International Seminar on Anaerobic Treatment in Tropical Countries, São Paulo, p.109-121, 1986.

VIEIRA, S.M.M. et al., Efeito da Variação de Vazão em Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente Tratando Esgoto, Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, São Paulo, p.262-275, 1987.

ANEXO I - Detalhes construtivos da miniEETERA em PVC e concreto armado

As fotos da Figura I.1 ilustram o local antes da implantação, a preparação do terreno e a chegada dos tubos tipo Rib. Loc. E as da Figura I.2 a construção dos biodigestores UASBs



Figura I.1 - Sequência de fotos da preparação do terreno e chegada dos tubos.



Figura I.2- Sequência de fotos da acomodação dos tubos, da vedação do fundo dos biodigestores, do ensaio de tancagem e da preparação da campânula.

Na Figura I.3, mostra-se o molde em madeira compensada, na qual são acomodadas as chapas de PVC, para a construção da tampa dos biodigestores anaeróbios. A sustentação dos moldes em madeira compensada foi feita por meio de pontaletes, para moldagem de lajes em tubos de aço desmontáveis. Na Figura I.4, são mostrados os detalhes de construção do artefato, para fixação das chapas de PVC na parte inferior da laje. A Figura I.5 mostra e descreve o procedimento de colagem do artefato na chapa de PVC.

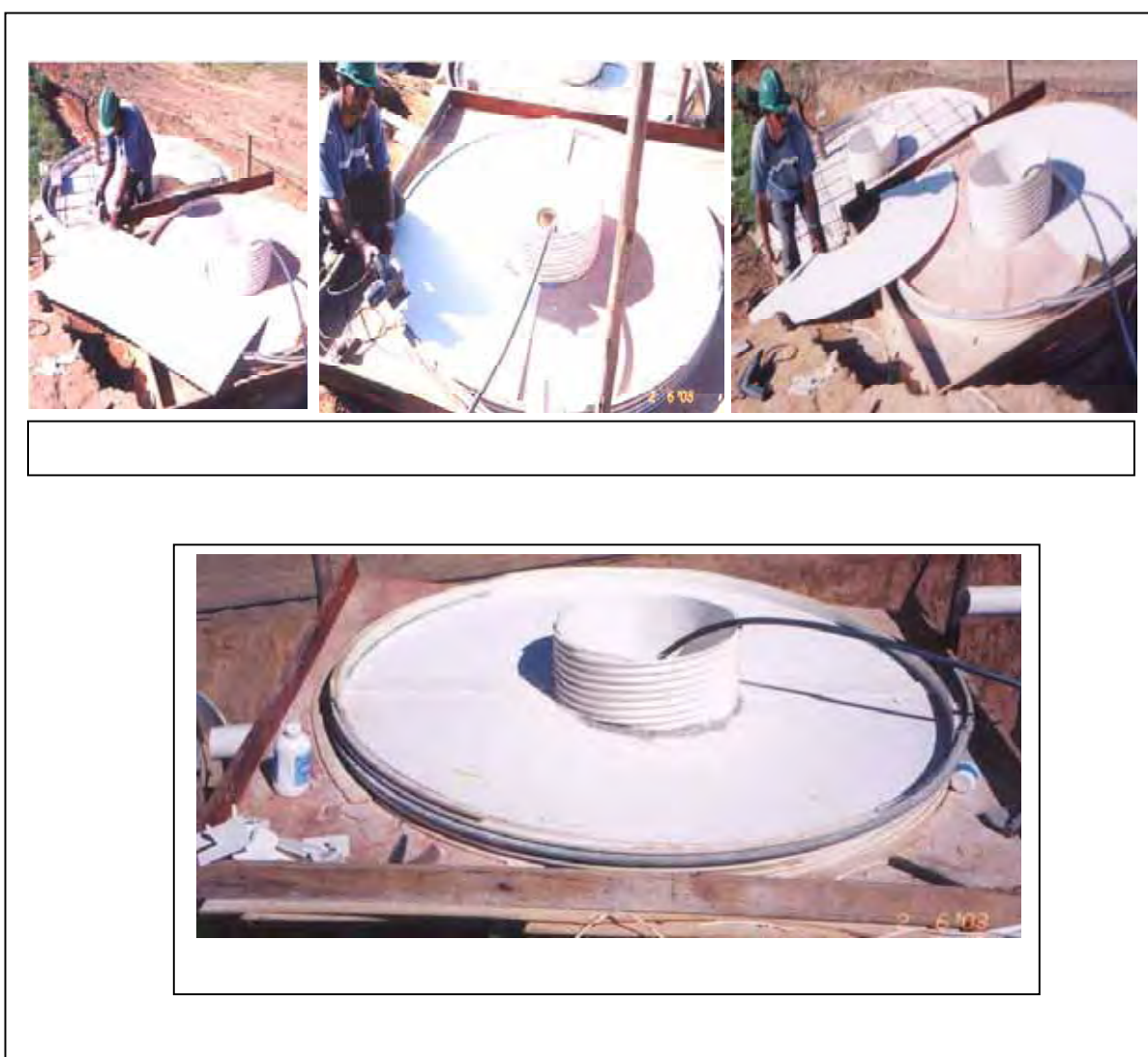


Figura I.3 - Sequência de fotos do corte das chapas em PVC, sua montagem e colagem nos tubos de PVC tipo Rib Loc.

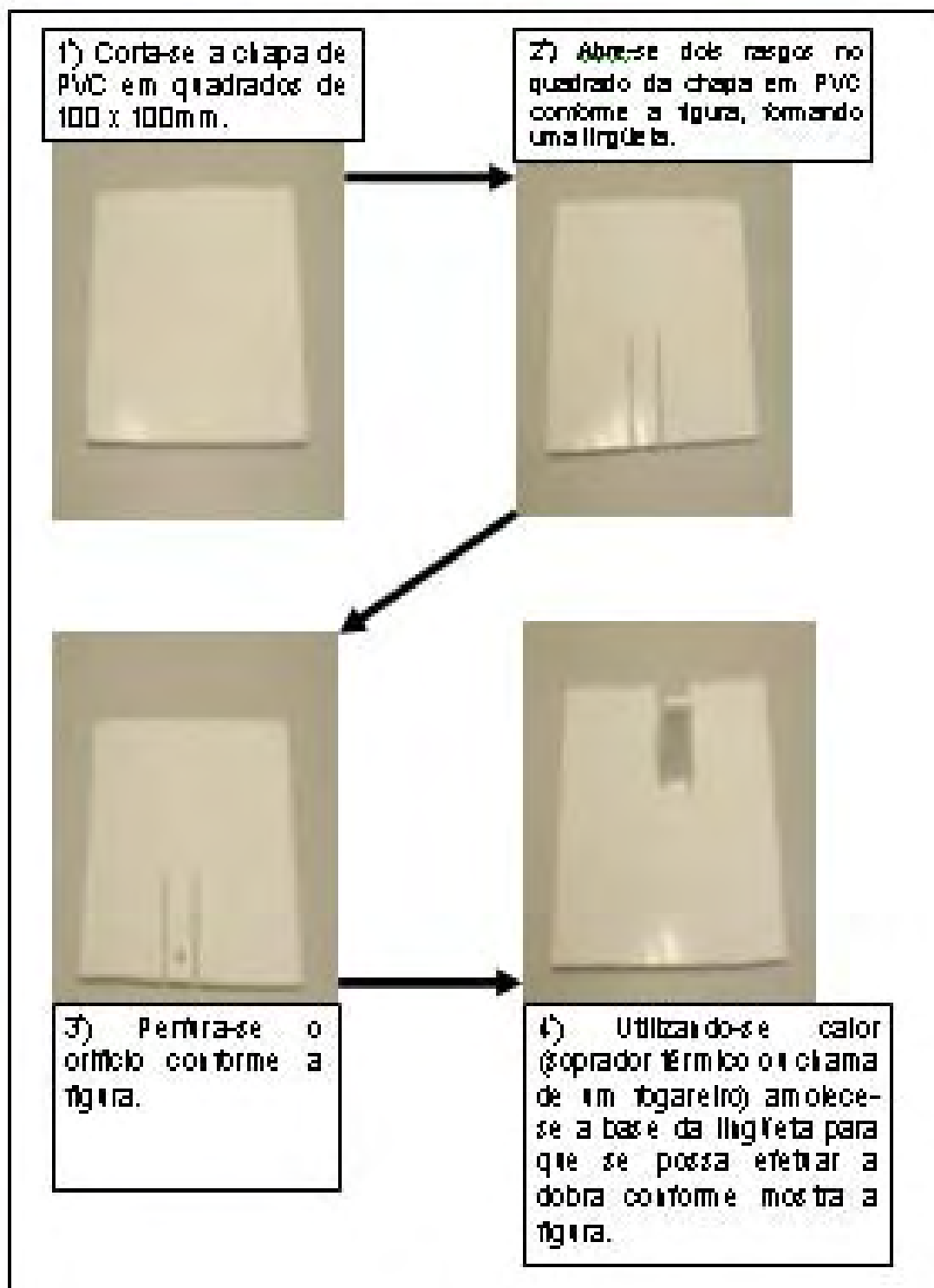


Figura I.4 - Fotos da sequência de fabricação dos sistemas de fixação das chapas de PVC no concreto armado, para estanqueidade e proteção corrosiva contra o gás sulfídrico presente no biogás.



Figura 1.5 - Fotos e descrição do procedimento de fixação do artefato na chapa de PVC e sua fixação nas ferragens da laje.

A Figura 1.6 ilustra a foto e o desenho esquemático do artefato fixado à parte inferior de uma laje.

Na Figura 1.7 é ilustrada a foto do sistema separador de fases sólida-líquida-gasosa, que tem a função de separar o biogás do efluente e do lodo granular floculento, do biodigestor anaeróbio de fluxo ascendente em manto de

lodo. A Figura I.8 ilustra a foto da concretagem da tampa dos biodigestores anaeróbios e dos ensaios de tancagem e estanqueidade a gases.

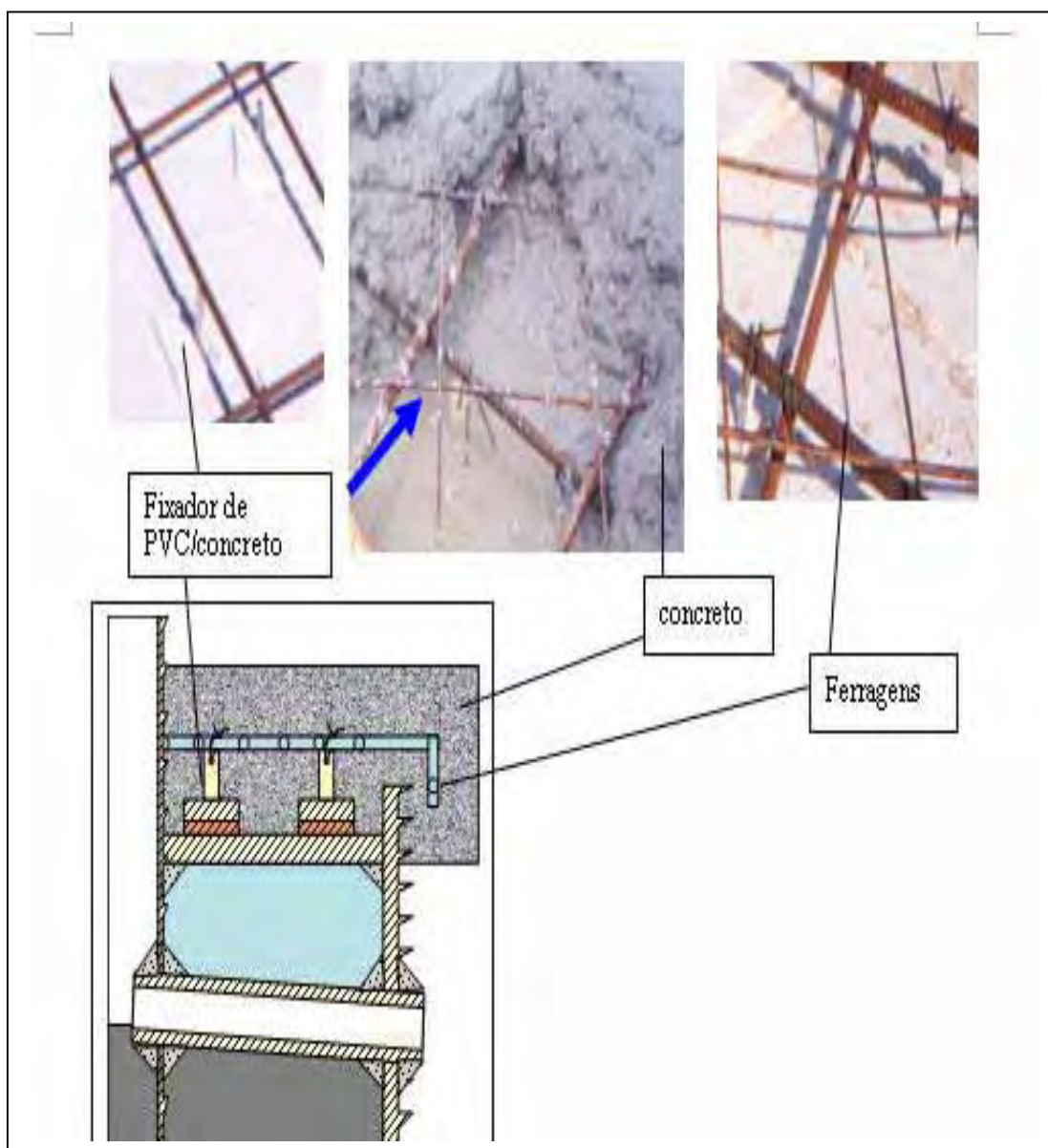


Figura I.6 - Foto e desenho esquemático do artefato fixando a laje ao PVC. Fonte: Godoy Junior (2004).



Figura I.7 - Foto do sistema de separação de fases sólida-líquida-gasosa em PVC.



Figura I.8 - Foto da concretagem da tampa dos biodigestores anaeróbios e dos ensaios de tancagem e estanqueidade a gases.

As Figuras de I.9 até I.11 ilustram respectivamente a ancoragem do tubo de PVC do tipo Rib Loc no concreto, a acomodação dos tubos e o reaterro do SOBAA.



Figura I.9 - Ancoragem do tubo de PVC de 1.500 mm de diâmetro no concreto armado.



Figura I.10 - Acomodação dos tubos de PVC de 2.500, 2.000, 1.500 e 1.200mm de diâmetro.



Figura I.11 - Reaterro do SOBAA.

A Figura I.12 ilustra os ensaios de tancagem do SOBAA, e a Figura I.13 ilustra a posição dos pontos onde se encontram os registros para a retirada dos lodos aeróbio e anóxico.



Figura I.12 - Ensaio de tancagem do SOBAA.



Figura I.13 - Colocação das válvulas para retirada dos lodos aeróbio e anóxico.