



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

II-024 – MINIAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E REUSO DE ÁGUA ASSOCIADA A COGERADOR COMPACTO DE ENERGIA A BIOGÁS

Ederaldo Godoy Júnior⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade de Taubaté. Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade de Taubaté. Doutorando em Energia pela Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá SP. Pesquisador do Departamento de Energia da UNESP – Guaratinguetá e do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

José Luz Silveira

Departamento de Energia UNESP - Campus de Guaratinguetá

Engenheiro Mecânico pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Mestre em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Doutor em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Professor do Departamento de Energia da UNESP – Campus de Guaratinguetá.

Giorgio Eugênio Ocare Giacaglia

Engenheiro Metalurgista pela Escola Politécnica de São Paulo. Doutor em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica de São Paulo. PhD - Yale University – EUA. Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Endereço⁽¹⁾: Av. Juscelino K. de Oliveira, 193, Jd. Eulália, Taubaté - SP - CEP: 12010-600 - Brasil - Tel: +55 (0xx12) 221-2325 /91159451 - Fax: +55 (0xx12) 2224005

 godoyjr@feg.unesp.br ou godoyjr@unitau.br

RESUMO

Neste trabalho é feita a análise técnica e econômica de uma miniETERA (miniestação de tratamento de efluente e reuso de água) por processo integrado anaeróbio (sem a presença de ar), aeróbio (na presença de ar) e anóxico (sem a presença de ar, porém na presença de nitrato), associada a um sistema compacto de cogeração de energia acionado a biogás, ambos desenvolvidos pelo autor e orientador. O biogás aproveitado é convertido em energia elétrica, para acionar o sistema aeróbio e, em água quente, para aquecer o sistema biodigestor anaeróbio. O efluente tratado é utilizado para ferti-irrigação de áreas verdes. A miniETERA é modular, compacta, auto-suficiente energeticamente e, composta pelos seguintes sistemas: a) o anaeróbio, constituído por 3 biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente em manto de lodo, dispostos em série, formando cascata e com sistema separador de fases em formato helicoidal; b) o aeróbio e anóxico, compostos por um biodigestor aeróbio e anóxico tubular vertical com aeração do tipo bolha fina; c) o cogerador de energia compacto, convertido a biogás, capaz de produzir, simultaneamente, energia elétrica e água quente; d) o sistema de reuso de águas para ferti-irrigação, composto por uma rede de distribuição e de gotejamento do efluente tratado. O processo visa promover, simultaneamente, saneamento ambiental do esgoto, aproveitamento energético do biogás produzido e reuso do efluente tratado, mitigando, assim, o impacto ambiental causado pelo descarte in natura de esgoto nos corpos d'água e de biogás na atmosfera. O sistema proposto está em fase de implantação em escala real nas dependências da UNESP – Campus de Guaratinguetá, com capacidade para tratar 70 m³/dia de esgoto e estima-se uma produção média 30 N m³/dia de biogás.

PALAVRAS-CHAVE : Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico, Aproveitamento de Biogás, reuso de Águas,

Ferti-irrigação, Cogeração de Energia

1. OBJETIVO DO TRABALHO

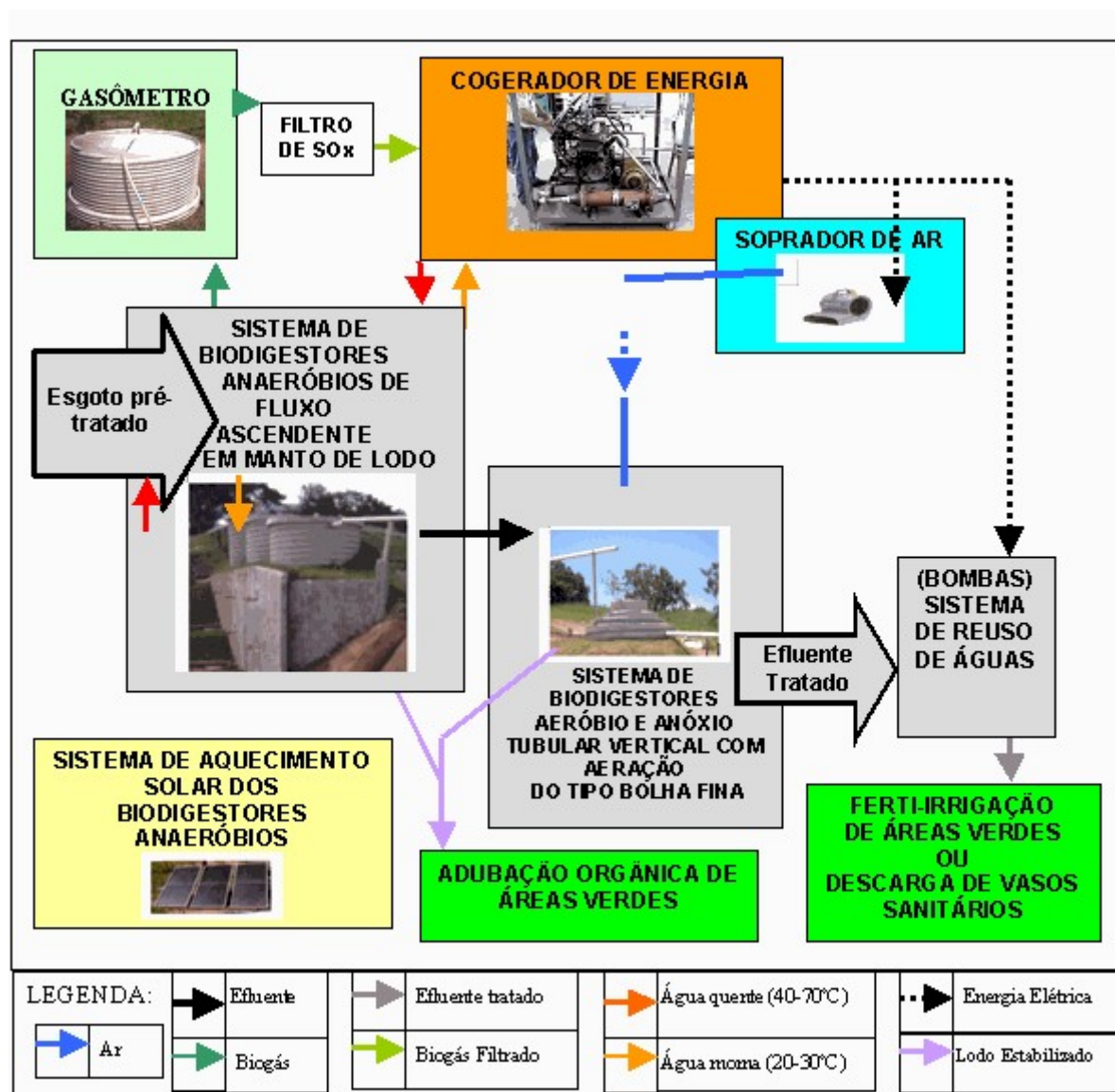
O trabalho visa analisar os aspectos relacionados à viabilidade técnica e econômica da implantação de técnicas ecologicamente corretas no tocante ao gerenciamento ambiental sanitário das águas residuárias. A miniETERA é de fácil implantação, fácil manutenção, compatível com os artefatos e equipamentos disponíveis no mercado, de baixo custo de implantação e de operação e auto-suficiente energeticamente. Sua concretização física está sendo realizada, onde será tratado todo o esgoto sanitário gerado nas dependências da instituição, promovendo saneamento do esgoto, aproveitamento energético do biogás produzido e, do efluente tratado para ferti-irrigação de áreas verdes ou descarga de vasos sanitários.

2. METODOLOGIA UTILIZADA

2.1. CONFIGURAÇÃO GERAL DA MINIETERA ASSOCIADA COM COGERAÇÃO DE ENERGIA

A configuração da miniETERA é demonstrada conforme fluxograma da Figura 01, dando ênfase à veiculação das águas, do biogás e da energia elétrica, essa, utilizada para acionar as bombas e sopradores utilizados.

Figura 01 – Fluxograma da veiculação das águas, do biogás e da energia elétrica na miniETERA.



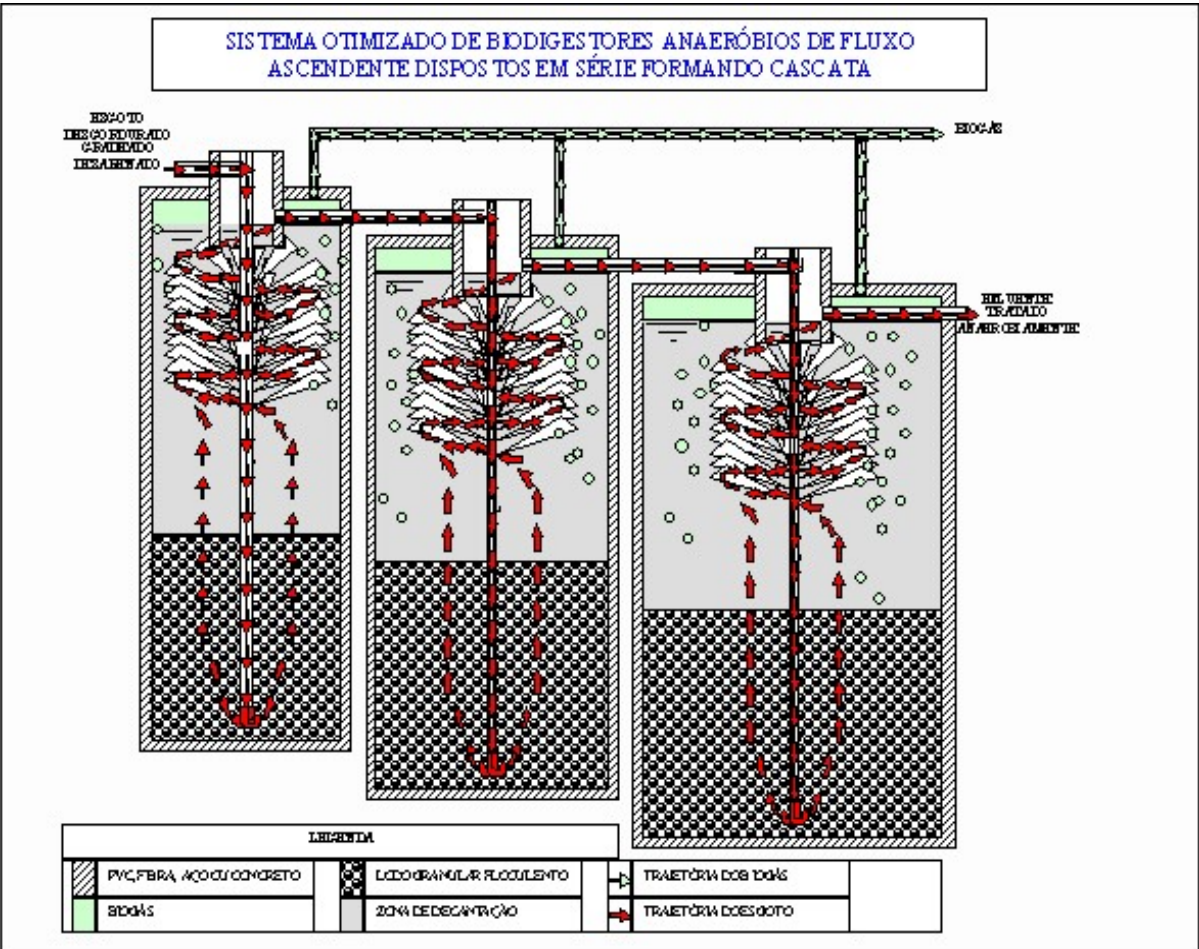
2.2. CONFIGURAÇÃO DA MINIAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A miniETERA é confeccionada basicamente utilizando tubos termoplásticos em PVC (policloreto de vinilideno) de diâmetros que vão de 100mm até 2.500mm.

2.2.1. SISTEMA OTIMIZADO DE BIODIGESTORES ANAERÓBIOS DE FLUXO ASCENDENTE

A descrição detalhada do processo de tratamento de efluentes no Sistema Otimizado de Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo, é ilustrada na Figura 02: 1º) o efluente pré-tratado (desengordurado, gradeado e desarenado) é alimentado por meio de uma tubulação na parte inferior do manto de lodo do primeiro biodigestor; 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 mini bolhas de biogás na superfície dos grânulos de lodo; aumentando sua flutabilidade, 3º) dependendo da velocidade ascendente do fluxo do efluente, o manto de lodo se expande, e alguns grânulos gaseificados são arrastados em direção a 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 gaseificados são degasados no separador de fases, provocando a sua precipitação e retorno ao manto de lodo, as bolhas de biogás são direcionadas para a campânula de coleta. 5º) em seguida, o efluente passa pelos mantos de lodo e sistemas de separação de fases dos dois outros biodigestores dispostos em série, formando cascata. A planta piloto do sistema em escala real que está em implantação, e obteve uma eficiência média na remoção de DQO de 82 %, operando com um tempo de retenção hidráulica de 12 horas e tratando um efluente que possuía uma DQO média de 1.500 mg/L de DQO.

Figura 02 – Desenho esquemático do Sistema Otimizado de Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo, e fotos do sistema em fase de implantação, com volume útil de 70 m³/dia.

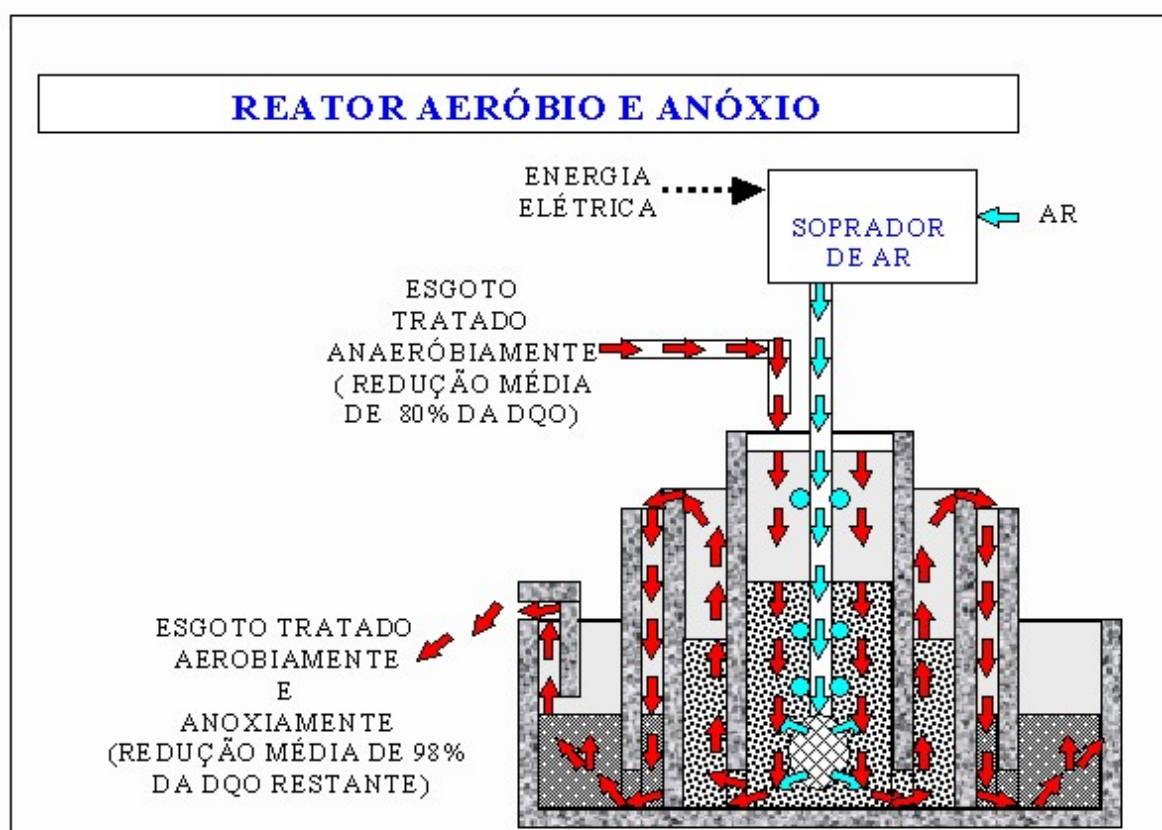


2.2.2. SISTEMA OTIMIZADO DE BIODIGESTOR AERÓBIO E ANÓXIO TUBULAR VERTICAL COM

AERAÇÃO POR BOLHA FINA

A descrição detalhada do processo de tratamento de efluentes, no Sistema Otimizado de Biodigestores Aeróbios e Anóxico Tubular Vertical com Aeração por Bolha Fina, é ilustrado na Figura 03: 1º) o efluente tratado anaerobiamente, é alimentado na parte superior do tubo central e, em fluxo descendente, ele 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 numa 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.

Figura 03 – Desenho esquemático do Sistema Otimizado Biodigestor Aeróbio e Anóxico Tubular Vertical com Aeração Tipo Bolha Fina, pós-tratamento do efluente tratado anaerobiamente.

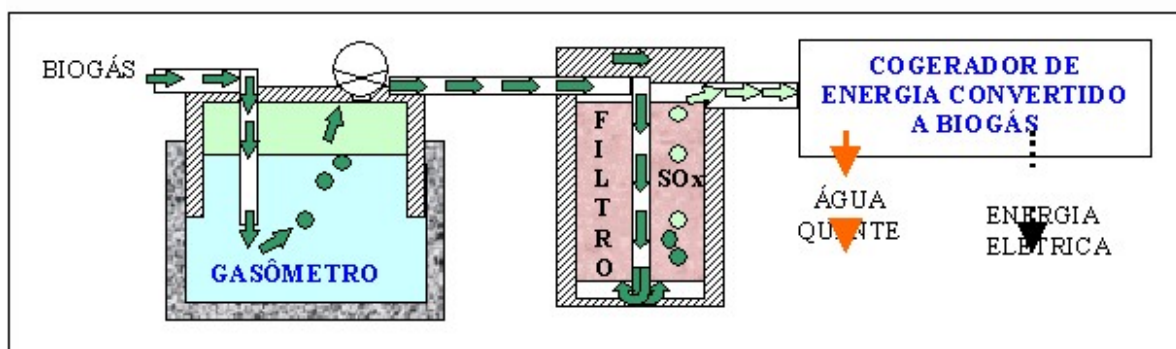


2.3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS E DE COGERAÇÃO.

No tocante ao aproveitamento energético do biogás gerado foram sugeridas 3 implantações: 1) armazenamento do biogás, em 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 a biogás.

Figura 04 – Desenho esquemático do sistema de armazenamento e purificação do biogás, associado ao sistema

de cogeração de energia



Na configuração ilustrada na Fig. 04, do aproveitamento energético do biogás, foi proposta a tecnologia de cogeradores compactos que, constituem-se, de motores alternativos de combustão interna, acionados a biogás. A menor capacidade de geração comercialmente encontrada para essa unidade é de 7 kW (denominada TOTEM 7). Os principais componentes dessa unidade de cogeração são: um motor alternativo de combustão interna, um gerador elétrico, um sistema de controle que assegure o bom rendimento da instalação e, quando necessário, um isolante acústico. Segundo SILVEIRA (1994), cogeradores compactos, utilizando motor de combustão interna, podem aproveitar de 50 a 70% da energia disponível do combustível na forma de energia térmica e de 23 a 30% na forma de energia elétrica. A Fig. (5) mostra uma unidade TOTEM e a Fig. (6) ilustra o funcionamento dessa unidade.

Figura 05 – Corte de uma unidade TOTEM (Importado – origem italiana).

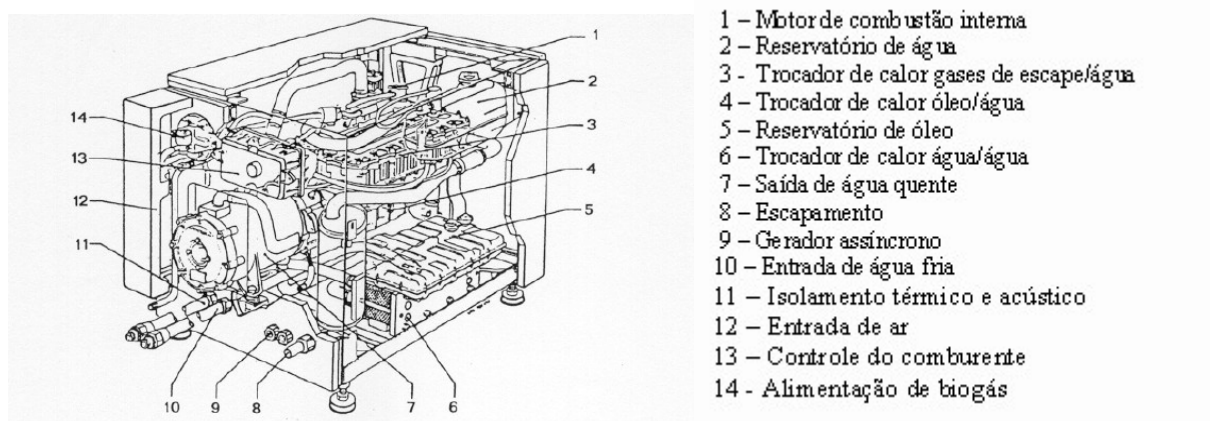


Figura 06 – Detalhamento esquemático do funcionamento do sistema mostrado na Fig. (3), apresentando a recuperação do calor dos gases de escape e da refrigeração do motor.

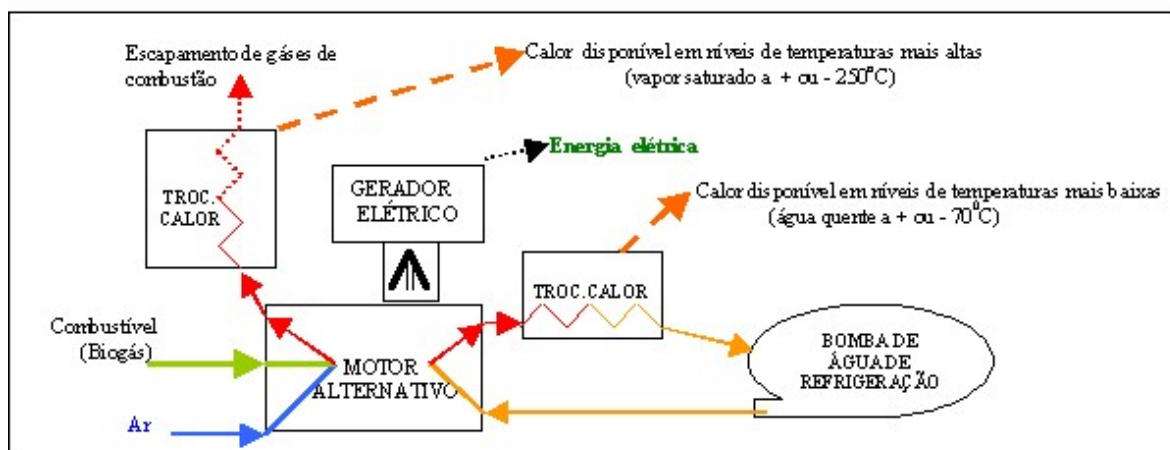
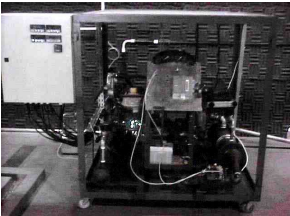


Figura 07 - Sistema Compacto de Cogeração de Energia a Biogás, desenvolvido para produção simultânea de energia elétrica e água quente com o biogás gerado pelo sistema de biodigestão anaeróbia.

1. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA 	TIPO: GM Corsa, 1.0L "98" 4 tempos Sistema de Injeção: MPFI - Delphi Taxa de compressão: 9.4:1 Potência Máxima: 44 kW Torque Máximo: 81 Nm Rotação Máxima : 6000 rpm
2. ALTERNADOR TRIFÁSICO 	Frequência: 60 Hz Número de polos: 4 Rotação: 1800 rpm Cosf: 0,8 Potência: 12,5 kVA Corrente alternada 220 V: 32,8 A
3. TROCADOR DE CALOR 	Tipo: casca e tubo (água/água) Número de tubos: 40 Diâmetro dos tubos: 9,5 mm Espessura dos tubos: 0,8 mm Distância entre os tubos: 12,5 mm Número de chicanas: 7 Corte das chicanas: 30%

2.4. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE REUSO DE ÁGUAS POR FERTI-IRRIGAÇÃO

A ferti-irrigação 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.

2.5. MINIETTERA ASSOCIADA A SISTEMA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

A miniETTERA implantada, corresponde à versão coletiva, possui um volume útil de 70 m³/dia, sua capacidade é para o tratamento do esgoto produzido por uma população aproximada de 1.000 habitantes, esse sistema será comparado com três casos: o primeiro, caso 1 - sistema tradicional por lodo ativado; o segundo, caso 2 - sistema integrado anaeróbio-aeróbio-anóxico com aquecimento solar e o terceiro, caso 3 - sistema integrado anaeróbio-aeróbio-anóxico com aquecimento solar, aproveitamento do biogás e reuso de águas. As Figs. 9, 10 e 11, ilustram o funcionamento nos três casos.

Figura 9 – Esquema de funcionamento do sistema tradicional por lodo ativado.

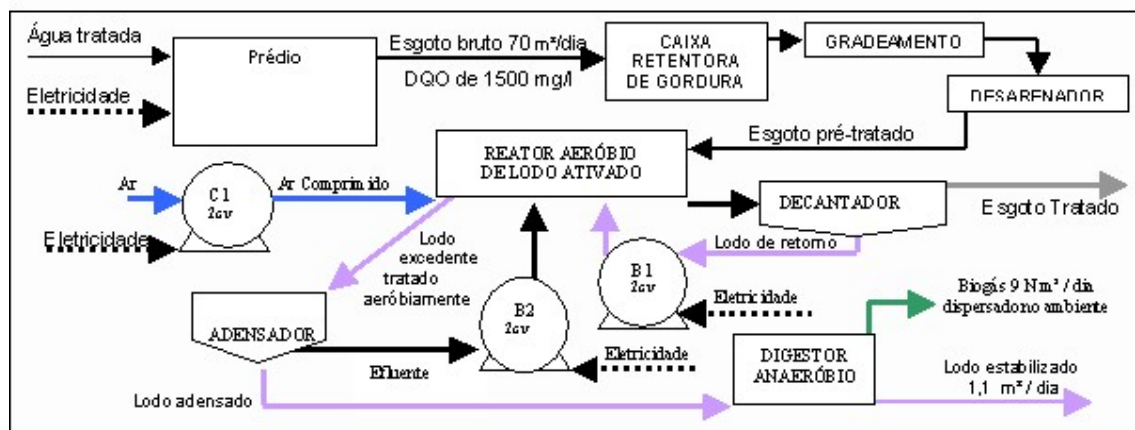


Figura 10 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico, com aquecimento solar.

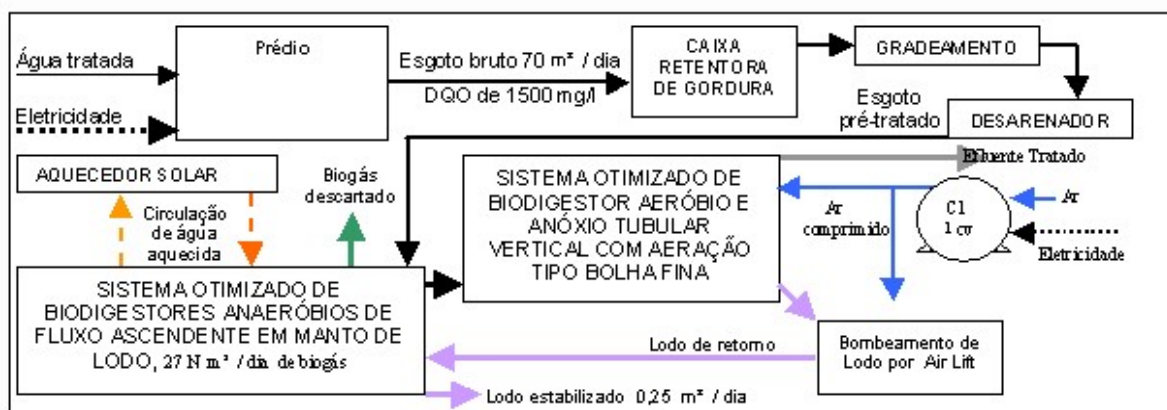
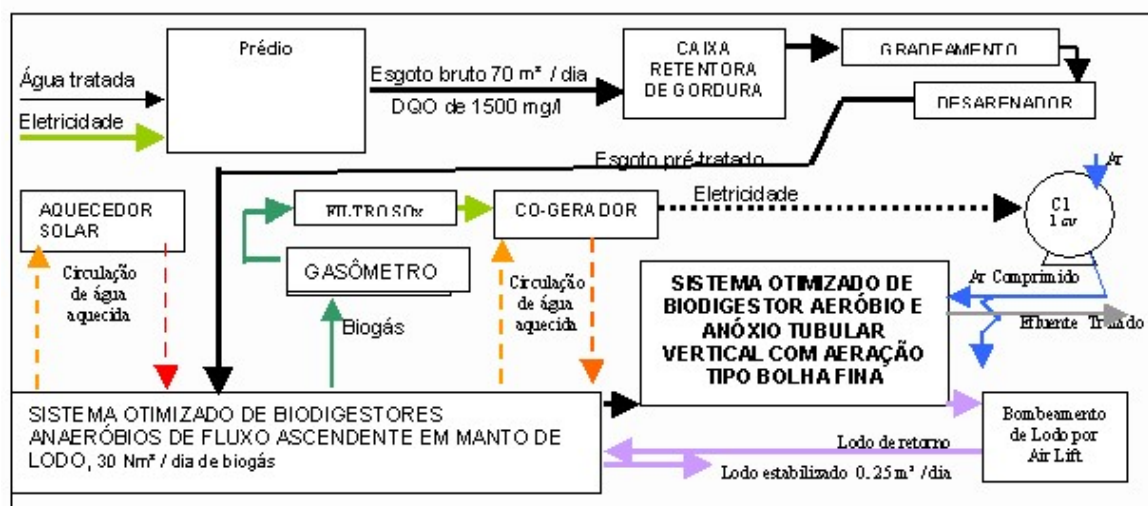


Figura 11 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio-Anóxico, com aquecimento solar, aproveitamento do biogás e reuso do efluente tratado.



Foram adotados os seguintes valores para os dados: $P_{el} = 0,075$ US\$/kWh; $P_{tl} = 5$ US\$/m³; DQO média do esgoto de 1500 mg/l; $r = 12\%$ aa; $H = 8.760$ h/ano; custo de manutenção para o sistema de lodo = 0,003% do I_{pt} ; custo de manutenção para o sistema de RAFAs = 0,0001% do I_{pt} ; custo de manutenção para o sistema de aquecimento solar = 0,0001% do I_{pt} ; custo de manutenção do sistema TOTEM = 0,003% do I_{pt} ; $P_{et} = 0,650$ US\$/m³ (tarifa SABESP). Esses valores foram dimensionados em base aos locais onde serão instaladas as unidades de estudo em suas configurações características. A produção de cerca de 12 m³ de biogás por dia é suficiente para o funcionamento do microcogador por apenas 4 horas. Sendo assim, optamos por acioná-lo das 3:00 às 7:00 horas para fornecimento de energia elétrica para a parte aeróbia da miniETERA e água quente para aquecimento dos RAFAs; durante o restante das horas do dia, energia elétrica, requerida pela parte aeróbia, será fornecida pela concessionária e o aquecimento dos RAFAs será efetuado pelo sistema de aquecimento solar.

Tabela 01 – Dados das configurações das mini-ETEs, conforme Figs.5, 6 e 7.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Produção de biogás [m ³ /dia]	9	27	30
Q _{eb} [m ³ /dia]	70	70	70
P _l [m ³ /dia]	1,10	0,25	0,25
P_{tl} = Preço do transporte do lodo gerado por m ³ de esgoto tratado [US\$/m ³]	0.0310	0.0068	0.0068
Potência dos equipamentos [cv] e utilização diária [horas]	C1 = 2 ; (24 horas) B1 = 2 ; (6 horas) B2 = 2 ;(12 horas)	C1 = 1 ; (24 horas)	C1 = 1 ; (24 horas)
Ereq diária dos equipamentos [kW]	C1 = 35,80 B1 = 8,95 B2 = 17,90	C1 = 20,00	C1 = 20,00
Total	62,66	20,00	20,00
I_{pl} [US\$]	Lodo ativado = 60,000.00	RAFAs = 30,000.00 Aeróbio-Anóxico = 15,400.00 Aq. Solar = 6,400.00 Ferti-irrigação = 2,000.00 53,800,00	RAFAs = 30,000.00 Aeróbio-Anóxico = 15,400.00 Aq. Solar = 6,400.00 Ferti-irrigação = 2,000.00 TOTEM7 = 9,000.00 62,800.00
Total	60,000.00		
C_{mETE} [US\$/m ³]	Lodo ativado = 0.333	RAFAs = 0.003 Aeróbico-Anóxico = 0.18 Aq. Solar = 0.0064 Ferti-irrigação = 0.01	RAFAs = 0.003 Aeróbico-Anóxico = 0.18 Aq. Solar = 0.0064 TOTEM7 = 0.29 Ferti-irrigação = 0.01
Total	0.333	0.1895	0.4894

Tabela 02 - Especificação do módulo de cogeração tipo TOTEM

Fabricante	Modelo	Ep [kW]	Ec [kW]	Ecomb [kW]	Ta [°C]	Mb [m³/h]
Biklim	TOTEM	7	21	29	80	3,0

3. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DAS ETES

O custo de implantação é definido como o custo de construção das plantas mais o 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 (IpI), compreende o custo das instalações civis, dos equipamentos, do cogrador , do aquecedor solar dos RAFAs e do sistema de ferti-irrigação, quando for o caso.

Temos então que:

$$Cet = \text{IpI} * F + CoETE + CmETE \quad \text{equação (1)}$$

H * Qeb

onde:

$$F = \frac{q^k}{q^k - 1} \quad \text{equação (2)}$$

$q^k - 1$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad \text{equação (3)}$$

100

Para o caso 1 e 2, sem cogeração, teremos:

$$R = H * Qeb * (Pet - Cet) \quad \text{equação (4)}$$

24

Para o caso 3, com cogeração, teremos:

$$R = H * Qeb * (Pet - Cet) \quad \text{equação (5)}$$

24

Para o caso 1, Tratamento Convencional (Aeróbio por lodo ativado), teremos:

$$CoETE = Ereq * Pel + Ptl = 0,87 \text{ US\$/m}^3 \quad \text{equação (6)}$$

Qeb

Para o caso 2, Tratamento Alternativo (Anaeróbio-Aeróbio-anóxico), teremos:

$$CoETE = Ereq * Pel + Ptl = 0,224 \text{ US\$/m}^3 \quad \text{equação (7)}$$

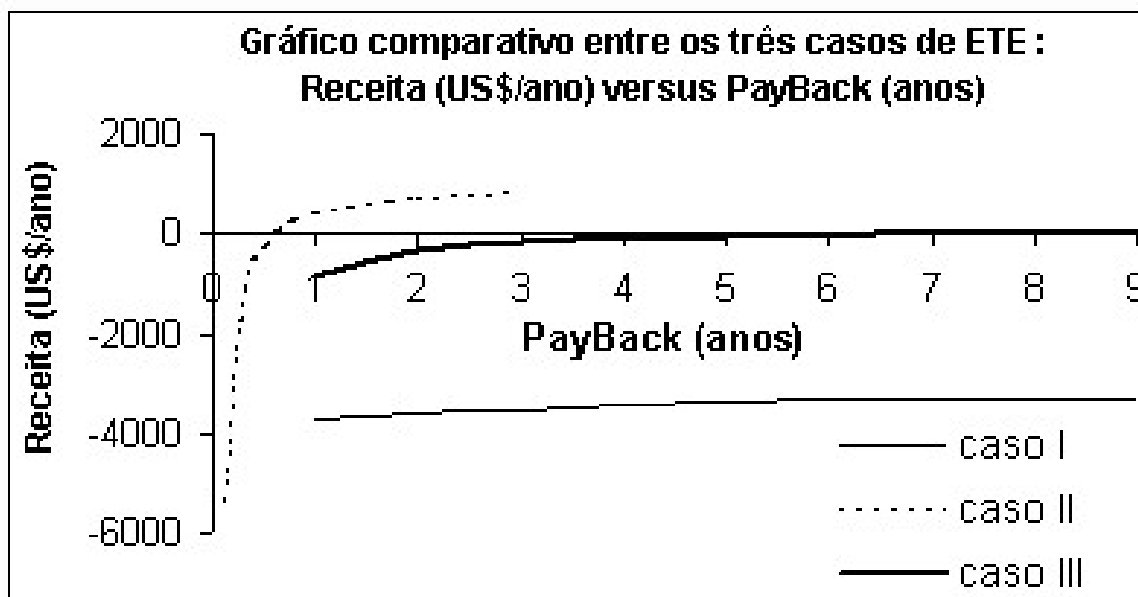
Qeb

Para o caso 3, Tratamento Alternativo (Anaeróbio-Aeróbio-anóxico + Cogrador + Reuso), teremos:

$$CoETE = - (Ep * \frac{4}{24} - Ereq) * Pel + Ptl = 0,087 \text{ US\$/m}^3 \quad \text{equação (8)}$$

Qeb

Figura 12 – Gráfico comparativo entre os três casos: Receita (US\$/ano) versus PayBack (anos).



Com a implantação do sistema proposto é possível, com segurança, conservar água potável, baixar os custos do consumo de água e descartar um efluente com condições químicas e microbiológicas consideravelmente menos agressivo para o meio do que o lançamento do esgoto *in natura*.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observa-se da Figura 10 que o caso 1 (Lodo ativado convencional) é praticamente inviável, pois sua receita será sempre negativa.

No caso 2 (RAFAs aquecidos por energia solar, seguido de pós tratamento por lodo ativado) o investimento se amortiza em sete meses.

No caso 3 (RAFAs aquecidos por energia solar, seguido de pós tratamento por lodo ativado e associado a sistema de cogeração para aproveitamento *in situ* do biogás produzido) que considera 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 mostrado para o caso de 12% aa.

5. CONCLUSÕES

Para o caso 1, uma primeira conclusão leva a crer que praticamente o sistema é inviável economicamente;

O caso 2, com um PayBack de sete meses, se mostra 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 possui o maior custo de implantação, devido ao alto custo do sistema cogerador que atualmente é importado e não é encontrado comercialmente numa potência menor, porém possui o menor custo operacional, podendo num futuro próximo ser totalmente nacionalizado e encontrado em menores potências, ou aguardando uma provável expansão da planta.

No caso de uma ETE de indústria alimentícia 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.

A implantação do projeto é bastante interessante do ponto de vista ecológico e energético, pois é uma alternativa que concilia saneamento e produção de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GODOY JÚNIOR, E., Sistema Otimizado de Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Para Tratamento de Efluente de Suinocultura, Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais - Concentração em Saneamento Ambiental, Universidade de Taubaté, Taubaté SP, 52 p., jul. 2001.
2. GODOY JÚNIOR, E., CARROSSI, L.R., SILVEIRA, J. L., GIACAGLIA, G. E. O., "Mini estações de tratamento anaeróbio aeróbio de esgoto associadas a sistemas de co-geração de energia no aproveitamento *in situ* do biogás produzido.", CONEM 2002 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 12-16/08/2002, João Pessoa, PB.
3. SILVEIRA, J.L., "Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudo de Casos para o Setor Terciário", Tese de Doutorado na UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 193p., 1994.
4. VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G., Tratamento Anaeróbio de Esgoto – Um Manual Para Regiões de Clima Quente, Vol.1, Campina Grande, PB, Universidade Federal da Paraíba, 253p., 1991.