



MINIESTAÇÕES DE TRATAMENTO ANAERÓBIO-AERÓBIO DE ESGOTOS, ASSOCIADAS A SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO DE ENERGIA PARA APROVEITAMENTO *IN SITU* DO BIOGÁS PRODUZIDO

Ederaldo Godoy Júnior (1)

Depto. de Energia da FEG/UNESP, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 CEP 12516-410, Guaratinguetá, e-mail: godoyjr@feg.unesp.br

Luiz Roberto Carrocci (2)

Depto. de Energia da FEG/UNESP, e-mail: carrocci@feg.unesp.br

José Luz Silveira (2)

Depto. de Energia FEG/UNESP, e-mail: joseluz@feg.unesp.br

Giorgio Eugênio Oscare Giacaglia (3)

Depto. de Engenharia Mecânica da UNITAU, e-mail: giorgio@prppg.unitau.br

Resumo: *Este trabalho propõe o tratamento de efluentes por meio de mini-ETEs (Estações de Tratamento de Esgotos), compostas por RAFAs (Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente), seguido de pós tratamento por sistema de AR (Aeradores Rotacionais), ambos fabricados em termoplásticos e associado a um microcogenerador denominado de TOTEM (Módulo de Energia Total) capaz de gerar simultaneamente energia térmica e elétrica. Busca-se desenvolver e testar, em escala real, mini ETEs com sistema integrado anaeróbio e aeróbio, ou seja, primeiro trata-se o efluente por meio de três RAFAs dispostos em série, formando cascata, com separador de fases gasosa-líquida-sólida, em formato helicoidal e, em seguida, é tratado por meio de aeradores rotacionais, também formando cascata, constituídos por carretel tipo roda d'água, onde são enroladas várias espiras de tubo plástico corrugado. Os aeradores são acionados com a entrada do afluente nas pás da roda d'água, produzindo um movimento rotacional que aprisiona ar e líquido no interior do corrugado, aumentando a interação entre o filme bacteriano, aderido à superfície do corrugado, e o líquido. Este trabalho constitui-se na proposta de projeto, construção, monitoramento físico-químico-patogênico e ensaios de mini ETEs em três versões. A primeira é Residencial, para que no próprio local, seja possível realizar o tratamento anaeróbio e, na rede coletora urbana, com suas quedas e declives, realize-se parte do tratamento aeróbio necessário, ou que conduza o efluente até uma estação aeróbia coletiva para seu pós tratamento aeróbio. Essa versão visa exclusivamente o saneamento do efluente residencial. Uma segunda versão é a Comunitária, para tratar esgoto de pequenas comunidades e do setor terciário, visando saneamento e aproveitamento do biogás. A terceira versão é industrial, para tratar o efluente de indústrias alimentícias e agro-industriais, visando saneamento e aproveitamento do biogás produzido. Este trabalho apresenta esquemas das três versões, mas só analisa a versão comunitária associada ao sistema de cogeração.*

Palavras-chave: *mini ETEs, reator anaeróbio de fluxo ascendente, biodigestor, biogás, cogeração.*

NOMENCLATURA

AR – aerador rotacional

B₁ – bomba 1

B₂ – bomba 2

C₁ – compressor 1

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

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

C_{mETE} – custo de manutenção da ETE [US\$/m³]

DQO – Demanda Química de Oxigênio [mg/l de DQO]

E_c – fluxo de calor residual recuperado [kW]

E_{comb} – energia do combustível [kW]

E_p – energia elétrica gerada no microcogenerador [kW]

E_{req} – energia elétrica requerida pela ETE [kW]

ETE – estação de tratamento de esgoto

F – fator de anuidade [1/ano]

I_{pl} – investimento total da planta [US\$]

k – período de amortização do capital investido [anos]

mb – consumo de biogás pelo TOTEM [m³/h]

P_{el} – preço de compra de eletricidade [US\$/kWh]

P_{et} – preço do esgoto tratado [US\$/ m³]

P_{tl} – preço do transporte do lodo excedente gerado por m³ de esgoto [US\$/m³]

Q_{eb} – vazão diária de esgoto bruto [m³/dia]

R - receita [US\$/ano]

r – taxa de juros [% aa]

RAFA – reator anaeróbio de fluxo ascendente

T_a – Temperatura de saída de água do cogenerador [°C]

TOTEM – modulo de energia total (*total energy module*)

V_l – Volume de lodo excedente [m³/dia]

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho é uma evolução natural do trabalho de Godoy Jr (2001) e propõe o tratamento de esgoto por meio de mini ETEs, compostas por RAFAs, seguido de pós tratamento por AR, ambos confeccionados em termoplásticos, associado a um microcogenerador do tipo TOTEM.

No Brasil, algo em torno de 50% de todo esgoto gerado é coletado adequadamente e, menos de 10 % desse esgoto, recebe algum tipo de tratamento, antes de seguir para os corpos d'água; isso ocasiona a eutrofização das águas, a propagação de doenças hidrotansmissíveis e o desperdício da biomassa dos esgotos que poderia, quando tratada adequadamente, gerar biogás combustível.

A grande maioria das plantas de tratamento de esgoto instaladas operam pelo processo de lodo ativado, um sistema bastante eficiente no que diz respeito a redução de poluentes biodegradáveis, mas que implica em alto custo operacional energético e produz grande volume de lodo residual cujo destino é o aterro sanitário e requer custo de transporte. Nesse sistema, o efluente é tratado em reatores aeróbios (lodos ativados), cuja função é a oxidação da carga orgânica; e a seguir é lançado nos corpos receptores e o lodo residual é digerido por meio de digestores anaeróbios, gerando pouco biogás e muito lodo estabilizado.

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 75% menor daquela quantidade gerada pelo lodo ativado, pois grande parte desse

lodo volatiliza na forma de biogás combustível, que pode ser seguramente aproveitado por sistemas de cogeração, para diminuir os custos operacionais no tocante à compra de eletricidade.

O desenvolvimento de plantas de ETEs eficientes e de baixo custo operacional, é uma necessidade mundial no tocante à conservação dos recursos naturais de águas de boa qualidade e de energia. Em tempos de crise de energia elétrica, essa é uma variante bastante atrativa, uma vez que concilia saneamento com produção de energia.

2. CONFIGURAÇÃO DAS VERSÕES DAS MINI-ETEs

A versão Residencial promove, no subsolo da própria residência, o tratamento anaeróbico e a rede coletora urbana, com suas quedas e declives, fica responsável por parte do tratamento aeróbico necessário, ou de conduzir o efluente até uma ETE coletiva para seu pós-tratamento aeróbico. Essa versão visa exclusivamente saneamento e é ilustrado na Fig. (1).

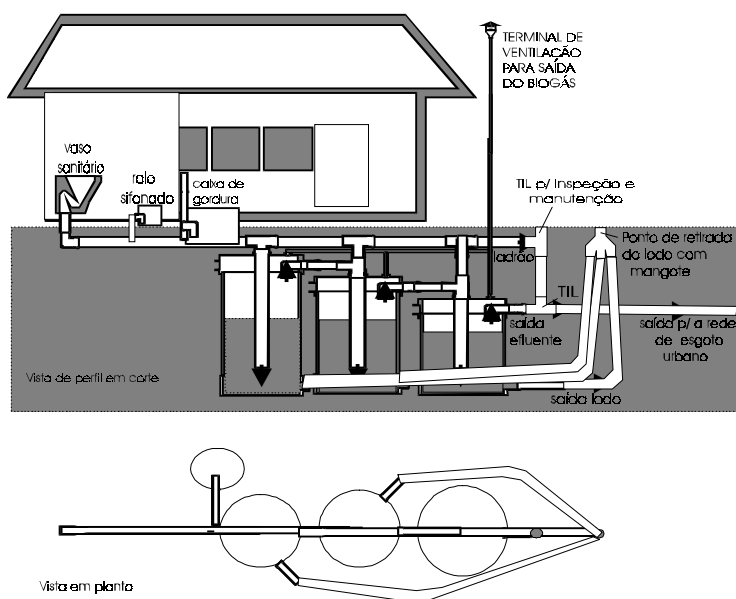


Figura 1 - Desenho esquemático da Mini ETE na versão Residencial

A segunda versão é a Comunitária, para tratar esgoto de pequenas comunidades e do setor terciário, visando saneamento e aproveitamento do biogás, conforme ilustrado nas Fig. 2 e 3.

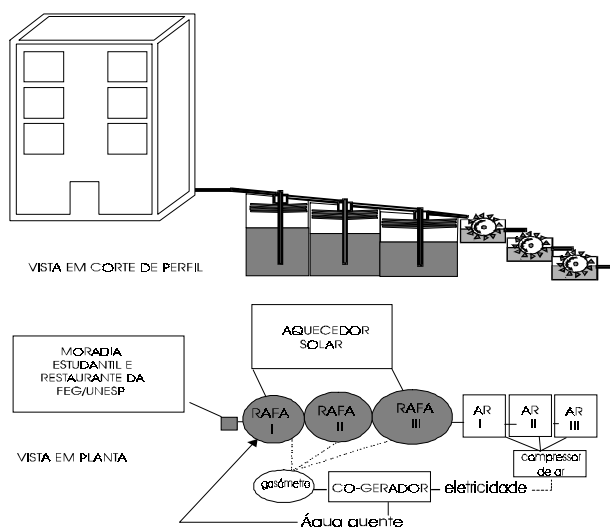


Figura 2 - Desenho esquemático da mini ETE na versão Comunitária (Caso da Moradia Estudantil e Restaurante da FEG/UNESP).

A terceira versão é agro-industrial, para tratar efluentes de suinoculturas, bovinoculturas de leite, laticínios, cervejarias, suco-alcooeiras, entre outras, visando saneamento e aproveitamento energético do biogás produzido, conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4. Na Figura 4 é vista a instalação que serviu de base para o trabalho de Godoy Jr (2001).

Segundo Carrocci & James (1991), atualmente, uma usina de álcool produz, por tonelada de cana: 0,07 m³ de álcool, 250 kg de bagaço e 0,2 m³ de efluente residual, com capacidade de produzir cerca de 0,0118 m³ de biogás, com 65% de metano, quando devidamente tratado.

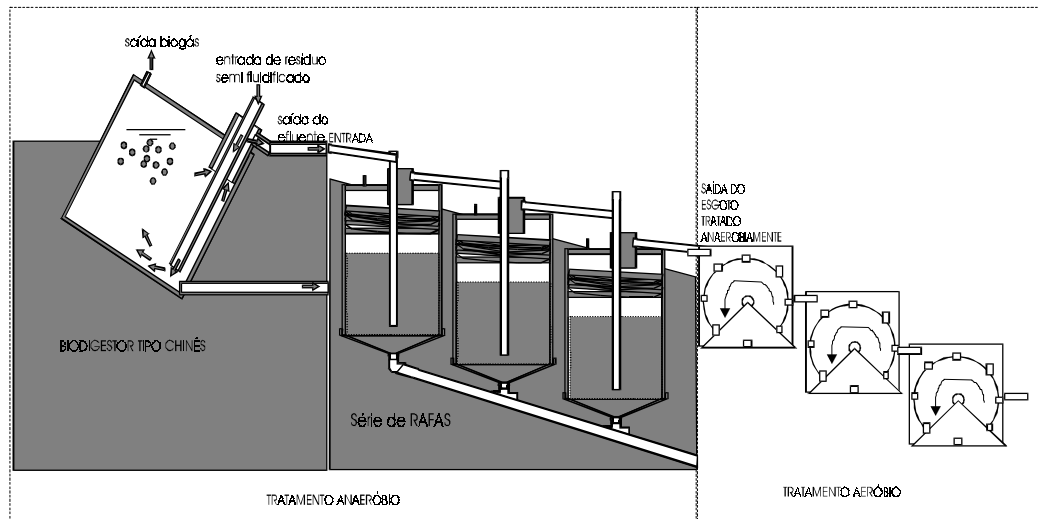


Figura 3 – Desenho esquemático da versão agro-industrial, a ser implantada na Suinocultura da Fazenda Piloto da Universidade de Taubaté, composta por um biodigestor do tipo chinês, 3 RAFAs e 3 AR, dispostos em série, formando cascata e aquecidos por energia solar.



Figura 4 – Vista da suinocultura onde foi instalada a planta piloto do projeto de Godoy Jr (2001) na UNITAU, e onde pretende-se instalar planta em escala real. 1) Suinocultura, 2) Tanque de hidrólise, 3) Série de quatro RAFAs aquecidos por energia solar, 4) Tanques aeróbios, 5) Infiltração no solo.

3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA MICROGERADOR DE ENERGIA

No caso de tratamento de esgoto pela versão comunitária é proposta a tecnologia denominada de microgeradores ou ainda co-geradores compactos, que constituem-se de motores alternativos de combustão interna, modificados para funcionar a biogás. A menor capacidade elétrica comercialmente encontrada para essa unidade é de 7 kW (denominada TOTEM 7). Os principais componentes dessa unidade de microcogeração 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), microgeradores, utilizando motor de combustão interna, podem aproveitar de 50 a 70% da energia do combustível na forma de energia térmica e de 23 a 30% na forma de energia elétrica. O rendimento total global desses sistemas de cogeração varia de 80 a 98%. O calor produzido por essas instalações é disponível numa faixa de temperatura entre 80°C a 600°C. A Fig. (5) mostra uma unidade TOTEM e a Fig. (6) ilustra o funcionamento dessa unidade.

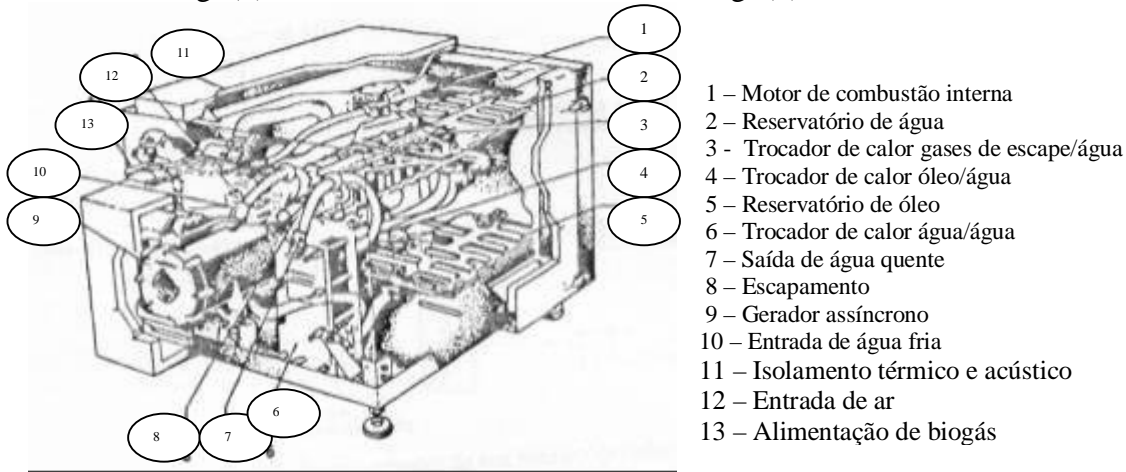


Figura 5 – Corte de uma unidade TOTEM (Importado)

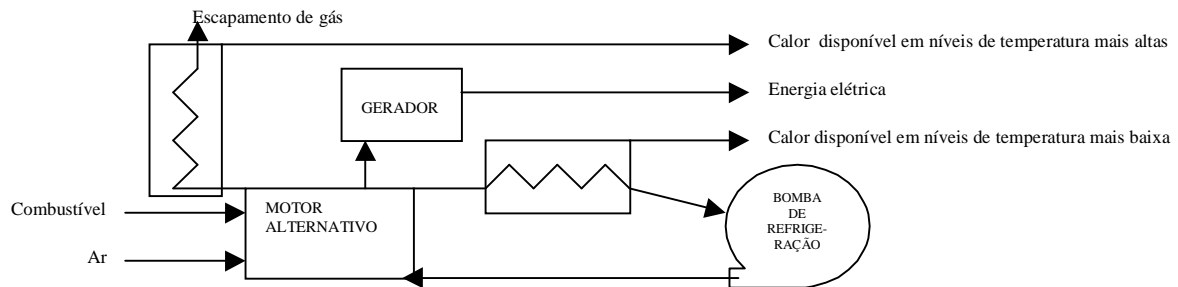


Figura 6 – Detalhamento esquemático do funcionamento do sistema mostrado na Fig. (5), apresentando a recuperação do calor dos gases de escape e da refrigeração do motor.

4. MINI-ETEs ASSOCIADAS A SISTEMA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

No presente trabalho apresentamos uma análise técnica econômica comparativa da versão comunitária para o tratamento do esgoto gerado na Moradia Estudantil e no Restaurante da FEG/UNESP. A versão comunitária será comparada analisando-se três casos: o primeiro, caso 1 - sistema tradicional por lodo ativado; o segundo, caso 2 - sistema integrado anaeróbio-aeróbio com aquecimento solar e o terceiro, caso 3) sistema integrado anaeróbio-aeróbio com aquecimento solar associado a microcogrador. As Figuras 7, 8 e 9 ilustram o funcionamento nos três casos.

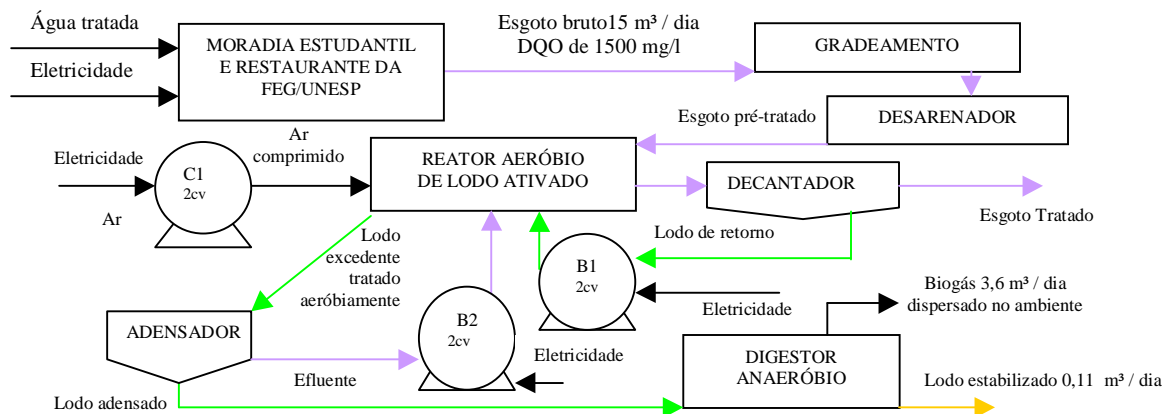


Figura 7 – Esquema de funcionamento do sistema tradicional por lodo ativado

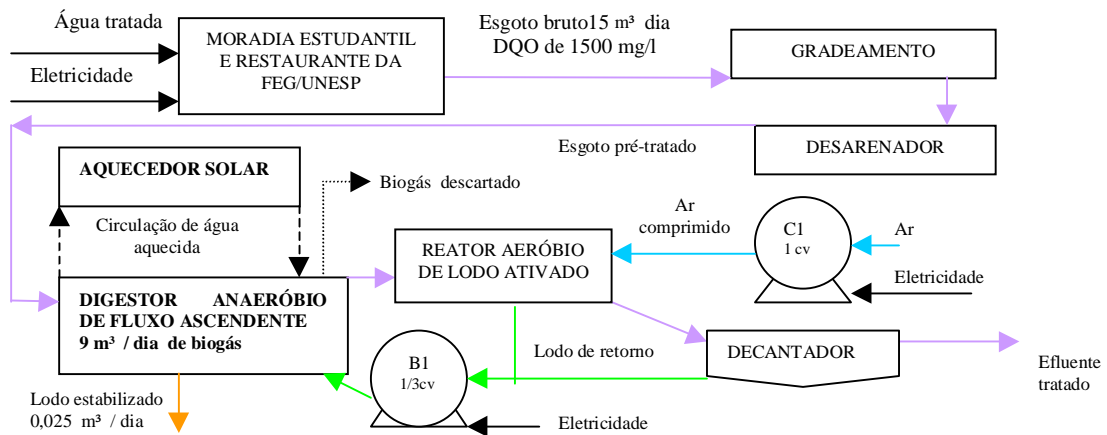


Figura 8 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio, aquecido por energia solar.

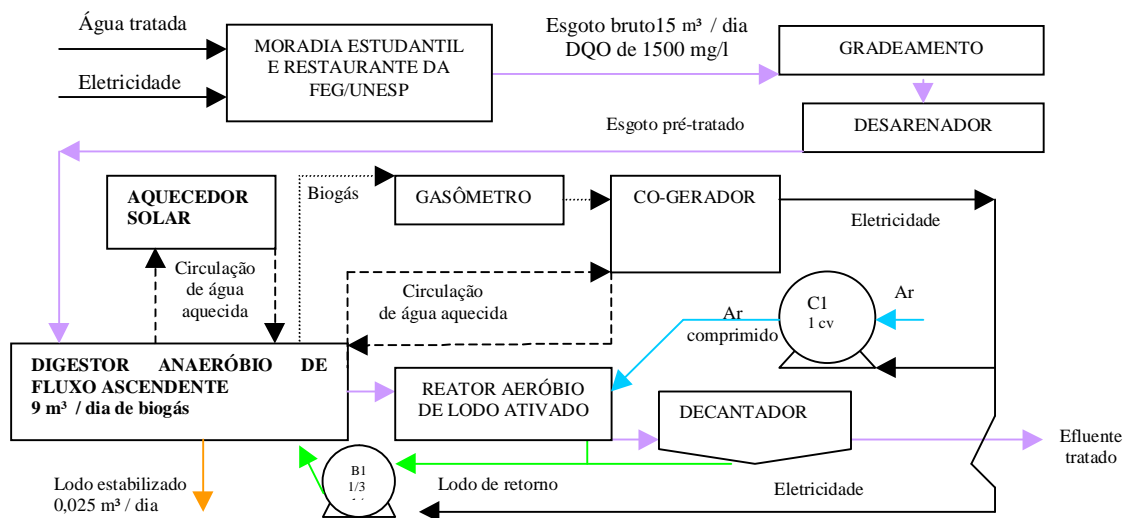


Figura 9 - Tratamento Anaeróbio-Aeróbio associado a um sistema cogenerador de energia para aproveitamento *in situ* do biogás produzido, com aquecimento solar.

Foram adotados os seguintes valores para os dados:

$P_{el} = 0,075$ US\$/kW, $P_{tl} = 5$ 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 Ipl, custo de manutenção para o sistema de RAFAs = 0,0001% do Ipl, custo de manutenção para o sistema de aquecimento solar = 0,0001% do Ipl, custo de manutenção do sistema TOTEM = 0,003% do Ipl e,
 $P_{et} = 0,650$ US\$/m³ (tarifa SABESP)

Esses dados foram dimensionados em base aos locais onde serão instaladas as unidades de estudos em suas configurações características.

A produção de cerca de 12 m³ de biogás por dia é suficiente para o funcionamento do microgerador por apenas 4 horas. Sendo assim optamos por aciona-lo das 3:00 às 7:00 para fornecimento de energia elétrica para a parte aeróbia da miniETE 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 1 – Dados das configurações das mini-ETEs, conforme Figs.7, 8 e 9.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Produção de biogás [m³/dia]	3,6	12	12
Q _{eb} [m³/dia]	15	15	15
PI [m³/dia]	0,110	0,025	0,025
P _{tl} = Preço do transporte do lodo gerado por m³ de esgoto tratado [US\$/m³]	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) B1= 1/3; (12 horas)	C1 = 1;(24 horas) B1=1/3; (12 horas)
Ereq diária dos equipamentos [kW.h]	C1 = 35,80 B1 = 8,95 B2 = 17,90 62,66	C1 = 17,90 B1 = 2,98 20,88	C1 = 17,90 B1 = 2,98 20,88
Total			
I _{pl} [US\$]	Lodo ativ. = 11,000.00	RAFAs = 3,000.00 Lodo ativ. = 15,400.00 Aq. Solar = 6,400.00 15,400,00	RAFAs = 3,000.00 Lodo ativ. = 15,400.00 Aq. Solar = 6,400.00 TOTEM7 = 10,000.00 25,400.00
Total	11,000.00	15,400,00	25,400.00
C _{mETE} [US\$/m³]	Lodo ativ. = 0.33	RAFAs = 0.003 Lodo ativ. = 0.18 Aq. Solar = 0.0064 0.1894	RAFAs = 0.003 Lodo ativ. = 0.18 Aq. Solar = 0.0064 TOTEM7 = 0.3 0.4894
Total	0.33	0.1894	0.4894

Tabela 2 - 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

5. 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 (I_{pl}), compreende o custo das instalações civis, dos equipamentos, do microcogrador e do aquecedor solar dos RAFAs, quando for o caso.

Temos então que:

$$C_{et} = \frac{I_{pl} * F}{H * Q_{eb}} + C_{oETE} + C_{mETE} \quad (1)$$

onde:

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

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

Para o caso I e II, sem cogeração, teremos:

$$R = H * \frac{Q_{eb}}{24} * (P_{et} - C_{et}) \quad (4)$$

Para o caso III, com cogeração, teremos:

$$R = H * \frac{Q_{eb}}{24} * (P_{et} - C_{et}) \quad (5)$$

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

$$C_{oETE} = \frac{E_{req} * P_{el}}{Q_{eb}} + P_{tl} = 0,87 \text{ US\$/m}^3 \quad (6)$$

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

$$C_{oETE} = \frac{E_{req} * P_{el}}{Q_{eb}} + P_{tl} = 0,224 \text{ US\$/m}^3 \quad (7)$$

Para o caso III, Tratamento Alternativo (Anaeróbio-Aeróbio + Cogrador), teremos:

$$C_{oETE} = \frac{-(E_p * 4/24 - E_{req}) * P_{el}}{Q_{eb}} + P_{tl} = 0,087 \text{ US\$/m}^3 \quad (8)$$

Tabela 3. Resultados dos cálculos do Cet e R para as variações de k

k (anos)	F	caso I		caso II		caso III	
		Cet (US\$/m³)	R	Cet (US\$/m³)	R	Cet (US\$/m³)	R
0,1	9,998			1.581	- 5,338.10		
0,3	3,333			0.803	- 1,084,05		
0,5	1,99881			0.647	- 229.00		
0,8	1,1981			0.551	301.12		
1	9,9988	1.2831	- 3,712.05	0.530	410.00	0.7664	- 883.66
2	0,4911			0.470	739.12	0.6695	- 353.13
3	0,3333			0.450	848.62	0.6391	- 186.69
4	0,2491					0.6200	- 82.12
5	0,1991	1.2153	- 3,344.00			0.6110	- 27.37
6	0,1655					0.6070	- 14.78
7	0,1422					0.6031	10.95
9	0,1104	1.2092	- 3,307.99			0.5970	42.15

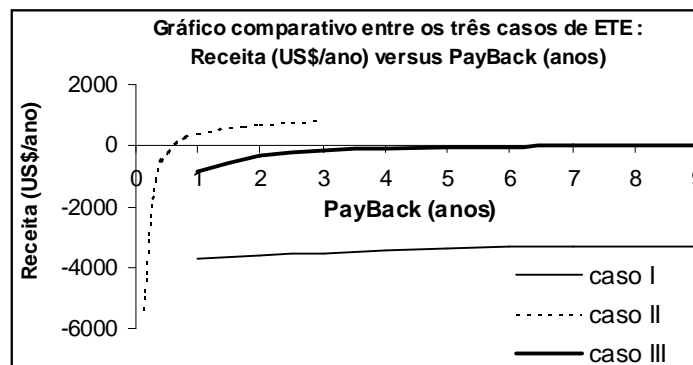


Figura 10 – Gráfico comparativo entre os três casos: Receita (US\$/ano) versus PayBack (anos).

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observa-se da Figura 10 que o caso I (Lodo ativado convencional) é praticamente inviável pois sua receita será sempre negativa, mas não devemos esquecer do benefício ambiental.

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

No caso III (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 no artigo só foi mostrado para o caso de 12% aa.

7. CONCLUSÕES

Para o caso I, uma primeira conclusão leva a crer que praticamente o sistema é inviável economicamente; mas é preciso lembrar que tal processo trás grandes benefícios ambientais.

Para o caso II, 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 I.

O caso III possui o maior custo de implantação, devido ao alto custo do sistema cogenerador 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.

No caso de uma ETE de indústria alimentícia ou agro-industriais, com efluente com maior concentração orgânica, os custos operacionais tendem a diminuir com o aumento na produção de biogás, possuindo até um superavit elétrico que poderá ser aproveitado no 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.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Energia da FEG/UNESP pelo apoio logístico, a UNITAU pela autorização pelo desenvolvimento de parte do experimento na suinocultura do Departamento de Ciências Agrárias, a CAPES pela bolsa de Doutorado, a FAPESP pelo fomento do trabalho de mestrado que foi um pré-requisito para o desenvolvimento do projeto e a TIGRE S.A. Tubos e Conexões pela doação dos materiais termoplásticos para a construção das mini-ETEs.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carrocci, L. R., James, E. H., 1991, “Cogeneration at Alcohol Production Plants in Brazil”, Energy, Vol. 16, No. 8, Great Britain, pp. 1147-1151.

Godoy Jr, E., 2001, “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, 52 p.

Silveira, J.L., 1994, “Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudo de Casos para o Setor Terciário”, Tese de Doutorado na UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 193p.

Van Haandel, A.C., Lettinga, G., 1991, “Tratamento Anaeróbio de Esgoto – Um Manual Para Regiões de Clima Quente”, Vol.1, Campina Grande, PB, Universidade Federal da Paraíba, 253p.

Von Sperling, M., 1997, “Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Lodos Ativadas”, Vol.4, Belo Horizonte, MG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 416p.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso no trabalho.

TITLE

MINI WASTEWATER ANAEROBIC-AEROBIC TREATMENT STATIONS ASSOCIATED TO A COGENERATION SYSTEM FOR LOCAL UTILISATION OF THE BIOGÁS PRODUCED

First Author :

Ederaldo Godoy Júnior, Depto. de Energia da FEG/UNESP, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 CEP 12516-410, Guaratinguetá, e-mail: godoyjr@feg.unesp.br

Second Author's:

Luiz Roberto Carrocci, Depto. de Energia da FEG/UNESP, e-mail: carrocci@feg.unesp.br

José Luz Silveira, Depto. de Energia FEG/UNESP, e-mail: joseluz@feg.unesp.br

Giorgio E. O. Giacaglia, Depto. de Eng. Mecânica da UNITAU, e-mail: giorgio@prppg.unitau.br

SUMMARY: *This work proposes the treatment of wastewater by means of mini WTSs (Wastewater Treatment Stations), composed of UASBs (up-flow anaerobic sludge blanked), followed by post-treatment by a system of RA (rotational aerator), both made of thermoplastic material and associated to a Total Energy Module (TOTEM) micro-cogenerator capable of generating heat and electricity simultaneously. The purpose of this research is to design, build and test, in real scale, the mini WTSs by an anaerobic and aerobic integrated system, that is, first the wastewater is treated by means of three UASBs disposed in a series forming a cascade, with a gaseous-liquid-solid phase separator in a helicoidal shape and then post-treated by means of rotational aerators, also forming cascade, consisting of a reel of the water mill type, where a wrinkled plastic tube is rolled thus forming several spirals. The aerators are started with the entering of the affluent in the blades of the water mill, producing the rotational movement which holds the air and liquid in the interior of the tube , increasing the interaction between the bacterium film adhered to the surface of the tube and the liquid. This work consists of a project, construction, physical-chemical-pathogenic monitoring and tests of mini WTSs in three versions. The first one is residential, so that it is possible to perform the anaerobic treatment at the point of the effluent. Following this treatment, the urban collector network, with its falls and slopes, produces part of the necessary aerobic treatment, and or it conducts the effluent to the collective aerobic station for its post-treatment. This version aims at sanitation exclusively. A second version is a Community one, designed to treat wastewaters of small communities and of the tertiary sector, aiming at sanitation and utilisation of the biogas. The third version is industrial, for treating the food and agriculture industry effluent, aiming at sanitation and utilisation of the biogas produced.*

Keywords : *mini WTSs, up-flow anaerobic sludge blanket, biodigestor, biogás, cogeneration.*