

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental****28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil*

II-097- AVALIAÇÃO ECONÔMICA ENTRE O SISTEMA UASB-RBS E O SISTEMA DE LODO ATIVADO CONVENCIONAL

Patrícia Guimarães⁽¹⁾

Engenheira Química. Doutora em Engenharia Química.

Henio Normando de Souza Melo⁽²⁾

Professor do DEQ-CCT-UFRN. Engenheiro Químico. Doutor em Engenharia Ambiental.

Paula Frassinetti Feitosa Cavalcanti⁽³⁾

Professor do DEC-CCT-UFCG. Engenheira Civil. Doutor em Engenharia Civil.

Adrianus C. Van Haandel⁽⁴⁾

Professor do DEC-CCT-UFCG. Engenheiro Químico. Doutora em Engenharia Civil. Pós-Doutor em Engenharia Ambiental.

Endereço⁽¹⁾: Rua Águas Formosas, 5034 – Capim Macio - Natal - RN - CEP: 59084-030 - Brasil - Tel: +55 (84) 643-2157 guimaraespacia@zipmail.com.br

RESUMO

O sistema de lodo ativado é amplamente utilizado para esgotos domésticos e industriais em virtude da qualidade do efluente final. Contudo, a grande quantidade de lodo gerado e a elevada mecanização tornam os custos operacionais e financeiros altos. O sistema híbrido UASB-RBS é capaz de produzir um efluente de qualidade semelhante ao obtido em um sistema de lodo ativado a custos mais baixos. Este trabalho apresenta uma análise dos custos operacionais e financeiros para o sistema de lodo ativado convencional e o sistema híbrido. Utilizou-se modelos matemáticos para otimizar os sistemas de modo a obter efluentes com a mesma qualidade a custos mínimos. A análise mostrou que o custo total por m³ de esgoto tratado no sistema híbrido pode ser menos que a metade daquele necessário no sistema convencional. O volume total do sistema UASB-RBS, em m³ por m³/d de esgoto tratado, representou apenas 55% do volume total do sistema convencional o que implica em uma redução expressiva com o investimento na construção de reatores.

Palavras-chave: avaliação econômica, anaeróbio, aeróbio, lodos ativados, sistema híbrido.

INTRODUÇÃO

A combinação entre sistemas anaeróbios e aeróbios tem sido foco de pesquisas em todo o Brasil. Usualmente, utiliza-se o reator UASB como pré-tratamento e entre as alternativas de pós-tratamento estão: lagoas de polimento, filtros biológicos, biofiltros aerados, lagoas aeradas e sistema de lodo ativado. As pesquisas mais recentes comprovam a viabilidade técnica e econômica desta associação no tratamento de esgotos domésticos (Sousa & Foresti, 1996; Salomão Junior, 1996; Coletti et al, 1997; Gonçalves et al, 1998; Coura & Van Haandel, 1999; Freire et al, 1999; Callado & Foresti, 2000; Lozada, 2000; Guimarães et al, 2003).

O reator de bateladas sequenciais é a variante mais simples do sistema de lodo ativado convencional: um único reator atua sequencialmente como tanque de reação (aeração) e sedimentador. A associação com o UASB produz um sistema

muito compacto, que pode ser implantado em áreas urbanas ou indústrias. Além disso, o reator aeróbio pode ser completamente automatizado e otimizado. Estudos experimentais realizados no esgoto da Cidade de Campina Grande mostraram que o sistema é capaz de produzir um efluente com características comparáveis a obtida em um sistema de lodo ativado convencional (Guimarães, 2003).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre os custos de operação e investimento de um sistema de lodo ativado convencional e a de um sistema híbrido composto por um reator anaeróbio tipo UASB e um reator de bateladas sequenciais (RBS), simulando em cada sistema as condições ótimas para obter a uma mesma qualidade de efluente.

METODOLOGIA

Considerou-se um sistema anaeróbio-aeróbio composto de três unidades: um reator UASB, um tanque de armazenamento e um reator RBS e um sistema convencional constituído por um tanque de aeração, um decantador, um adensador e uma unidade para digestão do lodo de excesso. Os desenhos esquemáticos estão apresentados nas Figuras 1 e 2.

A simulação foi realizada de modo a obter um efluente tratado com as mesmas características físico-químicas em ambos os sistemas. A metodologia utilizada para simulação e otimização do sistema de lodo ativado convencional foi a proposta por Van Haandel & Marais (1999). Para o sistema UASB-RBS, aplicou-se o procedimento descrito por Guimarães (2003) que se baseia na combinação entre o modelo de Cavalcanti et al (2002) para o reator UASB e o modelo de Marais & Ekama (1976) para sistema de lodo ativado.

Admitiu-se um esgoto tipicamente doméstico com as características apresentadas na Tabela 1. Os valores das variáveis utilizados nos modelos estão listados na Tabela 2. Ao final do trabalho, é apresentado uma lista com o significado de cada parâmetro. Considerou-se, ainda, que as condições ambientais e operacionais favoreciam a nitrificação completa nos sistemas.

A análise de custos abordou os custos financeiros, resultado dos investimentos necessários para implementar o sistema de tratamento (construção, equipamentos, terreno, etc.), e os custos operacionais (energia, lodo, pessoal, operação e manutenção). A otimização consistiu em minimizar a função custo expressa por:

$$\text{CustoTotal} = \text{Custos de Investimento} + \text{Custos Operacionais}$$

A fim de comparar os custos operacionais e os custos de investimentos, este último foi transformado em custos financeiros correntes, com desembolso regular ao longo da vida útil do sistema admitindo uma vida útil de 20 anos para o sistema e uma taxa de juros de 8% ao ano.

Para o sistema convencional adotou-se uma idade de lodo de 5 dias visto que estudos anteriores relatam que, para a temperatura de 25°C esta condição permite que haja completa nitrificação do esgoto. Seguindo o procedimento descrito por Van Haandel & Marais (1999), determinou-se as concentrações de lodo no reator aeróbio que proporcionaram o menor custo de construção do reator e decantador e a concentração de lodo adensado que representavam menor custo de construção do adensador e digestor.

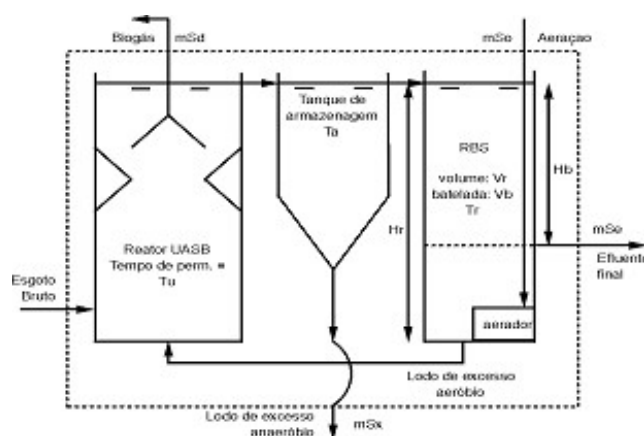
Para o sistema UASB-RBS as variáveis otimizadas foram a idade de lodo do reator UASB, a idade de lodo do reator de bateladas e o número de bateladas ótimos para o sistema. A Tabela 3 apresenta os dados financeiros utilizados na análise de custos.

Tabela 1: Características do esgoto utilizado nos processos de otimização

	Símbolo	Unidade	Valor
DQO afluente	S_{ta}	mg/L	600
Fração não biodegradável solúvel	f_{us}	--	0,09
Fração não biodegradável particulada	f_{up}	--	0,06
Concentração de Nitrogênio Nitrificável	N	mg/L	38

Tabela 2: Dados de entrada para simulação dos modelos

PARÂMETRO			UNIDADE	VALOR
μ_{max}	-	Taxa máxima específica de crescimento de Nitrosomonas	(d ⁻¹)	0,23
b_n	-	Constante de decaimento endógeno de Nitrosomonas	(d ⁻¹)	0,05
b_h	-	Constante de decaimento do lodo aeróbio ativo	(d ⁻¹)	0,29
f	-	Fração de lodo transformada em resíduo endógeno	(-)	0,2
f_v	-	Fração de lodo ativo	(-)	0,6
f_{cv}	-	Fator de conversão de sólidos em DQO	(mgDQO/mgSSV)	1,5
f_{up}	-	Fração de matéria orgânica não-biodegradável particulada	(-)	0,06
f_{us}	-	Fração de matéria orgânica não-biodegradável solúvel	(-)	0,09
k	-	Constante de sedimentação em zona	(L.g ⁻¹)	0,4
v_0	--	Constante de sedimentação em zona	(m.h ⁻¹)	8,3
V_b	-	Volume das bateladas adicionadas diariamente no RBS	(L)	4
V_r	-	Volume do reator RBS	(L)	7
X_{tu}	-	Concentração de lodo no UASB	(g.L ⁻¹)	25
Y_a	-	Coefficiente de crescimento de lodo aeróbio	(mgSSV/mgDQO)	0,45
Y_{an}	-	Coefficiente de produção de lodo anaeróbio	(mgSSV/mgDQO)	0,05
T	-	Temperatura	°C	25



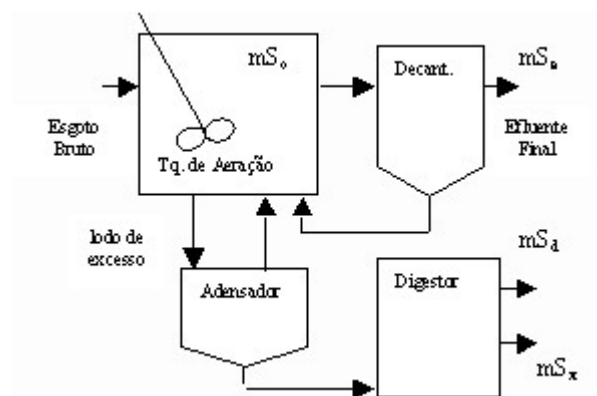


Figura 1: Lay-out do Sistema UASB-RBS

Figura 2: Lay-out do Sistema Convencional

Tabela 3: Índices de custo adotados

CUSTO	UNIDADE	VALOR
Construção	US\$.m ⁻³	140
Aeradores	US\$.kW ⁻¹	1000
Energia Elétrica	US\$.kWh ⁻¹	0,05
Destinação de Lodo	US\$.tTSS ⁻¹	20
Gerador de Energia	US\$. kW ⁻¹	1000

* Considerando 1US\$ = R\$ 3,00

RESULTADOS

Da totalidade de matéria orgânica que entra no sistema uma fração é oxidada, outra sai no efluente final e outra fração é transformada em lodo de excesso. As Figuras 3 e 4 mostram a divisão das frações da matéria orgânica afluyente em cada um dos sistemas: (1) mS_d , digerida no UASB ou no digestor de lodo, (2) mS_{xu} , transformada em lodo anaeróbio, (3) mS_o oxidada no RBS, (4) mS_{xa} transformada em lodo aeróbio e (5) mS_e , descarregada no efluente final.

Devido ao pré-tratamento anaeróbio, o consumo de oxigênio para oxidação da matéria orgânica no sistema UASB-RBS é muito menor que no sistema convencional: 55 % contra apenas 6% no sistema híbrido. Já a produção de lodo total não varia muito entre os dois sistemas: 21% no sistema UASB-RBS, ($mS_{xu} + mS_{xa}$), contra 22% no sistema convencional. Ainda assim, o sistema combinado torna-se mais vantajoso uma vez que tanto o lodo aeróbio quanto o anaeróbio são estabilizados dentro do próprio UASB, dispensando assim a presença de mais um reator (digestor de lodo) para executar tal função.

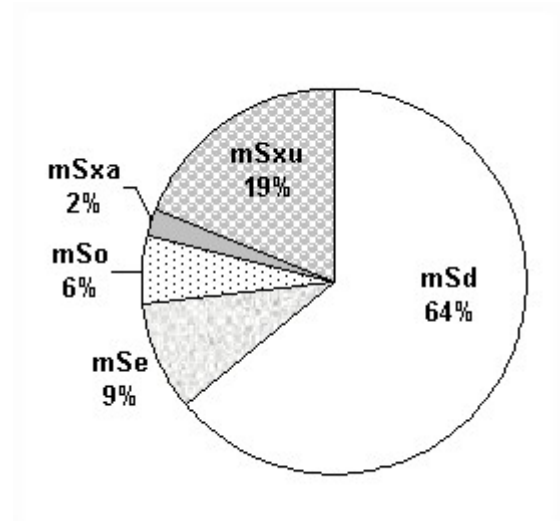


Figura 3: Divisão da matéria orgânica afluyente no sistema UASB-RBS

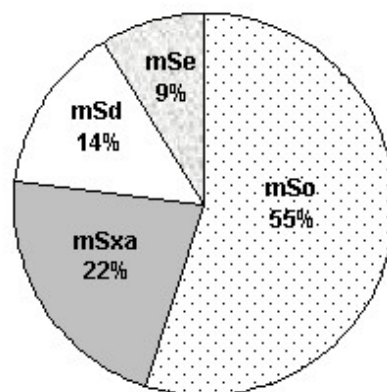


Figura 4: Divisão da matéria orgânica afluyente no sistema de lodo ativado convencional

Em ambos os casos, verifica-se na Tabela 4 que o custo financeiro é o fator preponderante no custo total, seguido pelo custo com pessoal. No entanto, ao optar pelo sistema combinado UASB-RBS tem-se um custo total de 0,039 US\$/m³ o que representa uma economia de mais de 50% comparado com os custos do sistema convencional.

A redução mais expressiva relaciona-se com o investimento na construção de reatores. Além de serem necessárias menos unidades, os volumes destas no sistema UASB-RBS são menores como se observada na Tabela 5. Supondo que o lodo formado apresente boas características de sedimentabilidade ($v_0 = 10$ m/h, $k = 0,41$ L/g), obtém-se que o volume total do sistema UASB-RBS, em m³ por m³/d de esgoto tratado, representa apenas 55% do volume total do sistema convencional.

Tabela 4: Custos otimizados para os sistemas convencional e UASB-RBS

Custo	UASB-RBS		Sistema Convencional	
	US\$/m ³	%	US\$/m ³	%
Financeiro	0,017	43	0,033	40
Energia	0,0024	6	0,015	18
Lodo	0,0027	7	0,0029	4
Pessoal	0,010	26	0,019	23
O e M	0,0070	18	0,013	15
Total	0,039	100	0,083	100

Tabela 5: Resultados dos volumes otimizados em cada sistema (m³/m³/d)

UASB-RBS		Sistema Convencional	
UASB	0,16 m ³	Tanque de Aeração	0,27 m ³
Tanque de Armazenamento	0,09 m ³	Decantador	0,18 m ³
RBS	0,11 m ³	Adensador de Lodo	0,03 m ³
		Digestor de Lodo	0,18 m ³
Volume Total	0,36 m³	Volume Total	0,66 m³

Com relação aos custos com energia para aeração, o sistema convencional é, disparadamente, a opção mais onerosa. Além disso, no sistema híbrido há a possibilidade de aproveitamento do biogás gerado no UASB para geração de toda a energia necessária durante a aeração no RBS. Considerando a concentração da DQO afluente de 600mg/L e a concentração de TKN afluente nitrificável (N_c) de 38 mg/L, a demanda total de oxigênio em cada um dos sistemas corresponderá a demanda para oxidação da matéria orgânica (MO_c) e nitrificação (MO_n) :

$$MO_T = MO_c + MO_n = mS_o \cdot S_{ti} + 4,57 \cdot N_c$$

$$MO_{T1} = 4,57 \cdot 42 + mS_o \cdot S_{ti} = 192 + 0,58 \cdot 600 = 540 \text{ mg/L (Sistema Convencional)}$$

$$MO_{T2} = 4,57 \cdot 42 + mS_o \cdot S_{ti} = 192 + 0,06 \cdot 600 = 228 \text{ mg/L (Sistema UASB-RBS)}$$

A demanda de oxigênio para nitrificação será a mesma nos dois sistemas, haja vista o reator anaeróbio não remover nutrientes. Já a demanda para oxidação de matéria orgânica no sistema UASB-RBS é irrelevante comparada ao sistema convencional.

Sabendo que 1 kg de CH_4 gerado a partir de 4 kg de DQO pode produzir 5 kWh de energia elétrica, então a energia gerada em kWh/kg DQO será:

$$Energia = CH_4 \text{ produzido} \cdot 5 = \frac{mS_d}{4} \cdot 5$$

A produção de metano no sistema UASB-RBS é de 0,16 Kg CH_4 /KgDQO e gera 0,8 kWh/kg DQO ou 0,48 kWh/m³ (0,8 kWh/kg * 0,6 kg DQO/m³). Em contrapartida, o sistema convencional tem um potencial de produção de metano de 0,035 Kg CH_4 /KgDQO que gera 0,175 kWh/kg DQO ou 0,105 kWh/m³. Considerando uma transferência de 1 kgO₂/kWh, obtém-se o seguinte balanço de energia nos sistemas:

UASB-RBS

$$Energia \text{ Produzida} = 0,48 \text{ kWh/m}^3$$

$$Demanda \text{ Energética} = 0,228 \text{ kWh/m}^3$$

$$Energia \text{ Disponível p/venda} = 0,252 \text{ kWh/m}^3$$

Sistema Convencional

$$Energia \text{ Produzida} = 0,105 \text{ kWh/m}^3$$

$$Demanda \text{ Energética} = 0,540 \text{ kWh/m}^3$$

$$Consumo \text{ de Energia} = 0,435 \text{ kWh/m}^3$$

Se no sistema convencional a energia produzida corresponde apenas a 24% da demanda total exigida, o sistema UASB-RBS produz mais que o dobro da energia demandada para oxidação da matéria orgânica e nitrogênio.

Quanto maior a idade de lodo no UASB, maior será a produção de metano. A Figura 5 mostra que a partir de $R_{su} = 10d$, o sistema torna-se auto-sustentável energeticamente. A energia gerada na queima do biogás é muito maior que a demanda de energia necessária para aeração no reator aeróbio.

Mesmo diante do potencial energético gerado na combustão do metano, o aproveitamento energético do gás gerado no reator anaeróbio nem sempre é uma prática comum. A Tabela 6 mostra o custo total dos sistemas, admitindo que não haja aproveitamento energético do metano. Ainda assim, o estudo mostra que, para uma mesma qualidade do efluente final, as vantagens inerentes ao tratamento anaeróbio (baixa produção de lodo, pequena área, baixa consumo de energia) aliada as vantagens do tratamento aeróbio (baixa concentração da material orgânico biodegradável e de sólidos em suspensão no efluente) fazem do sistema UASB-RBS uma opção tecnológica muito mais atrativa financeiramente que o sistema convencional.

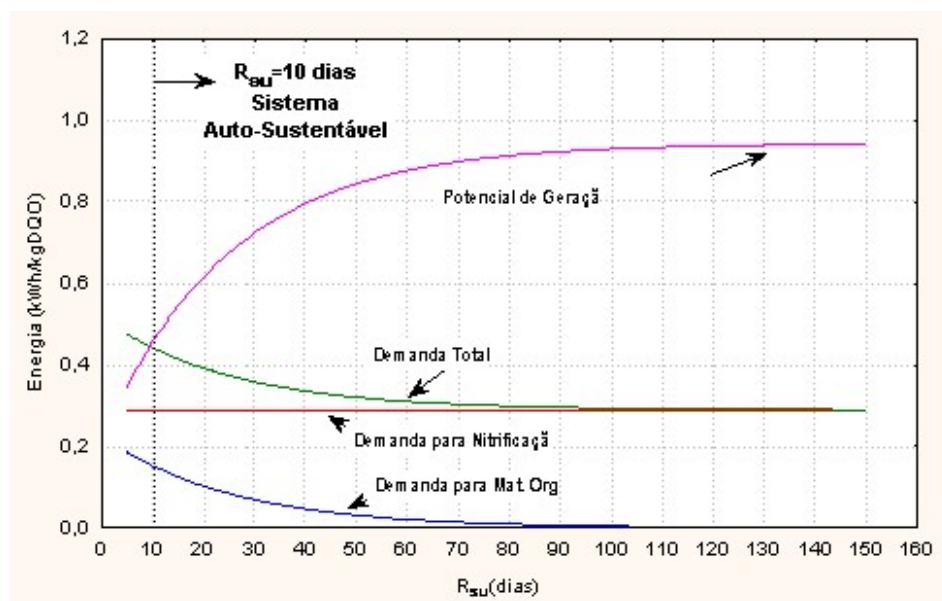


Figura 5: Energia produzida pela combustão e demanda energética do RBS em função da idade de lodo no UASB.

Tabela 6: Custo otimizado desconsiderando o aproveitamento do biogás

Custo	UASB-RBS		Sistema Convencional	
	US\$/m ³	%	US\$/m ³	%
Financeiro	0,017	36	0,033	38
Energia	0,0103	22	0,02	22
Lodo	0,0027	6	0,003	3
Pessoal	0,010	21	0,019	22
O e M	0,0070	15	0,013	15
Total	0,047	100	0,088	100

CONCLUSÕES

- Economicamente, o sistema UASB-RBS apresenta-se como uma alternativa mais atrativa quando comparada a um sistema de lodo ativado convencional. O custo total por m³ de esgoto tratado é menos que a metade daquele necessário no sistema convencional.
- O custo financeiro, ou seja o custo de construção dos reatores é o fator preponderante no custo total, seguido pelo custo com pessoal. O volume total do sistema UASB-RBS, em m³ por m³/d de esgoto tratado, representa apenas 55% do volume total do sistema convencional o que implica em uma redução expressiva com o investimento na construção de reatores.
- O sistema UASB-RBS é auto-sustentável energeticamente: a demanda de energia para aeração pode ser suprida pela combustão do CH₄ formado no reator UASB.

REFERÊNCIAS

- 1-CAVALCANTI P.F.F.;VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Influence of the phase separator design on the UASB reactor and on excess sludge production. In: 7th LATIN AMERICAN CONGRESS ON ANAEROBIC DIGESTION, 2002, Merida. **Trabalhos Técnicos...**México: 2002.
- 2-GUIMARÃES, P. *Modelagem e otimização de um sistema anaeróbio-aeróbio de tratamento de esgoto utilizando o reator UASB e o reator de bateladas seqüenciais*. 2003. 200f. Tese de doutorado – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN.
- 3-GUIMARÃES, P., MELO, H.N.S, CAVALCANTI, P.F.F & VAN HAANDEL, A. C. Anaerobic-aerobic sewage treatment using the combination UASB-SBR activated sludge. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 38 (11), 2633-2641, 2003.
- 4-MARAIS, G.R & EKAMA, G.A. The activated sludge process part I: Steady state behaviour. *Water SA*, p 163-200, 1976.
- 5-VAN HAANDEL, A.C. & MARAIS, G. O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projeto e operação. Campina Grande/PB: Epgraf, 1999.