

II-135 – MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS NO AUXÍLIO À SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS

José Lima de Oliveira Júnior ⁽¹⁾

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutor em Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Professor do Departamento de Engenharia Ambiental do Instituto Federal do Ceará (IFCE).

José Tavares de Sousa

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB.

Saionara Alexandre da Silva

Tecnóloga em Construção de Edifícios pelo Instituto Federal do Ceará – Campus Juazeiro do Norte (IFCE). Mestre em Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Professora Formadora da Escola Técnica Aberta do Brasil no Instituto Federal do Ceará (IFCE).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Plácido Aderaldo Castelo, 1646 – Planalto – Juazeiro do Norte - CE - CEP: 63.040-540 - Brasil - Tel: (88) 2101-5324 - e-mail: junior@ifce.edu.br

RESUMO

O gerenciamento baseado na descentralização tem sido progressivamente considerado nas decisões de implantação de estruturas sanitárias urbanas, podendo variar desde soluções muito simplificadas, como fossas e latrinas ecológicas, a sistemas mais sofisticados e efetivos dos pontos de vista sanitário e ambiental. Os sistemas anaeróbios e estações compactas anaeróbio-aeróbias com ou sem desinfecção do efluente são amplamente pesquisados para sistemas domésticos pelas características técnicas que aliam alta eficiência de remoção dos poluentes, somado à baixa produção de lodo a custos reduzidos.

O presente trabalho, desenvolvido em duas fases, apresenta a modelagem matemática de uma estação compacta anaeróbia / aeróbia realizada para compor o módulo de seleção de alternativas de tratamento descentralizado no contexto do Modelo de Avaliação de Alternativas de Tratamento Descentralizado de Esgotos – MAATE – I. Na primeira, o sistema de tratamento foi operado por nove meses e monitorado em termos dos parâmetros físico-químicos de DQO, sólidos e suas frações, e microbiológicos em termos de coliformes termotolerantes e ovos de helmintos. Na segunda fase, com base nos resultados obtidos na primeira fase, foram construídos os modelos matemáticos empíricos com base na regressão linear dos dados, com ajuste da curva pela minimização dos erros pelo método dos mínimos quadrados.

As diferenças máximas entre os resultados experimentais e modelados foram pouco significativas, variando na faixa de -0,62% e 2,64% para todos os parâmetros analisados. Apesar da diferença aparentemente inexpressiva entre os resultados modelados e experimentais, recomenda-se a calibração dos modelos com base em um maior número de dados, através de simulação de Monte Carlo e/ou nova campanha experimental no reator monitorado.

A modelagem matemática aplicada à estimativa da qualidade do efluente das associações de tratamento para alimentação do Modelo MAATE-I cumpriu o seu papel na pré-seleção de alternativas no processo de identificação da melhor solução de tratamento, ficando restrita à configuração unifamiliar em faixa restrita de TDH.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Matemática, Sistema Compacto, Tratamento Descentralizado, Esgoto Doméstico.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento baseado na descentralização tem sido progressivamente considerado nas decisões de implantação de estruturas sanitárias urbanas e rurais pelo menor aporte de recursos, além da sustentabilidade ecológica (BALKEMA *et al.*, 2002; MASSOUD *et al.*, 2009; TCHOBANOGLOUS e CRITES, 2003).

A abordagem descentralizada pode variar desde soluções muito simplificadas, como fossas e latrinas ecológicas, a sistemas mais sofisticados e efetivos dos pontos de vista sanitário e ambiental. Dependendo se o sistema descentralizado é de caráter residencial ou multi familiar, as tecnologias podem variar desde simples tratamento primário e disposição final no solo, indo do secundário ao terciário em algumas situações restritivas para lançamento do efluente em corpo receptor conforme legislação local (PARTEN, 2010).

Os sistemas anaeróbios e estações compactas anaeróbio-aeróbias com ou sem desinfecção do efluente são amplamente pesquisados para sistemas domésticos pelas características técnicas que aliam alta eficiência de remoção dos poluentes, somado à baixa produção de lodo a custos reduzidos (AL-SHAYAH e MAHMOUD, 2008; IVERY, 1996; SABRY, 2010).

No intuito de contornar o problema dos sistemas anaeróbios em atingir uma qualidade do efluente que atenda a certos padrões restritivos de lançamento e reuso, são empregadas tecnologias aeróbias como pós-tratamento de sistemas anaeróbios.

Algumas empresas, no Brasil, já oferecem um portfólio variado de estações anaeróbias seguidas por processos anaeróbios, a exemplo de países como a Austrália, Estados Unidos e Japão, os quais utilizam esse tipo de ETE há algum tempo, inclusive com normatização nacional (IVERY, 1996; USEPA, 2005; ICHINARI et al., 2008).

Os sistemas compactos agregam em uma única unidade reatores anaeróbios seguidos de aeróbios, podendo conter ainda um tratamento terciário por desinfecção. São amplamente utilizados internacionalmente, com emprego cada vez maior, porém ainda inexpressivo no Brasil, já que os sistemas compactos são mais empregados em sistemas descentralizados domésticos, embora ocorram no tratamento tanto de efluente industrial quanto hospitalar.

Diversos modelos capazes de auxiliar na escolha de sistemas de tratamento têm sido desenvolvidos. Entre eles destaca-se, no Brasil, o Sistema de Apoio à Decisão (SAD) do Projeto PROSAB (CHERNICHARO *et al.*, 2001), além de outras iniciativas internacionais como o SANEXTM (LOETSCHER e KELLER, 2002) e o WAWTTAR - (*Water and Wastewater Treatment Technologies Appropriate for Reuse*), não obstante sejam constatadas limitações dado o elevado grau de especificidade para determinadas condições, muitas vezes não compatíveis no tratamento de esgoto sanitário municipal (OLIVEIRA, 2004).

O presente trabalho, desenvolvido em duas fases, apresenta a modelagem matemática de uma estação compacta anaeróbia / aeróbia realizada para compor o módulo de seleção de alternativas de tratamento descentralizado no contexto do Modelo de Avaliação de Alternativas de Tratamento Descentralizado de Esgotos – MAATE – I (OLIVEIRA JR., 2014). Na primeira, o sistema de tratamento foi operado por nove meses e monitorado em termos dos parâmetros físico-químicos de DQO, sólidos e suas frações, e microbiológicos em termos de coliformes termotolerantes e ovos de helmintos. Na segunda fase, com base nos resultados obtidos na primeira fase, foram construídos os modelos matemáticos empíricos com base na regressão linear dos dados, com ajuste da curva pela minimização dos erros pelo método dos mínimos quadrados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da modelagem, o sistema compacto de tratamento unifamiliar foi operado e monitorado em termos da qualidade do efluente, quanto à remoção de DQO, Sólidos Suspensos, Coliformes Termotolerantes e Ovos de Helmintos. A operação abrangeu o período entre julho de 2011 e abril de 2012. As duas fases de trabalho serão descritas a seguir:

PRIMEIRA FASE: OPERAÇÃO DO SISTEMA

O sistema compacto ECO1 foi operado durante nove meses. O experimento foi realizado nas dependências da Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgoto Sanitário -EXTRABES/UEPB localizada na cidade de Campina Grande- PB. O esgoto bruto era captado do interceptor da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA para um poço úmido de onde era recalcado por bomba submersa de eixo vertical $P = 1/2$ CV, até um reservatório com volume de 1.000 litros.

O esgoto era, então, recalcado através de bomba centrífuga de eixo horizontal $P=1/4CV$ com vazão média de $30L.min^{-1}$ através de tubos de PVC de 25 mm até um segundo reservatório de 250 litros alimentando o sistema por gravidade. O recalque era controlado por temporizadores de barramento a fim de simular um hidrograma unifamiliar. Na Tabela 1 apresentam-se os parâmetros de operação do sistema experimental.

Tabela 1 – Parâmetros de operação dos sistemas experimentais

Sistemas de tratamento unifamiliar operados	Vazão $L.dia^{-1}$	Volume m^3	T. A. S. $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$	C.O.V. $kgDQO.m^{-3}.dia^{-1}$
Estação Compacta (ECO1)				
UASB braço "W" interno	285	0,28	-	0,46
Filtro Anaeróbico interno		0,31	-	0,17
Filtro de Areia interno		0,11	1,25	0,64

T.A.S.: Taxa de Aplicação Superficial; C.O.V.: Carga Orgânica Volumétrica.

O sistema foi operado em condições domésticas rurais de baixa vazão com médias diárias de 285 Litros. dia^{-1} . A Figura 1 apresenta o reator monitorado.



Figura 1: Sistema compacto de tratamento em escala unifamiliar monitorado para modelagem dos parâmetros (vista lateral e superior, em estágio de montagem)

As análises foram realizadas conforme recomendações do APHA (2005). Os resultados das análises foram submetidos a dois métodos estatísticos: (1) estatística descritiva de distribuição; (2) análise de variância fator único (ANOVA), com nível de significância de 5% (SOKAL e ROHLF, 1981). Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros analisados.

Tabela 2: Parâmetros analisados com suas respectivas frequências, métodos e referências.

Análises	Frequência	Método	Referências
DQO (mgO_2/L)	Semanal	Titulométrico	APHA (2005)
ST e frações (mg/L)	Semanal	Gravimétrico	APHA (2005)
Coliformes Termotolerantes	Quinzenal	Membrana filtrante	APHA (2005)
Ovos de Helminths	Quinzenal	Sedimentação	BAILINGER (1996)

RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE

A Estação Compacta ECO1, composta por sistemas anaeróbios seguido de aeróbio, apresentou expressiva remoção de matéria orgânica em termos de DQO e sólidos suspensos totais, com médias efluentes, respectivamente de $58 \pm 24 mg.L^{-1}$ e $7 \pm 5 mg.L^{-1}$.

O sistema ECO1 apresentou concentrações efluentes de coliformes termotolerantes da ordem de $9,54 \times 10^4 UFC.100 mL^{-1}$, com redução aproximada de 2 unidades log, sem contudo, atingir aos padrões e recomendações para o reuso de águas residuárias na agricultura familiar sem necessidade de desinfecção (USEPA, 2012; WHO, 2006).

Relativamente à concentração de ovos de helmintos (OH) no efluente, o reator ECO1 apresentou concentração menor do que 1 ovo.L⁻¹, atendendo à recomendação da OMS para irrigação irrestrita (WHO, 2006). A Tabela 3 apresenta comportamento do sistema ECO1 durante o período de monitoramento na fase estacionária, em termos da remoção de parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

Tabela 3: Comportamento do sistema experimental compacto monitorado

Parâmetros		Esgoto		
		Bruto	ECO 1	n
Matéria Orgânica	DQO _{total}	443±99	58±24	1
	mg.L ⁻¹			2
	DQO _{filtrada}	201±23	51±23	1
	mg.L ⁻¹			2
	SST	173±47	7±5	2
	mg.L ⁻¹			4
	SSV	122±32	5±4	2
	mg.L ⁻¹			5
Patógenos	CTT	4,90E+06	9,54E+04	1
	UFC.100mL ⁻¹			0
	OH	155±19	ND	9
	ovos.L ⁻¹			
ECO1: Estação Compacta Anaeróbia/Aeróbia; N : número de determinações ND: Não detectado				

SEGUNDA FASE: MODELAGEM MATEMÁTICA

Os resultados obtidos pela operação dos sistemas foram aplicados à construção de modelos matemáticos empíricos com base na regressão linear simples dos dados, com ajuste da curva pela minimização dos erros pelo método dos mínimos quadrados (JØRGENSEN; BENDORICCHIO, 2001; SOETAERT; HERMAN, 2009).

O objetivo da modelagem matemática foi alimentar um modelo de avaliação de alternativas de tratamento de esgotos – MAATE - I, para o auxílio à tomada de decisão de seleção de alternativas de tratamento descentralizado de esgotos domésticos para fins de reuso na agricultura (OLIVEIRA JR., 2014). A fase de modelagem matemática se deu em duas etapas. A Tabela 4 apresenta o detalhamento das etapas dentro das fases da pesquisa.

Tabela 4: Detalhamento das etapas da pesquisa dentro de cada fase.

FASES DA PESQUISA	DISCRIMINAÇÃO DAS ATIVIDADES	
	1a. Etapa	2a. Etapa
1a. Fase - Parametrização dos Modelos	Revisão de Literatura	-
2a. Fase - Modelagem Matemática	Construção do Modelo	Ajuste do modelo

RESULTADOS DA SEGUNDA FASE

Os resultados da modelagem em relação aos dados experimentais mostraram-se dentro da faixa de desvio padrão. A Estação Compacta ECO1, composta por sistemas anaeróbios seguido de aeróbio, apresentou excelente remoção de matéria orgânica em termos de DQO e sólidos suspensos totais, com médias efluentes, respectivamente de $58 \pm 24 \text{ mg.L}^{-1}$ e $7 \pm 5 \text{ mg.L}^{-1}$, enquanto a modelagem da remoção de DQO e sólidos estimou o efluente do sistema com valores respectivamente de 58 mg.L^{-1} e $8,1 \text{ mg.L}^{-1}$, com diferenças absolutas respectivas de 2,64% e -2,53%.

No que diz respeito à qualidade sanitária do efluente, o sistema ECO1 apresentou concentrações efluentes de coliformes termotolerantes da ordem de $9,54 \times 10^4 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$, com redução aproximada de 2 unidades log, sem contudo, atingir os padrões para o reuso de águas residuárias para a agricultura familiar sem necessidade de desinfecção (USEPA, 2012; WHO, 2006). Já em termos de ovos de helmintos (OH), o reator ECO 1 apresentou resultado não detectável, isto é, menor do que 1 ovo.L^{-1} , atendendo aos padrões da OMS para irrigação irrestrita (WHO, 2006).

A Tabela 5 apresenta os modelos matemáticos empregados para o reator ECO1 em termos da remoção de parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

Tabela 5: Modelagem dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos do sistema ECO1

Parâmetro	Módulo de remoção na Estação Compacta		
	UASB Duplo Y	Filtro Anaeróbio	Filtro de Areia
DQO _{total}	-	-	$DQO_{ef} = DQO_{eb} - (DQO_{eb} - 58.25)$
SST	-	-	$SST_{ef} = SST_{eb} - (0.953 \times SST_{eb})$
SSV	-	-	$SSV_{ef} = SSV_{eb} - (0.961 \times SSV_{eb})$
Modelagem dos parâmetros de remoção microbiológicos			
CTT	$CTT_{ef} = CTT_{eb} - (0.9853 \times CTT_{eb} - 822.921)$	$CTT_{ef} = CTT_{uasb} - (0.1714 \times CTT_{uasb}^{1,1019})$	$CTT_{ef} = CTT_{fan} - (0.600 \times CTT_{fan} + 12.786)$
OH	-	-	$OH_{ef} = OH_{eb} - (0.9982 \times OH_{eb}^{1,0003})$
DQO _{ef} : DQO efluente; DQO _{eb} : DQO esgoto bruto; SST _{ef} : SST efluente; SST _{eb} : SST esgoto bruto; CTT _{ef} : CTT efluente; CTT _{uasb} : CTT proveniente do UASB; CTT _{fan} : CTT proveniente do Filtro anaeróbio; O _{heb} : Ovos de Helmintos no esgoto bruto			

Para o efluente modelado, as concentrações efluentes para coliformes termotolerantes e ovos de helmintos foram, respectivamente de $9,68 \times 10^4 \text{ UFC.100 mL}^{-1}$ e 0 ovo.L^{-1} , com respectivas diferenças máximas observadas de 1,48% e -0,62%, igualmente dentro faixa de desvio padrão dos dados experimentais.

A Tabela 6 apresenta os resultados do comportamento do sistema experimental e da modelagem matemática do reator ECO1.

Tabela 6 – Remoção de parâmetros físico-químicos e microbiológicos no sistema experimental.

Parâmetros		Esgoto Bruto	Resultado experimental		Efluente Modelado	Diferença Máxima %
			ECO 1	n		
Matéria Orgânica	DQO _{total} mg.L ⁻¹	443±99	58±24	12	58	2,64
	DQO _{filtrada} mg.L ⁻¹	201±23	51±23	12	-	-
	SST mg.L ⁻¹	173±47	7±5	24	8,1	-2,53
	SSV mg.L ⁻¹	122±32	5±4	25	4,4	0,58
Patógenos	CTT UFC.100mL ⁻¹	4,90E+06	9,54E+04	10	9,68E+04	1,48
	OH ovos.L ⁻¹	155±19	0	9	0	-0,62

ECO1: Estação Compacta Anaeróbia/Aeróbia;

n = número de determinações.

CONCLUSÕES

A modelagem matemática aplicada à estimativa da qualidade do efluente das associações de tratamento para alimentação do Modelo MAATE-I cumpriu o seu papel na pré-seleção de alternativas no processo de identificação da melhor solução de tratamento.

As diferenças máximas entre os resultados experimentais e modelados foram pouco significativas, variando na faixa de -0,62% e 2,64% para todos os parâmetros analisados. Apesar da diferença aparentemente inexpressiva entre os resultados modelados e experimentais, recomenda-se a calibração dos modelos com base em um maior número de dados, através de simulação de Monte Carlo e/ou nova campanha experimental no reator monitorado.

Recomenda-se a investigação do comportamento do sistema ECO1 mediante reconfiguração da sua planta de tratamento, de modo a aumentar a área superficial e a profundidade do filtro intermitente de areia, a fim de reduzir a elevada taxa de aplicação superficial, para a construção de modelagem matemática da estimativa da qualidade do efluente em termos de Nitrogênio e Fósforo.

A aplicação da modelagem do efluente do reator ECO1 ficou restrita à configuração unifamiliar em faixa restrita de TDH, sendo necessárias outras pesquisas para modelagem com base na variação dos parâmetros operacionais, permitindo, assim, maior flexibilidade do modelo na abordagem comparativa de sistemas multifamiliares e unifamiliares.

Sugere-se, ainda, proceder à adaptação e calibração dos modelos de remoção do sistema ECO1 reconfigurado, a partir de modelagens disponíveis na literatura com base na variação do regime operacional, em termos de TDH e temperatura de operação do reator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-SHAYA, H. M.; MAHMOUD, N. Start-up of an UASB-septic tank for community on-site treatment of strong domestic sewage. *Bioresource Technology* 99 (2008) 7758-7766. Doi: 10.1016/j.biortech.2008.01.061.

2. APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23th Editions. Washington, 2005.
3. _____. NBR 07229:1993. Projeto, construção e operação de tanques sépticos. Rio de Janeiro: ABNT. Norma técnica. p. 15.
4. _____. NBR 13969:1997. tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT. Norma técnica. p. 15.
5. BAILENGER, J. Mechanisms of parasitological concentration in coprology and their practical consequences. J. Am. Med. Technol. 41 apud Ayres R & Mara D. Analysis of wastewater for use in agriculture. A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques. Geneva: WHO, pp. 65-71, 1996.
6. BALKEMA, A.; PREISIG, H. A.; OTTERPOHL, R.; LAMBERT, F. J. D. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. Urban Water. volume 4, Issue 2, 2002. pp. 153-161.
7. CHERNICHARO, C.A.L. (Coord.) Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
8. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Censo demográfico. 2010. disponível em: <<http://www.ibge.com.br/censo2010.htm>> acesso em 23.09.2011.
9. IVERY, G. Aerobic treatment units (ATUs): Appropriate technology for on-site wastewater treatment and re-use. Elsevier: Desalination. (1996). v. 1. 06: 295-303.
10. JØRGENSEN, S. E. ; BENDORICCHIO, G. Fundamental of ecological modeling. 3th. Edition. Oxford. Elsevier Science Ltd: 2001. 543p. ISBN: 0-080-44015-0 (hardbound edition).
11. LOETSCHER, T. Working with you towards appropriate water supply and sanitation. Disponível em: <<http://www.decisionscape.com.au/>>. Acesso em: 17 ago. 2011.
12. MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NARS, J. A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. Elsevier: Journal of Environmental management. 90 652-659, 2009.
13. OLIVEIRA, S. V. W. B. Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário. 2004. 293 f. Tese (Doutorado em Administração) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
14. OLIVEIRA JR., J. L. de. Modelo de avaliação de alternativas de tratamento descentralizado de esgoto doméstico para pequenas comunidades. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande - PB. 2014. 208p.
15. PARTEN, S. M. Planning and installing sustainable onsite wastewater systems. McGraw Hill. USA, 2010. 412 p. Il. ISBN 978-0-07-162463-3.
16. SABRY, T. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing Up flow Septic Tank/Baffled Reactor (USBR) in developing countries. Elsevier: Jornal of Hazardous Materials. 0304-3894. 2009. pp. 501 - 505.
17. SOETAERT, K.; HERMAN, P. M. J. A Practical Guide to Ecological Modeling. Using R as a Simulation Platform. Netherlands Institute of Ecology. Uerseke: Springer Science + Business Media. 2009. 376p. il. ISBN:978-4020-8623-6.
18. SOKAL R. R. e ROHLF F. J. BIOMETRY – The Principles and Practice of Statistic in Biological Research. 2nd edition. 1981. San Francisco: W.H. Freeman and Company. 634p
19. SOUSA, M. A. A. Análise tecnológica de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: resultados da avaliação multiobjetivo. In: 21. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais...2001. Rio de Janeiro: ABES.
20. TCHOBANOGLOUS, G.; CRITES, R. (Eds.). Wastewater Engineering (Treatment Disposal Reuse), fourth ed. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hill: 2003 NY.
21. USEPA. United States Environmental protection agency. 2012 Guidelines for Water reuse. USEPA: EPA No. 600-R-12/618 September 2012. Cópia eletrônica. disponível em: <www.epa.gov.owm>.
22. _____. United States environmental protection agency. Handbook for Managing Onsite and Clustered (Decentralized) wastewater treatment systems. An introduction to management tools and information for implementing EPA's Management guidelines. 2005. USEPA: EPA No. 832-B-05-001. Cópia eletrônica. disponível em: <www.epa.gov.owm/onsite>.
23. WHO. World Health Organization. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Grey water: Wastewater in Use in Agricultural. v. II. 2006. 630p.