



Estudo experimental de aspectos hidrodinâmicos e da partida de um reator anaeróbio sequencial tratando esgotos domésticos (doi:10.4136/ambi-agua.108)

Herlane Costa Calheiros¹; Ana Carolina Silveira Perico²; Camila Fernandes Nunes²

¹IRN - Instituto de Recursos Naturais - UNIFEI
E-mail: h2c@unifei.edu.br

²UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá
E-mail: carolperico@yahoo.com.br; camila_unifei@yahoo.com.br

RESUMO

É importante a previsão de sistemas individuais de esgotamento sanitário para comunidades peri-urbanas ou rurais a fim de minimizar os impactos sobre o ambiente e a saúde humana causados pelo lançamento de efluentes *in natura* em cursos d'água. Neste contexto, a digestão anaeróbia de efluentes tem sido uma das principais tecnologias consideradas, tendo como seus principais alavancadores, a sua fácil implementação, possibilitando a minimização de insumos de processo, bem como a redução na geração de resíduos. O objetivo deste trabalho foi estudar um Reator Anaeróbio Sequencial (RAS): suas características hidrodinâmicas, percentual de inóculo a ser aplicado e partida do reator. Concluiu-se que o tipo de escoamento é disperso com 3,84% de zonas mortas; a proporção de 20% de inóculo foi a que proporcionou melhores resultados; no entanto, devido ao elevado teor de fibras do esterco bovino, não se recomenda o seu uso como inóculo; o sistema de RAS, composto por quatro câmaras, apresentou um bom desempenho, ao tratar esgotos sanitários de uma comunidade rural, com relação à remoção de matéria orgânica em termos de DQO, turbidez e sólidos atendendo, com relação a estes parâmetros, aos padrões Federal e do Estado de Minas Gerais de lançamento de efluente em corpos d'água, mesmo ainda estando em fase transiente de operação e operando em temperaturas abaixo de 20°C. Contudo, os efluentes do RAS não podem ser lançados em corpos d'água sem que outros parâmetros como nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, entre outros sejam investigados e enquadrados aos referidos padrões.

Palavras-chave: Esgoto sanitário; reator anaeróbio compartimentado; hidrodinâmica; inoculação.

Experimental study of hydrodynamic and operation start of a baffled anaerobic reactor treating sewage

ABSTRACT

It is important to provide individual sanitation systems for sewage peri-urban communities or rural areas to minimize impacts on the environment and human health caused by sewage discharge *in natura* into water resources. In this context, the anaerobic digestion of effluent has been one of the main considered technologies due to easy implementation, material minimization and reduction in waste production. The objective of this work was to study a Baffled Anaerobic Reactor (BAR) including its hydrodynamic characteristics, percentile of inoculum to be applied and reactor operation start. It was concluded that the flow is dispersed with 3.84% of dead spaces and that 20% of the cow manure provided best results; however, due to the high fiber content of the manure, its use is not recommended as inoculum. The BAR system, composed of four chambers, presented good performance for

sewage treatment of a rural community in terms of organic substance removal (COD), turbidity and solids meeting effluent disposal standards of these parameters considering the Federal and Minas Gerais State legislation, in Brazil, even in a transient phase of operation, at temperatures below 20°C. However, the effluents from the BAR can't be released into water bodies without other parameters such as nitrogen, phosphorus, fecal coliforms, and others are investigated to be conforming to those standards.

Keywords: Sewage; baffled anaerobic reactor; hydrodynamic; inoculation.

1. INTRODUÇÃO

O reator anaeróbio sequencial ou compartimentado (RAS ou RAC) é semelhante a um tanque séptico modificado com múltiplas câmaras em série. A água residuária se movimenta de forma sequencial descendente e ascendente quando passa de uma câmara para a outra, aumentando o contato do líquido com a biomassa presente no fundo da unidade.

Barber e Stuckey (1999) fizeram um revisão de literatura sobre o desenvolvimento, a aplicabilidade e as futuras aplicações possíveis de um reator anaeróbio compartimentado (RAC) no tratamento de esgotos. Eles constataram que esse tipo de reator tem sido utilizado desde a década de 80 e apresentam várias vantagens quando comparado com o reator anaeróbio tipo manta de lodo e o filtro anaeróbio, entre elas estão: melhor resistência a cargas de choque orgânicas e hidráulicas, maior tempo de retenção da biomassa, menor produção de lodo e habilidade de fazer separação parcial entre as várias fases do catabolismo anaeróbio. Isso causa um deslocamento das populações bacterianas proporcionando maior proteção contra materiais tóxicos e aumentando sua resistência a mudanças das condições ambientais como pH e temperatura. A estrutura física de um RAC permite alterações como, por exemplo, a inserção de um estágio de polimento aeróbio, proporcionando ao sistema a capacidade de tratar esgotos difíceis que, geralmente, requerem várias unidades e, assim, sua utilização pode reduzir custos importantes.

Langenhoff et al. (2000) estudaram a partida e o comportamento hidrodinâmico de quatro reatores anaeróbios compartimentados tratando esgotos coloidais e solúveis, com demanda química de oxigênio (DQO) de 500 mg.L⁻¹, e variando o tempo de detenção hidráulica (TDH). O reator possuía 10L e 8 compartimentos. A partida dos quatro reatores foi realizada com TDH de 80 horas e a temperatura de 35°C, no entanto, o TDH eventualmente foi reduzido para 6 horas. Em todos os TDH testados, a eficiência de remoção de DQO foi maior que 80 %. Testaram em um dos reatores o TDH de 1,3 horas durante 2 dias e verificaram que a eficiência de remoção de DQO foi de 40%. Observaram que a formação de produtos microbianos solúveis foi maior em reatores alimentados com material coloidal, possivelmente devido à solubilidade e a composição deste esgoto, apresentando diminuição na remoção de DQO quando comparado com os esgotos solúveis. Aparentemente, a diferença entre a qualidade da biomassa usada não influenciou na formação dos produtos microbianos solúveis (PMS). Quanto mais o TDH era reduzido, mais PMS eram produzidos. Bioensaios anaeróbios foram empregados para avaliar a atividade da biomassa para os diferentes esgotos e sua biodegradabilidade. Os resultados apontaram que a atividade inicial tanto para os esgotos coloidais quanto para os esgotos solúveis foi da mesma ordem de grandeza, ou seja, a hidrólise dos sólidos não limitou a eficiência e a extensão da degradação. Do estudo da hidrodinâmica dos reatores, os autores notaram pequena diferença no tipo de fluxo e nos espaços mortos para as diferentes condições testadas e concluíram que os espaços mortos foram em média de 20 a 37% e o fluxo no interior dos reatores ficou entre o fluxo pistonado e o fluxo tipo mistura completa ideal.

O desenvolvimento de reatores anaeróbios mais eficientes requer uma compreensão maior da interação entre as populações bacterianas que compõe a biomassa. Por esse motivo, Uyanik et al. (2002) avaliaram a influência da adição de polímero na formação de grânulos de lodo e compara a ecologia da biomassa em cada compartimento dos dois RAC, um reator com polímero e o outro como controle, tratando esgotos de fábrica de sorvete. A pesquisa desenvolvida por Uyanik et al. (2002) é a primeira que caracteriza a microbiologia das bactérias acidogênicas e metanogênicas em cada compartimento de um RAC. O reator com polímero apresentou grânulos maiores e mais densos que os do reator de controle, indicando que a adição de polímero contribuiu para a retenção de biomassa ativa no interior do reator. A fração média de bactérias metanogênicas autofluorescente foi menor nos primeiros compartimentos (com 1,5 %) comparados ao último compartimento que teve 15 %, mostrando que cada compartimento possui uma composição microbiana única. A separação espacial parcial das bactérias anaeróbias foi verificada com as bactérias acidogênicas, predominantes nos primeiros compartimentos, e as bactérias metanogênicas, predominantes nos compartimentos finais. Os resultados revelaram que as bactérias dominantes no primeiro e segundo compartimento eram aquelas que consomem H_2/CO_2 e formato como substrato, isto é, *Methanobrevibacter* e *Methanococcus* e, no terceiro e quarto compartimento, as populações que consomem acetato, isto é, *Methanosaeta* e *Methanosarcina*. Além disso, pareceu a Uyanik et al. (2002) que existe uma estrutura estratificada de gêneros bacterianos presente no interior dos grânulos.

Vossoughi et al. (2003) avaliaram o efeito da razão DQO/SO₄ na performance de um RAC. Esgotos sintéticos (DQO de 3000 mg.L⁻¹) foram usados como o único substrato orgânico. O tempo de detenção hidráulico empregado foi de 1 dia e a temperatura mantida em 35°C. Os resultados desse estudo mostraram que quando a razão DQO/SO₄ foi alterada de 16,7 para 6, aumentando a concentração de sulfato de 180 para 500 mg.L⁻¹, houve um pequeno aumento na remoção de DQO. Esse fenômeno indicou que tanto as bactérias metanogênicas quanto as bactérias redutoras de sulfato poderiam existir no sistema como sintrofismo. As maiores remoções de DQO e sulfato foram 86 e 97%, respectivamente, onde mais de 65% desta remoção ocorreu no primeiro compartimento. Sob elevada concentração de sulfato, a maior conversão não aconteceu no primeiro compartimento, conseqüentemente, foi deslocada para outro compartimento.

Yang et al. (2004) investigaram o comportamento e as características microbiológicas de um RAC, com cinco compartimentos, em escala de laboratório, usando esgotos sintéticos. Os resultados experimentais mostraram que dos ácidos graxos voláteis (AGV), o acetato é o principal responsável pela degradação acidogênica da glicose. A concentração de AGV diminuiu longitudinalmente no reator. As análises da composição do biogás revelaram que, com o passar do tempo, a concentração de metano aumentou continuamente do primeiro ao quinto compartimento, enquanto o teor de hidrogênio diminuiu nos primeiros compartimentos. Não foi detectado hidrogênio nos dois últimos compartimentos. A produção de metano foi diferente em cada compartimento, indicando que o consórcio de bactérias anaeróbias de cada compartimento foi desenvolvido de acordo a disponibilidade de substrato e as condições ambientais específicas. Yang et al. (2004) concluíram que o RAC tem potencial para produzir elevadas eficiências em situações de carga orgânica elevada, condições ambientais extremas e onde haja compostos inibidores.

Krishna et al. (2008) estudaram o tratamento de esgoto por 600 dias, com DQO de 500 mg/L, em um RAC de 10 litros com oito compartimentos, em escala de laboratório, sob temperatura de 20 a 32°C. A unidade de tratamento foi operada em tempos de detenção hidráulica de 20, 15, 10, 8 e 6 horas. Com carga orgânica de 0,6, 0,8, 1,2, 1,5 e 2 kgDQO.m⁻³.dia⁻¹. Os autores concluíram que: (a) a remoção de matéria orgânica diminuiu com o aumento da carga orgânica; (b) mas, mesmo o reator operando com carga máxima de

2 kg.m⁻³.dia⁻¹, tanto a taxa de remoção de DQO quanto a de DBO excederam 88%; (c) houve maior remoção de matéria orgânica particulada que solúvel; (d) quanto maior a carga orgânica, mais importante se torna a quantidade de compartimentos para que haja uma remoção eficiente de matéria orgânica; (e) a hidrólise e a acidogênese foram as principais atividades bioquímicas que ocorreram nos primeiros compartimentos; (f) com base em estudos com o traçador cloreto de lítio, aplicado em forma de pulso na concentração 10 mgLi⁺.L⁻¹, detectaram 23 a 34% de zonas mortas no reator e o tipo de escoamento foi classificado com intermediário entre pistonado e mistura completa, no entanto devido a configuração típica do reator o escoamento tende a ser mais próximo ao tipo pistão mesmo nos tempos de detenção menores; (g) o RAC foi capaz de suportar os tipos de cargas de choque geralmente vivenciadas em estações de tratamento de esgotos.

Um RAC retangular, com volume útil de 17 litros, composto por seis câmaras preenchidas com esferas de bambu de 1,5 cm, alimentado com esgoto sintético foi estudado por Feng et al. (2009). Eles investigaram os efeitos da carga orgânica (DQO de 300 e 600 mg.L⁻¹) e da temperatura (10, 18 e 28°C). As relações entre pH, DQO, teor de sólidos suspensos, ácidos graxos voláteis e atividade do biofilme aderido ao bambu através do teste *TTC-DHA* (*triphenyl tetrazolium chloride-dehydrogenase activity*). Eles observaram uma variação no pH de 6,5 a 7,5; a eficiência de remoção de DQO foi de 91% com uma concentração de sólidos suspensos no efluente de 15 mg.L⁻¹ sob temperatura de 28°C e alimentado com carga orgânica de 600 mg.L⁻¹. A concentração de ácidos graxos efluente aumentou com a redução da temperatura. A atividade da biomassa aderida foi maior que a biomassa floculada em baixas taxas de alimentação de matéria orgânica, os resultados foram o oposto em altas concentrações de alimentação. Os microrganismos com menores atividades mas com elevada resistência a cargas de choque predominaram na primeira câmara. Desta forma, concluíram que o reator estudado possui alta resistência a cargas de choque e adaptabilidade a variações de temperatura.

Verifica-se que o potencial do RAC é inquestionável, conquanto sua eficiência esteja intimamente relacionada às condições ambientais em que está submetido. Nesta pesquisa estudou-se um RAC composto por quatro câmaras com o objetivo de avaliar suas características hidrodinâmicas, utilizando solução de cloreto de sódio como traçador, o percentual de inóculo a ser aplicado e acompanhar a partida do reator durante dois meses, monitorando os seguintes parâmetros: temperatura, potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais, suspensos, voláteis e sedimentáveis, turbidez e oxigênio dissolvido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Montagem experimental

A instalação experimental foi construída em área rural do Município de Itajubá, nas dependências do Campus Avançado da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, onde se encontra a pequena central hidroelétrica Luiz Dias que está localizada no rio Lourenço Velho, na sub-bacia hidrográfica do rio Sapucaí, bacia do Rio Grande, a 18 km do Campus Universitário Professor José Rodrigues Seabra, também da UNIFEI. No Campus Avançado da UNIFEI existe o Parque de Alternativas Energéticas para o Desenvolvimento Auto-sustentável - PAEDA, onde se disponibiliza instalações e equipamentos para demonstração e informações sobre as diversas fontes de energias renováveis (solar, eólica, biomassa, biogás, hídrica e dendroenergia), funcionando como fonte de aprendizado e informação para toda a sociedade.

A instalação experimental é composta por unidade de tratamento preliminar (caixa de cimento contendo tela e vertedor triangular) seguida por um sistema de reatores anaeróbios seqüenciais (Figuras 1 e 2) que, recebe os esgotos oriundos de pontos de apoio da usina, foi construído em escala real e é composto basicamente por quatro caixas d'água de polietileno de 1000 L cada uma, dispostas em série interligadas por tubulações em PVC. O volume útil de cada reator é 862,37 L.

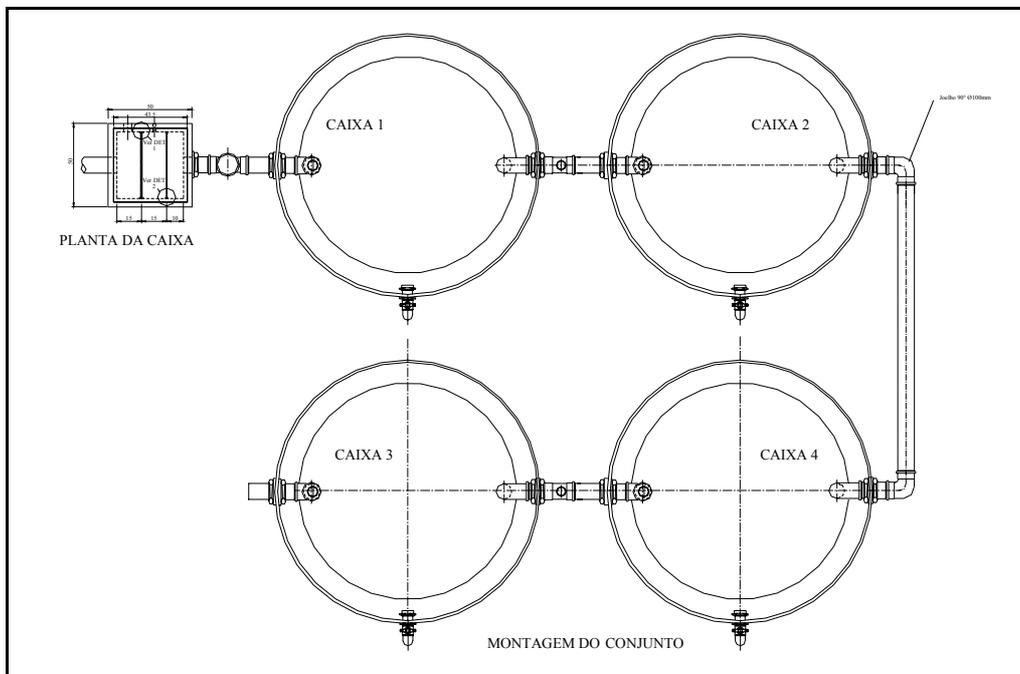


Figura 1. Planta baixa da Instalação Experimental.

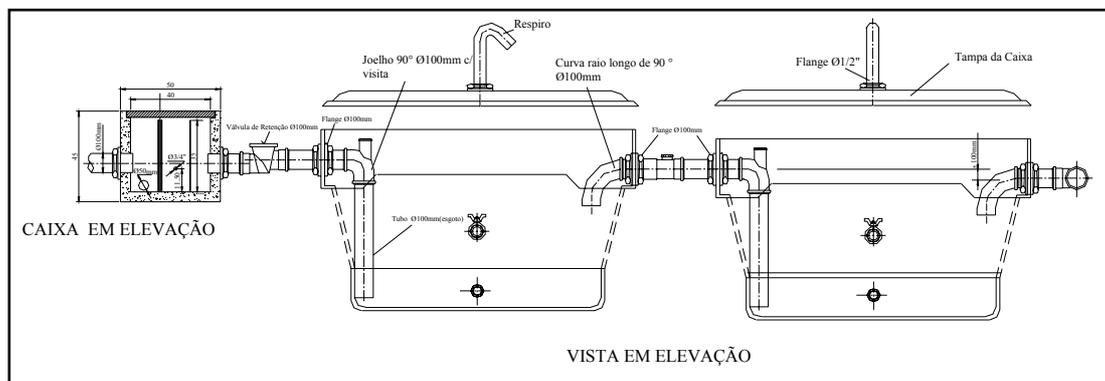


Figura 2. Corte da Instalação Experimental.

2.2. Hidrodinâmica

Foi usado como traçador uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com 150 mgCl/L aplicado em forma de pulso. Para a escolha do traçador levou em consideração que (a) a sua concentração na água é baixa e aproximadamente constante; (b) não reage com os compostos presentes na água; e (c) é facilmente detectado e medido na água. As amostras foram coletadas em intervalos regulares de 5 minutos e determinadas suas condutividades (multímetro HI-255, Hanna) pelo método do condutivímetro, método 2510 do *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), até os valores se tornarem constantes. As curvas experimentais da variação de concentração do traçador ao longo do tempo, $C(t)$, foram normalizadas (área sobre a curva igual a 1) resultando em curvas

de distribuição do tempo de residência hidráulica $E(\theta)$ em função do tempo adimensional θ . Após a normalização foram calculados, conforme Levenspiel (2000), o tempo médio de detenção hidráulica, a variância da curva, o número de dispersão e o percentual de zonas mortas do reator.

2.3. Estudo do inóculo

Como inóculo foi utilizado esterco bovino coletado no Matadouro Mafita localizado em Itajubá, Minas Gerais. Testou-se experimentalmente a melhor porcentagem de inóculo necessário para a partida do reator anaeróbio compartimentado. As unidades experimentais foram instaladas e monitoradas nas dependências do Laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Itajubá, com tempo de inoculação de 21 dias. As porcentagens de inóculo testadas foram de 10, 20 e 30%. A instalação experimental foi composta por 6 conjuntos de reatores de 2 litros, preenchida com as respectivas porcentagens de esgoto e inóculo, interligados por uma mangueira de silicone a um frasco contendo 600 mL de hidróxido de sódio para a coleta de gases. Foram realizadas as seguintes análises: sólidos sedimentáveis, DQO, temperatura, alcalinidade e pH. Todos os parâmetros foram determinados de acordo com o *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), veja o Quadro 1.

2.4. Partida do reator

Os testes experimentais foram realizados durante dois meses, com frequência de duas vezes por semana. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros que foram investigados e suas respectivas metodologias de determinação analítica encontradas em *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater*, APHA (1998).

Tabela 1. Parâmetros analisados e metodologia de determinação.

Parâmetros	Unidade	Metodologia (número do método*)
Temperatura	°C	Leitura em termômetro de mercúrio (2550)
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	Método potenciométrico (4500-H ⁺)
Alcalinidade	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	Método da titulação potenciométrica com ácido sulfúrico (2320)
Demanda química de oxigênio (DQO)	mgO ₂ .L ⁻¹	Método do refluxo do dicromato de potássio (5220-D)
Sólidos totais, suspensos e voláteis	mg.L ⁻¹	Método gravimétrico (2540-B, 2540-D e 2540-E)
Sólidos sedimentáveis (SSed)	mL.L ⁻¹	Método volumétrico (2540-F)
Turbidez	uT	Método nephelométrico (2130)
Oxigênio dissolvido (OD)	mgO ₂ .L ⁻¹	Método do eletrodo (eletrométrico) (4500-O G)

* Encontrado no *Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estudo hidrodinâmico

Observa-se na Figura 3 que, para a vazão testada de 0,9648 m³/h, ocorreu um pico no início do escoamento, indicando que no reator existem caminhos preferenciais, e o retardo da curva (pois o tempo de detenção hidráulica (TDH) de projeto é 53,63 minutos e o TDH observado foi de 55,69 minutos – Figura 4) revelando a existência de curto-circuito, o que provocou o fenômeno de cauda longa observado nas curvas experimentais.

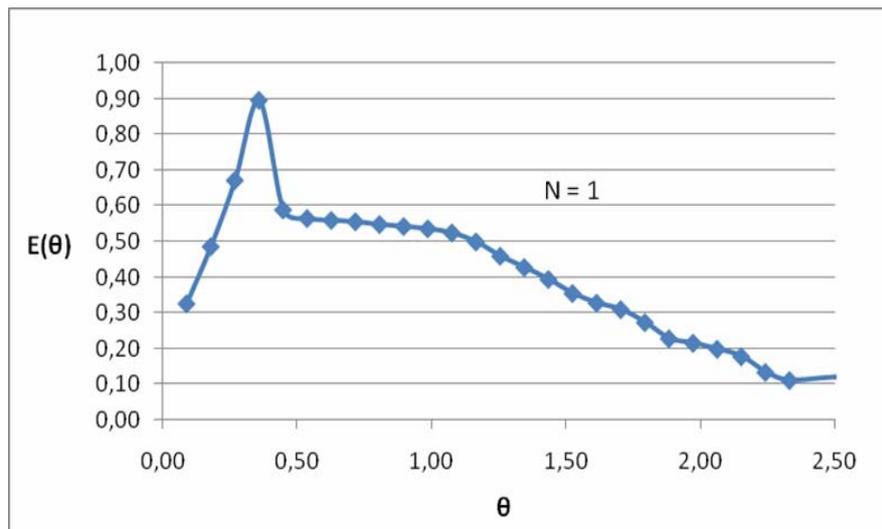


Figura 3. Curva de distribuição do tempo de residência hidráulica $E(\theta)$ em função do tempo adimensional θ para uma única câmara.

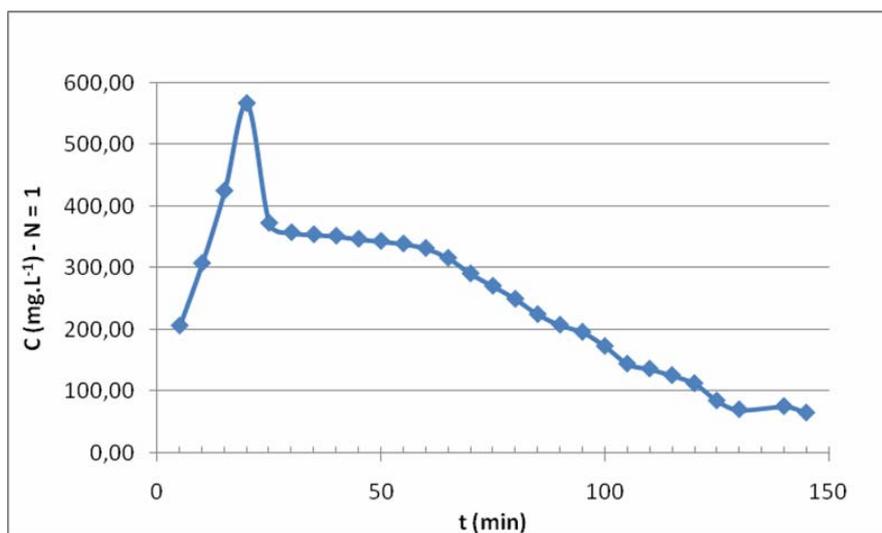


Figura 4. Curva da concentração do traçador C em função do tempo t para uma única câmara.

Com base nos estudos usando traçador, em cada câmara, as zonas mortas equivalem a 3,84% do volume do reator e o número de dispersão $D/\mu L$ é de 0,200 (indicando um escoamento disperso, no entanto mais próximo ao tipo mistura completa). O reator anaeróbio compartimentado, considerando as quatro câmaras, Figura 5, apresentou escoamento disperso com número de dispersão $D/\mu L$ de 0,127, ou seja, valor 37% menor.

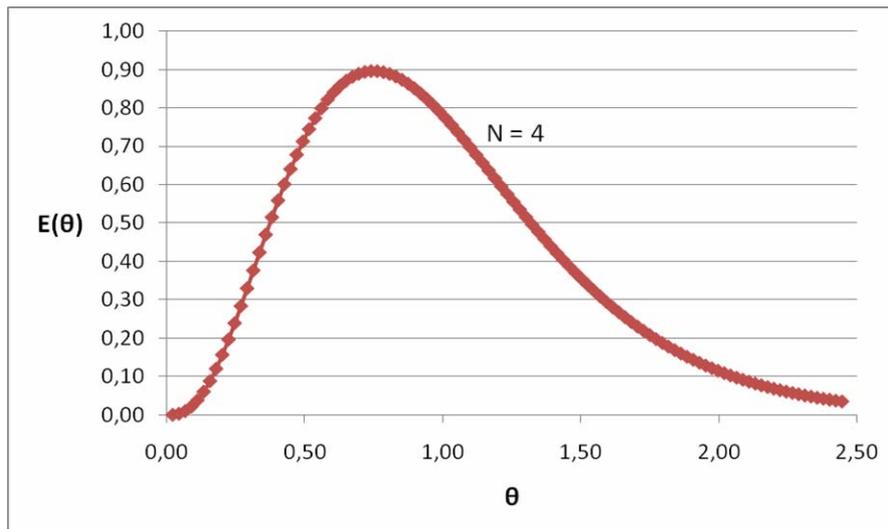


Figura 5. Curva de distribuição do tempo de residência hidráulica $E(\theta)$ em função do tempo adimensional θ para o reator anaeróbio compartimentado considerando as quatro câmaras dispostas em série.

Os resultados apresentaram-se em consonância com estudos desenvolvidos por outros pesquisadores como Langenhoff et al. (2000) e Krishna et al. (2008) com relação ao tipo de fluxo ocorrido no interior do reator no entanto, neste trabalho, os espaços mortos detectados foram menores.

3.2. Estudo do esterco bovino como inóculo

O estudo teórico realizado por meio de revisão de literatura mostrou que são utilizados na partida de reatores anaeróbios: inóculos de outras estações de tratamento de esgotos, esterco bovino e até mesmo polímeros. O inóculo utilizado no experimento foi esterco bovino proveniente de um matadouro. Havia muitas fibras no esterco, o que dificultou a sua seleção e utilização. O excesso de fibras no inóculo pode favorecer a flotação do lodo. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6 a 8.

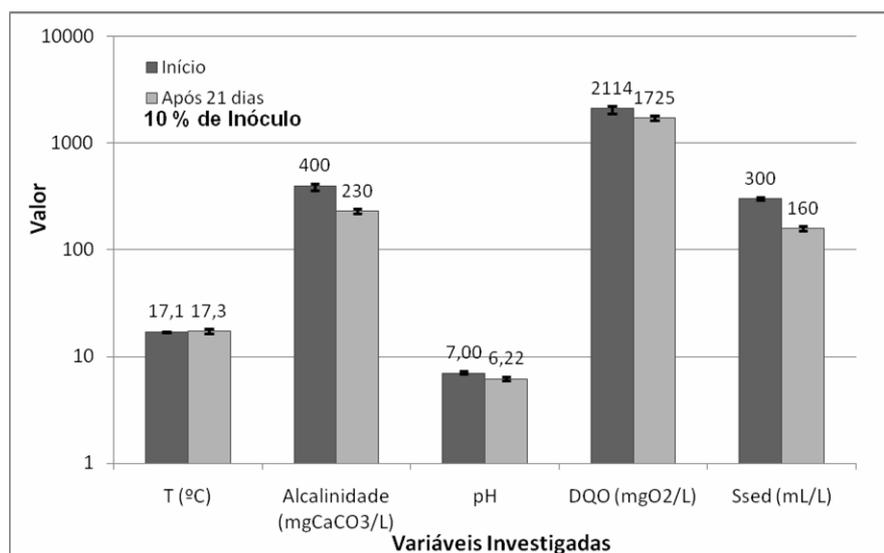


Figura 6. Resultado experimental (valores médios) para a proporção de inóculo de 10 %.

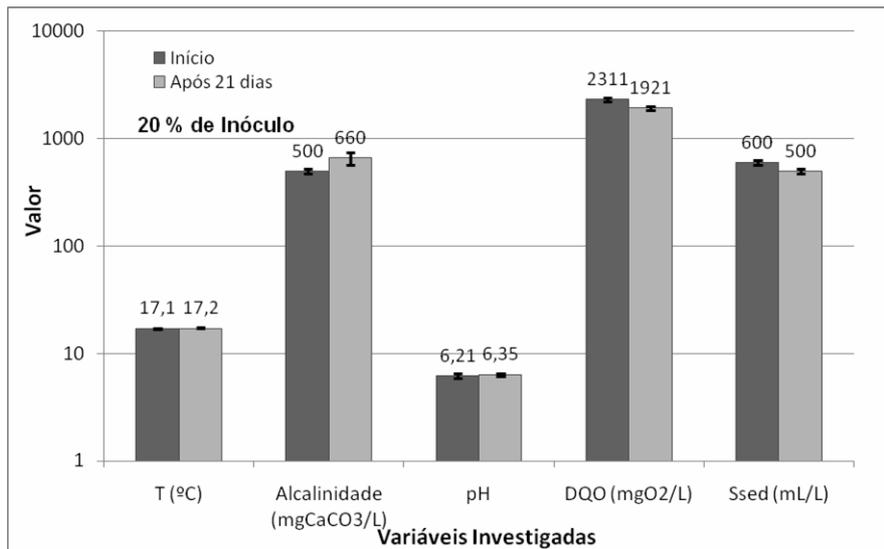


Figura 7. Resultado experimental (valores médios) para a proporção de inóculo de 20%.

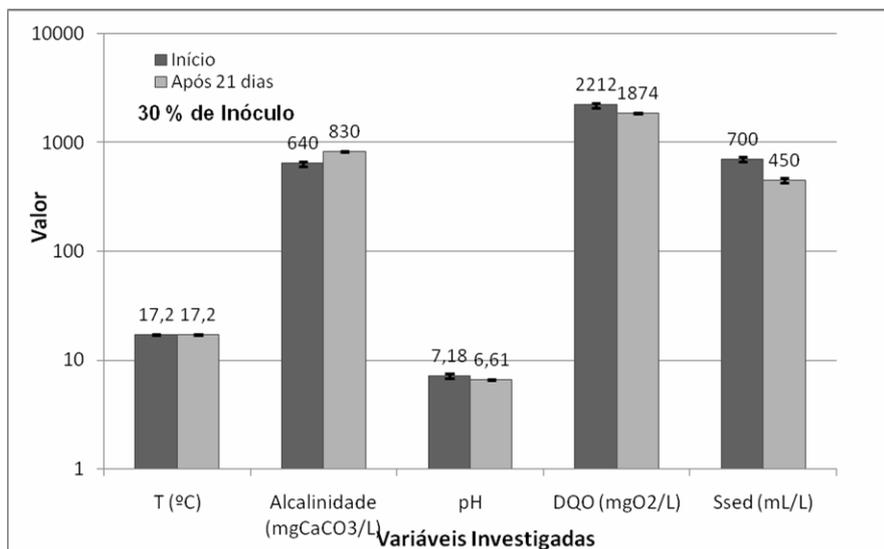


Figura 8. Resultado experimental (valores médios) para a proporção de inóculo de 30%.

Os experimentos foram realizados em temperatura de $17,1 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Segundo Campos (1999) a temperatura deveria manter-se superior a 20°C , caso contrário, reduz a velocidade do metabolismo dos microrganismos e, conseqüentemente, ocasiona lenta solubilização dos substratos, principalmente lipídios. Portanto, a temperatura na qual foi realizado o experimento foi um fator que influenciou no baixo percentual de remoção de DQO.

Speece (1996) considera que um reator anaeróbio deve ser operado em pH entre 6,5 e 8,2, no entanto este autor admite que em determinadas condições é possível a operação satisfatória do reator em pH de até 6. Com relação ao pH, observou-se que houve redução do pH, o que significa que houve formação de ácidos, que pode ter ocorrido devido a decomposição de compostos facilmente degradáveis, como açúcares e amido, produzindo ácidos orgânicos. Contudo, não houve problema de acidificação excessiva da água residuária analisada e nem a geração de odor desagradável.

Compostos, como CO_2 e ácidos graxos voláteis de cadeia curta, tendem a abaixar o pH, enquanto cátions geradores da alcalinidade, como os íons de nitrogênio amoniacal

provenientes da degradação de proteínas e o sódio originado da degradação de sabão, aumentam a alcalinidade e o pH. (Campos, 1999, p. 48).

A degradação de proteínas e lipídios é mais difícil que a de açúcares, exigindo-se maior tempo para que ocorra. No teste do inóculo de 10%, notou-se a diminuição da alcalinidade. Quando se testou inóculos na proporção de 20 e 30%, verificou-se o aumento da alcalinidade das águas residuárias após 21 dias, indicando que reações lentas ocorreram.

De uma maneira geral, a eficiência de remoção de DQO foi pequena, devido à qualidade do inóculo utilizado e da temperatura ambiente. A maior remoção foi obtida no teste com 10% de inóculo, porém, considerando as demais variáveis analisadas, a proporção de 20% de inóculo apresentou, de uma maneira geral, os melhores resultados.

3.3. Partida do reator

Devido aos resultados encontrados no estudo com o esterco bovino não tenham sido satisfatórios para a remoção de DQO e este tipo de inóculo apresentar dificuldade em sua seleção, optou-se por não inocular o reator e sim, durante o período de partida do reator, permitir a formação da biomassa a partir do próprio esgoto a ser tratado. Os esgotos em questão têm composição fraca e a vazão verificada foi de $0,5958 \pm 0,1120$ m³.dia⁻¹. O tempo de detenção hidráulica (TDH) do sistema foi de $6,05 \pm 1,64$ dias e a carga orgânica de alimentação do reator em termos de DQO foi de $0,0189$ kg.m⁻³.dia⁻¹. A Tabela 2 apresenta as características médias desses esgotos.

Tabela 2. Características médias (valor médio \pm desvio padrão) dos esgotos analisados.

Parâmetro	Unidade	Afluente*	Efluente*	Eficiência Média de Remoção (%)
Temperatura	°C	15,4 \pm 1,7	18,2 \pm 0,8	-
pH (a 25°C)	-	6,24 \pm 0,73	6,68 \pm 0,18	-
Alcalinidade	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	18,3 \pm 2,6	20,0 \pm 1,5	-
Demanda química de O ₂ (DQO)	mgO ₂ .L ⁻¹	27,2 \pm 5,4	16,2 \pm 2,4	40,43
Turbidez	uT	35,82 \pm 31,09	9,05 \pm 1,21	74,75
Sólidos totais (ST)	mg.L ⁻¹	380,00 \pm 249,62	193,33 \pm 58,05	49,12
Sólidos totais voláteis (STV)	mg.L ⁻¹	162,22 \pm 113,47	74,44 \pm 29,29	54,11
Sólidos suspensos totais (SST)	mg.L ⁻¹	144,44 \pm 136,31	47,22 \pm 34,40	67,31
Sólidos susp. voláteis (SSV)	mg.L ⁻¹	76,67 \pm 109,04	30,00 \pm 34,16	60,87
Sólidos sedimentáveis	mL.L ⁻¹	5,00 \pm 0,71	0,25 \pm 0,09	95,00
Oxigênio dissolvido (OD)	mgO ₂ .L ⁻¹	6,8 \pm 0,7	6,5 \pm 0,6	4,94

* valor médio \pm desvio padrão

No período de realização dos ensaios, apesar do RAS encontrar-se em fase transiente e de estar operando sob temperaturas menores que 20°C, constataram-se eficiências médias de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) de 40,43% e de remoção de turbidez de 74,75%.

Como era esperado, o RAS também funcionou como um decantador; o que pode ser notado por meio dos parâmetros de eficiência média de remoção de sólidos suspensos totais (67,31%) e de eficiência média de remoção de sólidos sedimentáveis (95,00%). Embora os parâmetros analisados para os esgotos afluentes ao sistema terem variado significativamente, as características dos efluentes variaram com uma intensidade menor, confirmando o que vários autores como Barber e Stuckey (1999), Krishna et al. (2008) e Feng et al. (2009) já haviam detectado.

Ao comparar as características dos efluentes do RAS (em termos de temperatura, pH, DQO, sólidos suspensos totais e sólidos sedimentáveis) com os padrões de lançamento de efluentes Federal, Resolução CONAMA N.º 357 (Brasil (2005)), e do Estado de Minas Gerais, Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1/2008, verifica-se que atendem plenamente aos limites legais (Tabela 3). No entanto, os efluentes do RAS não podem ser lançados em corpos d'água sem que outros parâmetros como óleos e graxas, demanda bioquímica de oxigênio, substâncias tensoativas que reagem com azul de metileno, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, entre outros sejam investigados e enquadrados aos referidos padrões.

Tabela 3. Alguns parâmetros de análise e seus respectivos padrões de lançamento de efluentes.

Parâmetros	Unidade	Efluente	CONAMA 357/2005	COPAM/CERH-MG 1/2008
Temperatura	°C	18,2 ± 0,8	menor que 40	menor que 40
pH (a 25°C)	-	6,68 ± 0,18	entre 5 a 9	entre 6,0 a 9,0
Alcalinidade	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	20,0 ± 1,5	-	-
Demanda química de oxigênio (DQO)	mgO ₂ .L ⁻¹	16,2 ± 2,4	-	até 180 mg.L ⁻¹ ou tratamento com eficiência de redução de DQO em no mínimo 55% e média anual igual ou superior a 65%
Turbidez	uT	9,05 ± 1,21	-	-
Sólidos totais (ST)	mg.L ⁻¹	193,33 ± 58,05	-	-
Sólidos totais voláteis (STV)	mg.L ⁻¹	74,44 ± 29,29	-	-
Sólidos suspensos totais (SST)	mg.L ⁻¹	47,22 ± 34,40	-	até 100
Sólidos suspensos voláteis (SSV)	mg.L ⁻¹	30,00 ± 34,16	-	-
Sólidos sedimentáveis	mL.L ⁻¹	0,25 ± 0,09	até 1	até 1
Oxigênio dissolvido (OD)	mgO ₂ .L ⁻¹	6,5 ± 0,6	-	-

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir, por meio dos estudos experimentais realizados, que:

Com base nos estudos com traçador, as zonas mortas equivalem a 3,84% do volume do reator anaeróbio compartimentado. Considerando o RAC composto por quatro compartimentos, concluiu-se que o tipo de escoamento é disperso com número de dispersão $D/\mu\text{L}$ de 0,127.

Com base nas variáveis analisadas, a proporção de 20% de inóculo foi a que proporcionou melhores resultados durante o estudo realizado usando esterco bovino como inóculo. Houve o aumento da alcalinidade e pH indicando a ocorrência de reações lentas e a remoção de DQO foi de 16,88%, além de ter apresentado um elevado teor de sólidos sedimentáveis após a inoculação com 20% de resíduo bovino, cerca de 500 mL.L⁻¹. No entanto, devido ao elevado teor de fibras, não se recomenda o seu uso como inóculo de RAC.

O sistema de reatores anaeróbios sequenciais apresentou um bom desempenho, ao tratar esgotos sanitários de uma comunidade rural, com relação à remoção de matéria orgânica em termos de DQO (efluente de $16,2 \pm 2,4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ e remoção média de 40,43%), turbidez (efluente de $9,05 \pm 1,21 \text{ uT}$ e remoção média de 74,75%), sólidos suspensos totais (efluente de $47,22 \pm 34,40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e remoção média de 67,31%) e sólidos sedimentáveis (efluente de $0,25 \pm 0,09 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ e remoção média de 95,00%) atendendo, com relação a estes parâmetros, aos padrões Federal e do Estado de Minas Gerais de lançamento de efluente em corpos d'água, mesmo ainda estando em fase transiente de operação e operando em temperaturas abaixo de 20°C.

No entanto, os efluentes do RAS não podem ser lançados em corpos d'água sem que outros parâmetros como óleos e graxas, demanda bioquímica de oxigênio, substâncias tensoativas que reagem com azul de metileno, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, entre outros sejam investigados e enquadrados aos referidos padrões.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho (Processo EDT 2002/03), propiciando a melhoria das instalações físicas do Laboratório de Saneamento da UNIFEI.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods of the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: APHA, 1998. 1 CD-Rom.
- BARBER, W. P.; STUCKEY, D. C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review. **Water Research**, Amsterdam, v. 33, n. 7, p. 1559-1578, 1999.
- CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução n. 357, de 7 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: MMA, 2005.
- CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL E CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS - COPAM/CERH-MG. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Texto retificado e publicado no DOE de 20/05/2008. Belo Horizonte: DOE, 2008.
- FENG, H.; HU, L.; MAHMOOD, Q.; FANG, C.; QIU, C.; SHEN, D. Effects of temperature and feed strength on a carrier anaerobic baffled reactor treating dilute wastewater. **Desalination**, Amsterdam, v. 239, p. 111–121, 2009.

CALHEIROS, H. C.; PERICO, A. C. S.; NUNES, C. F. Estudo experimental de aspectos hidrodinâmicos e da partida de um reator anaeróbio sequencial tratando esgotos domésticos. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 144-156, 2009. ([doi:10.4136/ambi-agua.108](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.108))

KRISHNA, G. V. T. G.; KUMAR, P.; KUMAR, P. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 99, n. 17, p. 8193-8200, 2008.

LANGENHOFF, A. A. M.; INTRACHANDRA, N.; STUCKEY, D. C. Treatment of dilute soluble and colloidal wastewater using an anaerobic baffled reactor: influence of hydraulic retention time. **Water Research**, Amsterdam, v. 34, n. 4, p. 1307-1317, 2000.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2000. 563 p.

SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Nashville: Archae Press, 1996. 394 p.

UYANIK, S.; SALLIS, P. J.; ANDERSON, G. K. The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part II. Compartmentalization of bacterial populations. **Water Research**, Amsterdam, v. 36, n. 4, p. 944-955, 2002.

VOSSOUGH, M.; SHAKERI, M.; ALEMZADEH, I. Performance of anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater influenced by decreasing COD/SO₄ ratios. **Chemical Engineering and Processing**, Amsterdam, v. 42, p. 811-816, 2003.

YANG, J.; YONGHENG, H.; ZHAO, X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 93, p. 205-208, 2004.