

III-064 - PANORAMA DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR DIGESTÃO ANAERÓBIA NA ÚLTIMA DÉCADA (2005 – 2014): REVISÃO DA LITERATURA

Vinícius Gouveia dos Santos ⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Regional de Blumenau (FURB).

João Girardi Neto

Engenheiro Químico. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Regional de Blumenau (FURB).

Joel Dias da Silva

Engenheiro Sanitarista. Doutor em Engenharia Ambiental. Professor do Departamento de Engenharia de Produção e Design e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da FURB – Universidade Regional de Blumenau. Instrutor Nível HV-01 do SENAI Blumenau.

Ivone Gohr Pinheiro

Engenheira Civil. Doutora em Química e Física Ambiental. Professora do Departamento de Física e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da FURB – Universidade Regional de Blumenau

Adilson Pinheiro

Engenheiro Civil. Doutor em Química e Física Ambiental. Professor do Departamento de Engenharia de Civil e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da FURB – Universidade Regional de Blumenau

Endereço ⁽¹⁾: Rua Augusto Steembock, 492 apto 101 bloco 20 – Uberaba – Curitiba - PR - CEP: 81550-080 - Brasil - Tel: (41) 9225-7387 e-mail: vinicius.gouveia.santos@hotmail.com

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo realizar um levantamento de artigos publicados relacionados ao tratamento de resíduos orgânicos em reatores anaeróbios, buscando estabelecer critérios de comparação como as características dos reatores (forma, volume e material utilizado na sua construção); regime de temperatura do sistema (termofílico, mesofílico ou psicrófilico); resíduos utilizados na digestão; assim também como a evolução das pesquisas no Brasil e no mundo ao longo da última década. As buscas foram realizadas nos bancos de dados *Science Direct*, *Scielo*, *Springer* e Portal de periódicos CAPES, com o uso das palavras chave: biorreator e biodigestor, associadas às palavras: material, forma e volume; e *bioreactor* e *biodigester*, associadas às palavras: *material*, *shape* e *bulk*. Estas palavras foram escolhidas para refinar o estudo e definir o espaço amostral, no âmbito deste trabalho, para reatores anaeróbios. Diante dos resultados obtidos, verificou-se a predileção pela aplicação do regime de temperatura mesofílica, em escala de laboratório, superior a 70% por apresentar melhores condições de controle do sistema. Entre os substratos utilizados, os dejetos de animais se sobressaíram.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos Urbanos, Tratamento, Digestão Anaeróbia, Panorama.

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento econômico, crescimento urbano e a revolução tecnológica, as alterações no estilo de vida, modos de produção e consumo da população tem sido modificados. Em virtude desses processos houve um aumento na produção de resíduos sólidos urbanos, tanto em quantidade como em diversidade, principalmente nos grandes centros urbanos. Os resíduos sólidos são considerados como um dos maiores problemas da sociedade, principalmente pela dificuldade na adequada destinação ao material descartado. No Brasil, estima-se que a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados per capita é de 378 kg em 2013, com coleta de 90% e destinação adequada de aproximadamente 58% do total coletado (ABRELPE, 2013).

Uma das soluções já empregada em indústrias para o tratamento de seus efluentes e também em propriedades rurais na destinação de dejetos de animais tem sido o tratamento biológico, onde comunidades de micro-organismos agirão na degradação da matéria orgânica, transformando-a em outras fontes de energia, como o biogás e um efluente rico em minerais (NOGUEIRA, 1992 apud INOUE, 2008).

A fração orgânica biodegradável presente nos resíduos sólidos urbanos apresenta um grande potencial energético. Entretanto, para se utilizar esta fonte energética é necessária a aplicação de processos de tratamento, sendo uma das alternativas a digestão por processo anaeróbio. Processo este que é apoiado na Lei nº 12.305, Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em seu art. 3º, inciso VII, que apresenta como uma das formas, por definição, adequadas para destinação final de resíduos, o aproveitamento energético. Está definição é retomada em pelo menos um dos objetivos da PNRS, no art. 7º, inciso II, que menciona o tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). PNRS que é fomentada pela Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) Lei nº 6.938, em seu art. 9º, inciso V, que promove o desenvolvimento de tecnologias para a melhoria da qualidade ambiental (BRASIL, 1981).

O tratamento por digestão anaeróbia é definido como um processo microbiológico, no qual a matéria orgânica é decomposta e sua complexidade é reduzida, em ambiente isento de oxigênio. O processo anaeróbio é responsável por reduzir as partículas sólidas presentes no resíduo, seja ele em fase líquida ou sólida (CARRILHO, 2012; ELBESHBISHY; NAKHLA, 2012; ALVES et al., 2013).

Os micro-organismos realizarão o processo de degradação da matéria orgânica em quatro fases, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (OROZCO et al., 2013). Responsáveis pela digestão são divididos em três grupos, bactérias fermentativas, responsáveis pela hidrólise e acidogênese, bactérias acetogênicas, que respondem pela acetogênese, e archeas metanogênicas, participantes da fase final do processo de digestão anaeróbia, a metanogênese (LAUWERS et al., 2013).

O grupo de bactérias fermentativas é responsável por realizar a decomposição da matéria orgânica em sua fase mais complexa, por meio do processo de hidrólise (ELBESHBISHY; NAKHLA, 2012). O resultado desta fermentação são os compostos orgânicos simples, representados por aminoácidos, açúcares, ácidos graxos e álcoois. As bactérias acetogênicas são responsáveis pela conversão dos compostos formados nos processos de hidrólise e acidogênese. O resultado da reação é a formação de acetato e hidrogênio. Já as archas metanogênicas são responsáveis por encerrar o processo de formação do metano e do dióxido de carbono, resíduo da conversão dos produtos formados pelas bactérias acetogênicas (CHERNICHARO, 2007; MALANCONI; CABRAL, 2012).

Dentre os produtos vindos da digestão anaeróbia está o biogás, composto por dois gases principais, o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), com a presença de ácido sulfídrico (H₂S) e outros gases, em menores quantidades. O CH₄ é o composto de maior interesse nesta composição, pois suas características combustíveis, o transformam em uma atraente fonte de energia. (SALOMON; LORA, 2005; SILVA et al., 2012; RAJENDRAN et al., 2012). Estudos sobre o tratamento de resíduos orgânicos por meio de digestão anaeróbia são amplamente abordados na literatura, com grande diversidade nas propostas de aplicação e melhoramento dos sistemas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de uma pesquisa bibliográfica visando observar o panorama da digestão anaeróbia como tratamento de resíduos tanto no Brasil como em outros países. O estudo considerou avaliar o cenário das pesquisas sobre o tema através da quantificação de artigos de periódicos científicos.

Para selecionar os artigos, foram utilizados critérios de forma, volume, e material utilizado na construção biodigestor, temperatura em que operam e resíduos utilizados na alimentação. Além de realizar triagem para segregar artigos que se utilizaram de reatores já registrados em outros artigos selecionados ou ainda trabalhos que não trouxessem a maior parte da informação esperada.

As buscas foram realizadas nos bancos de dados *Science Direct*, *Scielo*, *Springer* e Portal de periódicos CAPES, com o uso das palavras chave: biorreator e biodigestor, associadas às palavras: material, forma e volume; e *bioreactor* e *biodigester*, associadas às palavras: *material*, *shape* e *bulk*. Estas palavras foram escolhidas para refinar o estudo e definir o espaço amostral, no âmbito deste trabalho, para reator em sistema de digestão anaeróbia.

RESULTADOS

Dentre os trabalhos avaliados, citam-se os de Tampio *et al.*, (2014) que trabalharam em quatro reatores de 11 L de aço inoxidável em regime mesofílico, para tratar resíduos de alimentos e resíduos de alimentos pré-tratados em autoclave. O reator responsável por tratar o resíduo sem pré-tratamento teve tempo de detenção hidráulica (TDH) de 117 dias e após o 327^o a carga orgânica teve aumento gradativo (2, 3, 4 e 6 kg STV/m³), enquanto o TDH foi reduzido (117, 78, 58 e 39 dias). Neste mesmo período um reator paralelo foi inoculado com o resíduo do reator já aclimatado e passou pelos mesmos processos. Os resíduos de alimentos sem o pré-tratamento apresentaram média de 0,449 m³ de CH₄/kg STV, com remoção média de STV de 74,7%, além de apresentarem biogás com 55 a 62% de CH₄, com baixa variação entre as diversas cargas orgânicas aplicadas ao reator, e H₂S entre 0 e 500 ppm. Desta forma, os autores ressaltam a eficiência do processo com o uso de inóculo já aclimatado, com a inexistência de distúrbios mesmo com o aumento da carga orgânica e redução do TDH. Entretanto, fazem apontamentos para o pré-tratamento do resíduo, que apresentou menor produção de H₂S 0 a 100 ppm e menor média na produção de metano de 0,407 CH₄/kg STV.

Pode-se citar também o trabalho conduzido por Cho *et al.*, (2013) que aplicaram a digestão anaeróbia a seco em um reator cilíndrico de 60 L, com a função de tratar resíduo de alimentos, coletados de uma cantina universitária em regime mesofílico. Após o início da alimentação, o TDH foi reduzido de 60 a 20 dias, gradativamente, mudança que levou a um aumento na carga diária de sólidos. Como resultados quantitativos de produção de biogás foram obtidos valores estáveis para TDH de 60 e 40 dias, média de aproximadamente 2 e 4 m³.m⁻³.d⁻¹, respectivamente. Entretanto os resultados são mais baixos que aqueles obtidos para 20 dias, média de 7 m³.m⁻³.d⁻¹. Interferência que foi sentida no percentual de metano que apresentou grande variação e queda de qualidade em 20 dias, abaixo de 60%, quando comparados a 60 e 40 dias, ambos em 65% aproximadamente. Neste sentido os autores apontam as variações do sistema à redução na variedade das comunidades de micro-organismos metanogênicos, que teve redução de 18 a 4 tipos dominantes. Esta redução levou a uma troca de microrganismos metanogênicos dominantes, hidrogenotróficos para acetoclásticos, que alterou a produtividade e estabilidade do reator.

Por sua vez, Ferrer *et al.*, (2011), apresentaram o uso de reatores de PVC e polietileno, entre 2.400 e 7.500 L de volume, sob temperatura de 20 a 25 °C, sem aquecimento ou mistura. O TDH deste sistema teve variação entre 60 e 90 dias e o substrato baseado em dejetos bovinos. Dois dos digestores foram testados quanto a produção de metano e apresentaram resultados de 0,07 e 0,47 m³.m⁻³.d⁻¹. Os reatores restantes foram testados em seu consumo de biogás para uso no cozimento de alimentos, que resultou em média de 2,5 h.d⁻¹, e em seu percentual de metano, 63 a 67%. Os autores avaliaram então a viabilidade do sistema e concluíram que o uso dos sistemas de digestão anaeróbia são funcionais para os núcleos familiares, com TDH de 60 dias e alimentação de carga orgânica de 1 kgSTV.m⁻³.d⁻¹. Apresentaram ainda a confirmação de não ser necessário o aumento dos custos de manutenção dos reatores com acréscimo de tecnologias de controle.

Já Ganesh *et al.*, (2014), utilizaram 2 sistemas independentes de digestão anaeróbia, um de uma fase, com agitação, e outro de duas fases, sendo o sistema de duas fases composto por dois reatores. Os três reatores tem volume de 15 L, foram construídos em aço inoxidável e alimentados com resíduos de frutas e verduras, em TDH de 20 a 80 dias para uma fase e 2,5 a 18 dias em duas fases. Estas configurações apresentaram resultados médios de remoção de sólidos e DQO de 86,4%, uma fase, e, em sistemas de tratamento de duas fases com diversas configurações, a remoção máxima de DQO foi de 96% em reator de bateladas sequenciais. Foi apresentado ainda a produção de metano variável de 0,3 a 0,47 m³.kg STV⁻¹, uma fase, e 0,1 a 0,42 m³.kg STV⁻¹, duas fases. Os autores relatam melhores resultados para o sistema de digestão anaeróbia com uma fase, por apresentar maior produção de metano e remoção de carga orgânica. Além de dispensar menor mão de obra na operação do sistema.

As buscas por artigos de revistas nacionais e internacionais resultaram em 60 artigos com as características propostas no presente trabalho. Na tabela 1, os artigos que passaram pela triagem, foram dispostos segundo sua interação com os critérios de seleção escolhidos.

Tabela 1: Número anual de publicações por critérios de seleção.

Critérios de seleção		Número de publicações									
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Forma	Cilíndrico	5	4	2	4	6	10	8	5	5	4
	Oval		2	1							
	Retangular		1			1					
	Não identificado						2				
Material	Aço inoxidável	1	1			1	2	1			
	Concreto							2			
	Fibra de vidro		1	1		1		1			
	Geomembrana					1			1	1	
	Materiais plásticos diversos	2			3	1		1			
	Polietileno						2				
	PVC		1	1			1	2			
	Vidro	1	2		1	4	3		2	3	2
	Outros	1					1			1	
	Não identificado		2	1			3	1	2		2
Volume (L)	0,25 - 10,0	3	3		1	4	7	2	1	4	2
	10,1 - 200,0	2		1		1	2	1	1		1
	200,1 - 1.000,0						2	1			
	1.000,1 - 25.000,0		1		1	1	1	2	2		
	25.000,1 - 500.000,0		2	1	2	1		1	1		
	>500.000,1		1	1				1		1	1
Faixa de operação	Termofílico			1		1	2	2		1	
	Mesofílico	4	6	2	2	4	8	6	4	4	4
	Psicrofílico	1	1								
	Mesofílico/Termofílico				2	1	2		1		1
	Psicrofílico/Mesofílico/Termofílico					1					
Resíduo	Dejetos suínos e bovinos	2	2	2	2	3	1	4			
	Efluente de abatedouro								1		1
	Efluente de indústria alimentícia					1		1		1	
	Efluente de óleo de palmeira		1								1
	Efluente doméstico		1	1							
	Lodo industrial		2				1			1	
	Resíduos sólidos orgânicos				1	1	3	1	1		
	Resíduos do agronegócio						2	1	1	3	1
	Resíduos sólidos orgânicos e Efluente doméstico								1		
	Outros	2	1		1	2	5		1		1
	Não identificado	1						1			

Nos artigos selecionados, a resposta apresentada, quanto à forma dos reatores, indica que 88% dos equipamentos se caracterizavam por sua forma cilíndrica, associada ao material utilizado na construção dos reatores, principalmente vidro, PVC e outros materiais plásticos. Podem ser destacados os reatores construídos em vidro, que foram identificados em 30% do total. Segundo Orozco et al. (2013), o uso do vidro vem a corroborar com um melhor monitoramento do processo de digestão e maior facilidade no manejo do equipamento, principalmente para volumes reduzidos, de até 10 L, 45 % dos artigos selecionados.

Na tabela 1, um percentual de 72% dos trabalhos apresentou a condução dos estudos sob o regime mesofílico, com temperatura média dos sistemas em 35 °C, resultado que pode ser relacionado à redução nos gastos energéticos quando comparado aos reatores que fazem uso de sistema termofílico, em média de temperatura usual de 55 °C, que emprega aquecimento do sistema para manutenção da temperatura (BOE et al., 2009; LIANHUA et al., 2010).

Outro critério avaliado foi o resíduo utilizado na alimentação dos reatores anaeróbios, relacionados na tabela 1. Este critério apresenta como recorrente o uso de dejetos suínos e bovinos, que tem alto potencial de biodegradabilidade e de sólidos orgânicos voláteis, (ROBRA et al., 2010) além de retratar o uso de resíduos sólidos orgânicos, produzidos em grande quantidade, principalmente áreas urbanas (LOU et al., 2012). Foi verificado também a existência de alimentação com materiais diversos, entre eles, dejetos suínos em conjunto a óleo de cozinha (LANSING et al., 2010) e efluentes sintetizados (CALLI et al., 2005).

CONCLUSÕES

Segundo os trabalhos selecionados até o presente momento, algumas hipóteses se confirmam, como o material e o volume utilizado na construção do reator. Contudo, por conter maior número de publicações em escala de laboratório, o regime de temperatura mesofílica surpreendeu, sendo superior a 70%, pois em sistemas menores os ajustes das variáveis de contorno são melhores controladas. Na comparação do afluente utilizado, os dejetos de animais se destacam. Esta constatação se justifica devido aos dejetos possuírem comunidades microbianas propícias para degradação de matéria orgânica em um sistema de digestão anaeróbia, além de serem utilizados para startup nestes tipos de tratamento como meio de acelerar a estabilização do processo. Por fim, espera-se que a evolução das pesquisas no Brasil e no mundo ao longo da última década corroborem com a hipótese de que um número maior de publicações será encontrado fora do Brasil mesmo com um aumento nas divulgações das pesquisas nacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2013.
2. ALVES, H.J.; BLEY JUNIOR, C.; NIKLEVICZ, R. R.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Overview of hydrogen production Technologies from biogas and the applications in fuel cells. **International journal of hydrogen energy**, v. 38, p. 5215-5225. 2013.
3. BOE, K.; KARAKASHEV, D.; TRABLY, E.; ANGELIDAKI, I. Effect of post-digestion temperature on serial CSTR biogás reactor performance. **Water research**, v. 43, n. 3, p. 669-676, 2009.
4. BRASIL. Lei federal nº 12.305 de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010.
5. BRASIL. Lei federal nº 6.938 de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981.
6. CALLI, B.; MERTOGLU, B.; INANC, B.; YENIGUN, O. Methanogenic diversity in anaerobic bioreactors under extremely high ammonia levels. **Enzyme and microbial technology**, v. 34, n. 4, p. 448-455, 2005.
7. CARRILHO, N. F. Q. **Valorização de bio-resíduos alimentares por digestão anaeróbia descentralizada – Caso de estudo: Campus da FCT/UNL**. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
8. CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, 2ª edição, 380 p., 2007.

9. CHO, S.; IM, W.; KIM, D.; KIM, M.; SHIN, H.; OH, S. Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis. **Bioresource technology**, v. 131, p. 210 – 217. 2013.
10. ELBESHISHY, E.; NAKHLA, G. Batch anaerobic co-digestion of proteins and carbohydrates. **Bioresource technology**, v. 116, p. 170-178. 2012.
11. FERRER, I.; GARFÍ, M.; UGGETTI, E.; FERRER-MARTÍ, L.; CALDERON, A.; VELO, E. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. **Biomass & bioenergy**, v. 35, p. 1668-1674. 2011.
12. GANESH, R.; TORRIJOS, M.; SOUSBIE, P.; LUGARDON, A.; STEYER, J. P.; DELGENES, J. P. Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance. **Waste management**, v. 34, p. 875 – 885. 2014.
13. GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & saúde coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503 – 1510, 2012.
14. INOUE, K. R. A. **Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
15. LANSING, S.; MARTIN, J. F.; BOTERO, R. B.; SILVA, T. N.; SILVA, E. D. Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. **Biomass and bioenergy**, v. 34, n. 12, p. 1711-1720, 2010.
16. LAUWERS, J.; APPELS, L.; TROMPSON, I. P.; DEGRÈVE, J.; IMPE, J. F. V.; DEWIL, R. Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations. **Progress in energy and combustion science**, v. 39, n. 4, p. 383 – 402, 2013.
17. LIANHUA, L.; DONG, L.; YONGMING, S.; LONGLONG, M.; ZHENGHONG, Y.; XIAOYING, K. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of Rice straw in South China. **International journal of hydrogen energy**, v. 35, n. 13, p. 7261-7266, 2010.
18. LOU, X. F.; NAIR, J.; HO, G. Field performance of small scale anaerobic digesters treating food waste. **Energy for sustainable development**, v. 16, n. 4, p. 509-514, 2012.
19. MALANCONI, R.; CABRAL, R. C. Impactos e benefícios da produtividade de biogás em aterro sanitário. **Revista intertox de toxicologia, risco ambiental e sociedade**, v. 5, n. 2, p. 135 – 158. 2012.
20. OROZCO, A. M.; NIZAMI, A. S.; MURPHY, J. D.; GROOM, E. Optimizing the thermophilic hydrolysis of grass silage in a two-phase anaerobic digestion system. **Bioresource technology**, v. 143, p. 117- 125. 2013.
21. RAJENDRAN, K.; ASLANZADEH, S.; TAHERZADEH, M. Household biogás digesters – A review. **Energies**, v. 5, p. 2911 – 2942, 2012.
22. ROBRA, S.; SERPA DA CRUZ, R.; OLIVEIRA, A. M.; ALMEIDA NETO, J. A.; SANTOS, J. V. Generation of biogás using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry. **Biomass and bioenergy**, v. 34, n. 9, p. 1330-1335, 2010.
23. SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa & energia**, v. 2, n. 1, p. 57 – 67, 2005.
24. SILVA, W. T. L.; NOVAES, A. P.; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. A.; MAGNONI JR, L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbico para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Química Nova**, v.35, n.1, p. 35 – 40, 2012.
25. TAMPPIO, E.; ERVASTI, S.; PAAVOLA, T.; HEAVEN, S.; BANKS, C.; RINTALA, J. Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste. **Waste management**, v. 34, p. 370-377. 2014.