

II-023 – GRANULAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO EM UM REATOR EGSB

Miriam Cristina Santos Amaral⁽¹⁾

Engenheira química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), mestre e doutora em Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG). Professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG).

Clara Vieira de Faria⁽²⁾

Química Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestre em Ciências – Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Doutoranda em Engenharia dos Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Alexandre Eustáquio Leopoldino Jorge⁽³⁾

Graduando em Engenharia Química pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG).

Ana Luisa Pinheiro de Melo⁽⁴⁾

Engenheira Química pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG).

Fabiana Valéria da Fonseca⁽⁵⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Mestre e Doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professora e vice-diretora da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro e participa como docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Processos Químicos e Bioquímicos (EQ/UFRJ) e do Programa de Engenharia Ambiental (UFRJ).

Endereço⁽¹⁾: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha - Belo Horizonte – MG – CEP: 31270-901 - Brasil – Tel: +55 (31) 3409-1893 – e-mail: mcsamaral@yahoo.com.br.

RESUMO

O reator EGSB (*Expanded Granular Sludge Bed*), tido como um dos exemplos mais importantes de reatores que utilizam biomassa auto-imobilizada em forma de grânulos com alta densidade celular e boas características de sedimentação, é uma versão modificada do reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB-*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), operado com alta velocidade ascensional, fator que beneficia o contato entre biomassa e substrato, proporcionando, ao final, um maior desempenho. O presente estudo estabelece, portanto, resultados acerca do desenvolvimento de grânulos anaeróbios em reatores do tipo EGSB, objetivando analisar a granulação de um lodo floculento, utilizando de esgoto sintético como substrato. Para tanto, utilizou-se o lodo de um reator UASB para a inoculação, seguido por um período de aclimação e por outras cinco consecutivas etapas, nas quais foram adicionados incrementos de carga orgânica específica (COE) ao esgoto sintético. Periodicamente, amostras de afluente, efluente e lodo foram coletadas, a fim de que fossem submetidas a análises de demanda química de oxigênio (DQO), ácidos graxos voláteis (AGV), tamanho de grânulo e sólidos suspensos voláteis (SSV). Após a extração de produtos microbianos solúveis (SMP) e substâncias poliméricas extracelulares (EPS), foram realizados testes de concentração de carboidratos, proteínas e DQO. Como resultado, foi possível determinar que o lodo utilizado para inoculação apresentava aparência de flocos, e granulometria média de 344 µm, atingindo valores de 563,18 µm após o período de aclimação. Com o início do incremento de COE, observou-se que para as duas primeiras etapas houve uma redução da granulometria das partículas. Tal condição foi revertida a partir da terceira etapa, com o desligamento da bomba de recirculação. Foi possível perceber também o aumento da remoção de DQO ao comparar a aclimação à última etapa. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o aumento de COE possibilitou o aumento do diâmetro médio dos grânulos de um lodo anaeróbio em um reator EGSB, para o qual melhores resultados foram obtidos mediante a não recirculação de efluente. Assim sendo, sugere-se dar início à granulação do lodo em reatores do tipo UASB. Devido à perda de sedimentação e densidade granular, resultantes da redução da granulometria, foi necessário fazer intervenções no funcionamento normal do reator.

PALAVRAS-CHAVE: Reator EGSB, granulação, lodo anaeróbio.

INTRODUÇÃO

O reator EGSB, representado na Figura 1, é uma versão modificada do reator anaeróbico de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB) operado com alta velocidade ascensional (2-10 m/h), que pode ser atingida a partir da aplicação de uma relação altura/diâmetro maior quando comparado ao UASB, e com a recirculação do efluente (Puyol et al., 2009).

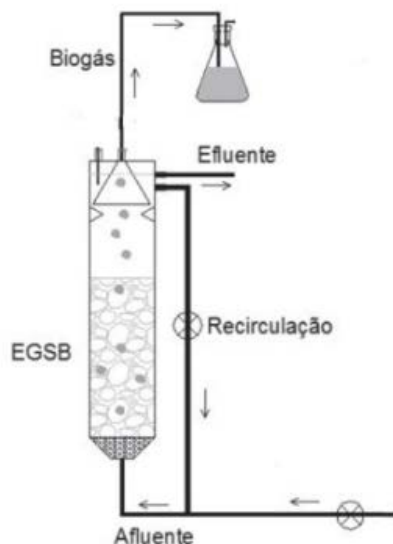


Figura 1: Esquema de um reator EGSB
Fonte: Adaptado de BRAÚNA; MOTA; SANTOS (2009)

O EGSB é um dos exemplos mais importantes de reatores que utilizam biomassa auto-imobilizada em forma de grânulos com alta densidade celular e boas características de sedimentação. Como resultado, há um elevado acúmulo de biomassa em contato com o efluente a ser tratado, o que permite altas taxas de carregamento orgânico, baixo tempo de retenção hidráulica (TRH) e boas condições de mistura devido à produção de maiores quantidades de gases quando em comparação ao reator UASB (Kato et al., 2003), resultando em maior desempenho do reator (Cisneros-P et al., 2015).

A observação da granulação de lodo anaeróbico em reatores do tipo UASB começou ao final da década de 1980 (Hulshoff Pol 1989). Schmidt e Ahring (1996) afirmam que o desenvolvimento de lodo granular é a chave para o bom funcionamento dos reatores UASB. Apesar de vários serem os parâmetros envolvidos na granulação do lodo anaeróbico, dentre eles: TRH, substrato e EPS; a pesquisa de granulação de lodo anaeróbico foi dedicada a COE, parâmetro operacional que descreve o grau de inanição dos microrganismos em relação à sua microbiologia, extremamente relevante no processo de granulação anaeróbia. Estudos conduzidos por Tay e Yan (1996) mostram que a granulação anaeróbia é alcançada pelo aumento gradual da COE durante o *start* do reator UASB.

Hulshoff Pol et al. (1989) salientaram que aplicando uma pressão de seleção gradualmente crescente, os organismos de sedimentação dispersos e fracos serão lavados do reator, enquanto os agregados de biomassa mais pesados serão retidos no reator. Essa seleção é baseada em diferenças nas densidades de organismos livres e aglomerados bacterianos. No entanto, é crítico selecionar uma COE razoavelmente alta no início da operação, para obter uma rápida granulação e estabilidade do processo. Zhou et al. (2007) observaram que, aumentando a COE no período de iniciação de um reator UASB, ocorre uma alta produção de biogás, resultando em uma severa turbulência hidrodinâmica, lavando o lodo do reator.

Diante do exposto, este trabalho investigou o desenvolvimento de grânulos anaeróbios em reatores do tipo EGSB, onde se esperava que a formação do grânulo fosse difícil devido à alta velocidade ascensional. Para isso, aumentos graduais na COE do reator foram realizados, e o tamanho médio dos grânulos monitorados.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi estudar a granulação de um lodo floculento em um reator EGSB utilizando-se o esgoto sintético como substrato.

METODOLOGIA

O reator EGSB foi confeccionado em acrílico com 1,5 m de altura, 0,06 m de diâmetro interno e volume útil de 2,72 L. O reator possuía um selo hídrico no topo para evitar a entrada de ar ou retorno de gases, e foi mantido sob condições mesofílicas (25 ± 6 °C) durante todo o seu funcionamento.

Lodo de um reator UASB usado no tratamento de esgoto sanitário da cidade de Belo Horizonte (ETE Onça /Copasa - Belo Horizonte/MG) foi utilizado para a inoculação. Adicionou-se 592,3 g de lodo com 36,76 g/g de SST (Sólidos Suspensos Totais), 17,33 g/g de SSF (Sólidos Suspensos Fixos) e 19,01 g/g de SSV. Após a inoculação, com o intuito de reativar e adaptar os microrganismos, o reator foi alimentado por aproximadamente 100 dias com esgoto sintético, sendo esse estágio denominado aclimação. A composição do esgoto sintético utilizado foi adaptada de Gomes et al. (2015) e está apresentada na tabela 1.

Tabela 1: Composição do esgoto sintético

COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO (mg/L)
Sacarose	47,8
Amido	148
Celulose	47,2
Extrato de carne	215
NaHCO ₃	200
KH ₂ PO ₄ (monobásico)	120
NaCl	250
CaCl ₂	7
MgCl ₂	4,5
LAS (tensoativo)	15
Óleo de soja	51

Nas etapas seguintes de operação denominadas etapas de granulação, posteriormente apresentadas nos resultados como G1, G2, G3, G4 e G5, o reator também foi alimentado com esgoto sintético e subsequentes incrementos de COE foram realizados.

Periodicamente, amostras do afluente e do efluente foram submetidas a análises de DQO e AGV para monitoramento do reator. Os parâmetros DQO e SSV foram avaliados de acordo com APHA (2005) e AGV de acordo com DILALLO e ALBERTSON (1961), com periodicidades apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Análises físico-químicas realizadas para o monitoramento do reator EGSB

PARÂMETRO	MÉTODO	PERIODICIDADE
AGV (mg/L)	Titulométrico	2 vezes/ semana
DQO (mg/L)	Espectrofotométrico	2 vezes/ semana
SSV	Gravimétrico	1 vez/ mês

Para a extração de SMP, alíquotas de 50 mL foram centrifugadas por 10 minutos a 4500 rpm e o líquido sobrenadante contendo o SMP foi coletado. A extração do EPS foi realizada de acordo com o método do vapor apresentado em Morgan et al. (1990), com algumas modificações. Para isso, o pellet resultante da centrifugação foi ressuspensionado com solução de NaCl a 0,05% até completar 50 mL, aquecido a 80 °C por 10

minutos e centrifugado por 10 minutos a 4500 rpm. O líquido sobrenadante contendo o EPS foi coletado. Após a extração, o SMP e o EPS foram monitorados quanto à concentração de carboidratos, proteínas e DQO. Análises de carboidratos foram realizadas de acordo com Dubois et al. (1956) e proteínas de acordo com Lowry et al. (1951).

O diâmetro médio dos grânulos foi monitorado em um analisador de distribuição de tamanho de partículas por dispersão a laser (Modelo LA-950, Horiba).

As diferenças entre a remoção de DQO e o tamanho médio dos grânulos em todas as fases foram testadas por meio de testes estatísticos não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguidos das comparações múltiplas com nível de significância (α) de 5%. As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica 10.0.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O lodo utilizado para inoculação apresentou aparência de flocos, com granulometria de tamanho médio de 344 μm . No estágio de aclimação (representado por "A" na Tabela 3), a COE aplicada foi de aproximadamente 20 mg COD/gSSV.d. Nesta fase, observou-se um ligeiro aumento no tamanho dos grânulos de 344,34 para 563,18 μm , e o reator foi operado continuamente.

No primeiro estágio de granulação (representado por "G1" na Tabela 3), a COE aplicada foi aumentada pelo aumento da vazão, e o reator foi operado 10 h por dia para garantir o período de "inanição". Estudos com lodo aeróbio relataram que o período de "inanição", que são intervalos prolongados sem alimento, desempenha um papel importante na estabilidade dos grânulos (Liu et al., 2008). No entanto, seguindo essa estratégia, foi observada uma diminuição no tamanho dos grânulos de 563,18 para 410,31 μm . Os autores acreditam que com a tentativa de aumentar a COE elevando abruptamente a vazão (de 0,06 L/h para 0,25 L/h), o processo de cisalhamento dos grânulos foi agravado. No entanto, diminuindo a vazão para 0,12 L/h e continuando com a operação normal, no 206º dia foi possível perceber que os grânulos ainda estavam diminuindo (276 μm), representados por "G2" na Tabela 3.

A fase G3 foi caracterizada pela alimentação contínua. No entanto, nesta etapa devido a perda da densidade do lodo e com isso suas características de sedimentabilidade, o que foi comprovado pela presença dos grânulos ao longo do corpo do reator, a bomba de recirculação foi desligada diminuindo a velocidade ascensional do sistema de 3,7 para 0,03 m/h.

Após a mudança para operação contínua e mantendo a bomba de recirculação desligada, foi possível observar que os grânulos começaram a crescer (217º dia). Somente após essa mudança, tornou-se possível realizar aumentos na COE e observar o crescimento dos grânulos, dados pelas fases "G4" e "G5" na Tabela 3. Nessas etapas, optou-se por aumentar a COE aumentando a DQO da alimentação e não modificar a vazão. Isso evidencia que um dos desafios para elevar o tamanho dos grânulos de um lodo anaeróbio nos reatores EGSB é que esse já possua boas características de sedimentação.

Após o restabelecimento do tamanho médio e sedimentabilidade dos grânulos, que duraram aproximadamente 20 dias, a bomba de recirculação foi ligada novamente e o reator EGSB passou a ser operado normalmente. Os incrementos de COE continuaram constantemente, atingindo no dia 261 cerca de 115 mg DQO/gSSV.d, um valor mais próximo do recomendado por Campos e Anderson (1992). Esses autores sugeriram uma COE de 120 mg DQO/gSSV.d para obtenção de uma rápida granulação do lodo anaeróbio, quando o esgoto sintético é usado como substrato. Atendendo a essas condições, também foi observado um aumento no tamanho médio dos grânulos (712 μm).

A figura 2 apresenta o resumo do monitoramento do reator nas fases A e G5. É possível observar um aumento na DQO afluente, AGV afluente e também na remoção de DQO no decorrer das fases. Verificou-se que a porcentagem de remoção de DQO aumentou de $84,4 \pm 10,77$ para $92,0 \pm 7,75$ mg/L ao comparar as fases A e G5, o que está de acordo com o observado por Jijai et al., (2015). Esses autores concluíram que o tamanho médio dos grânulos afetou diretamente o desempenho do reator, aquele com maior tamanho médio de grânulos também apresentou maior remoção de substrato.

Tabela 3: Resumo dos dados de granulação do lodo anaeróbio no reator EGSB

TEMPO (d)	FASE	TRH (d)	COE (mg DQO/gSSV.d)	DIÂMETRO MÉDIO DOS GRÂNULOS (μm)	CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO REATOR
1	A	45,33	20,90	344,34	Início
101	A		87,48	563,18	Alimentação contínua
178	G1	10,88	74,64	410,32	Aumento da vazão e alimentação por 10 h/d
206	G2	22,67	58,72	276,44	Diminuição da vazão e alimentação por 10 h/d
217	G3	36,01	61,02	357,65	Alimentação contínua e bomba de recirculação desligada
238	G4	27,14	77,03	594,34	Aumento da COE, alimentação contínua e bomba de recirculação desligada
261	G5	15,75	113,22	712,08	Aumento na COE, alimentação contínua e bomba de recirculação ligada
373	G5		112,82	798,73	Mantidas as condições de G5
422	G5		131,15	800,75	Mantidas as condições de G5
503	G5		122,13	965,85	Mantidas as condições de G5
562	G5		153,45	1583,34	Mantidas as condições de G5

O teste de Kruskal-Wallis comparou o diâmetro médio dos grânulos e a remoção da DQO entre as fases A e G5 (Figura 3). Os testes não paramétricos de comparação múltipla indicaram diferenças significativas nas medianas entre as fases A e G5, a um nível de significância de 5%. De fato, os grânulos tiveram um aumento no tamanho e as remoções de DQO são melhoradas no estágio G5.

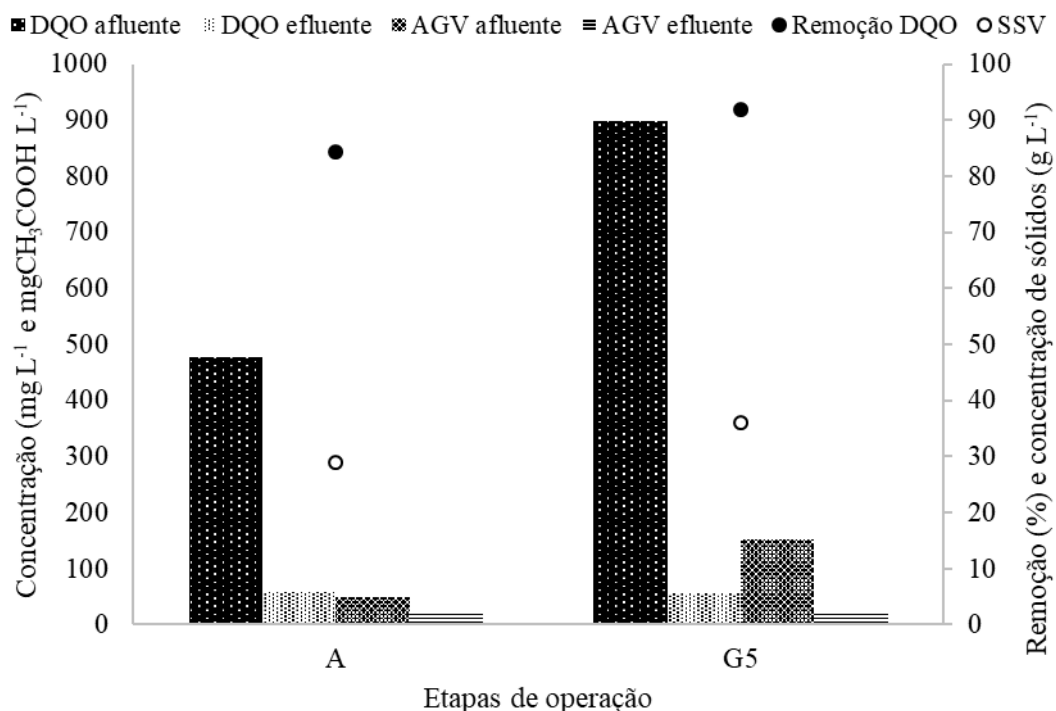


Figura 2: Resumo do monitoramento do reator nas fases A e G5

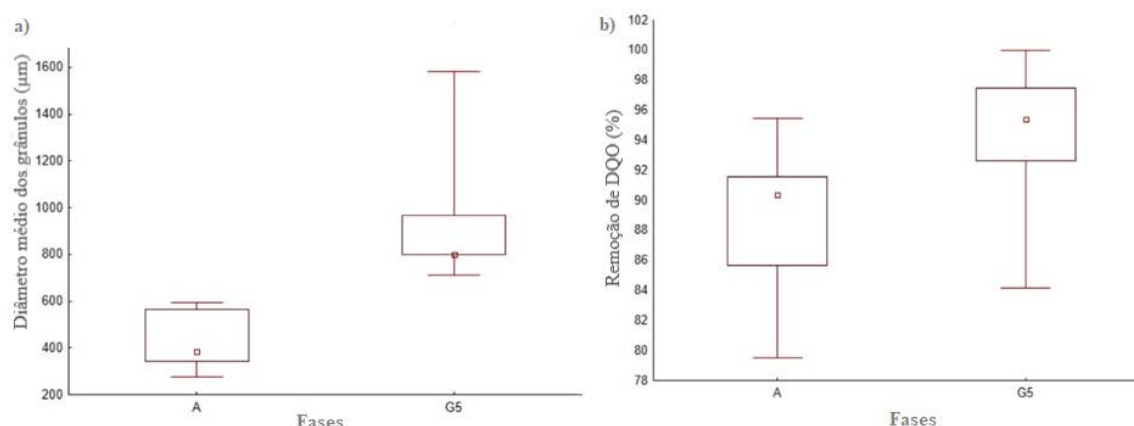


Figura 3: Box plots (a) Diâmetro médio dos grânulos nas fases A e G5 (b) Remoção de DQO nas fases A e G5.

Pesquisas anteriores sobre granulação anaeróbia e aeróbia mostraram que a quantidade total de EPS produzido não é um fator decisivo na formação e manutenção da estabilidade dos grânulos (Liao et al., 2001). Existem informações contraditórias sobre a composição do EPS em grânulos, especialmente no que diz respeito à relação entre carboidrato e proteína. Alguns pesquisadores relataram que a proteína é o componente predominante do EPS em grânulos anaeróbios (Fukuzaki et al., 1995), enquanto outros descobriram que o EPS era composto principalmente de carboidratos (Fang et al., 2002). O que se sabe hoje é que a quantidade e composição do EPS produzido pelas bactérias depende de numerosos fatores, tais como espécies microbianas, tipo de substrato limitante (carbono, nitrogênio e fósforo), força de cisalhamento, limitação de oxigênio, força iônica, temperatura, dentre outros (Nichols et al., 2004).

A análise de EPS do reator EGSB não pôde ser realizada periodicamente devido à remoção excessiva de lodo do reator. No entanto, a Figura 4 apresenta a determinação do EPS do dia 562 da operação do reator. O EPS

foi calculado em relação à concentração de carboidratos, proteínas e DQO. Analisando a Figura 4 é possível perceber maiores quantidades de proteínas e DQO na determinação do EPS.

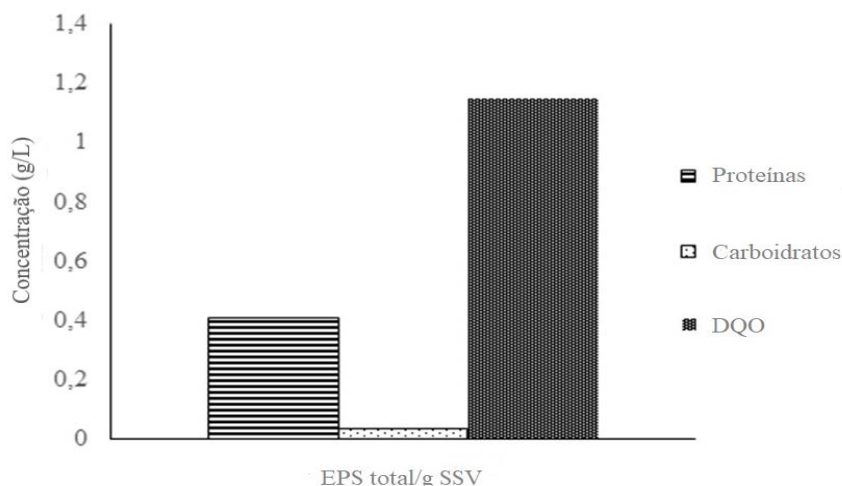


Figura 4: Concentração de EPS em termos de carboidratos, proteínas e DQO

CONCLUSÃO

Como ocorre nos reatores UASB, o aumento da COE permitiu o aumento do diâmetro médio dos grânulos de um lodo anaeróbio em um reator EGSB. No entanto, observou-se que uma melhor granulação do lodo foi obtida quando esse foi operado sem recirculação do efluente. Portanto, sugere-se iniciar a granulação do lodo em reatores do tipo UASB e, uma vez estabelecida a densidade do lodo e a sedimentabilidade, iniciar a operação normal do reator EGSB, isto é, com a recirculação de parte do efluente. A diminuição no tamanho dos grânulos causou perda de sedimentação e densidade granular, o que resultou em dificuldades em manter o funcionamento normal do reator. Além disso, com o aumento da COE e também do tamanho médio do lodo, tornou-se evidente que a operação do EGSB foi favorecida, obtendo-se maiores remoções de DQO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
2. BRAÚNA, C. H. C.; MOTA, S.; SANTOS, A. B. *Descoloração reductiva do corante azo RR2 na ausência e presença de mediador redox e acceptor de elétrons nitrato*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 2, p. 275–284, 2009.
3. CAMPOS, C. M. M., ANDERSON, G. K. *The effect of the liquid upflow velocity and the substrate concentration on the start-up and steady-state periods of lab-scale UASB reactors*. Water Science and Technology, v. 25, n. 7, p. 41-50, apr 1992.
4. CISNEROS-P, C., CARRILLO-REYES, J., CELIS, L.B., ALATRISTE-MONDRAGÓN, F., ETCHEBEHERE, C., RAZO-FLORES, E. *Inoculum pretreatment promotes differences in hydrogen production performance in EGSB reactors*. International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, p. 6329–6339, may 2015.
5. DUBOIS, M., GILLES, K. A., HAMILTON, J. K., REBERS, P. A., SMITH, F. *Colorimetric method for determination of sugars and related substances*. Analytical Chemistry, v. 28, n. 3, p. 350-356, mar. 1956.
6. FANG, H. H. P., LIU, H., ZHANG, T. *Characterization of a hydrogen-producing granular sludge*. Biotechnology Bioengineering, v. 78, p. 44–52, apr 2002.
7. FUKUZAKI, S., NISHIO, N., NAGAI, S. *High rate performance and characterisation of granular methanogenic sludges in upflow anaerobic sludge blanket reactors fed with various defined substrates*. Journal of Fermentation and Bioengineering, v. 79, p. 354–359, jan 1995.
8. GOMES, P. C. L., TOMITA, I. N., SANTOS-NETO, Á. J., ZAIAT, M. *Rapid determination of 12 antibiotics and caffeine in sewage and bioreactor effluent by online column-switching liquid*

- chromatography/tandem mass spectrometry*. Analytical and Bioanalytical Chemistry, v. 407, n. 29, p. 8787-891, nov 2015.
9. HULSHOFF POL, L.W. *The phenomenon of granulation of anaerobic sludge*. PhD thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands, 1989.
 10. JIJAI, S., SRISUWANA, G., O-THONG, S., ISMAILE, N., SIRIPATANAA, C. *Effect of Granule Sizes on the Performance of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors for Cassava Wastewater Treatment*. Energy Procedia. V. 79, p. 90-97, nov 2015.
 11. KATO, M. T.; FLORENCIO, L.; ARANTES, R. F. M. *Post-treatment of UASB effluent in an EGSB reactor type using flocculent sludge*. Water Science and Technology, v. 48, n. 6, p. 279-285, 2003.
 12. LIAO, B. Q., ALLEN, D. G., DROPPPO, I. G., LEPPARD, G. G., LISS, S. N. *Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability*. Water Research., v. 35, n. 2, p. 339-350, feb. 2001.
 13. LIU, Y., TAY, J.-H. *Influence of Starvation Time on Formation and Stability of Aerobic Granules in Sequencing Batch Reactors*. Bioresource Technology, v. 99, n. 5, p. 980-5, apr 2008.
 14. LOWRY, O. H., ROSEBROUGH, N. J., FARR, A. L., RANDALL, R. J. *Protein measurement with the Folin phenol reagent*. Journal of Biological Chemistry, v. 193, p. 265- 275, may 1951.
 15. MORGAN, J. W., FORSTER, C. F., EVISON, L. *A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges*. Water Research, v. 24, p. 743-750, jun 1990.
 16. PUYOL, D., MOHEDANO, A. F., SANZ, J. L., RODRÍGUEZ, J. J. *Comparison of UASB and EGSB performance on the anaerobic biodegradation of 2,4-dichlorophenol*. Chemosphere, v. 76, n. 9, p. 1192-1198, aug 2009.
 17. NICHOLS, C. A. M., GARON, S., BOWMAN, J. P., RAGUENES, G., GUEZENNEC, J. *Production of exopolysaccharides by Antarctic marine bacterial isolates*. Journal of Applied Microbiology, v. 96, p. 1057-1066, mar 2004.
 18. SCHMIDT, J. E., AHRING, B. K. *Granular Sludge Formation in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors*. Biotechnology and Bioengineering. V. 49, p. 229-246, feb 1996.
 19. TAY, J.H. & YAN, Y.G. *Influence of substrate concentration on microrial selection and granulation during start-up of upflow anaerobic sludge blanket reactors*. Water Environment Research, v. 68, p. 1140-1150, 1996.
 20. ZHOU, W., IMAI, T., UKITA, M., LI, F., YUASA A. *Effect of loading rate on the granulation process and granular activity in a bench scale UASB reactor*. Bioresource Technology, v. 98, n. 7, p. 1386-1392, jul 2007.