

XI-061 - AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS POR MEIO DE MOTOR-GERADOR EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Eng^o Sebastian Rosenfeldt ⁽¹⁾

Engenheiro Químico formado na Universidade de Ciências Aplicadas FHTW Berlim. Engenheiro da Rotária do Brasil Ltda.

Eng^a Carolina Bayer Gomes Cabral

Engenheira Sanitarista e Ambiental. Mestranda em Engenharia Ambiental pela UFSC. Engenheira da Rotária do Brasil Ltda.

Dr. Eng^o Christoph Julius Platzer

Engenheiro Civil pela Universidade Técnica de Munique, doutor em engenharia sanitária pela Universidade Técnica de Berlim, especialista em tratamento de efluentes, autor de mais de 50 publicações em saneamento, sócio diretor da empresa Rotária do Brasil Ltda., consultor internacional em diversos países da América Latina e África.

Dr. Heike Hoffmann

Bióloga pela Universidade de Greifswald (1987) e doutora em Ecologia dos Sistemas Aquáticos pela Universidade de Rostock (1999). Pesquisadora Visitante na UFSC (2000-2006). Gerenciamento da empresa Rotária del Perú (2009-2011), Sócio diretora da empresa Rotária do Brasil Ltda. (desde 2011), consultora internacional na América Latina e África. Mais de 40 publicações em saneamento.

Dr. Eng^o Roque Angélico Araújo

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Bahia, mestrado em Engenharia Civil Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo e doutorado em Saúde Pública pela Universidade de São Paulo. Atualmente é professor adjunto da Universidade Estadual de Feira de Santana e Faculdade Nobre em Feira de Santana.

Endereço⁽¹⁾: Rua Teodoro Manuel Dias, 421 - Bairro Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis – Santa Catarina - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel: +55 (48) 3234-3164 - Fax: +55 (48) 3234-3164 - e-mail: sebastian@rotaria.net

RESUMO

O presente trabalho apresenta a partir da quantificação do potencial teórico da geração de energia e do levantamento de custos tipo CAPEX e OPEX a viabilidade econômica de instalação de uma unidade motor-gerador, aproveitando energeticamente o biogás gerado em uma estação de tratamento de esgoto com uma população de aproximadamente 100.000 habitantes. Os dados estão baseados em um empreendimento que está em fase de implantação em Feira de Santana/BA. O empreendimento é financiado com recursos P&D da Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL) pela Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA). Os principais resultados obtidos foram o custo de investimento de R\$ 1,872 /(hab.a), custos operacionais de R\$ 1,704 /(hab.a) e o benefício na forma de custo evitado em função da geração de energia elétrica no valor de R\$ 5,873 /(hab.a).

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Eficiência energética, Viabilidade econômica, Co-geração, reator UASB.

INTRODUÇÃO

Nas estações de tratamento de esgoto brasileiras, de norte a sul do país, comumente encontra-se reatores UASB (upflow anaerobic sludge blanket) sendo utilizados. Ao contrário da realidade de países europeus, as temperaturas mais altas permitem a utilização segura deste tipo de reator, que proporciona uma remoção satisfatória da carga orgânica, porém, necessita de algum tipo de pós-tratamento antes do lançamento do efluente tratado em corpos hídricos.

Inicialmente, preocupava-se apenas com o tratamento de efluente líquido. Com o crescimento acentuado em muitos centros urbanos, enfrentou-se um novo problema com relação à fase sólida, o lodo excedente gerado em grandes quantidades nas estações de tratamento de esgoto (ETEs).

Hoje em dia, um terceiro elemento passou a ser considerado no ramo de saneamento, o biogás. Enquanto o estado da arte no Brasil já demanda a coleta e queima segura destes gases, visando a mitigação de impactos ambientais passíveis de ocorrer em função de liberação descontrolada de biogás na atmosfera, atualmente avalia-se o potencial econômico do biogás, enxergando-o como combustível, devido ao seu alto teor de metano, composto com um poder calorífico de 10 MJ/m³N.

Este trabalho apresenta uma entre várias alternativas tecnicamente viáveis para aproveitamento do biogás: a geração de energia elétrica por meio de motores a gás para a utilização do biogás em estações de tratamento de esgoto. Esta alternativa visa o aproveitamento do biogás como uma maneira para tornar o tratamento de esgoto menos oneroso, contribuindo assim para a universalização de saneamento, caso se confirme a viabilidade econômica.

O artigo apresenta um primeiro resultado das atividades que estão sendo realizadas no decorrer de um projeto de pesquisa e desenvolvimento em conjunto com a Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL), a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), a Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA), a Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e a Rotária do Brasil Ltda., a qual está implantando um projeto de aproveitamento energético de biogás na estação de tratamento de esgoto Jacuípe II em Feira de Santana/BA.

MATERIAIS E MÉTODOS

A ETE Jacuípe II da EMBASA, situada na cidade de Feira de Santana/BA, cuja primeira etapa de implantação terminou em 2010, tem atualmente uma capacidade de tratar esgoto de 97.200 contribuintes.

O arranjo da ETE, apresentado na Figura 1, consiste em: um pré-tratamento, composto por gradeamento e desarenadores; tratamento primário formado por 8 reatores UASB (vide Figura 4); seguido pelo tratamento secundário, por meio de um tanque de aeração e decantadores secundários e por fim uma etapa de desinfecção convencional. O lodo excedente do sistema é adensado por gravidade e segue para fazendas de lodo.

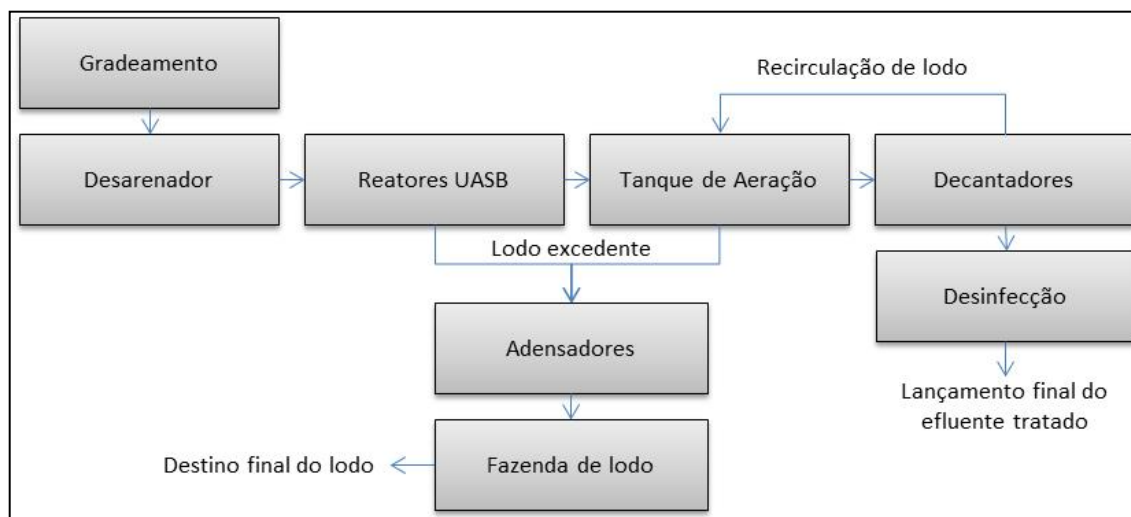


Figura 1: Arranjo processual na ETE Jacuípe II.

No caso de ETE Jacuípe II, foi inicialmente necessária a implantação do sistema de captação do biogás, uma vez que não estava contemplado pelo projeto original. O elemento principal deste sistema são as tampas desenvolvidas para o fechamento hermético do compartimento de coleta de biogás na parte superior dos reatores UASB.

Outra medida para facilitar a operação e viabilizar tecnicamente o aproveitamento do biogás, foi o desenvolvimento e implantação de um sistema de remoção de espuma por meio de calhas no interior do compartimento de separação trifásica (Figura 3). A formação e acumulação de espuma (Figura 2), formada basicamente por óleos e graxas, vem se mostrando como um dos principais problemas operacionais em

reatores UASB. As sobrepressões causadas pelo encrustamento da espuma acompanhado da produção de biogás pode causar danos às estruturas do reator (MIKI, 2010). O sistema implantado na ETE Jacuípe II é parecido com os dispositivos instalados na ETE Onça da COPASA e ETE Rio do Peixe da SAAE Itabira, apresentados por Chernicharo (2007), porém, permite o ajuste do nível de submersão.



Figura 2: Escuma acumulada na superfície do separador trifásico.



Figura 3: Calha para remoção de espuma no interior do separador trifásico.

Para a avaliação da viabilidade econômica, precisava-se inicialmente determinar a quantidade de biogás esperada. Adotando o número de contribuintes de 97.200, a carga orgânica disponível na entrada do reator anaeróbico a partir de 97 g/(hab.d) é estimada em 9.428,4 kg_{DQO}/d. Vale salientar que atualmente está sendo implantado um sistema de medição que contemplará a determinação da demanda química de oxigênio (DQO) na entrada e saída do reator UASB, bem como a vazão e composição de biogás. Este sistema pode trazer maior grau de segurança com relação à tomada de decisões referente a investimentos para futuros projetos. A metodologia destas medições adicionais é descrita detalhadamente por Cabral et al. (2015). A partir da carga orgânica do afluente ao reator UASB e uma eficiência de remoção de carga orgânica de 65 %, calculou-se a vazão de biogás, obtendo um resultado de 2.226 m³/d.



Figura 4: Reatores UASB na ETE Jacuípe II.

O potencial energético e consequentemente econômico do biogás é baseado no metano, componente principal do biogás. Na literatura internacional, as concentrações de metano esperadas para biogás variam entre 50 e 85 %, onde geralmente adota-se um processo anaeróbio genérico ou a digestão anaeróbia de lodos para geração de biogás.

Para a realidade brasileira, onde não há consenso sobre o processo ideal para produção de biogás e onde o reator UASB é bastante difundido, é de enorme importância fazer experiências próprias com relação ao biogás produzido em UASB. Atualmente, os autores nacionais adotam valores referentes à concentração de metano no biogás para digestores anaeróbios de 62 a 70 % (Andreoli; von Sperling; Fernandes, 2007) e para reatores UASB entre 70 e 80 % (Chernicharo, 2007). Em estudos recentes, Cabral et al.(2015) mostra resultados de campanhas de medição realizadas em 10 estações de tratamento de esgoto e reporta teores de metano de 75 a 85 %.

Além do metano, o biogás ainda apresenta quantidades consideráveis de dióxido de carbono, bem com sulfeto de hidrogênio e nitrogênio. Outro componente crítico são os siloxanos, formados a partir da degradação anaeróbia de materiais comumente encontrados em cosméticos, desodorantes, aditivos de alimentos e alguns tipos de sabões. No motor a gás, os siloxanos podem provocar a formação de depósitos contendo sílica ou silicatos (Chernicharo; Stuetz, 2008), causando sérios danos ao motor. No caso da ETE Jacuípe II, medições pontuais mostraram concentrações de 3,49 a 32,86 mg/m³. A Tabela 1 a seguir apresenta as características esperadas para o biogás.

Tabela 1: Características típicas de biogás gerado no tratamento anaeróbio de esgoto doméstico.
Adaptado de DWA-M 361 (2011)

Parâmetro	Valor	Unidade
Metano (CH ₄)	50 a 85	% v/v
Dióxido de carbono (CO ₂)	15 a 50	% v/v
Nitrogênio (N ₂)	2 a 6	% v/v
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	1.000 a 30.000	ppm
Teor de oxigênio (O ₂)	0 a 2	% v/v
Umidade relativa	90 a 100	%

Para o presente trabalho adotou-se uma concentração de metano no biogás gerado no UASB de 70 %. Os demais parâmetros significativos para o cálculo do potencial de geração de energia são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados para cálculo do potencial de geração de energia elétrica.

Parâmetro	Valor	Unidade	Observação
Teor de metano no biogás	70	%	Adotado
Perda de biogás	20	%	Adotado
Poder calorífico do biogás	7,00	kWh/m ³	Adotado
Eficiência elétrica do motor-gerador	38	%	Conforme fabricante
Eficiência térmica do motor-gerador	41	%	Conforme fabricante

A vazão de biogás aproveitável a ser tomado como referência para o dimensionamento foi determinada, adotando uma perda de biogás do sistema de 20 %, chegando desta maneira na vazão de 1.781 m³/d. Com a energia específica, que é função do teor de metano, determinou-se a energia química disponível de 12.468 kWh/d. Este resultado representa o teor energético antes da transformação em energia elétrica e térmica pela unidade motor-gerador. Considerando a eficiência elétrica do motor-gerador de 38 % e a disponibilidade técnica de 8.000 horas por ano (DÖHLER et al., 2013), calculou-se a produção de energia elétrica de 1.579.291 kWh_{elétrica}/a.

Foi elaborado um projeto do sistema de aproveitamento energético de biogás (Figura 5), baseado na vazão esperada de biogás, especificando o sistema de controle, transporte, armazenamento, tratamento e uso de biogás, bem como infraestrutura elétrica. O sistema de transporte é composto por um gasoduto com diâmetro

de 75 mm, dispositivos de manobras e segurança, destacando as válvulas contra sobre- e subpressões e válvulas corta-chama. O sistema ainda conta com medidores de vazão e composição do biogás gerado.

O armazenamento é realizado em um gasômetro de membrana dupla com capacidade de 400 m³. O gasômetro é uma instalação inflável, onde a camada externa serve para a proteção da membrana interna e para providenciar a pressão operacional do sistema de biogás. A membrana interna infla e esvazia conforme o volume de biogás armazenado. No gasômetro ainda é realizada a primeira etapa de tratamento, a biodessulfurização, onde a concentração de sulfeto de hidrogênio é reduzida por meio de adição de ar.

O sistema de tratamento do biogás consiste de um refrigerador, onde são removidas a umidade e outra parcela de sulfeto de hidrogênio, e um filtro de carvão ativado, responsável pela remoção de siloxanos. O tratamento foi projetado para uso do gás em motores a gás.

Vale salientar que no caso de outras formas de uso do biogás, por exemplo, como combustível em caldeiras, secadores de lodo ou veículos, o tratamento do biogás seria outro, mas não se trata de objeto de discussão deste artigo.

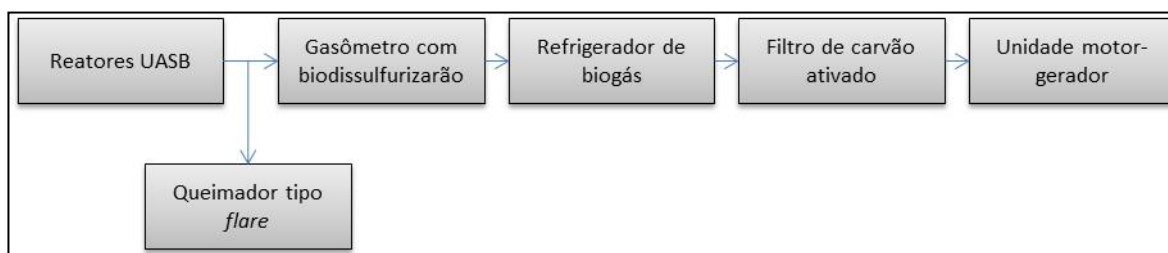


Figura 5: Sistema de aproveitamento energético de biogás na ETE Jacuípe II.

Finalmente foi escolhida a unidade motor-gerador (Figura 6) compatível com a vazão média de biogás calculada. O motor a gás tem eficiência elétrica de 38 % e eficiência térmica de 41 %. Após a escolha do motor e a confirmação das suas eficiências foi possível calcular as potências resultantes, sendo a potência elétrica de 197 kW e a potência térmica de 213 kW.



Figura 6: Exemplo de unidade motor-gerador.

Os custos considerados na análise da viabilidade econômica (Tabela 3) são os custos reais provenientes da aquisição, importação e instalação dos componentes do sistema de aproveitamento energético de biogás.

Vale salientar que o projeto parte da premissa de que uma estação de tratamento de esgoto, que gera biogás e consequentemente um passivo ambiental, deve possuir um sistema de coleta e queima de biogás. Sabendo que esta premissa não é ainda uma realidade para o caso brasileiro, entendeu-se como necessário apresentar estes

custos, no entanto, os mesmos não são considerados na avaliação da viabilidade econômica das instalações necessárias para o aproveitamento energético de biogás.

Para a verificação da viabilidade econômica do arranjo proposto, foi inicialmente calculado o custo anual equivalente para cada componente considerando a vida útil de cada um, conforme Sander (2003). Os custos são apresentados na Tabela 3. Conforme Sander (2003), o custo anual uniforme equivalente (CAUE) pode ser calculado por meio da Equação 1.

$$CAUE = I \cdot f_{CAE} = I \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde,

CAUE – Custo anual uniforme equivalente;
I – Investimento em R\$;
i – taxa de juros real em %;
n – vida útil em anos.

A taxa de juros adotada corresponde à taxa para empréstimos do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) para empreendimentos de saneamento ambiental. A taxa é composta pelo custo financeiro de no mínimo 6 % a.a., remuneração básica do BNDES de no mínimo 1,2 % a.a. e taxa de risco de crédito de no mínimo 1 % a.a.. Desta maneira, adotou-se uma taxa de financiamento de 8,20 %. Para determinação do juro real foi subtraído deste valor a taxa de inflação de 6,00 %, chegando assim em 2,20 %.

Por falta de experiências brasileiras, foram posteriormente determinados os custos operacionais com base em experiências alemãs. Foram considerados custos de operação, manutenção e reparação das unidades instaladas, bem como insumos como energia elétrica de autoconsumo da unidade motor-gerador, consumo de óleo lubrificante e análises laboratoriais. Os custos específicos de manutenção e de reparação para o motor-gerador foram adotados em conformidade com Döhler et al. (2013), adotando R\$ 0,0210 e R\$ 0,0315 por quilowatt-hora gerada por ano, respectivamente. Já o custo específico do tratamento de biogás é de R\$ 0,035, referindo-se à quantidade de biogás tratado por ano. Para a estimativa dos custos de manutenção das demais unidades do sistema de biogás foi adotado que os mesmos correspondam a 2 % do custo de investimento de cada unidade (DÖHLER et al., 2013).

RESULTADOS

O item mais oneroso é o motor a gás conjugado com um gerador no valor de R\$ 1.344.219. Na Tabela 3 são apresentados os valores referentes aos outros equipamentos, bem como os CAUEs dos equipamentos considerados na avaliação do investimento.

Tabela 3: Custos dos equipamentos.

Item	Custo em R\$	Custo em %	Vida útil em anos	CAUE em R\$	CAUE per capita em R\$
Elaboração do Projeto	61.959	3%	10	6.970,03	0,072
Unidade Motor-Gerador	1.344.219	58%	15	106.186,24	1,092
Sistema de Tratamento de Biogás	147.933	6%	10	16.641,62	0,171
Gasômetro	279.349	12%	15	22.067,11	0,227
Sistema de captação de biogás	120.964	5%	10	Não considerado	0,000
Sistema de transporte de biogás	59.876	3%	10	6.735,73	0,069
Instalações Elétricas	117.571	5%	20	7.329,77	0,075
Medição de vazão de biogás	29.988	1%	8	4.129,02	0,042
Medição de composição de biogás	86.357	4%	8	11.890,46	0,122
Sistema de queima	80.568	3%	8	Não considerado	0,000
TOTAL	2.328.785	100%		181.950	1,872

Desta forma, foi determinado o custo anual uniforme equivalente de R\$ 181.950 resultando em R\$ 1,872 por habitante e ano.

Os custos de manutenção e operação específicos referentes aos equipamentos instalados, apresentados na Tabela 4, foram adotados com base nas informações do Döhler et al. (2013). Vale salientar que os custos reais serão levantados durante o projeto de pesquisa e desenvolvimento realizado na ETE Jacuípe II.

Tabela 4: Custos operacionais.

Item	Qtd.	Unidade	Custo unitário em R\$ por unidade	Custo anual total em R\$	Custo anual per capita em R\$
Manutenção de geração	1.579.291	kWh/a	0,0210	33.165,11	0,341
Reparação de geração	1.579.291	kWh/a	0,0315	49.747,67	0,512
Operação do sistema de tratamento de gás	650.122	m ³ biogás/a	0,0350	22.754,26	0,234
Manutenção do gasômetro	1	global	5.586,98	5.586,98	0,057
Manutenção do sistema de captação de biogás	0	global	2.419,29	0,00	0,000
Manutenção do sistema de transporte de biogás	1	global	1.197,52	1.197,52	0,012
Manutenção das instalações Elétricas	1	global	2.351,42	2.351,42	0,024
Manutenção da medição de vazão de biogás	1	global	599,76	599,76	0,006
Manutenção da medição de composição de gás	1	global	1.727,15	1.727,15	0,018
Manutenção do sistema de queima	0	global	1.611,36	0,00	0,000
Autoconsumo de energia elétrica	31.586	kWh/a	0,19	6.070,43	0,062
Consumo de óleo lubrificante	1.128	L _{óleo} /a	7,28	8.212,31	0,084
Análises Laboratoriais - Óleo Lubrificante	12	un.	435,00	5.220,00	0,054
Análises Laboratoriais - Biogás	2	un.	1.800,00	3.600,00	0,037
Mão de Obra de Operador	810	Horas	25,43	20.590,94	0,212
Custos Gerais	197	kW _{instalado}	24,50	4.826,50	0,050
TOTAL				165.650,04	1,704

Para a avaliação do benefício monetário gerado do sistema partiu-se da energia elétrica gerada pela unidade motor-gerador durante o ano, atribuindo o valor de quilowatt-hora em conformidade com as tarifas da COELBA. A tarifa incidente, considerando também as alíquotas de ICMS e PIS/COFINS são R\$ 1,61088219 para consumo na ponta e R\$ 0,23937104 fora da ponta. Como consumo da ponta é considerado o consumo entre as 19h00min e 22h00min horas nos dias úteis. Foi adotado que a produção média anual de biogás seja constante, bem como seu consumo e consequentemente a geração de energia. Adotando a política tarifária da COELBA, ou seja, que há cerca de 780 horas na ponta por ano, o valor da quilowatt-hora gerada a partir do biogás é de R\$ 0,36149190. Portanto, os 1.579.291 kWh elétricas geradas representam um benefício de R\$ 570.900,90 no total e um benefício específico de R\$ 5,873 por habitante e ano.

O somatório dos benefícios e dos custos referente ao investimento, manutenção e operação resultam em um saldo positivo de R\$ 223.300,87 por ano e R\$ 2,297 por habitante e ano.

CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo mostraram a viabilidade econômica para o caso da ETE Jacuípe II, uma vez que o valor referente aos custos evitados relacionados ao menor consumo de energia elétrica, proporcionado por meio de aproveitamento do biogás gerado na própria ETE, supera o somatório de custos de investimento e operação.

Vale salientar que o potencial da energia térmica não foi computado, já que não são previstos unidades na ETE Jacuípe II que poderiam utilizar a mesma. Porém, na hipótese de secagem térmica de lodo, a energia térmica representaria um potencial financeiro de cerca de R\$ 225.000, considerando o custo evitado com combustível para operação do secador.

Mostrou-se que para a ETE Jacuípe II, as instalações para o aproveitamento energético do biogás gerado nos reatores anaeróbios contribuirão para efficientização energética com sustentabilidade econômica. Em total o benefício poderá ser um total de aproximadamente 17% a.a. em relação ao investimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem a todos os envolvidos no projeto, dentre eles a Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL), a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), a Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA), a Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), e destacam que seu apoio está sendo indispensável para o bom andamento do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodos de esgoto: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2010.
2. CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; CHERNICHARO C.A.L. Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015 (a ser publicado).
3. CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2007. 379 p.
4. CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R. M. Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater: management of gaseous emissions. In: IX Latin American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, 2008, Eastern Island - Chile. Anais... Eastern Island - Chile: IWA, 2008. p. 504-512.
5. DÖHLER, H. et al. Faustzahlen Biogas. 3. ed. Darmstadt: Kuratorium Für Technik Und Bauwesen In Der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2013. 360 p.
6. DWA - DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V.. DWA-M 361: Aufbereitung von Biogas. Hennef., 42 p. 2011
7. MIKI, M. K. Dilemas do UASB. Revista DAE, São Paulo, n. 183, p.25-37, maio 2010.
8. SANDER, T. Ökonomie der Abwasserbeseitigung: Wirtschaftlicher Betrieb von kommunalen Kläranlagen. Berlin Heidelberg: Springer-verlag, p. 320, 2003.