

## XI-117 - ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO POR REATORES UASB: UM ESTUDO DE CASO EM ESCALA REAL

### **Carolina Bayer Gomes Cabral<sup>(1)</sup>**

Engenheira Sanitarista e Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental pela UFSC. Engenheira da Rotária do Brasil. Doutoranda em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin).

### **Sebastian Rosenfeldt**

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

### **Christoph Julius Platzer**

Engenheiro civil pela Universidade Técnica de Munique. Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlin. Sócio diretor da empresa Rotária do Brasil.

### **Heike Hoffmann**

Bióloga pela Universidade de Greifswald. Doutora em Ecologia dos Sistemas Aquáticos pela Universidade de Rostock. Sócia diretora da empresa Rotária do Brasil.

### **Matthias Barjenbruch**

Engenheiro Civil pela Universidade de Hannover. Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade de Hannover. Professor titular na Universidade Técnica de Berlin (TU Berlin)

**Endereço<sup>(1)</sup>:** 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: [carolina@rotaria.net](mailto:carolina@rotaria.net)

### **RESUMO**

Neste artigo são apresentados os resultados de 6 meses de monitoramento e de viabilidade do uso de um motor-gerador de 191 kW para geração de energia elétrica, movido a partir do biogás produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo - UASB na ETE Jacuípe 2 – Feira de Santana -BA. A vazão de biogás coletada ficou na faixa de 98,6 a 835,0 Nm<sup>3</sup>/d, sendo que a composição mediana do biogás foi de 9,4% de CO<sub>2</sub>, 79,2% de CH<sub>4</sub>, 1.590 ppm de H<sub>2</sub>S e 0,00% de O<sub>2</sub>. Para reduzir a concentração de H<sub>2</sub>S foi realizado o tratamento do biogás com biodessulfurização, que apresentou eficiência média de 47% de remoção do compostos, seguido de adsorção por carvão ativado, que removeu o H<sub>2</sub>S até concentrações próximas a zero, com mediana em 0,54 ppm. Com relação ao consumo de energia elétrica, o consumo médio foi de 2.625 kWh/d no tanque de aeração, de 254 kWh/d no sistema de decantação secundário e de 9,3 kWh/d no pré-tratamento. E a geração de energia elétrica média foi de 1.114 kWh/d, representando 40% do consumo total da ETE. Com base nesses dados, foram simulados 6 diferentes cenários de viabilidade. O principal limitante está sendo a vazão de biogás média de 23 Nm<sup>3</sup>/h, atualmente muito abaixo do valor teórico esperado. Para o cenário em que a vazão de biogás coletado fosse suficiente para o funcionamento do motor-gerador continuamente, foi calculada uma TIR de 19,61 %. Demonstrou-se também um impacto positivo significativo ao injetar a energia excedente na rede no horário de ponta.

**PALAVRAS-CHAVES:** Reatores Anaeróbios, Biogás, UASB em escala real, Geração de Energia, geração distribuída.

### **INTRODUÇÃO**

Apesar de poucos, atualmente é crescente o número de estudos que tratam da caracterização quantitativa e qualitativa do biogás para reatores UASB em escala real, esse fato deve-se aos recentes avanços tecnológicos, que desenvolveram ferramentas capazes de medir *in-loco* e em tempo real o biogás produzido, facilitando a realização dessas pesquisas (CABRAL, 2016). Apesar disto sabe-se que é necessário o constante avanço das pesquisas para que o Brasil alcance seu potencial em aproveitamento energético a partir do biogás.

A presente pesquisa integra-se um projeto de P&D da Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL), da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.

(EMBASA), da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) em parceria com a GIZ e com a Rotária do Brasil Ltda.

Na ETE Jacuípe 2 foram instalados equipamentos para monitoramento de diversos parâmetros relacionados desde a produção de biogás até a geração de energia por meio de um conjunto motor-gerador, que possui a potência de 191kW e utiliza como combustível o biogás.

O objetivo do trabalho é avaliar esses dados coletados, com foco na operação do motor. Ao final, avalia-se também o cenário de autossuficiência da estação e as possibilidades de compensação da energia excedente através de *net-metering* (resolução ANEEL 687/2015), visando o maior retorno financeiro para a companhia de saneamento.

## METODOLOGIA

Na ETE Jacuípe 2, localizada no município de Feira de Santana – BA, não havia sistema de coleta do biogás produzido, e, portanto, como parte do P&D, foi feita uma adequação da ETE, que passou a contar com tubulação de coleta, sistema de armazenamento, tratamento e aproveitamento do biogás. Além disso, foram instalados os seguintes equipamentos de medição na ETE:

- Medidor de vazão de biogás tipo Vortex na linha de coleta do biogás para queima;
- Medidor de composição do biogás, por meio de equipamento de medição dos teores de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub>, recebendo amostras de biogás bruto na saída do UASB, após a biodessulfurização no gasômetro, e após o carvão ativado (tratamento completo);
- Medidor do consumo de energia nos principais equipamentos da ETE;
- Medidor da geração de energia do motor-gerador.

Os valores medidos foram transmitidos através de banco de dados online e posteriormente tratados em planilha eletrônica. A operação do motor-gerador iniciou em setembro de 2016. Com os valores medidos foram calculadas também as relações unitárias de produção de metano por m<sup>3</sup> de esgoto e por kg de DQO removida para comparação com o modelo de Lobato et al. (2012).

Para verificação da compensação da energia gerada no horário de ponta, foi utilizada como base a resolução 687 da ANEEL, que permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora. Quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário (para consumidores com tarifa horária) ou na fatura dos meses subsequentes. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 60 meses. Caso haja um excedente de energia injetada na rede no período de ponta, esse saldo, para abater o consumo do período fora de ponta, deve ser submetido ao fator de ajuste. O fator de ajuste é o resultado da divisão do valor de uma componente da tarifa (a componente TE – Tarifa de Energia) de ponta pela fora de ponta.

No caso da concessionária de energia em questão e para a categoria da companhia de saneamento (horosazonal – verde A4 - companhias de saneamento) o fator resultante de ponta sobre fora de ponta foi de 6,12.

## VIABILIDADE ECONÔMICA

Para o estudo foi estimada inicialmente uma produção de metano de 1.247 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/d, o que corresponde às expectativas do início do projeto referentes ao tratamento de esgoto em reatores UASB com uma população de aproximadamente 97.200 habitantes. Na Tabela 1 são apresentadas as premissas adotadas, que estão justificadas ao longo do trabalho.

**Tabela 1. Premissas do Estudo**

| Crítério                     | Premissa   |
|------------------------------|--|
| Forma de aproveitamento      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidade motor-gerador ciclo Otto para geração de energia elétrica</li> <li>• Geração elétrica contínua (24 horas por dia)</li> </ul>  |
| Eficiência elétrica do motor | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 36,8 % , conforme fabricante (Dreyer &amp; Bosse,2016)</li> </ul>   |
| Tarifa de energia elétrica * | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Horosazonal - verde A4 para a faixa de tensão de 2,3 a 25 kV da COELBA com desconto de 15 % de dezembro de 2016 <ul style="list-style-type: none"> <li>o R\$ 0,26709/kWh fora da ponta;</li> <li>o R\$ 1,63388/kWh no horário da ponta (COELBA, 2016).</li> </ul> </li> </ul> |
| Câmbio base **               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• R\$ 3,21541 por Euro (Rosenfeldt et al. 2017)</li> </ul>  |
| Juros de empréstimo *        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10,20 % (Rosenfeldt et al. 2017)</li> </ul>   |
| Taxa de inflação *           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6,97 % (Rosenfeldt et al. 2017)</li> </ul>  |
| *                            | Base 12/2016   |
| **                           | Variação cambial média ponderada resultante das aquisições. Variado na análise de sensibilidade  |

A determinação da viabilidade econômica exige inicialmente o levantamento do custo de investimento, custo operacional e receitas. Os custos de investimento baseiam-se nas aquisições realizadas para o projeto P&D, sendo compostos por mão de obra, material e equipamentos. Para componentes instalados que foram importados, acrescentaram-se ainda os custos de importação.

A receita do sistema pode ser determinada a partir da energia elétrica gerada e a tarifa da concessionária de energia elétrica, acrescentado pelas contribuições ICMS e PIS/COFINS. Foi adotado funcionamento contínuo (24 h/dia) e foi calculada uma tarifa média, considerando que a tarifa vigente da ETE é de tipo horo-sazonal (A4 - Serviço Público - NI Serv. Água, Esgoto e Saneamento - 2,3 a 25kV). Esta tarifa considera um desconto de 15% para companhias de saneamento (COELBA, 2016).

Para o cenário de tempo de funcionamento da usina reduzida, independentemente da causa da redução (necessidade de manutenção, menor disponibilidade de biogás, etc.), optou-se por um modelo que preferencialmente gera energia no período da ponta, representado pela Equação (1) elaborada pelos autores, considerando que o ano tem 8.760 horas e aproximadamente 780 horas no horário de ponta. Assim a tarifa média ponderada para um tempo de funcionamento superior a 1092 horas, considerando a tarifa fora de ponta de R\$ 0,26709/kWh e tarifa na ponta de R\$ 1,63388/kWh referente ao dezembro de 2016 (COELBA, 2016), varia conforme o tempo de funcionamento do motor gerador entre R\$ 1,2434/kWh e R\$ 0,3888/kWh.

$$\bar{T} = \frac{780 \text{ h} \cdot T_p + (t_{\text{funcionamento}} \cdot \frac{5}{7} - 780 \text{ h} + t_{\text{funcionamento}} \cdot \frac{2}{7}) \cdot T_{fp}}{t_{\text{funcionamento}}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- T – Tarifa média ponderada;  
 $T_{fp}$  – Tarifa fora da ponta em R\$ por kWh;  
 $T_p$  – Tarifa da ponta em R\$ por kWh;  
 $t_{\text{funcionamento}}$  – Tempo de funcionamento em horas.

Após o lançamento dos custos durante um horizonte de planejamento de 25 anos, usualmente utilizado para empreendimentos no setor de saneamento (SANDER, 2003), foi aplicada uma taxa de inflação para os reinvestimentos dos itens de investimento conforme a expectativa de vida útil e para o custo operacional. Adotou-se a taxa média anual do Índice Nacional de Custo da Construção (INCC) a partir de dezembro de 2004 de 6,97 %, baseando-se nos dados disponíveis do Portal Brasil (2017). Para evitar distorções na avaliação, foi considerado ainda um valor residual, caso a vida útil supere o horizonte e adotada uma depreciação linear para determinação do valor residual.

Posteriormente foram somados os custos nominais e aplicada a taxa de desconto adotada para determinação do valor presente líquido (VPL), conforme a Equação (2).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde,

VPL – Valor presente líquido;  
 FC<sub>t</sub> – Fluxo de caixa no período;  
 i – taxa de desconto em %;  
 n – número de períodos.

A taxa de desconto foi determinada com base na taxa de juros para empréstimos do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) para empreendimentos de saneamento ambiental de dezembro de 2016 de 10,20 % (BNDES, 2017). Em seguida foi calculada a taxa interna de retorno (TIR) por alteração da taxa de desconto até alcançar um VPL igual a zero, conforme Equação (3).

$$VPL = 0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad \text{Equação (3)}$$

A TIR foi comparada com a taxa mínima de atratividade (TMA), que foi adotada igual a taxa de juros para empréstimos do BNDES. A viabilidade econômica é indicada quando a TIR for maior do que a taxa mínima de atratividade (REBELATTO, 2004).

Para a realização da análise de sensibilidade este procedimento foi repetido para vários cenários que são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2. Detalhamento do custo de investimento.**

| <b>Item</b> | <b>Custo em R\$</b>                        |
|-------------|--|
| Cenário I   | Cenário Base                               |
| Cenário II  | Aumento real da tarifa de energia elétrica |
| Cenário III | Variação cambial                           |
| Cenário IV  | Custo de manutenção                        |
| Cenário V   | Tempo de funcionamento                     |
| Cenário VI  | Caso ETE Jacuípe 2 – Autoconsumo           |
| Cenário VII | Caso ETE Jacuípe 2 – Injeção               |

O cenário I foi trabalhado com uma base dos custos atualizados, destacando a atualização e consolidação dos custos de investimento, bem como dos insumos do óleo lubrificante e carvão ativado após um estudo de mercado no Brasil, não considerando os custos das adequações indispensáveis em ETES com etapa anaeróbia como os sistema de captação e queima de biogás, visando à redução de impacto ambiental e de odores (ROSENFELDT, 2016).

Nos demais cenários foram adotados: um aumento real da tarifa de energia elétrica, uma desvalorização do Real, um aumento de custo de manutenção e uma redução do tempo de funcionamento anual, figurando assim o estudo de sensibilidade.

Para a determinação de um possível aumento real da tarifa de energia elétrica analisou-se no cenário II o comportamento da tarifa média de energia elétrica para o serviço de saneamento e da inflação (INCC) a partir de 2003, o que indica um aumento real da tarifa de 0,49 % ao ano, alíquota esta que foi adotada na análise de sensibilidade.

No cenário III foi estudada a influencia da flutuação cambial, que é um parâmetro importante, levando em consideração que os equipamentos importados correspondem ao valor de aproximadamente 78 %. Variou-se a

taxa cambial até chegar a uma TIR igual a taxa de desconto de 10,20 %, o que mostra a condição de empate entre a viabilidade e não viabilidade econômica.

No cenário IV adotou-se um custo de manutenção de 50 % acima do custo atualmente estimado, uma vez que o tempo de operação ainda não permite a determinação representativa de custos de manutenção que incide no Brasil.

Movido pelas experiências com relação às diferenças entre o biogás produzido em reatores UASB e a quantidade tecnicamente disponível, bem como com relação às paradas involuntárias da usina devido aos atrasos de aquisição de insumos necessárias para a operação, criou-se o cenário V. Neste cenário foi reduzido o tempo de funcionamento anual e conseqüentemente da geração de energia elétrica e receita até chegar a uma TIR igual a taxa de desconto, que mostra o limite da viabilidade econômica.

No cenário VI foi considerado a real quantidade de biogás captada na ETE Jacuípe 2 de 590 m<sup>3</sup>/d, que é reduzida em função da forma construtiva do reator UASB e da contribuição de esgoto afluente, resultando em uma geração de 558 MWh/a e portanto abaixo do limite de equilíbrio determinado no cenário V.

No cenário VII foi estudada a alternativa operacional, em qual a usina opera a plena carga no horário de ponta, injetando a energia excedente e gerando com a capacidade residual no horário fora da ponta.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### VAZÃO DE BIOGÁS

Neste estudo foi possível notar os diversos fatores que influenciaram, direta ou indiretamente, em maior ou menor escala, na produção e coleta de biogás. Entre eles: períodos com reduzida vazão de esgoto; baixa eficiência do reator UASB, sendo esta causada por diversos motivos, como acúmulo de areia ou outros materiais, chuvas intensas no período, problemas na operação e manutenção do UASB, entre outros. Na ETE em questão, outra adversidade que interferiu consideravelmente na produção de biogás foi a quantidade de reatores em funcionamento, uma vez que, apesar da ETE possui oito reatores UASB, a partir do dia 5 de janeiro apenas sete estavam operando e no dia 24 de janeiro um segundo reator foi desativado, pois precisava de reparos.

A variação da vazão de biogás durante o período monitorado pode ser observada na Figura 1.

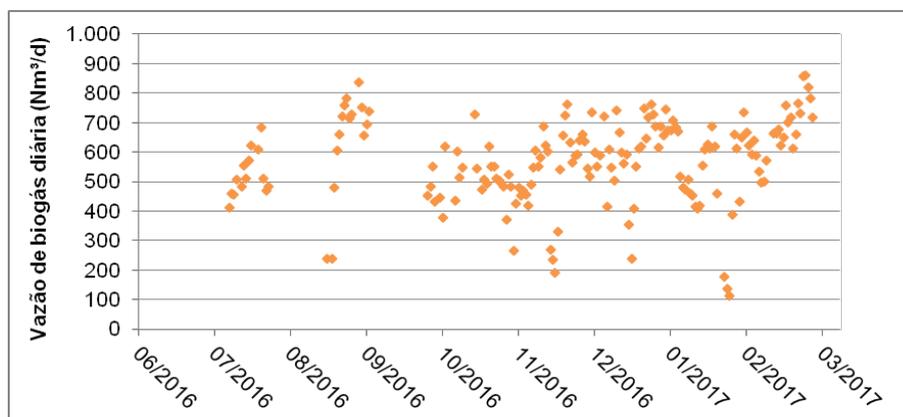


Figura 1. Vazão do biogás produzido nos reatores UASB

Os Box-plots a seguir resumem comportamento da vazão de biogás e da vazão de metano, respectivamente, nas Figura 2 e Figura 3.

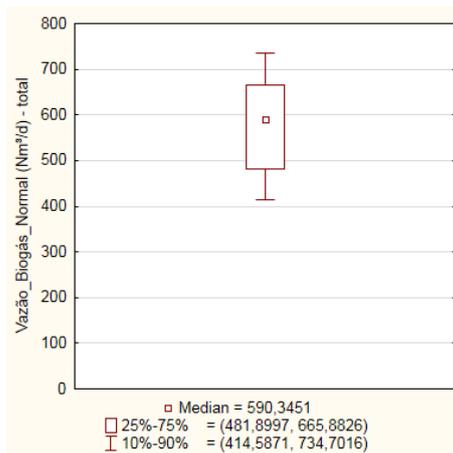


Figura 2. Box-plot Vazão de biogás normal total

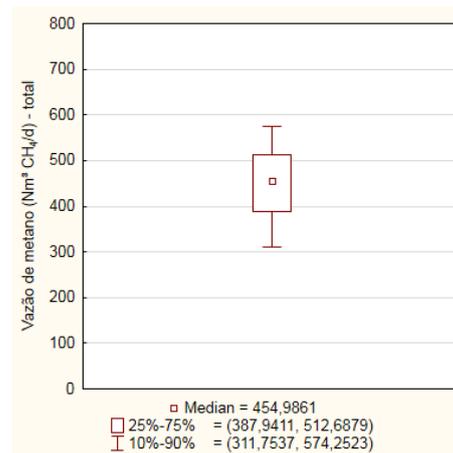


Figura 3. Box-plot da vazão de metano total

Para esse cenário a mediana da vazão diária foi de 590,3 Nm<sup>3</sup>/d, sendo que 50% dos dados variaram de 481,9 a 665,9 Nm<sup>3</sup>/d, e 80% entre 414,5 e 734,7 Nm<sup>3</sup>/d. Já a vazão de metano mediana foi de 455,0 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/d, com 50% dos dados entre 387,9 e 512,7 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/d e 80% entre 311,7 e 574,2 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/d.

A taxa de produção de metano por kg de DQO removida, que foi calculada a partir dos valores acima apresentados, é de 56,4 NL/kgDQOremov. Esse valor está abaixo dos encontrados no projeto de medições do Probiogás (CABRAL et al., 2017), que mediu a produção de biogás em 10 UASB em escala real no Brasil. Os resultados das medições indicaram taxas de 72 NL/kgDQOremov a 144 NL/kgDQOremov. O valor para a ETE em questão encontra-se na faixa inferior, como pode ser observado na Figura 4 a seguir.

Confrontando os valores com o modelo matemático proposto por Lobato (2011), conclui-se que a produção específica de metano da ETE encontra-se abaixo dos valores do pior cenário do modelo (113,4 L/kgDQOremov), que prevê sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano (≈ 34%). Especialmente a perda de metano é um fator com muita influência no caso deste projeto e acredita-se que a porcentagem de perdas do reator seja maior do que estimado no modelo e similar as ETEs investigadas por Cabral et al (2017).

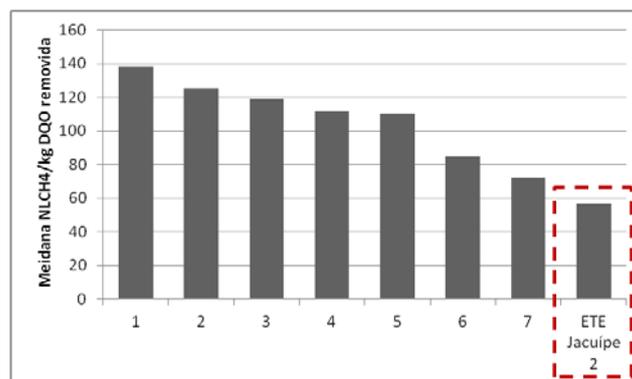


Figura 4. Relações unitárias encontradas em outros reatores UASB no Brasil (1 a 7) (CABRAL et al., 2017) em comparação com o encontrado na ETE em questão

Ressalta-se que as perdas podem variar de acordo com a tipologia do reator e destaca-se ainda que de acordo com a literatura para as condições do período de monitoramento da ETE, a parcela de CH<sub>4</sub> dissolvida no efluente pode ter variado entre 30 e 41%.

## COMPOSIÇÃO DE BIOGÁS

A Figura 5 apresenta as médias diárias das concentrações de Metano ( $\text{CH}_4$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e Oxigênio ( $\text{O}_2$ ) do biogás bruto, ou seja, antes de ter passado pelos processos de tratamento.

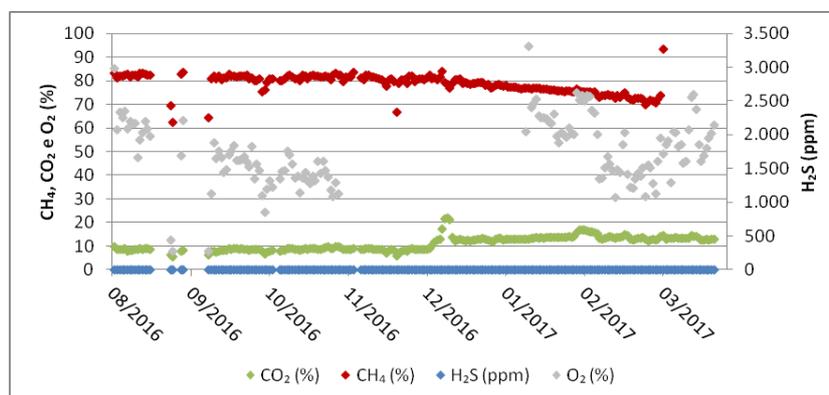


Figura 5. Composição do biogás bruto

A concentração mediana do biogás foi de 9,4% de  $\text{CO}_2$ , 79,2% de  $\text{CH}_4$ , 1.590 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  e 0,00% de  $\text{O}_2$ . Como reportado por Noyola, Morgan-Sagastume e Lópezhernández (2006), o biogás de reatores que tratam esgotos domésticos apresenta uma composição de metano (70 a 80%), nitrogênio (10 a 25%) devido à parcela de  $\text{N}_2$  dissolvida no esgoto doméstico e dióxido de carbono (5 a 10%). Na Tabela 3 pode-se observar a composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico comparado com as medianas encontradas neste estudo para o período de medição. É possível observar que todos os valores medidos se encontram dentro da faixa esperada.

Tabela 3. Composições típicas do biogás apresentadas por Lobato (2011) comparado com as medidas *in-loco*

| Parâmetro                                    | Unidade | Composição volumétrica típica para biogás de reatores anaeróbios | Mediana da composição |
|--|---------|--|-----------------------|
| Metano – $\text{CH}_4$                       | %       | 60 a 85  | 79,2                  |
| Gás carbônico – $\text{CO}_2$                | %       | 5 a 15   | 9,4                   |
| Monóxido de carbono – $\text{CO}$            | %       | 0 a 0,3  | Não analisado         |
| Nitrogênio – $\text{N}_2$                    | %       | 10 a 25  | Não analisado         |
| Hidrogênio – $\text{H}_2$                    | %       | 0 a 3  | Não analisado         |
| Sulfeto de hidrogênio – $\text{H}_2\text{S}$ | ppmv    | 1000 a 2000  | 1.590                 |
| Oxigênio – $\text{O}_2$                      | %       | Traços   | 0,0                   |

As Figura 6 e Figura 7 resumem o comportamento da concentração de biogás, sendo que este apresentou elevadas concentrações de metano, no qual a mediana foi de 79%, sendo que 50% dos dados ficaram entre 75,6% a 81,5% e 80% dos dados entre 73% a 82%. O  $\text{CO}_2$  variou de 7 a 14%, com mediana em torno de 9% e  $\text{O}_2$  ficou em 0%.



Figura 6. Box-plot do teor de metano

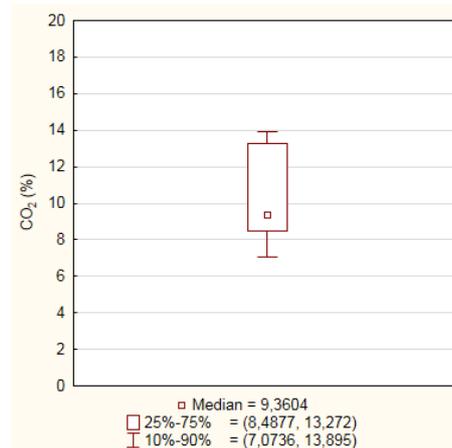


Figura 7. Box-plot do teor de dióxido de carbono

Em motores estacionários de combustão interna, o uso de biogás requer o cumprimento de certos requisitos de umidade, de teor de sulfeto de hidrogênio e outro componente que pode comprometer a integridade do motor. O sulfeto de hidrogênio ao reagir com água pode produzir ácido sulfúrico, composto que agride os componentes do sistema de aproveitamento de biogás. Por esse motivo, antes do componente de aproveitamento energético, é necessário realizar o tratamento para sua remoção, principalmente na utilização de motogeradores, que exigem um teor de H<sub>2</sub>S abaixo de 150 ppm devido ao alto potencial corrosivo desta substância (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Como é possível observar, a concentração de H<sub>2</sub>S no biogás bruto ficou em torno de 1.590 ppm, praticamente 10 vezes maior que o limite de segurança recomendado para o motor.

No presente estudo, o biogás bruto era tratado por biodessulfurização seguido de adsorção por carvão ativado. A biodessulfurização é a remoção de sulfeto de hidrogênio por meio de micro-organismos, que é realizada diretamente no gasômetro. Já o uso do filtro de carvão ativado objetiva a redução do teor residual de sulfeto de hidrogênio que permanece após a biodessulfurização. Geralmente o tratamento é economicamente viável para concentrações de sulfeto de hidrogênio até 500 ppm, podendo alcançar concentrações na saída inferiores a 1 ppm (SILVEIRA et al., 2015).

Na figura abaixo é possível visualizar a variação dos teores de H<sub>2</sub>S para: (1) biogás bruto; (2) após o tratamento por biodessulfurização; e (3) após o carvão ativado.

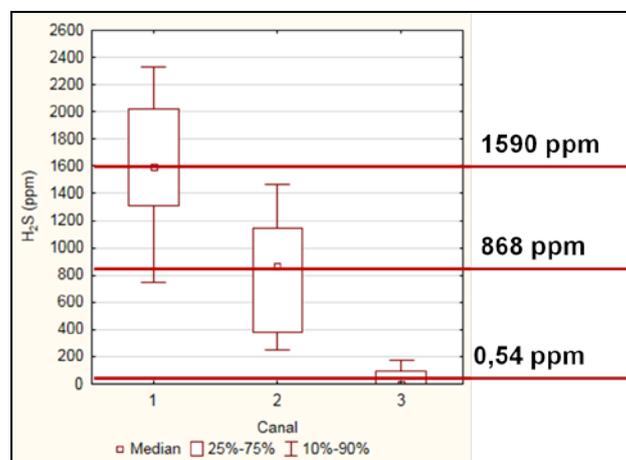


Figura 8. Box-plot do teor de sulfeto de hidrogênio

Comparando a coluna 1 com a 2 verifica-se a redução da concentração do H<sub>2</sub>S pela biodessulfurização no gasômetro. Durante todo o período, a biodessulfurização experimental apresentou uma eficiência média de 47% de remoção. O restante do H<sub>2</sub>S foi removido pelo sistema de carvão ativado (do canal 2 para 3), sendo que a concentração após essa etapa de tratamento ficou próxima a zero, com mediana em 0,54 ppm.

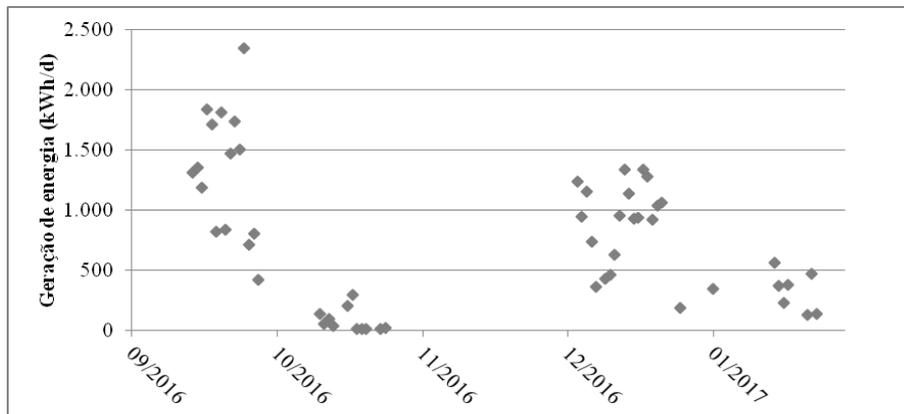
## CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Na ETE foi estudado o consumo elétrico de três sistemas no tratamento do efluente, que são: o pré-tratamento, que inclui a limpeza mecanizada do gradeamento, rosca transportadora do gradeamento, pontes removedoras de areia e roscas transportadoras dos dois desarenadores; o sistema de decantação secundária, contando com os decantadores secundários e as bombas de recirculação e remoção de lodo; e o tanque de aeração, que é a unidade principal do processo de lodo ativado, cujos equipamentos eletromecânicos são os aeradores.

O consumo de energia elétrica do tanque de aeração variou no período de observação entre 129,8 e 6.689 kWh/d, sendo o consumo médio de 2.625 kWh/d. Já o consumo do sistema de decantação secundária variou entre 3 e 1.305 kWh/d, com média de 254 kWh/d, dependendo principalmente do modo de operação das bombas de recirculação de lodo. Com relação ao pré-tratamento a média do consumo diário foi de 8,4 kWh/d. O consumo médio medido pela COELBA, que foi de 2.782 kWh/d, o que inclui outros equipamentos periféricos.

## GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

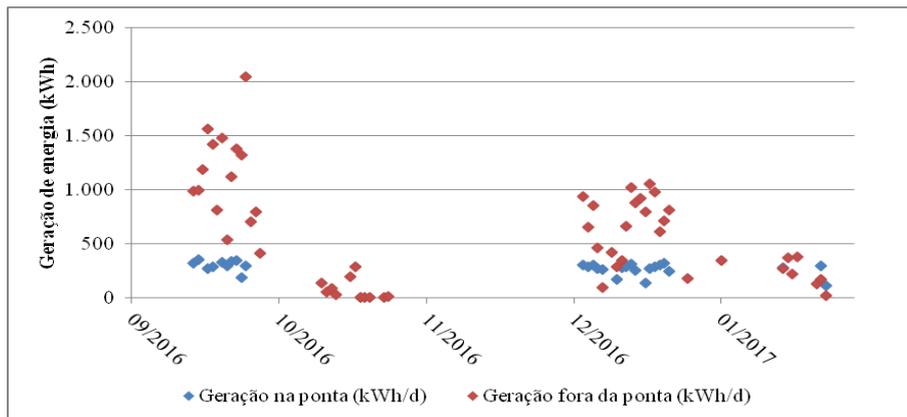
Na Figura 9 são apresentados os valores de geração de energia do motor-gerador movido a biogás, calculados a partir dos dados de potência ativa e tempo de funcionamento gravados..



**Figura 9. Dados de geração diária energia**

Considerando os dias de funcionamento normal, sem limitações por equipamentos periféricos danificados ou falta de insumos de operação, a média gerada foi de 1.114 kWh/d, com geração mínima de 362 kWh/d e máxima de 2.349 kWh/d. O valor médio representa 40% do consumo total da ETE.

É importante salientar que o motor-gerador era ligado preferencialmente à tarde, isso para que ele estivesse em pleno funcionamento durante os horários de ponta (das 18 até às 21 horas), ou seja, durante o horário em que a energia tem o valor mais elevado. O motor permanecia em funcionamento até que o gasômetro atingisse uma porcentagem em volume mínimo estipulada, evitando assim o esvaziamento completo deste e uma eventual subpressão. Na Figura 10 é possível observar a geração na ponta e fora ao longo dos dias.



**Figura 10. Geração diária de energia, devido em geração diária na ponta e fora da ponta**

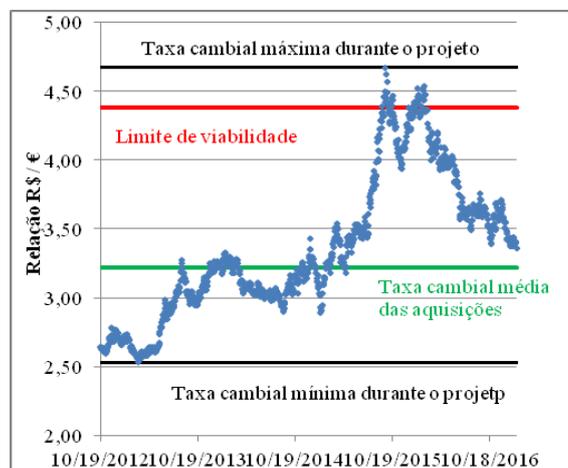
No período, foram gerados aproximadamente 8.070 kWh na ponta e 32.343 kWh fora da ponta, utilizando o preço para dezembro de 2016 da tarifa HOROSAZONAL - VERDE A3a (30 a 44 kV) de R\$ 1,63/kWh e R\$ 0,27/kWh respectivamente, a economia foi de aproximadamente R\$ 21.824,69.

## RESULTADOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA

No cenário I que serve de cenário base para a avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético de biogás em motores Ciclo Otto e para a análise de sensibilidade chegou-se em uma TIR igual a 19,61 %, o que indica sua viabilidade econômica.

O cenário II apresentou uma TIR de 20,86 %, valor este maior do que o cenário I. Este resultado é plausível uma vez que o aumento real da tarifa de energia elétrica de 0,49 %, acima da inflação, impacta somente nas receitas do empreendimento. Com este cenário mostrou-se o impacto que tem o valor da tarifa sobre a viabilidade, já que o custo evitado de energia é a receita nesse caso. Desta maneira, a tarifa com desconto de 15% para companhias de saneamento afeta diretamente na viabilidade já que reduz a receita, e acaba por desincentivar medidas de redução de gastos de energia, seja por efficientização energética ou energias alternativas.

O cenário III mostrou que uma taxa de câmbio de R\$ 4,38 por Euro representa o limite da viabilidade econômica. Ao longo do projeto a taxa de câmbio variou 84,9 % (como mostra a Figura 11) e representa assim o indicador que mais significativamente influencia a viabilidade econômica.



**Figura 11. Histórico da taxa cambial durante o projeto**

Embora tenham sido considerados os valores atualizados referentes ao material de consumo (óleo lubrificante e carvão ativado) para o cálculo dos custos de operação, ainda há uma incerteza referente aos custos de

manutenção. O cenário IV, onde foi adotado um aumento de custo de manutenção em 50 % acima do valor estimado resultou em uma TIR de 13,92 %.

No cenário V, onde foram adotados: um aumento real da tarifa de energia elétrica, um custo de manutenção de 50 % acima do estimado e uma taxa de câmbio atual de R\$ 3,34/€, chegou-se em um tempo de funcionamento de 4.529 horas por ano (limite da viabilidade econômica). Este tempo de funcionamento corresponde a um consumo de 301.678 m<sup>3</sup> de biogás e uma geração de 866 MWh por ano. No projeto, este valor não está sendo atingido atualmente pela limitação da disponibilidade de biogás atualmente observada na ETE Jacuípe 2, onde a projeção de geração de energia elétrica é de 64,5 % deste limite. Vale destacar que o aproveitamento energético de biogás como modelo de negócio fica economicamente viável neste cenário com tempo de funcionamento superior a 4.529 horas e uma geração de 866 MWh/ano.

Confrontando a quantidade de biogás tecnicamente disponível na ETE Jacuípe 2 e o potencial de geração de energia elétrica resultante de 558 MWh/a, evidenciou-se que a situação atual não possui viabilidade econômica, apresentando uma TIR de 6,31 %, e portanto inferior à taxa de desconto, como mostrado no cenário VI.

O cenário VII também considera a situação atual da ETE Jacuípe II e, portanto o potencial de geração de 558 MWh/a. Porém, foi priorizada a geração em horário de ponta que resultou em 136 MWh no horário de ponta e 422 MWh em horário fora da ponta, o que alavancou a receita substancialmente em comparação com o cenário VI, resultando em uma TIR de 10,71 %. Embora a viabilidade indicada não seja expressiva, é visível que mesmo com a geração inferior ao limite estabelecido para operação contínua de 865.936 kWh/ano no cenário VI, seria possível de tornar o empreendimento economicamente atrativo.

O resumo dos resultados dos cenários são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4. Resumo dos resultados**

| Descrição               | Cenário       |               |               |               |                |                |                |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
|                         | I             | II            | III           | IV            | V              | VI             | VII            |
| Aumento da Tarifa       | 0%            | <b>0,49%</b>  | 0%            | 0%            | <b>0,49%</b>   | <b>0,49%</b>   | <b>0,49%</b>   |
| Taxa Cambial em R\$/EUR | 3,22          | 3,22          | <b>4,38</b>   | 3,22          | <b>3,34</b>    | 3,22           | 3,22           |
| Manutenção              | 100 %         | 100 %         | 100 %         | <b>150%</b>   | <b>150%</b>    | 100 %          | 100 %          |
| Tempo de Funcionamento  | 8.000         | 8.000         | 8.000         | 8.000         | <b>4.529</b>   | <b>4.853</b>   | <b>4.831</b>   |
| Geração de energia      | 1.529.419     | 1.529.419     | 1.529.419     | 1.529.419     | <b>865.936</b> | <b>5581.33</b> | <b>5581.33</b> |
| VPL em R\$              | 2.649.347     | 3.258.029     | 0             | 988.120       | 0              | -1.006.062     | 139.093        |
| <b>TIR</b>              | <b>19,61%</b> | <b>20,86%</b> | <b>10,20%</b> | <b>13,92%</b> | <b>10,20%</b>  | <b>6,31</b>    | <b>10,71%</b>  |

## CONCLUSÕES

A pesquisa realizada sobre a quantidade e qualidade do biogás produzido em um reator UASB operado em condições reais proporcionou a confrontação de modelos para a determinação da produção de biogás com a quantidade tecnicamente realmente captável e conseqüentemente disponível para o aproveitamento. Os valores de qualidade do biogás estavam dentro do esperado para reatores UASB. Sendo necessária a remoção do H<sub>2</sub>S antes do motor gerador. O monitoramento das concentrações nas duas etapas de tratamento, permitiram demonstrar que o tratamento do biogás composto por biodessulfurização e carvão ativado tem se mostrado eficiente para remoção de H<sub>2</sub>S anteriormente ao motor-gerador.

Identificou-se uma diferença substancial entre a produção de biogás esperada e a quantidade tecnicamente captável e, portanto, disponível para o aproveitamento. A quantidade de metano captado correspondeu a 37% da vazão teórica estimada. Foi possível atribuir qualitativamente as perdas a problemas de métodos construtivos adotados para a execução de reatores tipo UASB.

Com base no primeiro levantamento de custos de investimento e de operação reais de um arranjo para geração de energia a partir do biogás proveniente de reatores anaeróbios (UASB) de ETES no Brasil, foi possível mostrar as condições mínimas para alcançar uma viabilidade econômica. No caso em que a quantidade de

biogás tecnicamente disponível é compatível com as características do motor (potência instalada de 191 kW<sub>e1</sub>), gerando a energia elétrica de 1.529 MWh/a e permitindo o alcance do tempo de funcionamento de 8.000 horas, pode-se atingir uma viabilidade econômica com TIR de 19,61 %. Mostrou-se que a geração de energia elétrica inferior a 866 MWh/a para este arranjo sem priorização de geração no horário de ponta, tornaria o empreendimento economicamente não viável, como seria no caso da ETE Jacuípe 2.

Estas experiências mostraram a necessidade de averiguar o real potencial de produção de biogás por meio de medições antes de iniciar um projeto de uma planta de aproveitamento de biogás.

Embora não tenha sido estudado em sua totalidade o impacto de operar o motor com potência total no horário de ponta e injetar o excedente na rede na viabilidade econômica, foi mostrado por meio do cenário VII como esta estratégia pode tornar o empreendimento economicamente mais atrativo. Mesmo com a geração de energia elétrica inferior ao limite indicado pelo cenário V, foi possível alcançar a viabilidade econômica mesmo considerando a situação adversa da ETE Jacuípe II.

A resolução 687 da ANEEL permite a compensação da energia e pode-se concluir pelos resultados deste cenário, que é um mecanismo importante para a viabilidade do sistema.

Durante a análise de sensibilidade destacou-se a taxa cambial como o parâmetro de influência significativa sobre a viabilidade econômica. Com o intuito de reduzir a vulnerabilidade de um projeto de aproveitamento de biogás, no que tange a influência da taxa cambial, deve ser estudado se equipamentos disponíveis no mercado nacional são capazes de substituir os equipamentos importados.

Evidenciou-se que um aumento real da tarifa de energia elétrica aumenta a viabilidade econômica e conseqüentemente o desconto de 15 % que está concebido ao setor de saneamento impacta negativamente a viabilidade, bem como às medidas de aumento de eficiência energética no modo geral.

Destaca-se também, que apesar de não quantificado, com a implantação do projeto, há também um benefício sócio-ambiental, pois além do benefício econômico, com a implantação da usina, deixou-se de emitir um gás de efeito estufa (metano) e um gás de efeito odorante (H<sub>2</sub>S).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 687*: Procedimentos de Distribuição – PRODIST, p. 25, 2015.
2. Brasil, *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos*. Brasília, DF.: SNMA/MCIDADES, p. 212, 2016.
3. BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. *Finem - Saneamento ambiental e recursos hídricos*. [Online]. Disponível: <http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-saneamento-ambiental-recursos-hidricos>. Acesso em 30/01/2017
4. CABRAL, B. G. C., et. al. *Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil*. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.
5. CABRAL, B. G. C. *Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário em reatores UASB/RALF*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - UFSC. Florianópolis. 2016
6. CABRAL, C. G. B. et al.. *Resultados do projeto de medições de biogás em Reatores anaeróbios*. Brasília, DF.: Ministério das Cidades, p. 130, 2017.
7. CHERNICHARO, C. A. L. et al. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. Reviews In *Environmental Science And Bio/technology*, [s.l.], v. 14, n. 4, p.649-679, 21 set. 2015. Springer Science + Business Media. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>>. Acesso em: 25 mar. 2015.
8. COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA. *Tabela de tarifa e preço final de energia elétrica – Dezembro/2016*. [Online]. Disponível: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiY3YSjkaDTAhVGTJAKHdTqA98QFgg2MAM&url=http%3A%2F%2Fservicos.coelba.com.br%2Fresidencial-rural%2FDocuments%2Fbaixa->

- tensao%2FTarifas%2Fagosto\_2016%2FGRUPO\_B.pdf&usg=AFQjCNG1kUZ7twps46iDZZdum3C78HWNCw&sig2=KjcoisKhY80xMTIFGh59QQ. Acesso em 27/01/2017.
9. DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. Wiley-VCH, Weinheim, p. 443, 2008.
  10. DREYER & BOSSE. Ficha de dados técnicos para motores de biogás - Vita-Pico 190. 2016.
  11. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T. F... et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
  12. LOBATO, L. C. S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos*. Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2011.
  13. LOBATO, L.C.S., CHERNICHARO, C.A.L., SOUZA C.L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. *Water Science and Technology*, 66 (12) p. 2745-2753, 2012.
  14. NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZHERNÁNDEZ, J. E. *Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery*. Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, v. 5, p. 93-114, 2006.
  15. PORTAL BRASIL. Índice Nacional De Custo Da Construção Do Mercado - INCC-M - <http://www.portalbrasil.net/incc.htm>. Acesso em 31/01/2017
  16. REBELATTO, D. Projeto de Investimento. Editora Manole Ltda, 2004.
  17. ROSENFELDT, S. et al. Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás. Brasília, DF.: Ministério das Cidades, 2016, 145 p.
  18. ROSENFELDT, S. et al. Análise da viabilidade econômica de ETE para geração de energia elétrica no Brasil. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL); 2 a 4 de agosto de 2017. João Pessoa, PB; 2017.
  19. SANDER, T. *Ökonomie der Abwasserbeseitigung: Wirtschaftlicher Betrieb von kommunalen Kläranlagen*. Berlin Heidelberg: Springer-verlag, p. 320, 2003.
  20. SILVEIRA, B. et al. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto*. Brasília, DF. Ministério das Cidades, p. 183, 2015.
  21. SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A.L., AQUINO, S.F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. *Water Science and Technology*, v. 64, n. 11, p. 2259-2264, 2011.