

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS MEDIANEIRA  
ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS**

**JULIO CEZAR RIETOW**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA EM  
UMA ETE COM PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

**MONOGRAFIA**

**MEDIANEIRA**

**2019**

**JULIO CEZAR RIETOW**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA EM  
UMA ETE COM PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Hermes Passig

Co-orientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti

**MEDIANEIRA**

**2019**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA ETE COM PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

por

**JULIO CEZAR RIETOW**

Esta Monografia foi apresentada em 04 de maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Fernando Hermes Passig  
Prof. Orientador

---

Thiago Edwiges  
Membro titular

---

Eduardo Eyng  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar saúde e uma família maravilhosa.

Aos meus pais Wilson Estefano Rietow e Natividade Sebastiana Otremba Rietow pelo grande esforço, carinho e dedicação para que eu pudesse realizar meus estudos. Espero um dia poder dar aos meus filhos o carinho e amor que vocês me deram.

À minha amada esposa Jéssica Cristine Ostrovski, melhor amiga e companheira. Obrigado por estar ao meu lado sempre e também por entender os momentos de ausência.

Aos meus irmãos Wilson Estefano Rietow Júnior e Schirley de Fátima Rietow Artur pela confiança e apoio em todos os momentos de minha vida. Com vocês aprendi que não importa a distância entre nós. Sempre seremos unidos, fortes e acima de tudo, irmãos.

Ao meu orientador Fernando Hermes Passig. Obrigado pela confiança e disponibilidade durante a realização da especialização.

Ao meu co-orientador Gustavo Rafael Collere Possetti. Muito obrigado pela atenção e parceria em praticamente todos os meus projetos acadêmicos até aqui realizados.

Aos professores do curso de especialização, em especial, ao Dr. Thiago Edwiges e a Dr.<sup>a</sup> Janaina Camile Pasqual Lofhagen.

Aos meus colegas de especialização.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

RIETOW, Julio Cezar. **Avaliação do processo de cogeração de energia em uma ETE com produção de biogás**. 2019. 26 de folhas. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

O processo de cogeração de energia a partir do aproveitamento energético do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto (ETEs), tem se mostrado como uma prática promissora para se alavancar os serviços de esgotamento sanitário no Brasil. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar a possibilidade de uso do biogás, produzido em reatores UASB de uma ETE de médio porte, para a realização do processo de cogeração de energia. Para tanto, o potencial de energia elétrica do conjunto moto-gerador foi comparado com a demanda de energia da ETE. Foi também levantado se o potencial térmico oriundo dos gases quentes de exaustão do sistema de geração de energia elétrica seria suficiente para a secagem térmica do lodo produzido na própria planta de tratamento. Para as estimativas de produção de biogás e energia, utilizou-se o software ProBio 1.0, que levou em consideração todas as rotas possíveis de conversão da matéria orgânica dentro de um reator UASB. Desse modo, a ETE em estudo apresentou uma produção de biogás de  $(2.443 \pm 1.236) \text{ Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , e um potencial de geração de energia elétrica igual a  $(5.968 \pm 3.020) \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$ . Com uma potência a ser instalada igual a 250 kW, a operação do conjunto moto-gerador compensaria em aproximadamente 51% a demanda de energia elétrica da estação, evitando um custo de R\$ 533.390,61 durante o período de investigação. Adicionalmente, a utilização do potencial térmico oriundo dos gases quentes de exaustão do conjunto moto-gerador, sendo esse igual  $(4.241 \pm 2.172) \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$ , supriria cerca de 41% da demanda energética necessária para a realização da secagem térmica do lodo.

**Palavras-chave:** Cogeração; Geração distribuída; Biogás; Secagem térmica.

## ABSTRACT

RIETOW, Julio Cezar. **Evaluation of the energy cogeneration process in a STP with biogas production**. 2019. 26 folhas. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

The process of energy cogeneration from the energetic use of biogas produced in sewage treatment plants (STPs) has been shown to be a promising practice to leverage sanitary sewage services in Brazil. In this context, the present work had the objective of investigating the possibility of using biogas, produced in UASB reactors of a medium-sized STP, for the realization of the energy cogeneration process. For this purpose, the electric power potential of the motor-generator set was compared to the energy demand of the STP. It was also raised if the thermal potential arising from the hot exhaust gases from the electric power generation system would be sufficient for the thermal drying of the sludge produced in the treatment plant itself. For the biogas and energy production estimates, ProBio 1.0 software was used, which took into account all the possible conversion routes of the organic matter inside a UASB reactor. Thus, the STP under study had a biogas production of  $(2,443 \pm 1,236) \text{ Nm}^3.\text{d}^{-1}$  and a potential of electric power generation of  $(5,968 \pm 3,020) \text{ kWh.d}^{-1}$ . With a power to be installed equal to 250 kW, the operation of the motor-generator set would compensate the station's electric energy demand by approximately 51%, avoiding a cost of R\$ 533,390.61 during the investigation period. In addition, the use of the thermal potential from the hot exhaust gases of the motor-generator set, which is  $(4,241 \pm 2,172) \text{ kWh.d}^{-1}$ , would supply about 41% of the energy demand required for the thermal drying of the sludge.

**Keywords:** Cogeneration; Distributed generation; Biogas; Thermal drying.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - a) Comparação do consumo de energia elétrica na ETE com o potencial de geração de energia a partir do aproveitamento do biogás produzido nos reatores UASB; b) Comparação dos custos do consumo de energia elétrica na ETE com os custos evitados a partir da geração de energia elétrica.....	11
Figura 2 - Exemplo do novo fluxograma da ETE em estudo considerando o processo de cogeração de energia.....	14

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de entrada utilizados no <i>software</i> ProBio 1.0 para a estimativa da produção de biogás em reatores UASB.....	3
Tabela 2 - Equações para cálculo de produção de biogás, potencial de cogeração de energia, produção de lodo e de demanda energética do processo de secagem térmica.....	6
Tabela 3 - Estatística descritiva dos dados de produção de biogás e metano, assim como dos potenciais de geração de energia elétrica e térmica da ETE (período de investigação de 365 dias).....	10
Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados de produção de lodo nos diferentes processos da ETE em estudo (período de investigação de 365 dias).....	13



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>2</b>
2.1 LOCAL DE ESTUDO.....	2
2.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DO POTENCIAL DE COGERAÇÃO DE ENERGIA.....	3
2.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE LODO.....	4
2.4 DEMANDA ENERGÉTICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DO LODO.....	4
2.5 DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA DA ETE.....	5
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>7</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ESGOTO NA ETE.....	7
3.2 BALANÇO DE MASSA DE DQO NOS REATORES UASB.....	7
3.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS E POTENCIAL DE COGERAÇÃO DE ENERGIA.....	8
3.4 ANÁLISE DE CUSTOS EVITADOS A PARTIR DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE.....	9
3.5 PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DO LODO A PARTIR DO APROVEITAMENTO DOS GASES QUENTES DE EXAUSTÃO DO MCI.....	12
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>15</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A partir das Resoluções Normativas da ANEEL nº 482/2012, e sua atualização nº 687/2015, que estabeleceram as condições gerais para o acesso das micro e minigerações distribuídas de energia elétrica em todo o território brasileiro, a ANEEL estima que mais de 1 milhão de consumidores deverão produzir sua própria energia elétrica até o ano de 2024, representando uma potência instalada de 4,5 GW (ANEEL, 2016). Isso equivale aproximadamente a 1/3 da potência instalada da Usina Hidrelétrica de Itaipu. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor de saneamento é responsável por cerca de 3% do consumo total de energia elétrica no país, podendo, desse modo, ser um dos principais beneficiados a partir da adoção da geração distribuída de energia (EPE, 2016). Isto se deve, principalmente, pelas potencialidades da geração hidroenergética em sistemas de distribuição de água e pela cogeração de energia em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), a partir do aproveitamento do biogás produzido em reatores anaeróbios (POSSETTI *et al.*, 2018).

Destaca-se que o processo de cogeração de energia em ETEs com produção de biogás pode apresentar significativas reduções dos custos operacionais para as companhias de saneamento, não somente pela compensação de energia elétrica, mas também pela oportunidade do aproveitamento dos gases quentes oriundos do motor de combustão interna (MCI) para a secagem e higienização do lodo (ROSA *et al.*, 2016).

De acordo com Andreoli *et al.* (2014), os custos inerentes ao gerenciamento do lodo podem atingir de 20 a 60% dos custos operacionais de uma ETE. Os atuais sistemas empregados no Brasil para o desaguamento e higienização do lodo, demandam, na grande maioria das vezes, de incorporação de produtos químicos, de grandes áreas para a realização de seu tratamento e de elevados tempos de cura para a sua completa higienização (BITTENCOURT *et al.*, 2014). Desse modo, o aproveitamento dos gases quentes produzidos durante o processo de cogeração de energia surge como uma promissora alternativa para melhorar o gerenciamento do lodo em uma ETE.

Apesar dos potenciais benefícios econômicos, sociais, ambientais e operacionais do processo de cogeração de energia em ETEs, destaca-se que tal prática ainda é incipiente no país. Além disso, as informações dedicadas ao processo de tomada de decisão sobre a viabilidade do processo não estão prontamente disponíveis (GOMES *et al.*, 2017). Destaca-se ainda a dificuldade na quantificação de biogás produzido pelos reatores anaeróbios, sendo boa parte dos métodos tradicionais de medições morosos e com um alto custo de análise

(POSSETTI *et al.*, 2013). Para minimizar tais problemas, o Guia Técnico de aproveitamento energético de biogás em ETEs sugere que quando as análises de medições não forem exequíveis, modelos de estimativa de produção de biogás, que levem em consideração as perdas de metano e as conversões da matéria orgânica dentro dos reatores anaeróbios, devem ser empregados (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo investigar a possibilidade de uso do biogás, produzido em reatores anaeróbios de uma ETE de médio porte, para a realização do processo de cogeração de energia. O potencial de energia elétrica foi então comparado com a demanda de energia da ETE, possibilitando, dessa forma, avaliar o custo evitado a partir do aproveitamento energético do biogás. Adicionalmente, foi também levantado se os gases quentes oriundos do MCI seriam suficientes para a realização da secagem e higienização térmica do lodo produzido na própria planta de tratamento.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 LOCAL DE ESTUDO**

O presente estudo foi desenvolvido com base nos dados de uma ETE situada na região sul do Brasil. A ETE possui capacidade de projeto para tratar até  $440 \text{ L.s}^{-1}$  de esgoto, equivalente a uma população de 230 mil habitantes. A estação apresenta unidades de tratamento preliminar (duas grades mecanizadas e um desarenador), de tratamento biológico anaeróbio (6 reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo – UASB) e aeróbio (lagoa aerada seguida de lagoa de decantação).

O biogás produzido pelos reatores UASB atualmente não é utilizado para fins energéticos na estação. Desse modo, esse gás é captado e conduzido até um queimador enclausurado, apresentando uma elevada eficiência de queima, reduzindo de forma significativa as taxas de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera. Já o lodo excedente produzido nos reatores UASB e nas lagoas aerada e de decantação, é descartado periodicamente, sendo então adensado e desaguado em uma centrífuga. Por fim, é feita a incorporação de cal no lodo, sendo essa mistura encaminhada até um pátio de cura, permanecendo ali por um período mínimo de 30 dias. Posteriormente, o lodo já higienizado pode então ser utilizado para fins agrícolas.

## 2.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DO POTENCIAL DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

As estimativas de produção de biogás pelos reatores UASB da ETE em estudo foram realizadas por meio do *software* ProBio 1.0, que possui como base o modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2012). O *software* em questão foi desenvolvido em parceria entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Pautado no balanço de massa de matéria orgânica, o modelo matemático utilizado levou em consideração todas as rotas de conversão da demanda química de oxigênio (DQO) dentro de um reator UASB, sendo elas: DQO convertida em lodo, DQO utilizada na redução de sulfato, DQO não convertida em metano e perdida com o efluente, DQO convertida em metano e perdida dissolvida no efluente, DQO convertida em metano e perdida com o gás residual, DQO convertida em metano e perdida para a atmosfera e DQO convertida em metano e presente no biogás.

Os dados de entrada utilizados no *software* foram: vazão de esgoto afluente ( $Q_{\text{méd}}$ ), DQO afluente do esgoto ( $DQO_{\text{afluente}}$ ), eficiência de remoção de DQO ( $E_{DQO}$ ), concentração de sulfato no afluente ( $C_{SO_4}$ ), eficiência de redução de sulfato ( $E_{SO_4}$ ), temperatura operacional do reator ( $T$ ), percentual de metano presente no biogás ( $C_{CH_4}$ ), perda de metano com o gás residual ( $p_W$ ), outras perdas de metano na fase gasosa ( $p_O$ ) e perda de metano junto ao efluente ( $p_L$ ). Para os dados de  $Q_{\text{méd}}$ ,  $DQO_{\text{afluente}}$  e  $E_{DQO}$  foram utilizados os valores reais fornecidos pela companhia de saneamento responsável pela ETE. Os valores são referentes a um período de 365 dias. Já para os outros dados de entrada, foram utilizados os valores de literatura indicados por Lobato *et al.* (2012) (ver Tabela 1), sendo esses responsáveis por uma estimativa mais conservadora de produção de biogás em reatores UASB.

Tabela 1. Dados de entrada utilizados no *software* ProBio 1.0 para a estimativa da produção de biogás em reatores UASB

Parâmetro	Unidade	Valor
Concentração de sulfato no afluente ( $C_{SO_4}$ )	$gSO_4.m^{-3}$	80
Eficiência de redução de sulfato ( $E_{SO_4}$ )	%	80
Temperatura operacional do reator ( $T$ )	°C	25
Percentual de $CH_4$ no biogás ( $C_{CH_4}$ )	%	70
Perda com o gás residual ( $p_W$ )	%	7,5
Outras perdas ( $p_O$ )	%	7,5
Perda com o efluente ( $p_L$ )	$mg.L^{-1}$	25

Fonte: Von Sperling e Chernicharo (2005); Glória *et al.* (2008); Souza *et al.* (2011); Lobato *et al.* (2012).

Com os dados de entrada definidos, o *software* então realizou o balanço de massa de DQO dos reatores UASB, permitindo a obtenção dos valores de produção de biogás ( $P_{\text{Biogás}}$ ) e de energia química disponível ( $P_{\text{EReal}}$ ). A partir desses dados, foi então estimado, por meio da Equação 1, o potencial de geração de energia elétrica ( $P_{\text{Elétrica}}$ ) a partir da queima do biogás em um MCI. Para fins de cálculo, a eficiência elétrica ( $E_{\text{Elétrica}}$ ) do MCI utilizada foi de 35%. Adicionalmente, foi também estimado o potencial térmico ( $P_{\text{Térmico}}$ ) associado com os gases quentes de exaustão oriundos do MCI (Equação 2).

## 2.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE LODO

A estimativa de produção de lodo ( $P_{\text{Lodo}}$ ) foi realizada por meio da soma do lodo produzido nas unidades de tratamento biológico (reatores UASB + lagoa aerada seguida por lagoa de decantação). Para tanto, foram inicialmente calculadas as produções diárias de sólidos suspensos nos reatores UASB ( $P_{\text{UASB}}$ ) e nas lagoas aerada e de decantação ( $P_{\text{Lagoas}}$ ), conforme apresentado pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

A produção volumétrica de lodo pode então ser calculada conforme apresentado na Equação 5. Para tanto, considerou-se que tanto o lodo produzido nos reatores UASB, quanto o lodo produzido nas lagoas aerada e de decantação, tivessem um teor de sólidos totais (%ST) iguais a 4% e massas específicas ( $\gamma$ ) iguais a  $1.020 \text{ kg.m}^{-3}$ . Adicionalmente, foram também estimadas as produções de lodo no adensador ( $P_{\text{Lodo\_Ad}}$ ) e na centrífuga ( $P_{\text{Lodo\_Cen}}$ ), conforme destacado nas Equações 6 e 7, respectivamente. Para fins de cálculo, empregou-se uma captura de sólidos no adensador ( $CS_{\text{Ad}}$ ) igual a 85% e um teor de sólidos totais na massa de lodo (%ST<sub>Ad</sub>) após o processo igual a 7%. Considerou-se que a massa específica do lodo ( $\gamma_{\text{Ad}}$ ) no adensador não seria alterada. Já na centrífuga, definiu-se uma captura de sólidos ( $CS_{\text{Cen}}$ ) igual a 90%, um teor de sólidos totais na massa de lodo processada (%ST<sub>Cen</sub>) igual a 20% e uma massa específica do lodo desaguado ( $\gamma_{\text{Cen}}$ ) igual a  $1.050 \text{ kg.m}^{-3}$ .

## 2.4 DEMANDA ENERGÉTICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DO LODO

O sistema de secagem utilizado no presente estudo foi um secador térmico de tambor rotativo. Esse tipo de secador é responsável pelo aquecimento do lodo em um ambiente controlado, permitindo altas taxas de remoção de água e ainda possibilitando a higienização

do material, sem a necessidade, portanto, da incorporação de produtos químicos (PANEPINTO *et al.*, 2016).

Estudos realizados por Possetti *et al.* (2015) em um secador térmico piloto de tambor rotativo, destacaram que para a remoção de 1 kg de água presente no lodo são necessários cerca de 1,0 kWh de energia, considerando uma eficiência energética do sistema de aproximadamente 85%.

Desse modo, para a determinação da demanda energética do secador térmico, foram realizados, primeiramente, os cálculos da produção volumétrica de lodo no secador ( $P_{Lodo\_Sec}$ ) e da massa de água evaporada ( $M_{Água\_Ev}$ ) nesse sistema. Conforme destacado na Equação 8, foram adotados os seguintes parâmetros de cálculo para a obtenção da produção volumétrica de lodo no secador: captura de sólidos no secador ( $CS_{Sec}$ ) igual a 100%, teor de sólidos totais no lodo após o processo de secagem ( $\%ST_{Sec}$ ) igual a 80% e massa específica do lodo seco ( $\gamma_{Sec}$ ) igual  $1.100 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Com os valores da produção volumétrica de lodo no secador térmico ( $P_{Lodo\_Sec}$ ), foi possível calcular a massa de água evaporada ( $M_{Água\_Ev}$ ) no sistema, conforme apresentado na Equação 9. Por fim, para a determinação da demanda energética da secagem térmica do lodo ( $E_{Secagem\_Térmica}$ ), foram então multiplicados os valores da massa de água evaporada do lodo e da energia requerida do secador térmico de tambor rotativo para a evaporação de 1 kg de água, conforme apresentado na Equação 10.

Na Tabela 2 estão destacadas todas as equações empregadas no presente estudo.

## 2.5 DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA DA ETE

A análise de custos evitados da ETE em estudo foi pautada no aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica, deixando de adquirir, desse modo, a energia ativa da concessionária local. Para tanto, foram levantados o enquadramento tarifário da planta e seu histórico de consumo de eletricidade mensal ao longo do período de investigação. Essas informações foram fornecidas pela companhia de saneamento responsável pela ETE e consideraram todos os gastos energéticos da planta (operação da estação elevatória de esgoto, dos agitadores da lagoa aerada, da centrífuga, do bombeamento do lodo, do consumo administrativo e laboratorial, bem como dos demais equipamentos elétricos instalados). Destaca-se que para a realização da análise de custos evitados, foi incorporado no consumo de eletricidade mensal da ETE o consumo hipotético do secador térmico de lodo. Para tanto,

considerou-se um equipamento com potência de consumo igual a 56,2 kWh, operando 24 horas por dia.

Tabela 2. Equações para cálculo de produção de biogás, potencial de cogeração de energia, produção de lodo e de demanda energética do processo de secagem térmica

Nº	Equação	Observações
1	$P_{Elétrica} = P_{EReal} \times E_{Elétrica}$	$P_{Elétrica}$ = potencial de geração de energia elétrica no MCI (kWh.d <sup>-1</sup> ); $P_{EReal}$ = potencial energético máximo disponível (kWh.d <sup>-1</sup> ); $E_{Elétrica}$ = eficiência elétrica do MCI (35%) (USEPA, 2003).
2	$P_{Térmico} = P_{EReal} \times E_{Térmico}$	$P_{Térmico}$ = potencial de geração de energia térmica associada com os gases quentes de exaustão do MCI (kWh.d <sup>-1</sup> ); $E_{Térmico}$ = relação entre o calor contido nos gases quentes de exaustão do MCI e a energia química disponível total no biogás (25%) (ARTEAGA, 2010).
3	$P_{UASB} = Q_{méd} \times DQO_{af\_UASB} \times Y_{UASB}$	$P_{UASB}$ = produção diária de massa de lodo nos reatores UASB (kgSS.d <sup>-1</sup> ); $Q_{méd}$ = vazão de esgoto afluyente (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ); $DQO_{af\_UASB}$ = valor de DQO afluyente do esgoto em relação aos reatores UASB (kg.m <sup>-3</sup> ); $Y_{UASB}$ = coeficiente de produção de lodo nos reatores UASB (0,15 kgSS.kgDQO <sub>aplicada</sub> <sup>-1</sup> ) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014).
4	$P_{Lagoas} = Q_{méd} \times DQO_{af\_Lagoas} \times Y_{Lagoas}$	$P_{Lagoas}$ = produção diária de massa de lodo nas lagoas aerada e de decantação (kgSS.d <sup>-1</sup> ); $DQO_{af\_Lagoas}$ = valor de DQO afluyente do esgoto em relação às lagoas aerada e de decantação (kg.m <sup>-3</sup> ); $Y_{Lagoas}$ = coeficiente de produção de lodo nas lagoas aerada e de decantação (0,12 kgSS.kgDQO <sub>aplicada</sub> <sup>-1</sup> ) (VON SPERLING, 2017).
5	$P_{Lodo} = \frac{(P_{UASB} + P_{Lagoas})}{(\%ST \times \gamma)}$	$P_{Lodo}$ = produção diária de lodo na ETE (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ); %ST = teor de ST no lodo (4%) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014); $\gamma$ = massa específica do lodo (1.020 kg.m <sup>-3</sup> ) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014).
6	$P_{Lodo\_Ad} = \frac{(P_{UASB} + P_{Lagoas}) \times CS_{Ad}}{(\%ST_{Ad} \times \gamma_{Ad})}$	$P_{Lodo\_Ad}$ = produção diária de lodo no adensador (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ); $CS_{Ad}$ = captura de sólidos no adensador (85%) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014); %ST <sub>Ad</sub> = teor de ST do lodo após o adensador (7%) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014); $\gamma_{Ad}$ = massa específica do lodo após o adensador (1.020 kg.m <sup>-3</sup> ) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014).
7	$P_{Lodo\_Cen} = \frac{(P_{UASB} + P_{Lagoas}) \times CS_{Ad} \times CS_{Cen}}{(\%ST_{Cen} \times \gamma_{Cen})}$	$P_{Lodo\_Cen}$ = produção diária de lodo na centrífuga (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ); $CS_{Cen}$ = captura de sólidos na centrífuga (90%) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014); %ST <sub>Cen</sub> = teor de ST no lodo após a centrífuga (20%) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014); $\gamma_{Cen}$ = massa específica do lodo após a centrífuga (1.050 kg.m <sup>-3</sup> ) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014).
8	$P_{Lodo\_Sec} = \frac{(P_{UASB} + P_{Lag}) \times CS_{Ad} \times CS_{Cen} \times CS_{Sec}}{(\%ST_{Sec} \times \gamma_{Sec})}$	$P_{Lodo\_Sec}$ = produção diária de lodo no secador térmico de tambor rotativo (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ); $CS_{Sec}$ = captura de sólidos no secador térmico de tambor rotativo (100%); %ST <sub>Sec</sub> = teor de ST no lodo após o secador térmico de tambor rotativo (80%) (POSSETTI <i>et al.</i> , 2015); $\gamma_{Sec}$ = massa específica do lodo após a centrífuga (1.100 kg.m <sup>-3</sup> ) (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2014).
9	$M_{Água\_Ev} = P_{Lodo\_Cen} - P_{Lodo\_Sec}$	$M_{Água\_Ev}$ = massa de água evaporada do lodo no secador térmico de tambor rotativo (kg.d <sup>-1</sup> ).
10	$E_{Secagem\_Térmica} = M_{Água\_Ev} \times E_{Evaporação}$	$E_{Secagem\_Térmica}$ = Demanda de energia do processo de secagem térmica do lodo (kWh.d <sup>-1</sup> ); $E_{Evaporação}$ = energia requerida do secador térmico para a evaporação da água (1,0 kWh.kgH <sub>2</sub> O <sub>evaporada</sub> <sup>-1</sup> ). Valor já considerando uma eficiência do secador igual a 85% (POSSETTI <i>et al.</i> , 2015).

Fonte: Autoria própria.

O contrato para atendimento da demanda energética da ETE faz parte do Grupo A (fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV) e subgrupo A4 (com tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV) da ANEEL. A modalidade tarifária adotada é a horária sazonal verde, com diferenciação de tarifas em consumo de ponta (horário de pico) e fora de ponta (horário fora de pico), bem como por uma única tarifa de demanda de potência em qualquer horário de utilização (ANEEL, 2010).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ESGOTO NA ETE

No período de investigação, a vazão de esgoto tratada na estação apresentou um valor médio de  $304 \pm 36 \text{ L.s}^{-1}$ , representando cerca de 70% da capacidade de projeto da ETE. Considerando essa vazão e um per capita de contribuição de esgoto de  $160 \text{ L.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , estima-se que a ETE atenda a uma população de aproximadamente 164 mil habitantes.

A concentração média de DQO afluente dos reatores UASB, nesse mesmo período, foi de  $(728 \pm 202) \text{ mg.L}^{-1}$ . Já a DQO afluente das lagoas apresentou uma concentração de  $(318 \pm 67) \text{ mg.L}^{-1}$ . Desse modo, constatou-se que os reatores UASB da ETE apresentaram uma eficiência, em média, igual a  $(60 \pm 9)\%$ , sendo esse valor bem próximo daqueles encontrados por Duarte *et al.* (2018). A DQO final do esgoto tratado na ETE apresentou um valor médio igual a  $(169 \pm 28) \text{ mg.L}^{-1}$ , tendo então as lagoas uma eficiência de remoção de DQO de aproximadamente  $(50 \pm 11)\%$ . De acordo com Von Sperling (2017), a faixa de eficiência média esperada de remoção de DQO em lagoa aerada seguida de lagoa decantação é de 65 a 80%. A partir dos dados de caracterização do tratamento de esgoto na ETE, pode-se constatar que a mesma, durante o período de investigação, apresentou uma eficiência global de remoção de DQO igual a  $(77 \pm 10)\%$ .

#### 3.2 BALANÇO DE MASSA DE DQO NOS REATORES UASB

A partir do balanço de massa realizado pelo *software* ProBio 1.0, constatou-se que cerca de  $(40 \pm 7)\%$  da DQO ficou solubilizada junto ao efluente da ETE durante o período de investigação. A DQO convertida em metano e presente no biogás foi igual a  $(21 \pm 8)\%$ , sendo



a DQO convertida em metano e dissolvido junto ao efluente da ETE igual a  $(17 \pm 7)\%$ . As perdas de DQO convertida em metano para a fase gasosa representaram cerca de  $(6 \pm 3)\%$  do balanço de massa. A partir desses dados, destaca-se que cerca de  $(44 \pm 8)\%$  da DQO foi convertida em metano durante o tratamento do esgoto nos reatores UASB. Já a DQO utilizada para a redução do sulfato foi igual a  $(7 \pm 3)\%$ , sendo, por fim, a porcentagem de DQO convertida em lodo igual a  $(13 \pm 2)\%$ .

Estudos de balanço de massa de DQO realizados por Souza *et al.* (2011), por meio de medições em reatores UASB em escala piloto e demonstração, também destacaram elevadas perdas de metano dissolvido junto ao esgoto tratado, podendo chegar a valores de 36 a 41% de todo o metano produzido. Testes recentes realizados por Nelting *et al.* (2017), visando a captura do metano dissolvido no efluente de reatores UASB por meio de um sistema a vácuo, alcançaram faixas de recuperação desse gás da ordem de 75%. Desse modo, além do significativo aumento do potencial energético associado com o biogás, a recuperação do metano dissolvido contribui para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa em ETEs, uma vez que o metano possui um potencial de aquecimento global 28 vezes superior àquele do dióxido de carbono (IPCC, 2014).

### 3.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS E POTENCIAL DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

A partir do balanço de massa de DQO realizado, foi possível estimar a produção normalizada de biogás nos reatores UASB da ETE, sendo essa, em média, igual a  $(2.443 \pm 1.236) \text{ Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Desse modo, constatou-se uma produção média de biogás per capita (considerando uma população atendida pela ETE de 164 mil habitantes) de  $(13 \pm 7) \text{ NL} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , ou ainda uma produção de biogás em relação a matéria orgânica removida de  $(0,15 \pm 0,08) \text{ Nm}^3 \cdot \text{kgDQO}_{\text{remov}}^{-1}$ . Com um teor de metano igual a 70% presente no biogás, a estimativa de produção normalizada desse gás nos reatores UASB foi, em média, igual a  $(1.710 \pm 1.013) \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{d}^{-1}$ . A produção per capita de metano apresentou valores de  $(9 \pm 5) \text{ NLCH}_4 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , sendo ainda estimada uma produção desse gás em relação a matéria orgânica removida de  $(0,10 \pm 0,06) \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kgDQO}_{\text{remov}}^{-1}$ . Estudos realizados por Cabral *et al.* (2016), durante medições de produção de biogás em diferentes portes de ETEs dotadas de reatores UASB espalhadas pelo Brasil, observaram variações na produção per capita de metano de 6 a 12  $\text{NLCH}_4 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ . Isto posto, os resultados encontrados nas estimativas de

produção de biogás e metano estão dentro das faixas de produções determinadas em processos de medições.

Além das estimativas de produção de biogás e de metano, o *software* ProBio 1.0 também determinou o potencial energético máximo da ETE em estudo. Sendo assim, caso os sistemas de aproveitamento energético tivessem 100% de eficiência no processo de conversão de energia, a ETE possuiria um potencial máximo de aproximadamente  $(16.966 \pm 8.691) \text{ kWh.d}^{-1}$ . Entretanto, considerando o emprego de um MCI com eficiência de conversão de energia igual a 35%, estimou-se um potencial de geração de energia elétrica na ETE, em média, igual a  $(5.968 \pm 3.020) \text{ kWh.d}^{-1}$  (ou cerca de  $2.082.252 \text{ kWh.ano}^{-1}$ ). Esse valor representa uma relação per capita de produção de energia elétrica igual a  $(0,03 \pm 0,01) \text{ kWh.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , ou ainda, em relação ao volume de biogás produzido nos reatores UASB, uma produção de  $(0,35 \pm 0,20) \text{ kWh.Nm}^{-3}$ .

O potencial de geração de energia elétrica calculado representa uma potência instalada do MCI igual a 250 kW, podendo então a ETE ser caracterizada, conforme a Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, como uma minigeradora distribuída de energia (potência instalada superior a 75 kW e inferior a 5 MW). De acordo com os trabalhos de viabilidade técnico-econômica realizados por Rosenfeldt *et al.* (2016), a escala mínima para projetos envolvendo o aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica em ETEs é de 200 kW de potência instalada.

Tratando-se do aproveitamento dos gases quentes de exaustão do MCI para a realização da secagem térmica do lodo, estimou-se um potencial de geração de energia térmica na ETE igual a  $(4.241 \pm 2.172) \text{ kWh.d}^{-1}$  (ou cerca de  $1.482.435 \text{ kWh.ano}^{-1}$ ). Desse modo, a relação per capita de produção de energia térmica no MCI foi igual a  $(0,02 \pm 0,01) \text{ kWh.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , ou ainda, em relação ao volume de biogás produzido nos reatores UASB, uma produção igual a  $(1,75 \pm 0,81) \text{ kWh.Nm}^{-3}$ . Na Tabela 3 estão apresentados os resultados das estimativas de produção de biogás e de metano, bem como dos potenciais de geração de energia elétrica e térmica da ETE em estudo.

### 3.4 ANÁLISE DE CUSTOS EVITADOS A PARTIR DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE

Durante o período de investigação, a ETE apresentou um consumo de energia elétrica, em média, igual a  $3.556.856 \text{ kWh.ano}^{-1}$ , sendo  $3.197.258 \text{ kWh.ano}^{-1}$  em horário fora de ponta

e 359.598 kWh.ano<sup>-1</sup> em horário de ponta. A demanda média de potência mensal calculada para ETE foi, em média, igual a 483 kW. Esse consumo de energia elétrica proporcionou a ETE um custo médio anual de R\$ 913.436,27.

Tabela 3. Estatística descritiva dos dados de produção de biogás e metano, assim como dos potenciais de geração de energia elétrica e térmica da ETE (período de investigação de 365 dias)

Estatísticas	Produção normalizada de biogás (Nm <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	Produção normalizada de metano (Nm <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	Potencial energético máximo (kWh.d <sup>-1</sup> )	Potencial de geração de energia elétrica (kWh.d <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	Potencial de geração de energia térmica (kWh.d <sup>-1</sup> ) <sup>c</sup>
Média	2.443	1.710	16.966	5.968	4.241
Nº de dados	128	128	128	128	128
Mediana	2.294	1.606	15.240	5.334	3.810
Desvio padrão <sup>a</sup>	1.236	865	8.691	3.020	2.172
Máximo	8.758	6.130	57.963	20.287	14.490
Mínimo	12	8	168	59	42

<sup>a</sup>Desvio padrão em relação ao valor médio; <sup>b</sup>Considerando uma eficiência do MCI igual a 35%; <sup>c</sup>Considerando uma relação entre o calor contido nos gases quentes de exaustão do MCI e o potencial energético máximo da ETE igual a 25%.

Fonte: Autoria própria.

Entretanto, cabe destacar que os valores apresentados não estão contabilizando o consumo de energia elétrica hipotético do secador térmico de lodo. Desse modo, considerando um secador com uma potência de consumo igual a 56,2 kWh, operando 24 horas por dia, o consumo de energia elétrica médio anual desse equipamento seria de aproximadamente 492.312 kWh.ano<sup>-1</sup>, sendo 442.539 kWh.ano<sup>-1</sup> em horário fora de ponta e 49.773 kWh.ano<sup>-1</sup> em horário de ponta. Para o levantamento do custo de energia elétrica do secador térmico, foram considerados os custos médios específicos praticados durante o período de investigação, sendo então o custo do kWh no horário fora de ponta igual a R\$ 0,18 e no horário de ponta igual a R\$ 0,85. Adicionalmente, a modalidade tarifária na qual a ETE se enquadra determina a cobrança da tarifa de demanda de potência, sendo essa igual a R\$ 6,76 a cada kW consumido.

A partir do emprego do secador térmico, a demanda de potência da ETE passaria a ser igual a 540 kW, com um consumo médio de energia elétrica de 4.049.168 kWh.ano<sup>-1</sup>, sendo 3.639.797 kWh.ano<sup>-1</sup> em horário fora de ponta e 409.371 kWh.ano<sup>-1</sup> em horário de ponta. O custo médio anual de energia elétrica na estação passaria a ser da ordem de R\$ 1.040.022,43, evidenciando um aumento de aproximadamente 14% em relação ao período sem a utilização do secador térmico. Desse modo, a geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás (2.082.252 kWh.ano<sup>-1</sup>) seria capaz de suprir cerca de 51% da demanda de eletricidade

da estação ( $4.049.168 \text{ kWh}\cdot\text{ano}^{-1}$ ), proporcionando uma economia de R\$ 533.390,61 durante o período de investigação.

Nos gráficos da Figura 1 estão apresentados os resultados da comparação mensal entre o consumo e o potencial de geração de energia elétrica da ETE, bem como são destacados os custos mensais evitados a partir da geração de energia elétrica. Nesse sentido, o consumo médio mensal de energia elétrica na estação foi igual a  $(337.431 \pm 19.080) \text{ kWh}\cdot\text{mês}$ , enquanto o potencial de geração de energia estimado foi de  $(173.521 \pm 27.224) \text{ kWh}\cdot\text{mês}$ . O custo médio mensal do consumo de energia elétrica foi da ordem de R\$ 86.668,54, sendo que a partir da geração de energia elétrica a estação passaria a ter um custo evitado médio mensal de R\$ 44.449,22.

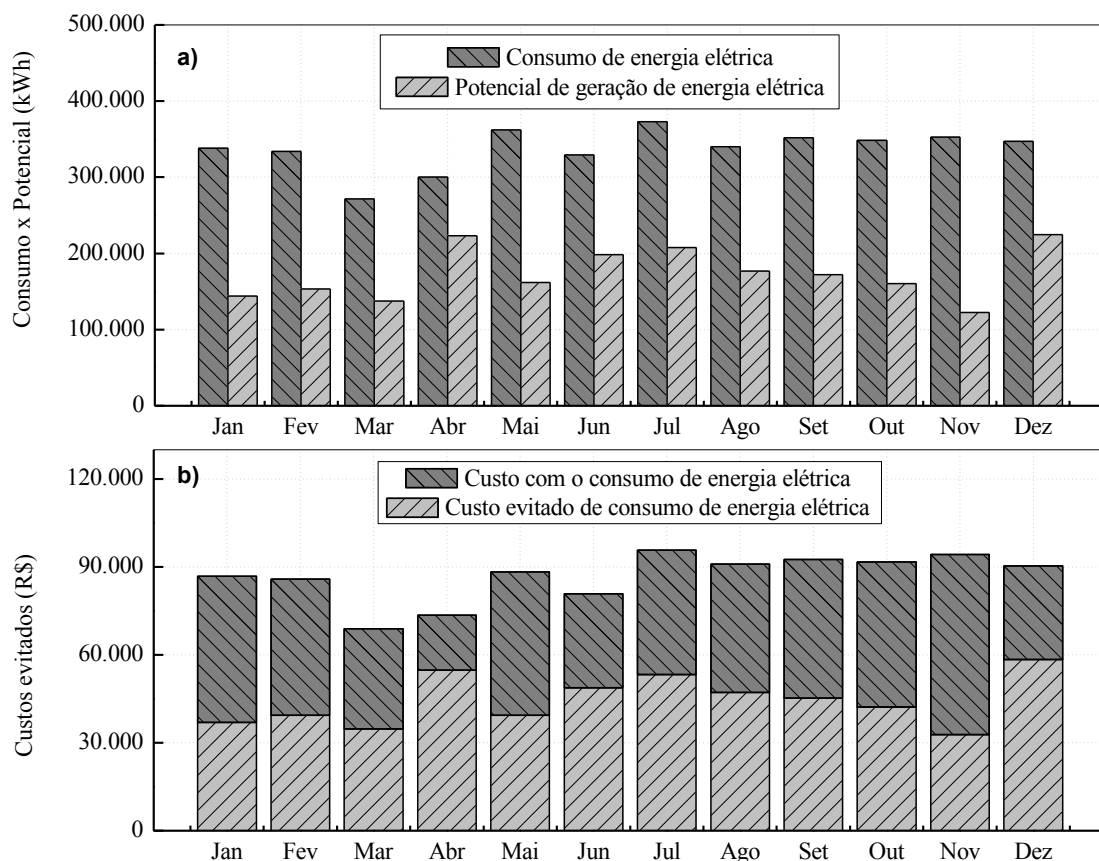


Figura 1. a) Comparação do consumo de energia elétrica na ETE com o potencial de geração de energia a partir do aproveitamento do biogás produzido nos reatores UASB; b) Comparação dos custos do consumo de energia elétrica na ETE com os custos evitados a partir da geração de energia elétrica.

Fonte: Autoria própria.

Cabe destacar que o consumo e o potencial de geração de energia elétrica sofreram variações ao longo do período de estudo. O menor consumo de energia nos meses de março e abril pode ser explicado pela manutenção da centrífuga. Desse modo, constatou-se que no

mês de abril, a geração de energia elétrica supriria cerca de 75% do consumo de energia da estação. No que diz respeito às variações de geração de energia, denota-se que essas estão diretamente relacionadas com a questão de disponibilidade de biogás na ETE. Em períodos chuvosos, por exemplo, podem ocorrer a diluição da matéria orgânica presente no esgoto a ser tratado, diminuindo, dessa forma, a produção de biogás nos reatores UASB. Sendo assim, torna-se imprescindível o emprego de um gasômetro para regularização da vazão de biogás, de modo que em períodos com menor produção desse gás seja possível manter o fornecimento de energia elétrica para a ETE.

### 3.5 PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DO LODO A PARTIR DO APROVEITAMENTO DOS GASES QUENTES DE EXAUSTÃO DO MCI

Os resultados das estimativas de produção de lodo na ETE estão apresentados na Tabela 4. Os reatores UASB foram responsáveis por uma produção média de lodo igual a  $(68,8 \pm 19,7) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Já as lagoas aerada e de decantação apresentaram uma produção de lodo, em média, igual a  $(22,0 \pm 6,3) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Desse modo, a produção total de lodo na ETE foi estimada em  $(90,8 \pm 24,3) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , com um teor de sólidos totais de 4%. Destaca-se assim que os reatores UASB foram responsáveis por aproximadamente 75% do volume de lodo gerado na estação.

O volume total de lodo produzido é encaminhado para o adensador, sendo desaguado até teores de sólidos totais de aproximadamente 7%. A estimativa do volume de lodo gerado nesse sistema foi, em média, igual a  $(44,1 \pm 11,8) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . O aumento do teor de sólidos totais de 4 para 7%, resultou em uma redução do volume de lodo em aproximadamente 50%. Antes do processamento do lodo no secador térmico, esse material deve ainda ser desaguado até teores de sólidos totais de 20% em centrífuga. Logo, a estimativa do volume de lodo produzido nesse equipamento foi de  $(13,5 \pm 3,6) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . No processo de secagem térmica do lodo até teores de sólidos totais de 80%, estimou-se um volume final desse material, em média, igual a  $(3,2 \pm 0,9) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Desse modo, a redução do volume de lodo, desde a sua produção até a realização do processo de secagem térmica, foi, em média, igual a  $(95 \pm 6)\%$ .

A partir desses dados, foi possível estimar uma remoção de água por evaporação no secador, em média, igual a  $(10,3 \pm 2,8) \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . De acordo com estudos realizados por Possetti *et al.* (2015), são necessários cerca de 1,0 kWh de energia para a remoção de 1,0 kg de água

presente no lodo em um secador de tambor rotativo. Desse modo, a estimativa da demanda térmica para a realização do processo de secagem do lodo na ETE em estudo foi, em média, igual a  $(10.279 \pm 2.751) \text{ kWh.d}^{-1}$ . Comparando esse resultado com o potencial de geração de energia térmica a partir do aproveitamento dos gases quentes de exaustão do MCI, pode-se constatar que o processo de cogeração de energia na ETE supriria cerca de 41% da demanda energética do processo de secagem térmica do lodo.

Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de produção de lodo nos diferentes processos da ETE em estudo (período de investigação de 365 dias)

Estatísticas	Produção de lodo nos reatores UASB ( $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ ) <sup>b</sup>	Produção de lodo nas lagoas ( $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ ) <sup>b</sup>	Produção total de lodo na ETE ( $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ ) <sup>b</sup>	Produção de lodo após adensador ( $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ ) <sup>c</sup>	Produção de lodo após centrífuga ( $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ ) <sup>d</sup>	Produção de lodo após secador ( $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ ) <sup>e</sup>
Média	68,8	22,0	90,8	44,1	13,5	3,2
Nº de dados	128	128	128	128	128	128
Mediana	68,6	23,2	93,7	45,5	13,9	3,3
Desvio padrão <sup>a</sup>	19,7	6,3	24,3	11,8	3,6	0,9
Máximo	148,0	41,6	177,1	86,0	26,3	6,3
Mínimo	13,8	4,4	18,2	8,8	2,7	0,6

<sup>a</sup>Desvio padrão em relação ao valor médio; <sup>b</sup>Considerando um teor de sólidos totais no lodo igual a 4%; <sup>c</sup>Considerando um teor de sólidos totais no lodo igual a 7%; <sup>d</sup>Considerando um teor de sólidos totais no lodo igual a 20%; <sup>e</sup>Considerando um teor de sólidos totais no lodo igual a 80%.

Fonte: Autoria própria.

Uma alternativa para a complementação de energia seria a realização da combustão do lodo seco, sendo também aproveitados os gases quentes produzidos no combustor (Figura 2). As cinzas do processo poderiam ser utilizadas para fins agrícola ou destinadas em aterros sanitários. Adicionalmente, outra alternativa seria a realização da secagem térmica de aproximadamente 40% do lodo produzido na estação, sendo o restante do material encaminhado para o processo usual de estabilização alcalina prolongada.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse trabalho evidenciaram a possibilidade do uso do biogás, produzido pelos reatores UASB de uma ETE de médio porte, como combustível para o processo de cogeração de energia. As estimativas de produção de biogás realizadas pelo *software* ProBio 1.0, permitiram um melhor entendimento do comportamento da matéria orgânica nos reatores, destacando ainda os desafios dessa tecnologia quanto às perdas de biogás para o meio líquido e como gás residual.

Os parâmetros de vazão e DQO afluente aos reatores UASB, utilizados como dados de entrada do *software*, apresentaram um comportamento variável ao longo do período de investigação. Eventos significativos de chuvas e as mudanças nas características físico-químicas do esgoto, podem estar diretamente relacionadas com essa variação. Desse modo, a produção de biogás ( $2.443 \pm 1.236 \text{ Nm}^3.\text{d}^{-1}$ ) e do seu potencial químico de energia ( $16.966 \text{ kWh}.\text{d}^{-1}$ ), também apresentaram um comportamento oscilatório.

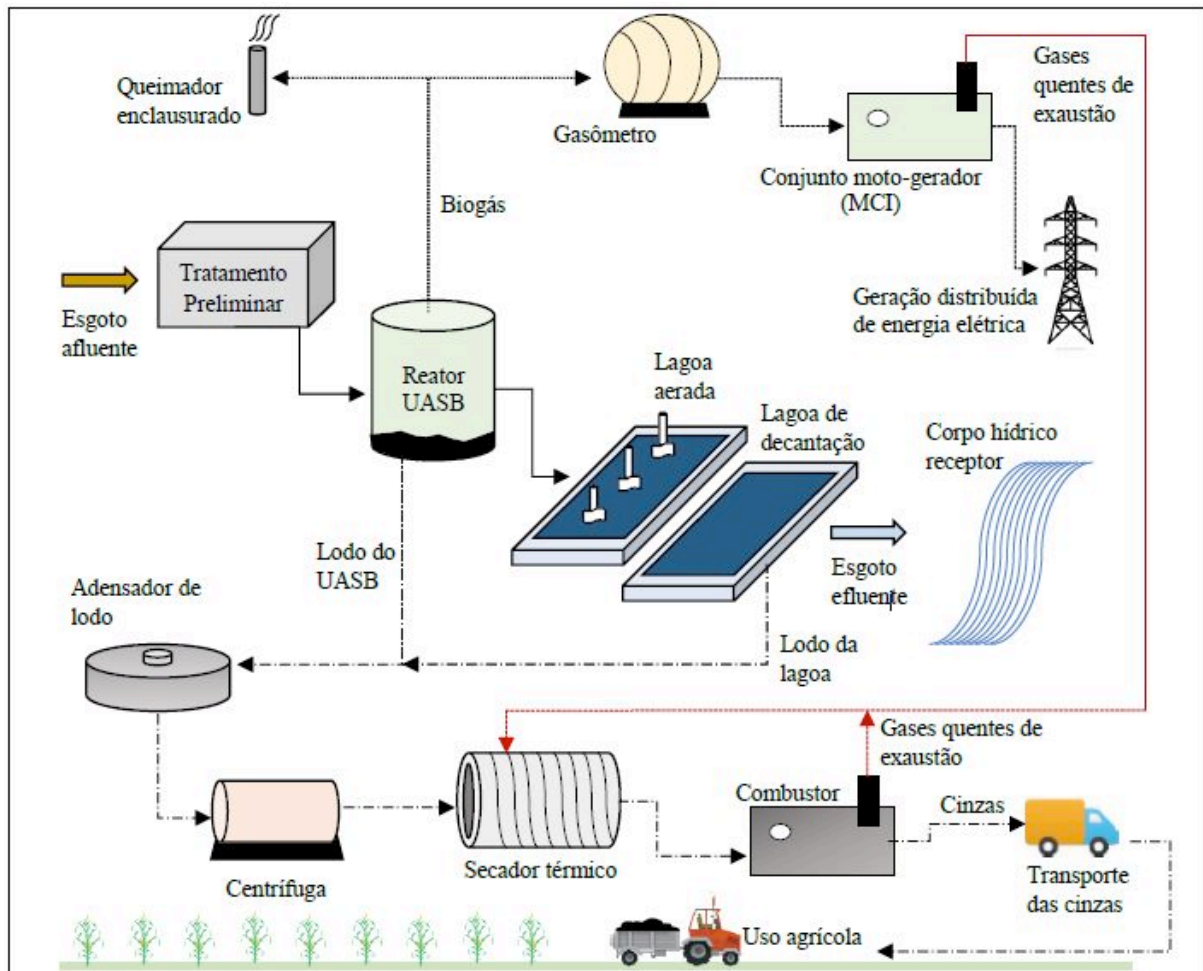


Figura 2. Exemplo do novo fluxograma da ETE em estudo considerando o processo de cogeração de energia.

Fonte: Autoria própria.

A partir da estimativa do potencial de geração de energia elétrica em um conjunto moto-gerador ( $5.968 \text{ kWh}.\text{d}^{-1}$ ), a ETE poderia ser enquadrada, conforme a Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, como uma minigeradora distribuída de energia, com potência instalada igual a 250 kW. Tal enquadramento possibilitaria a compensação de energia na ETE em aproximadamente 51%, resultando em um custo evitado de R\$ 533.390,61 durante o período de investigação. A utilização do potencial térmico oriundo dos gases

quentes de exaustão do conjunto moto-gerador (4.241 kWh.d<sup>-1</sup>), supriria cerca de 41% da demanda energética necessária para a realização da secagem térmica do lodo. Sendo assim, alternativas de complementação de energia térmica devem ser empregadas, como, por exemplo, o aproveitamento dos gases quentes de exaustão de um combustor de lodo. Ressalta-se, contudo, a necessidade de verificação da viabilidade econômica e operacional da implantação dessa alternativa.

Desse modo, o aproveitamento energético do biogás surge como uma promissora alternativa para a diminuição dos custos de energia elétrica e do gerenciamento do lodo em ETEs. A partir dessas constatações, destaca-se que o setor de saneamento no Brasil passa a ter novas perspectivas, caminhando rumo a um desenvolvimento mais sustentável, socialmente justo, ambientalmente correto, sanitariamente seguro e economicamente viável.

## REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, Belo Horizonte, 2014.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012** – atualizada em 01/03/2016. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/FAQ\\_GD\\_Atualizado.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/FAQ_GD_Atualizado.pdf)>. Acesso em: 15/12/2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL nº 414**, de 09 de setembro de 2010 – In: Resoluções, 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 25/01/2019.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL nº 482**, de 17 de abril de 2012 – In: Resoluções, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 25/01/2019.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL nº 687**, de 24 de novembro de 2015 – In: Resoluções, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 02/02/2019.

ARTEAGA, J. A. F. **Análise energética e exérgica de um sistema de cogeração com motores de combustão interna**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

BEN – BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **BEN 2018**. Ano base 2017. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_Int.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018_Int.pdf)>. Acesso em: 12/02/2019.



BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 225, 2014.

CABRAL, C. B. G.; CHERNICHARO, C. A. L.; HOFFMANN, H.; NEVES, P. N. P.; PLATZER, C.; BRESSANI, T. R.; ROSENFELDT, S. **Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios/Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

DUARTE, O. A. H.; PEREIRA, A. M.; CANTÃO, M.; POSSETTI, G. R. C.; AISSE, M. M. Assessment of an in situ Real Time UV/VIS Based Spectrometry System for Chemical Oxygen Demand Measurement in a Wastewater Anaerobic Treatment Reactor. **Water Resources Management**, v.1, p.167-180, 2018.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **EPE 2016**. Ano base 2015. Disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao\\_160/2016.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao_160/2016.pdf). Acesso em: 25/01/2019.

GLÓRIA, R. M.; NETO G. P. P.; SOUZA C. L.; SILVA, S. Q.; AQUINO S. F. DE.; CHERNICHARO, C. A. L. Remoção de sulfeto de hidrogênio de efluente de reator UASB: contribuição da camada de espuma e da tubulação de descarte. In: IX TALLER Y SIMPOSIO DIGESTIÓN ANAEROBIA, **Anais...** Ilha de Páscoa, 2008.

GOMES, E. C.; DIAS, I. A.; FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; MOREIRA, H. C.; POSSETTI, G. R. C.; WAGNER, L. G.; JUNIOR, J. A. S.; ZENI, A. L. **Guia técnico sobre geração distribuída de energia elétrica por biogás em ETEs/Probiogás**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (ed.), 1st edn, Ministério das Cidades, Brasília, Brazil, 2017.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC 2014**. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

NELTING, K., TRAUTMANN, N., CAICEDO, C., WEICHHREB, D., ROSENWINKEL, K. H., COSTA, F. J. O. G., POSSETTI, G. R. C. Constraints on the dissolved methane in the effluent of full scale municipal UASB reactors. In: The 14th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies - LET, Florianópolis, Brasil. **Anais...** Florianópolis, Brasil: International Water Association – IWA, 2017

PANEPINTO, D.; FIORE, S.; GENON, G.; ACRI, M. Thermal valorization of sewer sludge: Perspectives for large wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1323-1329, 2016.

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; MESQUITA, N. C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Curitiba - PR, 2013.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C. A.; CARNEIRO, C. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. **Anais...** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28ª edição, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; COSTA, F. J. O. G.; WAGNER, L. G.; LOBATO, L. C. S.; RIBEIRO, T. B.; MELO, D. F.; REIS, J. A.; CHERNICHARO, C. A. L. Contribuição

para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano. **Revista DAE**, v. 66, p. 73-89, 2018.

ROSA, A. P.; CONESA, J. A.; FULLANA, A.; MELO, G. C. B.; BORGES, J. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 7, p. 1680-1690, 2016.

ROSENFELDT, S.; MANN, H. H.; PLATZER, C.; CABRAL, C. B. G. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás/Probiogás**, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

SILVEIRA, B.; CHERNICHARO, C.; CABRAL, C.; SUIDEDOS, C.; PLATZER, C.; SILVA, G.; POSSETTI, G. R. C.; HOFFMANN, H.; MOREIRA, H. C.; ADAMATTI, H. B.; MIKI, M.; SILVA, M.; TAKAHASHI, R.; MIKI, R.; ROSENFELDT, S.; ARAUJO, V. S. F.; VALENTE, V. B.; VILLANI, W. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto/Probiogás**, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

SOUZA, C. L., CHERNICHARO, C. A., AQUINO, S. F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. **Water Science & Technology**, v. 64, n. 11, p. 2259-2264, 2011.

USEPA. A brief characterization of gas turbines in combined heat and power applications. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2003. Disponível em: <[http://www.epa.gov/lmop/res/pdf/chp\\_gasturbines.pdf](http://www.epa.gov/lmop/res/pdf/chp_gasturbines.pdf)>. Acesso em: 25/01/2019.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, v. 3. Lagoas de estabilização. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 1. 196p. 2017.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. **IWA Publishing**, London, 1452 p., 2005.