

Geração de energia elétrica a partir de resíduos sanitários urbanos

Davidson J. A. Silva*, Bruno de Nadai**, Denisson Q. Oliveira*

**Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão
Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga, São Luis (MA), Brasil
davidson.j.alencar@gmail.com, dq.oliveira@ufma.br*

***Universidade Tecnológica Federal do Paraná -Campus Apucarana
Rua Marcilio Dias, 635, Jardim Paraíso, Apucarana (PR), Brasil
brunonascimento@utfpr.edu.br*

Abstract: With the growth in energy needs and problems related to environmental factors, such as the gradual increase in the greenhouse effect, among others, it sought to associate the two problems considering the use of biogas produced in treatment plants as an energy factor. The use of biodigesters and internal combustion engines in the process of biogas production and energy use, respectively, stands out. Thus, this article proposes to investigate a method of extracting biogas from urban effluents as well as to highlight some technologies for its purification and energy conversion. Also presented is a methodology to estimate the amount of biogas produced and the energy potential for the city of São Luís MA based on IBGE data from 2018. Finally, it concludes whether the benefits that the use of this technology can add to the city's energy diversification and consequent environmental impacts.

Resumo: Com o crescimento da demanda energética e dos problemas relacionados a fatores ambientais, tais como o aumento gradativo do efeito estufa entre outros, buscou-se associar o uso de biogás produzido em estações de tratamento de esgoto como um fator energético. Destaca-se o uso de biodigestores e motores de combustão interna no processo de produção de biogás e aproveitamento energético, respectivamente. Assim, este artigo propõe investigar um método de extração de biogás a partir de efluentes urbanos bem como destacar algumas tecnologias de purificação e conversão energética dele. Também, apresenta-se uma metodologia para estimar a quantidade de biogás produzida e o potencial energético para a cidade de São Luís - MA tendo como base os dados do IBGE de 2018. Por fim, conclui-se que o uso dessa tecnologia poderá agregar na diversificação energética da cidade e em impactos ambientais consequentes.

Keywords: Biogas, Distributed Generation, sewage treatment plant.

Palavras-chaves: Biogás, Geração distribuída, estação de tratamento de esgoto.

1. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo a sociedade tem usado o petróleo como principal fonte de energia, seja em uso residencial, industrial e nos setores de transportes. O uso de combustíveis fósseis acarreta problemas ambientais relacionados às quantidades de carbono emitidos na atmosfera. Segundo estimativas, as emissões de combustíveis fósseis cresceram 1,5% em 2017, 2,1% em 2018 e 0,6% em 2019 (Levin, 2019). Esse crescimento vai na direção oposta dos cortes necessários para responder às emergências climáticas discutidas por meio de acordos internacionais que visam a diminuição de emissões de carbono. Todas essas medidas enfatizam a necessidade da criação de tecnologias e fontes de energias mais renováveis.

Outro problema ambiental é o descarte inapropriado dos resíduos urbanos. Segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio Contínua (PNAD Contínua) de 2018, o número de domicílios com escoamento do esgoto feito pela rede geral ou fossa ligada à rede, representa 66,3% do total de domicílios no país (PNAD, 2019). Já segundo o relatório *Atlas Esgotos*

Despoluição das Bacias Hidrográficas emitido pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), as redes coletoras de esgotos alcançam 61,4% da população urbana brasileira, restando 65,1 milhões de pessoas nas cidades do país que não dispõem de sistema coletivo para coleta do esgoto sanitário. Além da disparidade dos dados, segundo o mesmo relatório emitido pela ANA, nem todo o esgoto coletado é conduzido a uma estação de tratamento. Cerca de 18% do volume de esgoto é despejado no meio ambiente sem nenhum tratamento. A parcela atendida com coleta e tratamento dos esgotos só representa 42,6% da população urbana total. Desse modo, 96,7 milhões de pessoas não dispõem de tratamento coletivo de esgotos acarretando um sério problema de saúde (ANA, 2017).

A proposta deste trabalho é analisar o potencial do uso do biogás gerado a partir dos resíduos urbanos para geração de energia elétrica. O biogás é muito versátil, possuindo aplicações desde a indústria química, uso como gás de cozinha, produção de energia e entre outras aplicações. A matéria orgânica em decomposição produz naturalmente “gás do pântano” que é um dos componentes principais do biogás. Isso

significa que os resíduos sólidos produzidos pelos grandes centros urbanos, que são ricos em matéria orgânica, possuem um grande potencial para a produção de energia a partir dessa fonte. Logo, partilhando dos ideais do acordo de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas onde conferem as necessidades básicas a população, como energia e saneamento básico, o uso do biogás é uma solução factível. A principal razão é a possibilidade de obtenção de biogás via tratamento de esgoto e a partir deste gerar energia elétrica. Como consequência, reduz-se as emissões de metano na atmosfera, que é um gás bem mais prejudicial a camada de ozônio do que o dióxido de carbono. Assim sendo, o uso do biogás como uma fonte de energia alia-se aos objetivos da agenda 2030 para desenvolvimento sustentável segundo o relatório *O futuro é agora, ciência para alcançar o desenvolvimento sustentável* (ONU, 2019).

2. BIOMASSA

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a biomassa é considerada como toda matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Pode ser classificada de acordo com sua origem, podendo ser florestal, agrícola e de rejeitos urbanos e industriais (ANEEL, 2002).

Existem inúmeras aplicações para a biomassa representando um grande potencial de investimentos. A partir da biomassa, utilizando-se processos de gaseificação e de fermentação, pode-se obter biodiesel (renovável), etanol, butanol, metanol e entre outros químicos (Luz et al., 2009).

Outro exemplo do uso da biomassa é a cogeração de energia para atividades industriais a partir de resíduos urbanos. Esses resíduos produzidos em pequenos e grandes centros urbanos também podem ser considerados como biomassa. Porém, existe o descarte inapropriado deles em lixões a céu aberto, em vez de aterros sanitários ou controlados, gerando problemas ambientais, sociais e econômicos. Segundo a ANA, as redes coletoras de esgotos alcançam 61,4% da população urbana brasileira e 18% do esgoto coletado é despejado em algum lugar sem nenhum tratamento. De acordo com a ANA, somente 43 % do esgoto é tratado, representando cerca de 4,1 mil toneladas de esgoto despejados no meio ambiente sem qualquer tratamento (ANA, 2017).

No Brasil, em 2014, houve a geração de 219 mil toneladas diárias de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) (ABRELPE, 2015). Considerando que os RSU são compostos em média de 52% de material orgânico, foram geradas cerca de 114 mil toneladas diárias de resíduos orgânicos, (Nascimento et al., 2019). Cada tonelada de resíduo disposto possui potencial energético da ordem de 0,1 a 0,2 MWh (Reichert, 2014). A partir disso, existe a possibilidade de aumentar o aproveitamento da biomassa com base nos resíduos orgânicos urbanos.

No Brasil existem iniciativas de aproveitamento energético a partir do biogás através do tratamento de efluentes. Dentre as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) que utilizam o biogás gerado do aproveitamento de resíduos urbanos está a estação

de Ouro Verde, localizada em Foz do Iguaçu/PR. Esta estação possui uma capacidade instalada de 20 kW (ANEEL, 2015). Outra ETE que se beneficia do uso de biogás a partir de resíduos urbanos é a estação Ribeirão Preto/SP. Essa ETE utiliza o biogás proveniente de digestores anaeróbicos de lodo e recupera sua energia através de dois motores de cogeração ciclo Otto. A estação possui um potencial instalado de 1,5 MW e gera cerca 16.725 kWh/dia (Ferreira, 2014).

Existem outros projetos no Brasil com essa mesma prerrogativa e outros ainda em fase de projeto. Um dos projetos mais inovadores é do SEMAE de São José do Rio Preto que além de aproveitar o biogás dos reatores UASB, fará a secagem e a queima de lodo. Este projeto foi idealizado para trabalhar com uma potência instalada de 2,5 MW na sua primeira fase, e suprirá 100% da energia consumida na ETE (Villani JR., 2014).

Nascimento et al. (2019) apontam que entre 2004 e 2012, foram implantados no Brasil trinta e um projetos que aproveitam o biogás derivado de resíduos orgânicos urbanos, tanto provenientes de estações de tratamento de esgotos quanto de aterros sanitários. A Tabela 1 apresenta um resumo destes empreendimentos de acordo com a região e potência total instalada. Além destes enumerados, existem ainda dezenas de outras plantas com viabilidade de produção de energia elétrica a partir do biogás.

Tabela 1: Plantas de geração de energia a partir do biogás no Brasil

Região	Quantidade de plantas	Potência total instalada (MW)
Sudeste	20	206,2
Nordeste	8	49,1
Sul	2	11,6
Norte	1	19,2
Brasil	31	286,1

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2019)

Considerando o potencial que os resíduos urbanos oferecem e a experiências brasileiras abordadas podemos entender que o aproveitamento desses recursos possibilitará uma chance da diversificação da matriz elétrica do país e consequentemente acarretará geração de emprego junto com o desenvolvimento tecnológico e econômico mais sustentável. Assim, o uso da biomassa pode vir a ser uma grande estratégia competitiva no ambiente energético brasileiro.

3. BIOGÁS

Estima-se que a descoberta do biogás data o ano de 1667 (Classen et al., 1999), a partir de evidências da existência de uma substância inflamável presente em regiões pantanosas, que resultou, mais tarde, na descoberta em 1776 do metano por Alessandro Volta (Alves, 2016). A partir de então o biogás vem sendo utilizados para inúmeras aplicações, desde aquecimento até energia elétrica.

O biogás é produzido a partir da ação de bactérias anaeróbicas que atuam na degradação da matéria orgânica, através do

processo de biodigestão. O interesse pela biodigestão começou a partir de evidências de uma substância inflamável que levou algumas pessoas a pesquisarem sobre esta fonte energética. Cabe a Alessandro Volta a descoberta da composição do biogás, porém, foi Ulysse Grayon, aluno de Louis Pasteur, que propôs um experimento para a produção de biogás baseada na fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água (Nogueira, 1986). A partir disso, em 1884, Louis Pasteur, ao apresentar os trabalhos do seu aluno à Academia das Ciências, considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação (Pecora, 2006).

A biodigestão anaeróbica consiste em um processo biológico, em que a matéria orgânica, em condições de pouco oxigênio e de luz, se decompõe pela ação de bactérias produzindo metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros componentes. Na natureza existem vários ambientes favoráveis ao desenvolvimento do processo de produção de biogás, sendo representados pelos pântanos, estuários, mares e lagos, usinas de carvão e jazidas petrolíferas. A produção de biogás também é possível a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas a partir de biodigestores.

No Brasil, estima-se que até 1984 havia cerca de 3.000 biodigestores instalados, de acordo com Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER/PR) (Bley, 2015). A composição do biogás é aproximadamente em torno de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, amina voláteis e oxigênio (Wereko-Brobby e Hagen, 2000), entre outros componentes traços, como impurezas.

Hoje o processo de biodigestão anaeróbica vêm ganhando cada vez mais destaque uma vez que possibilita uma fonte de energia limpa e renovável. No Brasil, o uso dessa tecnologia se intensificou nas décadas de 70 a 80, onde programas oficiais estimularam a implantação de biodigestores focados na produção de energia e de biofertilizantes (Kunz, 2014).

3.1. Métodos de purificação do Biogás

Para facilitar o aproveitamento energético do biogás são necessários alguns procedimentos que visam a remoção de componentes traços como vapor de água, sulfetos e partículas em suspensão entre outros, dependendo do substrato que originou o biogás. O processo de purificação consiste em duas etapas, uma delas é a remoção de impurezas, que se fundamenta na retirada de substâncias que emitem poluentes indesejáveis durante a queima do biogás. Enquanto a segunda etapa do processo de purificação consiste no aumento do poder calorífico do biogás a partir da remoção do dióxido de carbono e aumento da concentração do metano (Borschiver e Silva, 2014).

A Tabela 2 apresenta algumas tecnologias de purificação de biogás usadas atualmente.

Tabela 2: Tecnologias de purificação de biogás

Impureza	Tecnologia de Limpeza
Sulfeto de hidrogênio	Precipitação/ Absorção química/ Adsorção em carvão ativado/ Tratamento biológico
Siloxanos	Resfriamento/ Absorção em mistura líquida de hidrocarbonetos/ Adsorção em carvão ativado/ alumínio e sílica gel/ Co separação com sulfeto de hidrogênio.
Água	Resfriamento / Compressão / Absorção / Adsorção
Oxigênio e Nitrogênio	Adsorção em carvão / Peneira molecular ou membranas
Amônia	Enquanto o gás é seco ou está no processo de ajuste de poder calorífico
Particulados	Filtro mecânico

Fonte: Adaptado de Borschiver e Silva (2014)

3.2. Biodigestores

Biodigestores são equipamentos usados para proporcionar um ambiente controlado para degradação da matéria orgânica a partir da respiração anaeróbica, mantendo as condições ideais para os microrganismos atuadores. A invenção dos biodigestores está atrelada diretamente a descoberta do uso do biogás como fonte de energia, com destaque para Índia e China que na década 50 e 60 desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores (Nogueira, 1986). Os biodigestores são dispositivos herméticos e impermeáveis dotados de um reservatório interno onde abriga o material orgânico (Magalhães, 1986). Para a respiração anaeróbica, os biodigestores precisam manter uma atmosfera com pouco oxigênio, pois os microrganismos que realizam a fermentação anaeróbica são sensíveis a ambientes aeróbios.

Além de um reservatório interno que armazena a biomassa por um determinado tempo, os biodigestores também possuem uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido. O biogás fica retido na parte livre do biodigestor e em seguida pode ser canalizado para ser utilizado em diversas aplicações (Araújo, 2017). É importante destacar que o substrato armazenado no interior dos biodigestores deve ser tratado de modo que a fração de sólidos totais (ST) sejam atenuados para facilitar a circulação e evitar entupimentos. Alguns modelos de biodigestores utilizam uma parcela de 8% de ST do substrato.

Os biodigestores possuem uma classificação acerca de seu regime de alimentação. Os biodigestores podem ser classificados como contínuos ou intermitentes (Kunz, 2019). No primeiro caso, o abastecimento de biomassa é diário, com descarga proporcional à entrada de biomassa. Já no intermitente, utiliza-se a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, restando-a até a completa

biodigestão. Também, de acordo com Kunz (2019), os biodigestores são classificados conforme a forma de trabalho, podendo ser ascendente, quando os substratos de alimentação efetuam um movimento vertical conforme a biomassa é digerida. A outra classificação, referindo se também a forma de trabalho, são os biodigestores de fluxo laminar (Kunz, 2019). Existem diferentes modelos de biodigestores no mercado, dentre eles o reator de fluxo ascendente (UASB).

Os biodigestores UASB, do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, segundo Souza (1982), consistem em um sistema biodigestor que se estende no fundo de um tanque ao longo de uma coluna de lodo. Essa coluna de lodo baseia-se em uma tecnologia de tratamento biológico de esgotos focada na decomposição anaeróbia da matéria orgânica, baseada em microrganismos anaeróbicos.

O sistema biodigestor desses reatores tem como característica o fluxo ascendente do afluente até o topo do reator. O esgoto, após chegar ao reator, é distribuído, uniformemente, no fundo do tanque, passando em seguida através de uma manta de lodo. Essa manta de lodo é a responsável pela transformação da matéria orgânica em biogás, ocorrendo a mistura, a biodegradação e a digestão anaeróbia do conteúdo orgânico (Ivanagava, 2014). A Figura 1 ilustra um reator UASB.

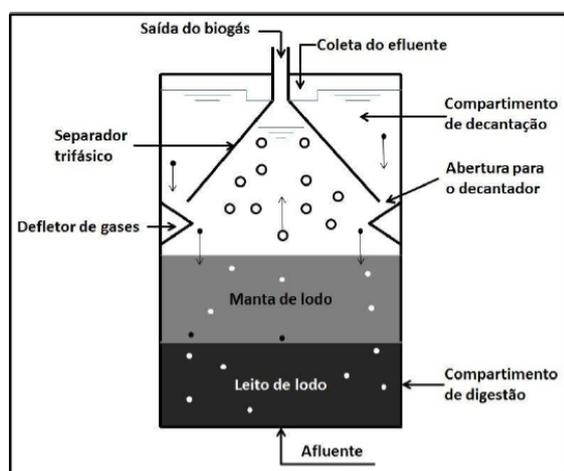


Figura 1: Desenho Esquemático de um reator UASB.
Fonte: Chernicharo, 1997.

Todo esse processo é embasado em uma coluna progressiva, que corresponde a manta de lodo. Essa coluna determina a transformação da matéria orgânica em uma direção de reação de cima para baixo, daí a derivação do nome *Upflow Anaerobic*. As principais funções do biodigestor UASB estão presentes nessa coluna, composta de zonas, que são: uma zona de digestão, uma zona de sedimentação, e um dispositivo separador de fases gás-sólido-líquido. O dispositivo separador de fases gás-sólido-líquido, encontra-se na parte superior consistindo em um sedimentador precedido de um sistema para a separação do gás. Esses reatores anaeróbios podem também vir a ter sistemas de aquecimento e agitação. Isso confere aos reatores UASB rendimentos superiores aos outros reatores anaeróbios.

3.3. Conversão do biogás em eletricidade

Um dos métodos de produção de energia elétrica a partir de biogás é o uso de Motores de Combustão Interna (MCI), como os motores de ciclo Otto. Esses motores baseiam-se na energia fornecida na expansão dos gases, no interior da câmara de combustão. O funcionamento desses motores é dividido em quatro tempos: admissão, compressão, combustão e emissão. A principal etapa desse processo é a combustão, onde ocorre o aproveitamento energético. Nessa etapa o gás é comprimido dentro de uma câmara e submetido a uma fonte de calor, que em seguida, com a expansão dos gases no interior da câmara, devido à explosão, a energia química presente nas moléculas dos gases é convertida em energia mecânica e transmitida ao virabrequim. Essa energia poderá agora acionar um alternador gerando assim energia elétrica (Figueiredo, 2011).

Ainda segundo Figueiredo (2011), a eficiência dos MCI está diretamente relacionada à taxa de compressão, ou seja, a proporção entre o volume deslocado pelo Pistão do Ponto Morto inferior (PMI) até o Ponto Morto Superior (PMS) (Figueiredo, 2011). Os motores de ciclo Otto possuem um limite de taxa de compressão devido a possibilidade de autoignição, ou seja, a queima do combustível decorrido de altas pressões e conseqüente aumento de temperatura. A autoignição pode causar ondas de alta pressão e conseqüentemente perdas de eficiência e danos ao motor, logo esses motores possuem uma eficiência térmica inferior a outros motores MCI com ignição a compressão.

Os primeiros modelos a usarem ignição por compressão são os MCI de ciclo diesel (Baggio, 2017). Os motores de ciclo Diesel por possuírem taxas de compressão mais elevadas que os motores de ciclo Otto possuem eficiências maiores. Um benefício à sua alta capacidade de operação com altos níveis de compressão, é a possibilidade do uso de combustíveis alternativos como o biogás.

Os motores de ciclo diesel e de ciclo Otto podem funcionar como motores a biogás pois o uso deste combustível não oferece grandes mudanças ao funcionamento desses motores uma vez que obedecem aos mesmos princípios ao que estão habituados a trabalhar (Zareh, 1998).

4. METODOLOGIA

O rendimento do biogás está atrelado a diversos fatores. Um dos fatores que afetam a quantidade do biogás é a biomassa disponível. A razão disso é que a eficiência dos biodigestores está relacionada a produção de resíduos urbanos, afetando diretamente a quantidade de biogás produzido. Dessa forma é preciso estimar o volume de biogás e seu potencial para determinada região.

A metodologia empregada estima o potencial de metano produzido com base nos modelos sugeridos por Rodrigues (2011) e Valente (2015). Esse método consiste em estimar a proporção de metano produzido para uma determinada região provida de uma ETE. Assim estima-se através de equações o potencial de metano bem como a conversão calorífica baseada na proporção de metano presente no biogás. Uma vez calculada a estimativa da quantidade de metano o passo

seguinte será determinar o potencial elétrico disponível do biogás.

O primeiro passo consiste em estimar o volume diário do biogás produzido a partir dos efluentes, segundo a Equação (1).

$$P_{gás} = \left(\frac{0,12 \text{ m}^3 \text{ gás}}{\text{kg} \cdot \text{DBO}} \right) \times \left(\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} \right) \times Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) \times \eta \quad (1)$$

Onde:

$P_{gás}$ = Volume diário de biogás produzido nos reatores em (m^3/dia).

0,12 $\text{m}^3 \text{ gás}/\text{kg}$ = Valor que relaciona à quantidade de biogás por kg de matéria orgânica no afluente (DBO afluente) (Figueiredo, 2017).

DBO (valor adotado DBO kg/m^3) = valor estimado de DBO para a estação de tratamento estudada.

Q (m^3/dia) = vazão média diária de esgoto da ETE.

η = eficiência do ETE.

Para determinar corretamente o valor de $P_{gás}$, é necessário calcular a taxa de kgDBO/m^3 da estação de tratamento de esgotos a ser utilizada para produção do biogás usando Equação (2).

$$\frac{\text{kgDBO}}{\text{m}^3} = \left(\frac{0,05 \text{ kg DBO}_5}{\text{Habitantes} \cdot \text{Dia}} \right) \times \left(\frac{\text{Habitantes} \cdot \text{Dia}}{0,160 \text{ m}^3} \right) \quad (2)$$

A eficiência da estação de tratamento pode ser determinada através da Equação (3). Essa equação relaciona a capacidade das estações de tratamento em remover o material orgânico (DBO) do efluente.

$$\eta = \frac{\text{DBO}_{\text{afluente}} - \text{DBO}_{\text{efluente}}}{\text{DBO}_{\text{afluente}}} \quad (3)$$

Onde:

η = eficiência da ETE.

$\text{DBO}_{\text{afluente}}$ = demanda Química de Oxigênio (afluente ou entrada).

$\text{DBO}_{\text{efluente}}$ = demanda Química de Oxigênio (efluente ou saída).

Uma vez estabelecida uma aproximação para a vazão de biogás produzido por dia, com base na Equação (1), é possível relacionar a concentração de metano presente, a partir da Equação (4).

$$P_{\text{metano}}[\text{m}^3] = P_{\text{gás}} \times \%CH_4 \quad (4)$$

Onde:

P_{metano} = volume diário metano (m^3/dia).

$\%CH_4$ = porcentagem de metano estimada para esgoto.

Este trabalho adota um valor de porcentagem de metano de 60%, segundo (Wereko-Brobby e Hagen, 2000).

As metodologias utilizadas em Rodrigues (2011) e Valente (2015) para determinar aproximadamente o potencial elétrico equivalente a um volume de biogás necessita do uso de conversões de energia, conforme a Tabela 3. Leva-se em consideração o Poder Calorífico do Metano (PCI) em energia aproveitável baseado em um valor médio de 8000 kcal para cada 1 m^3 de metano (Figueiredo, 2017). Assim, com base na Tabela 3, foi convertido esse valor médio em quilo caloria para quilo joules. Obtendo assim um valor de 33.440 kJ por segundo. Então, segundo (Figueiredo, 2017), tem-se a relação dada pela Equação (5).

$$1 [\text{m}^3] \text{ Metano} = \frac{33.440 \text{ kJ} [\text{h}]}{3600 [\text{s}]} = 9,29 \text{ kWh} \quad (5)$$

Assim, por meio de (5), cada 1 m^3 de metano possui 8.000 kcal, o que é equivalente a aproximadamente 9,3 kWh.

Tabela 3: Fatores de conversão para energia

	J	Cal	kWh
Joule (J)	1,0	0,23884	$277,7 \times 10^{-9}$
Caloria (cal)	4,1868	1,0	$1,163 \times 10^{-6}$
Quilowatt-hora (kWh)	$3,6 \times 10^6$	$860,0 \times 10^3$	1,0

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2008

A partir do fator de conversão podemos calcular a energia disponível no biogás produzido diariamente pelo ETE através da Equação (6).

$$E_{\text{biogas}}(\text{kWh}) = \frac{(P_{\text{metano}})[\text{m}^3] \times 9,3 \text{ kWh} \times \mu}{[\text{m}^3]} \quad (6)$$

Onde:

$E_{\text{biogas}}(\text{kWh})$ = Energia contida no biogás [kWh/dia].

μ = eficiência de conversão de máquinas térmicas

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse artigo foram considerados dados da cidade de São Luís MA. O estudo foi feito tomando-se em conta a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Jaracati, localizada nas margens do rio Anil em São Luís-Ma (Zagallo, 2018). Nessa estação o tratamento de esgoto é por meio de reatores UASB. A ETE do Jaracati possui uma vazão de projeto média de 178 L/s atendendo os bairros Ponta D'Areia, Calhau, Renascença, Lagoa Ana Jansen, São Francisco e Santa Eulália (CAEMA, 2008), possuindo capacidade para atender uma população de 76.869 habitantes até 2020 (Zagallo, 2018).

Para esse trabalho foi adotado para a DBO uma taxa de 0,05 kgDBO_5 por habitante por dia (CETESB, 1998). Usando esta estimativa para calcular o volume de biogás produzido pelo ETE de Jaracati, considerando que esse ETE tem uma capacidade de projeto para atender 76.869 habitantes, estima-se assim um valor para DBO tendo em vista uma aproximação de consumo de 160 litros de água por pessoa segundo a norma

ABNT NBR 7229/93, (CENBIO, 2012). Logo, a partir de (2) utilizou-se um valor de $0,312 \text{ kgDBO}_5 / \text{m}^3$.

Na Tabela 4 são apresentados os valores respectivos das vazões de trabalho para o ETE do Jaracati relativos ao ano de 2010, 2015 e 2020. Onde se optou a utilizar os valores médios e os dados mais atualizados.

Tabela 4: Vazão de projeto ETE Jaracati

Vazão (L/s)			
ANO	Mínima	Média	Máxima
2010	99,86	158,04	251,14
2015	104,02	166,37	266,13
2020	108,95	178,23	287,47

Fonte: CAEMA, 2008.

A determinação da quantidade de biogás foi baseada no total de habitantes da cidade de São Luís MA que possuem atendimento do ETE de Jaracati, com o auxílio das Equações (1)-(4), baseando-se nos dados de projeto apresentados na Tabela 5. Foi utilizado um valor de aproximação de 70% de eficiência para os reatores UASB da ETE de Jaracati baseado nos trabalhos de Figueiredo (2017) que realizou estudos em uma estação de tratamento em Itajubá.

Tabela 5: Parâmetros para a determinação da quantidade de biogás para a cidade de São Luís MA.

População atendida pela ETE	76.869 habitantes
DBO ₅	$0,312 \text{ kgDBO}_5 / \text{m}^3$
Vazão média do Efluente para as perspectivas do ano de 2020 segundo a tabela 2	$15.340 \text{ m}^3 / \text{dia}$
Eficiência do Reator anaeróbico	70% ou 0,7
Porcentagem de metano no biogás	60% ou 0,6

Fonte: Autores 2020.

Segundo tais dados, foi estimado uma vazão total de aproximadamente $402,03 \text{ m}^3 / \text{dia}$ de biogás para a ETE do Jaracati, com auxílio da Equação (1), com uma vazão de metano equivalente a $241,2 \text{ m}^3 / \text{dia}$, de acordo com a Equação (2). Observando que a massa específica do metano é cerca de $0,716 \text{ kg} / \text{m}^3$ (Cutrim, 2012), a massa produzida por dia corresponde aproximadamente a $173 \text{ kg} / \text{dia}$ de metano, o que resulta em 62.280 kg de metano por ano para a ETE de Jaracati. O DBO₅ é a Taxa da Demanda de Bioquímica e equivale a razão entre a carga orgânica e o consumo de água por habitante (CETESB, 1998).

Uma vez estimada a quantidade de biogás, pode-se definir uma aproximação para o potencial de energia elétrica. Considerando o coeficiente de conversão para máquinas térmicas, no caso os MCIs, em torno de 30% (Figueiredo, 2017), e uma vazão de $241,2 \text{ m}^3 / \text{dia}$ de metano produzido pelo o ETE do Jaracati, existe um potencial de aproximadamente

$20.188,44 \text{ kWh} / \text{ano}$ oriundos de fontes alternativas baseada em biogás de tratamento de esgoto.

A partir dessas aproximações pode-se estimar o quanto o uso da energia proveniente de tratamento de esgoto irá afetar o consumo e geração de energia elétrica. Conforme o relatório da SANEPAR (2010), baseado na ETE de Ouro Verde, a produção de energia em torno do esgoto de 17.550 habitantes gera um potencial de aproximadamente 16 mil kWh/ano, capaz de munir cinco residências nesse período. Comparativamente, por meio da estimativa feita para a cidade de São Luís, é possível abastecer aproximadamente 6 residências, através dos $20.188,44 \text{ kWh} / \text{ano}$ obtidos. Assim o uso de energia proveniente do tratamento de esgoto pode amenizar a pressão de produção de energia, atendendo a comunidade.

É importante salientar a importância da purificação do biogás para seu máximo aproveitamento. As aproximações realizadas foram feitas a partir de um modelo ideal, onde não se consideram as influências das impurezas do biogás após o processo de biodigestão. Segundo referências encontradas na literatura, a composição do biogás após a biodigestão é cerca de 1.23% de oxigênio, 15.5% de nitrogênio, 4.75% de dióxido de carbono, 75.8 % de metano, 649ppm de sulfeto de hidrogênio e 2.62% de água, (Yamashita, 2004). Assim sendo para melhor aproveitamento do biogás é necessário tratá-lo com procedimentos de purificação comentados na Tabela 1.

6. CONCLUSÃO

Ao longo desse artigo foi evidenciado que nem toda a população se beneficia dos sistemas de tratamento de esgotos, gerando uma parcela de efluentes líquidos e sólidos não tratados pela cidade. Em consequência disso, tem-se uma série de problemas ambientais de saúde e sociais que afetam diretamente a sociedade. Porém, embora a qualidade do saneamento básico não seja ideal, não atingindo toda a população, o percentual de atendimento melhorou muito ao longo dos tempos. Isso se deve a políticas de conscientização e o entendimento de preservação de recursos naturais.

Partindo do pressuposto da problemática ambiental, buscou-se relacionar nesse artigo um outro problema, a dependência do uso de combustíveis fósseis e diversificação da matriz energética tendo como escopo de projeto a cidade de São Luís. Assim foi apresentada a ideia do uso de tratamento de esgoto para diversificar a matriz energética tendo como apoio estações de tratamento de esgotos. Para isso, algumas tecnologias podem ser empregadas, tais como: reatores anaeróbios, técnicas de purificação do biogás, motores de combustão interna.

Uma vez definidos os conceitos que cercam esta temática, entre eles o que é biomassa e biogás, bem como biodigestores, foi empregada uma metodologia que pudesse determinar a quantidade de biogás para a estação de tratamento de esgoto Jaracati localizado na cidade de São Luís. Observou o impacto que o emprego dessa tecnologia irá proporcionar entre estes a redução da pressão de produção energética para atender a sociedade. Aponta-se então a necessidade de investimentos em unidades de esgotos tendo como pressuposto as vantagens apresentadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos (abrelpe). Panorama de Resíduos Sólidos, Brasil. São Paulo, 2015.
- Agência Nacional de Águas (ANA). atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília- DF: ana, 2017.
- Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL- atlas de energia elétrica do brasil - fatores de conversão - ed. – Brasília : aneel, 2008. disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>
- Alves, V. M. C. Análise de Produção de Inovação Tecnológica do Biogás no Brasil de 2006 a 2016: História do Biogás. Universidade Federal de São João Del-Rei, Ouro Branco, jun./2016.
- ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil: Biomassa. BRASIL, v. 1, n. 1, p. 1-153, 2002.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica - BIG - Banco de Informações de Geração. www.aneel.gov.br, 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3&UF=PR:PARAN%C1>. Acesso em: 04 Setembro 2020.
- Araújo, A. P. C. produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- Baggio, Pamela Leiria. Estudos de tecnologias existentes para a geração de energia elétrica a partir do biogás. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.
- Bley, C. Biogás: A energia invisível. CIBiogás-ER., n. 12232131, p. 48–50, 2015.
- Borschiver e A.L.R. da Silva. Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. COBEQ: Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis/sc, v. 1, n. 20, p. 1-9, out./2014.
- CAEMA. Companhia de Águas e Esgotos do Maranhão (CAEMA)/esse engenharia e consultoria Ltda. (Org.). Projetos Executivos do Sistema de Esgotamento Sanitário do Município de São Luís - Etapa 1 – Sistemas São Francisco, Anil, Vinhais e Bacanga: Diagnóstico da Situação Atual. São Luís: Caema, 2008. Volume I. (Tomo I).
- CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. Atlas de Bioenergia do Brasil, São Paulo, 2012.
- CETESB, Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos, 1998.
- Chernicharo, C. A. L. Reatores Anaeróbios. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997. 380 p. – (Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, 5).
- Classen, P.A.M; Lier, J.B.; Stamrs, A.J.M. Utilization of biomass for supply of energy carrier. Applied microbiology and biotechnology, v.52, p.741-755, 1999.
- Cutrim, A. M. F. Aproveitamento Energético do Biogás gerado no tratamento de Efluente Urbanos. Universidade Federal de Lavras.Lavras-MG, v. 1, n. 1, p. 1-56, 2012.
- Ferreira, C. R. Apresentação durante Workshop do Projeto Probiogás. Título: Aproveitamento do Biogás na Geração de Energia Elétrica no Tratamento de Efluentes. Ambient - Grupo GS Inima Brasil. Ribeirão Preto. 2014.
- Figueiredo, Alexandre Calixto. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica proveniente do Biogás da Estação de Tratamento de Esgoto de Itajubá: subtítulo do artigo. Centro Universitário de Itajubá : Engenharia Elétrica , Itajubá, v. 1, n. 1, p. 1-74, 2017.
- Figueiredo, N. J. V. D. Utilização De Biogás de aterro Sanitário Para Geração de Energia Elétrica - Estudo de caso: subtítulo do artigo. USP: Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 1-147, 2011.
- Ivanagava, Erika Nogami. Avaliação da partida de um reator anaeróbico de fluxo ascendente com decantador do tipo laminar aplicado ao tratamento de efluente suinocultura de uma pequena propriedade rural. Universidade Federal do Paraná: campus londrina, Londrina, 2014.
- Kunz, A. et al. Fundamentos da Digestão Anaeróbica, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato. EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Concórdia, SC, v. 1, n. 1, p. 1-209, 2019.
- Kunz, A. et al. Gestão Ambiental na Agropecuária: subtítulo do artigo. Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, v. 2, n. 1, 2014.
- Levin, Kelly. WRI INSIGHTS. CO2 Emissions Climb to an All-Time High (Again) in 2019: 6 Takeaways from the Latest Climate Data. Disponível em: <https://www.wri.org/blog/2019/12/co2-emissions-climb-all-time-high-again-2019-6-takeaways-latest-climate-data>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- Luz, L. F. D. L. et al. bioetanol, biodiesel e biocombustíveis: perspectivas para o futuro. ipea. dez./2009.
- Magalhães, Agenor P. T. Biogás: um projeto de saneamento urbano. São Paulo: Nobel, 1986, 120p.
- Nascimento, M. C. B., Freire, E. P., Dantas, F. A. S., Giansante, M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. Engenharia Sanitária Ambiental, São Paulo (SP), v. 24, n. 1, p. 143-154, jan./2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019171125.
- Nogueira, L.A.H. Biodigestão, a alternativa energética. Editora Nobel, p.1-93. São Paulo,1986.
- Organização das Nações Unidas (ONU). Objetivos do desenvolvimento Sustentável da ONU: Relatório Global do desenvolvimento sustentável 2019 o futuro é agora. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/globalsdreport/2019> . Acessado em 17/05/2020.
- Pecora, Vanessa. Implantação de uma unidade administrativa de geração de energia elétrica a partir do Biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - Estudo de caso. USP: Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 1-152, 2006.
- PNAD. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: Características gerais dos domicílios e dos moradores: 2018., Rio de Janeiro, v. 1.5, n. 4, 2019.

- Reichert, G.A. (2014) Painel 4 – Tecnologias apropriadas para o tratamento dos resíduos sólidos. in: seminário nacional de resíduos sólidos, desafios para implantação da política nacional, 11., abes. Brasília: abes. disponível em:<http://www.abesdf.org.br/upload/estudo/2014_08_19/41-geraldoreichert-tecnologias.pdf>. acesso em: set. 2020.
- Rodrigues, D. L.; Aquino, C. F.; Estevam, G. P. Produção de biogás a partir dos esgotos utilizando reatores anaeróbicos do tipo rafa seguido por lodos ativados numa estação de tratamento de esgoto. *Omnia Exatas*, v.4, n.2, p.103-109, 2011. Disponível em: <http://www.fai.com.br/portal/ojs/index.php/omniaexatas/article/download/250/pdf>.
- SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná. Energia produzida a partir de Estação de Tratamento de Esgoto. Disponível em: http://educando.sanepar.com.br/ensino_superior/energia-produzida-partir-deesta%C3%A7%C3%A3o-de-tratamento-de-esgoto. Curitiba, 2010.
- Silva, T.N. Diagnóstico da produção de biogás de um aterro sanitário: estudo de caso no aterro Bandeirantes. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2006.
- Souza, M. E., “Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia”, Trabalho apresentado no V Simpósio Nacional de Fermentação, Viçosa, 1982.
- Valente, V.B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbicos em estações de tratamento de esgoto no Brasil. Dissertação (Mestrado em planejamento energético.) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/bustani.pdf>
- VILLANI JR., W. Gestão energética em ETEs. Um novo paradigma. SeMAE São José do Rio Preto. 44º Assembleia Nacional da ASSEMAE. Uberlândia. 2014.
- Wereko-Brobby, C. Y., Hagen, E.B. Biomass conversion and technology. Editora John Wiley & Sons. p. 2-224. New York, 2000.
- Yamashita, T. Relatório de Ensaio - “Certificado de Análise da Composição do Biogás – PUREFA”. São Paulo. WHITE MARTINS, 2004.
- Zagallo, Sofia Araujo. esgotamento sanitário e vulnerabilidade social: um estudo de caso em São Luís – MA com a utilização de técnicas de geoprocessamento: subtítulo do artigo. Universidade de Brasília Centro de Desenvolvimento Sustentável: subtítulo da revista, Brasília, v. 1, n. 1, p. 1-176, 2018.
- Zareh, A. Motores a Gás. Lubrificação, Rio de Janeiro, v. 81, nº 04, p. 2-4, 1998.