Produção de biogás através de esgoto urbano

OLIVEIRA, Luana Bolivio de
SILVA, Mariana Colletti da
MAZZONETTO, Alexandre Witier

Resumo

A biodigestão anaeróbia do esgoto urbano e lodo de esgoto foi objeto do presente trabalho, visando demonstrar a viabilidade da elaboração de plantas de biogás nas estações de tratamento de esgoto situadas na região de Piracicaba. É notório que os biodigestores podem desempenhar um papel crucial no tratamento do esgoto urbano oferecendo uma abordagem inovadora e ambientalmente responsável, para lidar com os desafios relacionados ao saneamento básico nas áreas urbanas. A implementação efetiva dessa tecnologia poderia não apenas diversificar a matriz energética do país, mas também gerar retornos financeiros significativos. A pesquisa foi conduzida através da montagem de pequenos biodigestores no volume de 10 litros, utilizando amostras de esgoto bruto e lodo de esgoto coletadas na Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim em Piracicaba no estado de São Paulo. No material coletado foram realizadas análises de pH, DBO e DQO nos laboratórios da empresa Mérieux Nutrisciences. Essas mesmas análises foram realizadas após o processo de biodigestão. Foi estabelecido uma relação entre os aspectos físico-químicos e a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia, com e sem o uso de inóculo suíno como catalisadores no processo. Foi realizada comparação da capacidade de produção de biogás de cada matéria-prima. Verificou-se que o lodo de esgoto, apresentou maior degradabilidade da matéria orgânica, eficiência e produção de biogás quando comparado ao esgoto, demonstrando melhor para aproveitamento energético.

Palavras chave: Biogás; Esgoto urbano; energia renovável; Inóculo, DBO.

Abstract

The anaerobic biodigestion of urban sewage and sewage sludge was the focus of the present study, aiming to demonstrate the feasibility of developing biogas plants at sewage treatment stations located in the Piracicaba region. It is well known that biodigesters can play a crucial role in the treatment of urban wastewater, offering an innovative and environmentally responsible approach to address challenges related to basic sanitation in urban areas. The effective implementation of this technology could not only diversify the country's energy matrix but also generate significant financial returns. The research was conducted through the assembly of small-scale biodigesters with a volume of 10 liters, using samples of raw sewage and sewage sludge collected at the Piracicamirim Sewage Treatment Station in Piracicaba, in the state of São Paulo. The collected material was analyzed for pH, BOD, and COD at the laboratories of the company Mérieux Nutrisciences. These same analyses were conducted after the biodigestion process. A relationship was established between the physicochemical aspects and the efficiency of the anaerobic biodigestion process, with and without the use of swine inoculants as catalysts in the process. A comparison was made of the biogas production capacity of each raw material. It was found that sewage sludge showed greater organic matter degradability, efficiency, and biogas production when compared to sewage, demonstrating better potential for energy recovery.

Keywords: Biogas; Urban sewage; Renewable energy; Inoculum; BOD.

Resumen

La biodigestión anaeróbica de aguas residuales urbanas y lodos de depuradora fue el objeto del presente trabajo, con el objetivo de demostrar la viabilidad de la implementación de plantas de biogás en las estaciones de tratamiento de aguas residuales situadas en la región de Piracicaba. Es notorio que los biodigestores pueden desempeñar un papel crucial en el tratamiento de aguas residuales urbanas, ofreciendo un enfoque innovador y ambientalmente responsable para afrontar los desafíos relacionados con el saneamiento básico en las zonas urbanas. La implementación efectiva de esta tecnología podría no solo diversificar la matriz energética del país, sino también generar retornos financieros significativos. La investigación se llevó a cabo mediante el montaje de pequeños biodigestores con un volumen de 10 litros, utilizando muestras de aguas residuales crudas y lodos de depuradora recolectadas en la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales Piracicamirim, en Piracicaba, en el estado de São Paulo. En el material recolectado se realizaron análisis de pH, DBO y DQO en los laboratorios de la empresa Mérieux Nutrisciences. Estos mismos análisis se realizaron después del proceso de biodigestión. Se estableció una relación entre los aspectos físico-químicos y la eficiencia del proceso de biodigestión anaeróbica, con y sin el uso de inóculos porcinos como catalizadores en el proceso. Se realizó una comparación de la capacidad de producción de biogás de cada materia prima. Se observó que los lodos de depuradora presentaron una mayor degradabilidad de la materia orgánica, eficiencia y producción de biogás en comparación con las aguas residuales, demostrando un mejor aprovechamiento energético.

Palabras clave: Biogás; Aguas residuales urbanas; Energía renovable; Inóculo; DBO.

INTRODUÇÃO

O biogás é um gás oriundo da biodigestão anaeróbia de matéria orgânica. As fontes para sua produção são variáveis, sendo elas dejetos de animais, como bovinos, aves de corte e suínos, além de resíduos sólidos urbanos (RSU – parte orgânica), vinhaça e esgoto urbano, sendo esta última a matéria utilizada no presente trabalho para produção de biogás (EMBRAPA, 2021).

O biogás possui diversas aplicações, podendo ser utilizado como fonte de energia para aquecimento e movimentação de maquinário em propriedades rurais, diminuindo custos com energia e evitando o descarte inapropriado de resíduos (Machado, 2013).

É importante ressaltar que quanto maior o teor de metano, mais puro é o biogás. Para que a produção e uso do biogás sejam rentáveis ao produtor rural, é necessário que o gás possua, no mínimo, 70% de metano. A proporção dos gases na mistura varia de acordo com o manejo aplicado no biodigestor (Barros, 2021).

Os experimentos realizados contaram com a utilização de inóculo suíno como catalizador, a fim de comparar a eficiência processo, em relação ao uso ou não desse material. Foram realizadas análises dos pH's, DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio) do material inoculado e das amostras de esgoto, antes e depois da ocorrência da biodigestão, para identificação da produção e cálculo da eficiência do biogás dos biodigestores montados.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

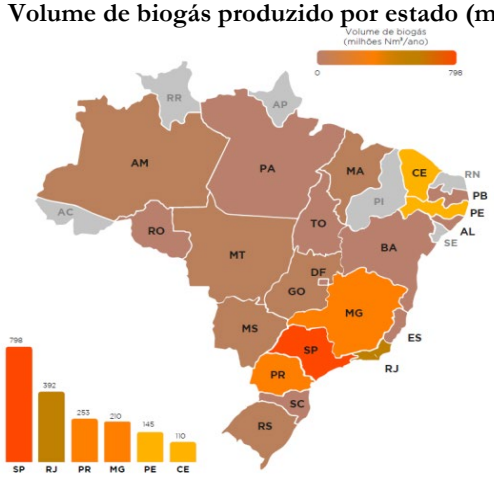
1.1 Panorama Nacional do Biogás

Em 2021 houve um acréscimo de 16% na quantidade de plantas em operação e 10% no volume produzido de biogás comparado ao ano de 2020. Além disso, também em 2021, havia 811 plantas de biogás cadastradas no Brasil, das quais 755 estavam em operação. Outras 102 foram construídas ao longo do mesmo ano, gerando 2,3 bi Nm^3/ano de biogás em operação e mais 209 mil Nm^3/ano em 2021. Além disso, houve um aumento de 10% no volume do gás entre os anos de 2020 e 2021 (Freddo *et al.*, 2022). Além disso, o país conta com seis unidades de plantas de biogás proveniente de resíduos de centros urbanos atualmente (PROBIOGÁS, 2017).

Conforme o último levantamento nacional de biogás realizado de CIBiogás, o número de plantas passou de 655 para 755 no ano de 2021, resultando em um aumento de 16% a nível nacional. Entretanto, ao analisar as regiões brasileiras separadamente, foi possível identificar que alguns estados se mantiveram estagnados enquanto outros fortaleceram a produção do gás. Os estados que mais produzem biogás são: Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina, enquanto os estados

com maior registro de crescimento a partir de 2021 foram: São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Goiás (Ramalho, 2022). A relação do volume de gás produzido o redor do Brasil está representado na Figura 1.

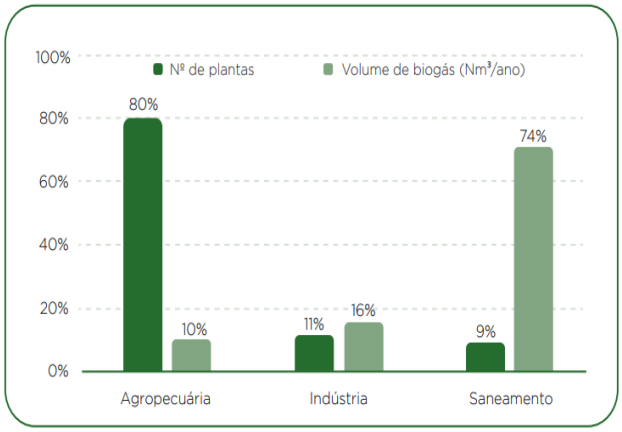
Figura 1: Volume de biogás produzido por estado (milhões Nm³/ano)



Fonte: Freddo *et al.*, (2022).

No Brasil, os principais substratos utilizados para produção de biogás são classificados em três categorias quanto a sua fonte, sendo elas agropecuária, agroindústria e saneamento. Em 2021, a agropecuária foi responsável por 80% das plantas de biogás operantes no país, enquanto os setores agroindustrial e de saneamento contribuíram em 11% e 9%, respectivamente, na quantidade de plantas do combustível. Referente ao volume de biogás, destacou-se o setor de saneamento, pois produziu cerca de 74% do volume total produzido, enquanto o setor industrial produziu 16% e o agropecuário apenas 10% (Freddo *et al.*, 2022). A Figura 2 representa o desenvolvimento das plantas nos últimos anos.

Figura 2: Crescimento do número de novas plantas ao longo do tempo



Fonte: Freddo *et al.*, (2022).

1.2 Estágios da Biodigestão Anaeróbica

O processo para obtenção de biogás é denominado digestão anaeróbia, ou seja, ocorre na ausência de oxigênio. Segundo Kunz (2022), tal processo possui quatro etapas, sendo elas:

a) Hidrólise

A fase hidrolítica é o período de degradação de compostos complexos como lipídeos, polissacarídeos e proteínas em monômeros, compostos de baixa complexidade e substâncias solúveis. Este processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares oriundas das bactérias hidrolíticas. A influência da hidrólise na velocidade da degradação do substrato é dependente das características do mesmo.

b) Acidogênese

Fase em que os produtos resultantes da hidrólise são metabolizados no interior das bactérias anaeróbias em álcoois (etanol), cetonas, aldeídos, hidrogênio, dióxido de carbono e, essencialmente, ácidos orgânicos (acético, propiônico, butírico e lático). A pressão parcial de hidrogênio influencia diretamente a oxidação de produtos. Caso for elevada, resultará em substâncias com maior quantidade de carbono.

c) **Acetogênese**

É a fase responsável pela oxidação das substâncias geradas na acidogênese. Ocorre a produção de ácidos orgânicos pela ação das bactérias sintróficas acetogênicas. Os produtos gerados nessa fase são acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. A equação geral que representa tal fase do processo está representada a seguir na equação 1.

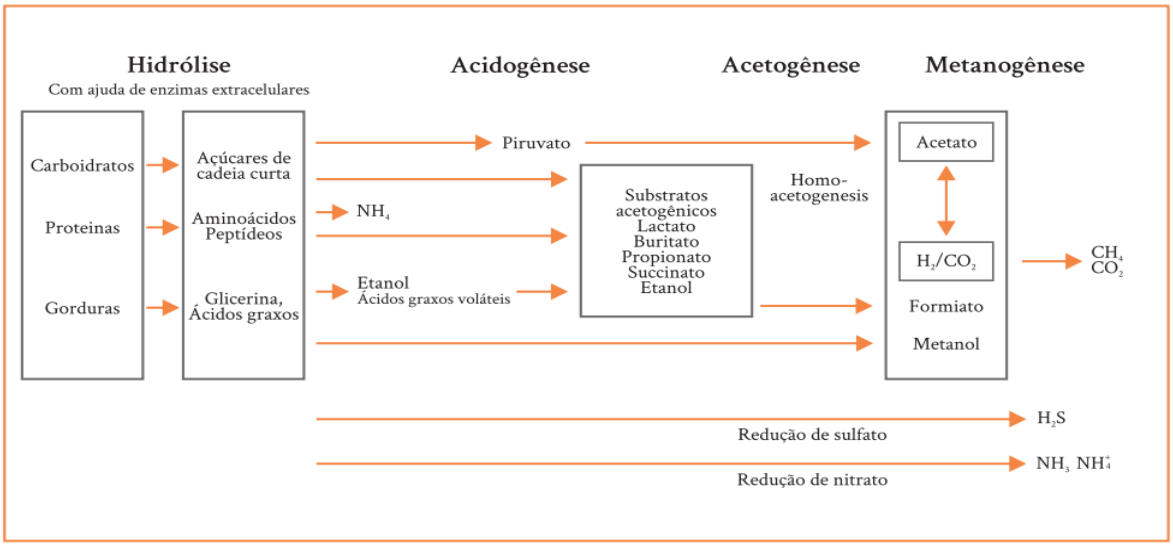
$$2CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_3COOH + 2H_2O \quad \text{(Equação 1)}$$

d) Metanogênese

É a etapa final do processo de biodigestão anaeróbia. Através da ação das arqueas metanogênicas, o carbono contido na biomassa é transformado em dióxido de carbono e metano. Vale ressaltar que as arqueas metanogênicas são classificadas em acetoclásticas e hidrogenotróficas. As acetoclásticas convertem acetato em metano, enquanto as hidrogenotróficas convertem hidrogênio e gás carbônico em metano.

O processo completo de biodigestão anaeróbia pode ser resumido através da Figura 3.

Figura 3: Biodigestão anaeróbia



Fonte: Kunz *et al.*, (2022).

1.3 Princípios do Biodigestor Anaeróbico

Os biodigestores são amplamente utilizados como alternativa para aproveitamento de resíduos agrícolas, gerando como produtos principais, energia e biofertilizante. Em seu sistema possuem uma câmara principal onde é adicionada a matéria orgânica que sofrerá degradação. Essa câmara pode apresentar uma estrutura cíclica, vertical e superficial, ou seja, se encontram acima do nível do solo, com uma estrutura específica onde é acumulado o gás obtido a partir da biodigestão, conhecido como gasômetro. Todo o processo de degradação ocorre na ausência de oxigênio, por meio da digestão de bactérias anaeróbias (Frigo *et al,* 2015).

Existem diversos modelos de biodigestores com características muito diferentes entre si, esses sistemas são separados em dois grupos; os biodigestores contínuos e os não contínuos ou descontínuos. Os contínuos são aqueles onde a matéria orgânica é adicionada ao reator com certa frequência por meio de uma caixa de entrada, dessa forma a degradação ocorre de forma constante e ininterrupta, como exemplo de reatores contínuos temos os biodigestores indianos, chineses e canadenses contínuos (Tarrento, 2006).

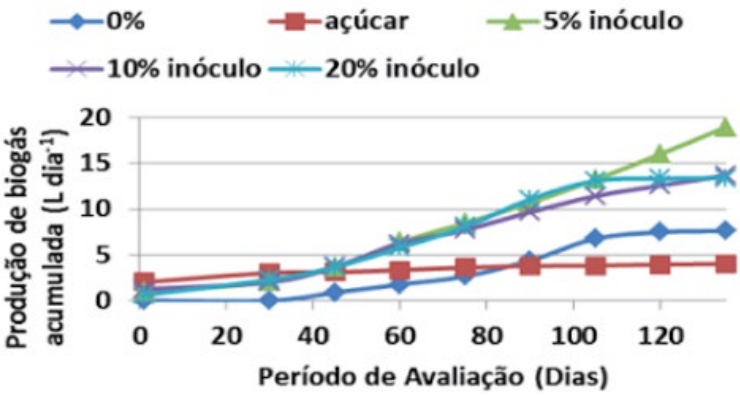
Já no sistema descontínuo o reator é abastecido apenas uma vez e selado até a retirada dos produtos. Geralmente são implementados em áreas onde não há disponibilidade frequente de matéria prima como em granjas avícolas de corte, pois nessas instalações os dejetos ficam disponíveis para a coleta após a venda das aves e são recolhidos durante a limpeza dos galpões, como exemplo de reator descontínuo temos o biodigestor a batelada (Frigo *et al*, 2015).

1.4 Utilização de Inóculo

Para que o processo de degradação ocorra em um menor espaço de tempo utiliza-se da técnica de inoculação do reator recém montado, o inóculo representa uma parcela de substrato retirado de outro reator que já apresenta as quatro fases de degradação completas, esse material é então adicionado ao biodigestor pretendido, ajudando na adaptação e sucesso das bactérias presentes no dejeto (EMBRAPA, 2012).

Reatores que não apresentam adição de inóculo podem levar até 120 dias para o início da produção de biogás, além disso o volume de biogás produzido pode ser menor quando comparado com os inoculados, A parcela de inóculo ideal em reatores é de 20% do volume total, porém mesmo em menores quantidades o resultado é satisfatório. A Figura 4 demonstra graficamente o conceito apresentado (LUCAS JR. *et al.*,1993).

Figura 4: Relação entre a porcentagem de inóculo e a produção de biogás



Fonte: EMBRAPA, (2012).

Por outro lado, quando o inóculo utilizado apresenta baixa eficiência, sua utilização poderá afetar o sistema como um todo, uma vez que ocupará o volume que poderia ser preenchido com substrato a ser tratado (Steil, 2001).

1.5 Caracterização do Esgoto Urbano

Conforme a definição da NBR 9.648 (ABNT, 1986) o esgoto urbano é o "despejo líquido constituído de esgotos domésticos e industriais, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária", portanto, o esgoto que chega nas estações de tratamento é composto pelos despejos de quaisquer estabelecimentos que possuam banheiros, cozinhas ou áreas de lavagem, além dos despejos oriundos das indústrias. A caracterização dos esgotos sanitários pode ser realizada

segundo parâmetros físicos como temperatura, cor, odor e turbidez, biológicos e químicos. A Tabela 1 apresenta as principais características do esgoto sanitário.

Tabela 1: Caracterização físico-química do esgoto urbano

Parâmetro	Descrição	Faixa de concentração típica	Unidade
Sólidos Totais	Sólidos suspensos + dissolvidos + sedimentáveis (orgânico e inorgânico).	700-1350	mg/L
Sólidos suspensos (SS)	Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que não são filtráveis.	200-450	mg/L
Fixos (SSF)	Compostos minerais, inertes, que são parte dos SS.	40-100	mg/L
Voláteis (SSV)	Compostos orgânicos, oxidável pelo calor, parte dos SS.	165-350	mg/L
Sólidos dissolvidos (SD)	Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que são filtráveis.	500-900	mg/L
Fixos (SDF)	Compostos minerais dos SD.	200-500	mg/L
Voláteis (SDV)	Compostos orgânicos dos SD.	200-350	mg/L
Sólidos sedimentáveis	Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que sedimentam.	10-20	mg/L
Matéria orgânica	Mistura homogenia de vários compostos orgânicos (proteínas, lipídios, carboidratos,etc).		
Determinação indireta			
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio.	250-600	mg/L
DQO	Demanda Química de Oxigênio.	450-800	mg/L
Nitrogênio total	É essencial para crescimento microbiológico.	35-60	mgN/L
Fósforo total	É um nutriente essencial para o crescimento biológico dos microrganismos.	4-15	mgP/L
pH	Os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzir o pH.	6,7-8,0	-
Alcalinidade	Indicador da capacidade tampão do meio, causada pela presença de íons de bicarbonato, carbono e hidroxila.	100-250	mgCaCo3/L

Fonte: Adaptado de Kunz *et al.* (2022).

A composição do biogás oriundo de resíduos do tratamento de esgoto urbano é mais diversificada do que o biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU). A presença de H_2S, como dito anteriormente, é corrosiva, por isso a produção do gás é voltada essencialmente para a geração de energia elétrica (Rodrigues, 2022). A composição do gás está representada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição do biogás proveniente do tratamento do esgoto urbano

Componentes	Biogás tratamento de esgoto sanitário
CH_4	60 - 85%
CO_2	5 – 24,1%
N_2	6,7 – 25%
H	0 – 0,3%
H_2S	1000 a 2000 ppmv
CO	0 – 3%
O_2	0,4 – 1,6%

Fonte: Rodrigues (2022).

1.6 Potencial Energético do Esgoto Urbano

Segundo Santiago (2019), os efluentes urbanos possibilitam a produção de energia elétrica através da remoção da carga orgânica. A Tabela 3 representa o potencial energético do esgoto para a produção de biogás por região brasileira no ano de 2016.

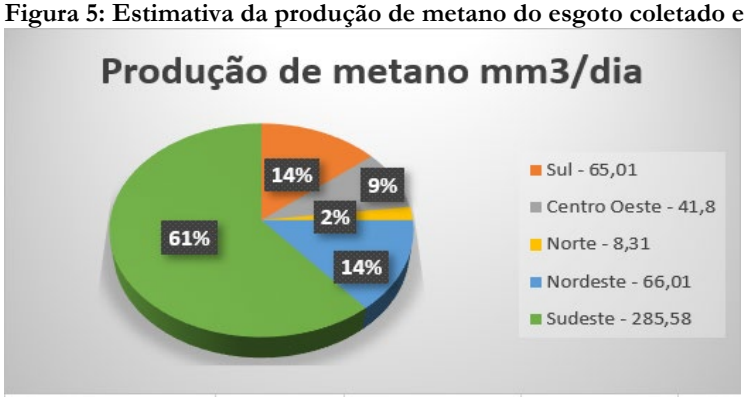
Tabela 3: Estimativa da produção de metano

		Esgoto coletado e tratado		
Região	**Vazão média m3/dia (Q)**	**DBO mg/L**	**% de CH_4**	**Produção de metano Mm3/dia**
Nacional	11.111.900	350	60%	466,70
Norte	197.744	350	60%	8,31
Nordeste	1.571.500	350	60%	66,01
Sudeste	6.799.470	350	60%	285,58
Sul	1.547.850	350	60%	65,01
Centro-Oeste	995.289	350	60%	41,80
		Esgoto coletado e não tratado		
Região	**Vazão média m3/dia (Q)**	**DBO mg/L**	**% de CH_4**	**Produção de metano Mm3/dia**
Nacional	3.885.072,00	350	60%	63,17
Norte	49.796,71	350	60%	2,09
Nordeste	371.126,90	350	60%	15,59
Sudeste	3.272.936,00	350	60%	137,46
Sul	105.596,30	350	60%	4,44
Centro-Oeste	85.612,75	350	60%	3,60

Fonte: Adaptado de Santiago (2019).

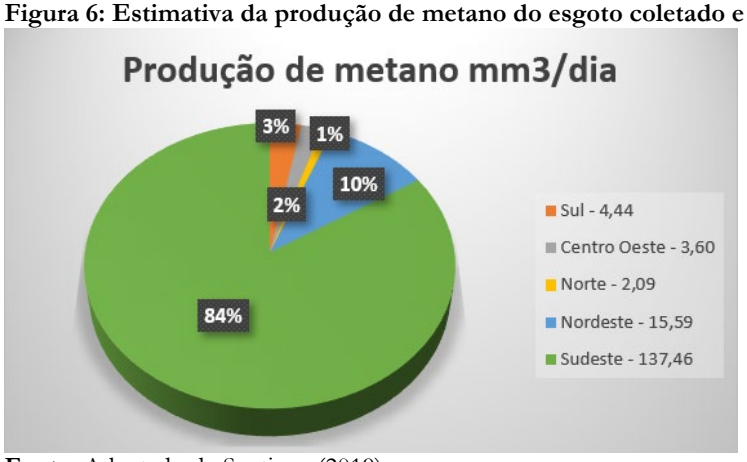
De acordo com Santiago (2019), há distinção no potencial energético do esgoto não tratado em relação ao esgoto tratado adequadamente. Para realizar a estimativa de biogás gerada por cada tipo de efluente, é necessário conhecer a vazão média de entrada do efluente no sistema de tratamento, a DQO média e o índice de produção de biogás em função da DQO gerada. As figuras a seguir demonstram o comparativo entre o potencial do esgoto tratado e do esgoto bruto para produção do gás. É importante ressaltar que para realização dos cálculos foram utilizados os seguintes indicadores técnicos: DQO removida (350 mg/L), média de vazão (m^3/dia), produção de metano por Kg de DQO removida e concentração de metano (60%).

Figura 5: Estimativa da produção de metano do esgoto coletado e tratado



Fonte: Adaptado de Santiago (2019).

Figura 6: Estimativa da produção de metano do esgoto coletado e não tratado



Fonte: Adaptado de Santiago (2019).

1.7 Relação entre pH e a Produção de Biogás

O potencial Hidrogeniônico (pH) tem importante papel na biodigestão anaeróbica, uma vez que os microrganismos responsáveis por esse processo são sensíveis à possíveis variações do meio, o pH não favorável pode ocasionar na inibição do processo e até mesmo na morte de parte dos microrganismos e bactérias. A faixa ideal para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas

é de 6,5 a 7,6, enquanto a maior produção de CH2 ocorre na faixa de 7 a 7,2, valores inferiores a 6 ou superiores a 7,6 ocasionam na inibição da atividade microbiana (Bidone e Povinelli, 1999).

O presente trabalho busca comprovar a viabilidade da produção de biogás a partir de esgoto urbano e lodo de esgoto coletados na Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim, em Piracicaba, cidade situada no Estado de São Paulo. Além da comprovação de produção do gás, o estudo visa salientar o potencial energético do esgoto urbano.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do Ponto e Coleta das Amostras

A coleta das amostras para elaboração do estudo foi realizada na Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim no município de Piracicaba, um galão de 10 litros de esgoto bruto foi retirado dos tanques de gradeamento e um galão de mesmo volume de lodo foi retirado dos tanques de decantação para montagem dos reatores. A Figura 7 apresenta uma foto do sistema de saneamento da ETE Piracicamirim.

Figura 7: Panorama geral da ETE Piracicamirim

Fonte: Portal do tratamento de água (2020).

2.2 Montagem dos Biodigestores e Análises Iniciais

A base utilizada para construção dos reatores foram quatro bombonas de 10 litros, duas atribuídas para a comparação da eficiência do esgoto, sendo um esgoto puro (Reator 1) e outra esgoto misturado ao inóculo de dejetos suínos (Reator 2), e as duas restantes foram destinadas ao lodo de esgoto *in natura* (Reator 3) e lodo de esgoto misturado ao inóculo suíno (Reator 4), o volume final de matéria-prima nas bombonas foi de 5L, sendo que 20% desse valor é equivalente ao inóculo adicionado no reator 2 e 4. Após a elaboração dos reatores, foram enviadas amostras dos quatro biodigestores para análise de pH, DBO E DQO.

Os biodigestores foram deixados em um local arejado durante todo o período do experimento que durou 16 semanas, para acompanhar o processo de biodigestão, a cada 15 dias a válvula de gás foi aberta para realização de um teste de chama no gás que era descarregado, para verificar a inflamabilidade do conteúdo produzido, sendo possível identificar o início da produção de metano.

A partir da quarta semana de experimento, os reatores 3 e 4 começaram a apresentar estufamento do diâmetro da bombona e foi possível retirar pequenas quantidades de gás metano, já os reatores 1 e 2 demoraram cerca de 6 semanas para apresentar a primeira produção de biogás. Após a identificação do metano em todos os reatores, as válvulas de gás foram mantidas fechadas para que fosse possível acumular gás e fazer o experimento comparativo de eficiência entre os protótipos. A Figura 8 mostra o modelo de biodigestor elaborado para realização do trabalho.

Figura 8: Modelo do biodigestor desenvolvido

Fonte: Autores.

Ao final do período as válvulas de gás foram abertas e o teste de chama foi repetido e cronometrado em cada reator, para identificação de eficiência na produção de gás. Ao final dos testes, foram retiradas amostras para repetir as análises de pH, DBO e DQO, com finalidade de comparar a degradação da matéria orgânica após o processo de digestão anaeróbica, como é possível observar na Figura 9.

Figura 9: Amostras destinadas ao laboratório de análises

Fonte: Autores.

2.3 Realização dos Cálculos de Eficiência a Partir da Demanda Química de Oxigênio

A eficiência do processo além de ser determinado pela quantidade de biogás produzido, também pode ser quantificado pela retirada de carga orgânica do resíduo submetido a biodigestão anaeróbica, uma vez que, o DBO é caracterizado pela medição de oxigênio consumido pelos microrganismos, durante o processo de conversão de matéria orgânica em água e gases combustíveis, tendo isso em mente, quanto maior for a retirada de matéria orgânica, mais eficiente será o processo de biodigestão (Moraes, 2022).

A partir do cálculo da variação entre os valores de DBO obtidos inicialmente, antes do processo ocorrer, e final, após o processo de biodigestão, apresentada na equação 2 é possível quantificar a eficiência do processo (Zilotti, 2012).

$$n = (DBOi - DBOf)/ (DBOi) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

n = Eficiência (rendimento) do processo.

DBOi = Valor da análise de DBO da amostra antes da biodigestão anaeróbica.

DBOf = Valor da análise de DBO da amostra após da biodigestão anaeróbica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de pH foram realizadas em um pHmetro de bancada fornecido pela Mérieux NutriSciences, o resultado demonstrou que as amostras retiradas dos reatores após 16 semanas apresentaram pH na faixa de 6 a 7,3, variação que está dentro dos parâmetros estipulados pela resolução nº430 do Concelho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) de 2011. As amostras não apresentaram grande diferença na faixa de pH quando comparadas aos valores obtidos inicialmente, porém foi possível observar aumento do valor, fazendo com que chegassem mais próximas a alcalinidade, resultado esperado, pois quando os afluentes passam pelo processo de biodigestão, os ácidos presentes são transformados em produtos gasosos (Matos *et. al.*, 2017). A Tabela 5 apresenta a comparação entre os resultados obtidos nas análises iniciais e após 16 semanas de experimento.

Tabela 5: Comparação dos resultados analíticos

	Valores das análises iniciais		
REATORES	**pH**	**DQOi (mg/L)**	**DBOi (mg/L)**
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	5,5	395	130
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	6,2	2650	382
Reator 3 (Lodo *in* natura)	5,3	6070	626
Reator 4 (Lodo + inóculo)	5,8	9800	890
	Valores obtidos após 16 semanas		
REATORES	**pH**	**DQOf (mg/L)**	**DBOf (mg/L)**
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	6	70,1	23,41
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	6,7	414	56,12
Reator 3 (Lodo *in* natura)	7,3	84,7	7,95
Reator 4 (Lodo + inóculo)	6,9	604	52,96

Fonte: Autores.

Como é possível observar na Tabela 5, que houve uma redução drástica da carga orgânica presente nos efluentes, demonstrando eficiência dos biodigestores na biodegradabilidade das amostras, pode-se observar que os reatores 3 e 4 apresentaram resultados muito superiores na degradação da matéria orgânica e consequentemente maior aumento do pH em relação aos demais reatores, isso se dá por conta da maior ação de microrganismos presentes no lodo de esgoto, essa eficiência pode ser quantificada utilizando a Equação 1 anteriormente citada, a Tabela 6 apresenta os resultados alcançados utilizando a equação.

Tabela 6: Comparação da eficiência dos reatores

REATORES	DBOi (mg/L)	DBOf (mg/L)	Eficiência (%)
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	130	23,41	81,9
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	382	56,16	85,3
Reator 3 (Lodo *in* natura)	626	7,95	98,7
Reator 4 (Lodo + inóculo)	890	52,96	94,0

Fonte: Autores.

Todos os biodigestores apresentaram eficiência acima de 80%, e o reator que apresentou resultado mais próximo de 100% foi o reator 3, enquanto o reator 1 apresentou a menor eficiência, além disso o DBO se manteve abaixo de 120 mg/L, valor máximo estabelecido na resolução nº430/2011 CONAMA.

A quantificação do biogás produzido pelos reatores não foi realizada por meio de manômetro ou equipamento específico destinado a essa finalidade. No entanto, presume-se a geração de biogás ao término do experimento, tendo em vista a presença de gases inflamáveis e a posterior realização de sua combustão, o que indica a ocorrência do processo de biodigestão dos afluentes selecionados para o estudo. A medição da quantidade de biogás foi feita a partir da cronometragem do tempo de queima dos gases acumulados em cada biodigestor após as 16 semanas de experimento. A Tabela 7 apresenta a comparação dos tempos de queima de cada biodigestor.

Tabela 7: Comparação do tempo de queima do gás acumulado dos reatores

Reator	Tempo (segundos)
Reator 3 (Lodo *in* natura)	95
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	92
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	84
Reator 4 (Lodo + inóculo)	72

Fonte: Autores.

A partir desse teste foi constatado que todos em reatores produziram biogás e quando comparado os tempos de queima, o reator 3 apresentou maior eficácia pois permaneceu em queima durante mais tempo, dessa forma, produziu maior quantidade de gás, enquanto o reator 1 apontou menor capacidade de produção de biogás, pois foi observado tempo de queima muito inferior aos demais reatores.

Também foi observada a redução da carga orgânica presente no material, com o uso dos biodigestores, comprovando sua eficiente utilização como tratamento do esgoto, e podendo ser aplicado em maior escala. Todos os parâmetros analisados como, pH, DBO e DQO, se mantiveram dentro dos parâmetros propostos na resolução CONAMA nº430/2011.

A comparação dos resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6 evidencia uma correlação entre os parâmetros físico-químicos e a produção de biogás de cada matéria-prima analisada. Observa-se que os reatores que alcançaram valores de pH mais alcalinos foram responsáveis pelas maiores quantidades de biogás gerado. Destacam-se os reatores 3 e 4 que mantiveram-se muito próximos da faixa ideal para a máxima produção de metano (pH entre 7,0 e 7,2), apresentando, consequentemente, o maior volume de biogás produzido. Além disso, a média dos tempos de queima reforça esse resultado: o lodo apresentou um tempo médio de combustão de 89,5 segundos, superior ao tempo registrado para o esgoto, que foi de 82 segundos. Esses dados corroboram a existência de uma relação direta entre o pH do meio e a eficiência na produção de biogás.

Já em relação ao DBO, os reatores que apresentação maior alcalinidade também demonstração maior degradabilidade da matéria orgânica, ou seja, nesses reatores, a variação entre o DBO inicial e final foi maior, pode-se notar na tabela 5 que o reator 4 aparenta ter degradado mais matéria orgânica que o reator 3, pois a redução absoluta (DBOi – DBOf) do reator 4 (837,04mgL) é maior que a do reator 3 (618,05mg/L). No entanto, ao analisar os resultados da tabela 6, verifica-se que o reator 3 apresentou maior eficiência percentual na remoção da DBO, sendo aproximadamente 4% superior à do reator 4, A partir desses resultados foi possível determinar que o reator 3 apresentou maior eficiência entre os reatores avaliados mesmo não sendo o que obteve maior redução absoluta da DBO.

Outro parâmetro avaliado foi o uso de inóculo nos reatores, observando os resultados obtidos foi concluído que os inóculos não apresentaram o resultado esperado, uma vez que o lodo de esgoto in natura demonstrou maior eficiência que o lodo de esgoto tratado com inóculo suíno. Já em relação ao esgoto, a adição de inóculo promoveu uma pequena vantagem no processo em relação ao esgoto puro, porém de modo geral, a aplicação do inóculo não apresentou resultados significativos, possivelmente por conta do tempo de vida útil desse material.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos o uso de biodigestores empregados em áreas rurais para lidar com os resíduos dos animais tem crescido muito. Este estudo propôs demonstrar como os biodigestores podem ser úteis também em áreas urbanas, onde os desafios são diferentes. Nas cidades, existe a necessidade em lidar com grande quantidade de resíduos descartados diariamente e a aplicação desse tipo de ferramenta tem se mostrado muito útil quando atrelado a estações de tratamento de esgoto, podendo aumentar sua eficiência, além de gerar como subproduto o biogás que pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou transformado em biocombustível (biometano).

Com base nos resultados obtidos ao longo do experimento, constatou-se que o Reator 3, contendo lodo *in natura*, apresentou o melhor desempenho entre os sistemas avaliados. Esse reator registrou a maior variação entre os valores de pH inicial e final, atingindo o nível mais alcalino, condição que se revelou essencial para a atividade das bactérias responsáveis pela conversão da matéria orgânica em gases inflamáveis. Tal condição justifica a maior produção de biogás observada nesse reator em comparação aos demais. Por outro lado, o uso de inóculo associado ao lodo de esgoto (Reator 4) não apresentou a eficiência esperada, contrariando a hipótese de que a adição de inóculo de origem suína potencializaria o processo de biodigestão. Quanto ao esgoto bruto, os resultados foram menos expressivos, uma vez que a variação de pH foi mínima, limitando a ação microbiológica sobre a matéria orgânica. Essa limitação resultou em uma menor produção de biogás, mesmo com a adição de inóculo.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. ABNT, 1986. Disponível em: https://allevanteducacao.com.br/wpcontent/uploads/Cursos/[DEFINITIVO]%20SISTEMAS%20DE%20ESGOTO%20SANIT%C3%81RIO%20M%C3%93DULO%202/NBR_9648_Estudos_de_Concepcao_de_Sistema.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.

BARROS, Talita Delgrassi. *Biogás*. EMBRAPA, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas. Acesso em: 03 abr. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89-96, 16 maio 2011.

BIDONE, F.R. A; POVINELLI, J. *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120 p.

EMBRAPA. Biogás. Agroenergia, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas. Acesso em: 22 maio 2025.

FRIGO *et al.* Biodigestores: seus modelos e aplicações**.** *Acta Iguazu*, v. 4, n. 1, p. 57-67, 2015.

FREDDO, Alessandra *et al. Panorama do biogás no Brasil 2021*. 2. ed. Foz do Iguaçu: CIBIogás, 2022.

KUNZ, Airton *et al. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. 2. ed. Concórdia, SC: EMBRAPA, 2022.

LUCAS JUNIOR, *et al.* Avaliação do uso de inóculo no desempenho de biodigestores abastecidos com estrume de frangos de corte com cama de maravalha. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22. 1993, Ilhéus. *Anais*... Ilhéus: SBEA/CEPLAC, 1993. v. 2, p. 915-30.

MACHADO, Gleysson. O que é o biogás. *Portal resíduos sólidos*, 13 de junho de 2013. Disponível em https://portalresiduossolidos.com/biogas/. Acesso em 22 de maio de 2025.

MORAES, Alessandra. *Correlação entre os três métodos de quantificação matéria orgânica:* demanda bioquímica de oxigênio e carbono orgânico total, para análise de biofertilizantes derivado da biodigestão anaeróbia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MATOS, C. F.; PAES, J.L.; PINHEIRO, E. F. M.; CAMPOS, D. V. B., 2017a. Produção de biogás a partir de dejetos de bovinos de leite, sob sistema orgânico e convencional de produção. *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 37, n. 6, pp. xxx.

RAMALHO, A. *Produção de biogás mais que dobra em 5 anos no Brasil***.** EPBR, 2023. Disponível em: Biogás dobra em cinco anos no Brasil; veja os estados com mais usinas (epbr.com.br). Acesso em: 01 jun. 2024.

RODRIGUES, Larissa. *Panorama de aproveitamento energético do biogás dos tratamentos de esgoto sanitário de resíduos sólidos urbanos*. São Carlos, 2022.

SANTIAGO, H. S.; SANTIAGO, E. L. G. Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto. *Engineering Sciences*, v.7, n.1, p.73-80, 2019.

STEIL, Lara**.** *Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbica de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos*. Universidade Estadual Paulista Instituto de Química de Araraquara SP, 2001.

TARRENTO. G. E., MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, dentro do contexto da produção limpa. In: *SIMPEP, 13*. 2006. Bauru, SP, Brasil.

ZILOTTI, Hélio. *Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para geração de energia elétrica***.** Cascavel, Paraná, 2012.

1 OLIVEIRA, Luana Bolivio de. Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza".

2 SILVA, Mariana Colletti da. Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza".

3 MAZZONETTO, Alexandre Witier. Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas - FEAGRI/UNICAMP. Mestrado em Engenharia Agronômica - Máquinas Agrícolas/Biomassa - Colheita Integral de Cana Crua, pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Doutorando pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - Departamento de Energia - FEM/UNICAMP (Caracterização e potencial energético de biomassas residuais da região de Piracicaba - SP). Na Graduação envolveu-se em Pesquisa/Desenvolvimento de processos térmicos, desenvolvendo um secador rotativo de sementes e outro de leito fluidizado. Desde o Mestrado vem trabalhando com fontes renováveis de energia e biomassas residuais (tratamento e geração de energia); levando-o a cursar Química na Universidade Mackenzie (Bacharel, Licenciatura e Industrial). Processos térmicos para obtenção de biocombustíveis, gaseificação, pirólise e combustão/incineração, e combustíveis sustentáveis, gás de síntese (Syngas), produção e uso do biogás - biodigestão anaeróbia de diversas biomassas residuais. Professor na FATEC Piracicaba (Biocombustíveis e Gestão Empresarial).