



PEDRO PERUCH LOUREIRO

**Avaliação do potencial de produção de biogás a partir de resíduos de jardinagem da
Cidade Universitária**

São Paulo

2024

PEDRO PERUCH LOUREIRO

**Avaliação do potencial de produção de biogás a partir de resíduos de jardinagem da
Cidade Universitária**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. René Peter Schneider

Co-orientadora: Sofia Caroline Moraes
Signorelli

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Peruch Loureiro, Pedro

Avaliação do potencial de produção de biogás a partir de resíduos de jardinagem da Cidade Universitária / P. Peruch Loureiro – São Paulo, 2024.
31 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Biogás 2.Poda 3.Aclimação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

“Valeu a pena? Tudo vale a pena se a alma não é pequena. Quem quer passar além do Bojador tem que passar além da dor. Deus ao mar o perigo e o abismo deu, mas nele é que espelhou o céu.”

Fernando Pessoa

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso pretende estudar o potencial teórico e técnico de produção de biogás por digestão anaeróbica tendo como matéria prima resíduos de poda coletados no campus da Cidade Universitária. Dispõe-se, como inóculo, de amostras de lodo provenientes dos biodigestores de resíduo alimentar do Instituto de Energia e Ambiente (IEE-USP), rico em bactérias anaeróbicas. Dentre as atividades desenvolvidas no curso do Trabalho estão: a revisão bibliográfica dos métodos e processos mais relevantes para compreender a produção de biogás a partir de resíduos sólidos, as técnicas de pré-tratamento envolvidas e os tipos de biodigestão que podem ser empregados; bem como o cálculo do potencial teórico de produção de biogás para o processo; e a determinação do potencial técnico de produção de biometano a partir dos ensaios experimentais de BMP. Além disso, é relevante levar em consideração o efeito da aclimação da microbiota ao meio reacional para a produtividade de biometano.

Palavras-Chave: Biogás. Poda. Aclimação.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis intends to study the theoretical and thecnical biogas production potential through anaerobic fermentation, using pruning waste collected at the University of São Paulo *campus* as feedstock. Sludge samples rich in anaerobic bacteria collected at the Institute of Energy and Environment's (IEE-USP) food waste biodigester are used as inoculum. The development of this Final Paper encompasses literature review of major processes involved in biogas production from solid waste, the pre-treatment thecniques, different fermentation methods and their advantages; as well as the calculation of the theoretical biogas potential for the process, and determination of the thecnical biomethane potential through BMP experiments. Furthermore, the effect of microbial acclimation to the reactional environment is proven relevant to the biomethane productivity.

Keywords: Biogas. Pruning. Acclimation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
2.	OBJETIVOS	10
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.	METODOLOGIA.....	19
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
6.	CONCLUSÃO.....	28
7.	REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

A busca por novas práticas para a produção de energia, visando a mitigação das emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera, tem sido uma constante na ciência contemporânea. Nesse contexto, uma das formas alternativas de geração de energia mais limpa - a produção de biocombustíveis - vem ganhando atenção na esteira da transição energética. Por se tratar de uma prática inovadora ainda em desenvolvimento, técnicas variadas de produção são testadas e aperfeiçoadas constantemente, visando combinar eficiência econômica e responsabilidade ambiental.

Desde a Revolução Industrial, com a invenção da máquina a vapor, o uso de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, petróleo e seus derivados, tem sido a principal fonte de energia que alimenta a cadeia produtiva. Nas primeiras décadas do século XXI, este uso se intensificou globalmente, conforme aponta o artigo de Mohr et al., que projeta o crescimento substancial dessa modalidade de energia até 2025, em comparação com o século XX. Conforme estudo da International Energy Agency (IEA), a produção de Carvão Mineral para geração de energia saltou, nos últimos anos, de 4630 Mt (megatoneladas) no ano 2000, para 7575 Mt (megatoneladas) em 2020 – aumentando por volta de 64%. Ainda segundo a IEA, o consumo de gás natural global saltou de 2496 bilhões de m³ no ano 2000, para 4015 bilhões de m³ no ano 2020 – um acréscimo de 61%.

Ao passo que a população mundial aumenta, cresce com ela a demanda por energia, seja para fins de aquecimento, transporte, eletricidade ou fins industriais. Essa demanda faz crescer a preocupação com a emissão de CO₂ e outros gases estufa para a atmosfera, visto que estes são os principais produtos da queima de combustíveis fósseis. A revista Our World in Data, da Universidade de Oxford, atribui 73,2% dos cerca de 50 bilhões de toneladas de gases estufa emitidos no ano de 2016, à geração de energia; sendo os 26,8% restantes atribuídos a todos os outros setores produtivos juntos – indústria, agricultura, pecuária entre outros.

A emissão crescente de gases como CO₂, metano, N₂O e material particulado para a atmosfera, advinda principalmente do uso de combustíveis fósseis, é assinalada como a principal causa para o agravamento do efeito estufa, aliada a outros fatores, como o desmatamento florestal e as queimadas, o que contribui para a elevação da temperatura atmosférica global. O Copernicus Climate Change Service, da União Europeia, calcula que a temperatura global esteja 1.43°C acima da média pré-industrial. A revista Nature revelou que

o ano de 2023 deve encerrar sendo o ano mais quente do planeta Terra dos últimos 125 000 anos.

Nesse contexto, diversos organismos internacionais, como as Nações Unidas, preveem medidas para desacelerar a curva de aquecimento do clima global, dentro da agenda do desenvolvimento sustentável. Cúpulas climáticas como a Eco-92, no Rio de Janeiro; e o Protocolo de Kyoto, de 1997, marcaram o compromisso dos diversos países do mundo com a adoção de medidas para reduzir a emissão de carbono e subsidiar formas alternativas e menos poluentes de geração de energia. Em 2015, a ONU e seus países membros assinaram os Objetivos Para o Desenvolvimento Sustentável, ou ODS-30, um conjunto de 17 metas a serem implementadas até o ano de 2030 para garantir o bem-estar social, a proteção do meio-ambiente e o enfrentamento da crise climática.

Figura 1 - Os objetivos para o desenvolvimento sustentável estipulados pela ONU até 2030.



Fonte: Organização das Nações Unidas

Dado este panorama, a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis limpos e de origem renovável, é central para alcançar o ODS-13, “tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos”; ODS-7, “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos”; e ODS-12, “assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”

Antar et al. (2021) destaca o Brasil como referência no uso de biomassa para produção de energia, sendo a cana-de-açúcar, o milho e a soja as principais fontes, com uma produção total de 657,1 Mt/ano. Além disso, o Brasil é o maior produtor de etanol a partir de

cana-de-açúcar do mundo, tendo chegado à marca de 28 bilhões de litros, no ano de 2013. A alta produtividade de biomassa da agricultura brasileira oportuniza a produção de uma variedade de biocombustíveis, além do bioetanol, tais como o biodiesel, e o biogás; que podem amenizar a emissão de carbono e figurar como importante medida para a contribuição do país para a solução da crise climática.

Atualmente, o Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP) desenvolve um trabalho de produção de biogás a partir de resíduos sólidos de alimentos advindos principalmente dos restaurantes da USP, resíduos de jardinagem do campus Butantã e óleos vegetais. Esta planta piloto dispõe de 3 biodigestores de tanque de agitação contínua (CSTR). O gás produzido na biodigestão é direcionado a um sistema de cogeração de energia no qual pode ser utilizado tanto na produção de energia elétrica, que é injetada na rede do campus, quanto na produção de energia térmica para a planta.

Entretanto, os resíduos de jardinagem são alimentados em menor quantidade e de forma menos frequente aos biodigestores, cerca de 2%, conforme informado pelo setor operacional da planta. Estes resíduos apresentam flutuação no interior do reator, impedindo sua mistura completa com o meio, além de dificuldades de degradação havendo um acúmulo significativo de resíduos de jardinagem, não biodigeridos que posteriormente acumulam nas paredes e fundo dos tanques. Adicionalmente, os resíduos de jardinagem demandam um intenso pré-tratamento visando a redução de tamanho do material o que já ocasionou problemas envolvendo quebra de triturados em linha.

2. OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo principal:

Fazer uma estimativa do potencial teórico e do potencial técnico de produção de biometano em base seca dos resíduos sólidos de jardinagem coletados na Cidade Universitária.

2.1.1 Objetivos secundários:

Caracterizar os resíduos sólidos de jardinagem da Cidade Universitária em termos de teor de sólidos fixos e voláteis.

Realizar revisão sistemática da literatura visando o maior entendimento do processo de produção de biogás, suas tecnologias, avanços e desafios.

Realizar revisão sistemática da literatura acerca da produção de biogás via seca com aspersão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As variadas atividades humanas desenvolvidas nos núcleos urbanos do Brasil, principalmente nas grandes cidades, foram responsáveis, no ano de 2022, por uma produção de resíduos sólidos de 224 mil t/dia, o que corresponde a, na média, 1,043Kg por habitante, segundo o recente Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2022). O Panorama dá conta de que a implantação de práticas de reutilização, tratamento e recuperação energética, desses resíduos tem impacto significativo na mitigação da emissão de gases do efeito estufa (GEE), principalmente de metano. Segundo o estudo, com a implantação do plano de diretrizes e metas instituído por lei, o Planares (Plano Nacional de Resíduos Sólidos), que prevê diretrizes para a destinação sustentável de resíduos até o ano de 2040, é possível atingir uma redução de 30.153.129,19 t CO₂eq por ano, o que corresponde a 34,8% do que é emitido no cenário atual.

Um estudo da Humboldt University of Berlin avaliou o potencial de uso de folhas de árvores que caíam durante o outono na cidade de Berlim como matéria-prima para digestão anaeróbica. Os pesquisadores compararam a eficiência de redução da emissão de gases de efeito estufa em 3 cenários diferentes: compostagem do substrato, produção de biogás sem pré-tratamento do substrato, e produção de biogás com pré-tratamento químico do substrato. Os resultados demonstraram uma possível redução de 140 Kg equivalentes de CO₂ por tonelada de folhas, caso a planta de biogás seja implantada no lugar da de compostagem, podendo chegar até a 167 Kg equivalentes de CO₂ por toneladas de substrato caso este seja pré-tratado; o que mostra como essa prática pode ser significativa para o objetivo descrito anteriormente de mitigação dos males do efeito estufa e consolidação de novas formas de geração de energia.

A produção de biogás via digestão anaeróbica é uma possível via de recuperação energética para uma variedade de resíduos sólidos orgânicos, podendo ser aproveitado como

combustível para geração de calor, ou para cogeração de eletricidade ou então purificado e comercializado como Gás Natural Renovável, segundo o Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (2020). Além disso, o digestato, subproduto líquido resultante do processo de biodigestão, é rico em componentes nitrogenados importantes na composição de nutrientes para o solo, podendo ser utilizado como fertilizante (Iocoli et. al, 2022).

Uma gama de substratos possui estudos para sua utilização em plantas de digestão anaeróbica: esgoto, dejetos bovinos e suínos, vinhaça de cana-de-açúcar, restos de alimentos, efluentes de abatedouros e frigoríficos, resíduos orgânicos industriais e a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (D'aquino, 2018). Diferentes tecnologias são empregadas, a depender do tipo de substrato adotado, para potencializar a eficiência do processo, o que pode incluir etapas de pré-tratamento que facilitem o acesso dos microrganismos digestores à matéria orgânica.

Quando se fala em biodigestores de via úmida, como por exemplo os CSTR, a aplicação de etapas de pré-tratamento aos substratos é importante para evitar o depósito de matéria orgânica sólida nos fundos do reator ou o sobrenado de material sólido na superfície do líquido. Para substratos vegetais com alto conteúdo de lignina e hemicelulose na composição, com o caso dos resíduos de poda e jardinagem, estudos demonstraram que a aplicação de pré-tratamento à biomassa lignocelulósica é vital para uma maior velocidade e rendimento de biogás para a biodigestão, aumentando a superfície de contato entre a celulose e o meio com os microrganismos decompositores. Em alguns casos, faz-se necessário, por exemplo, moagem e/ou adição de água a substratos sólidos. No quadro 1, estão descritos alguns dos procedimentos que podem ser empregados a fim de facilitar o acesso dos microrganismos aos nutrientes no caso de matérias primas lignocelulósicas:

Quadro 1: Técnicas de pré-tratamentos aplicáveis à substratos lignocelulósicos, suas respectivas vantagens e desvantagens

Tipo	Tratamento	Vantagens	Desvantagens
Físico	Moagem	Redução da cristalinidade e tamanho de partícula da celulose, manuseio facilitado do substrato	Alta demanda de eletricidade
	Irradiação	Rompimento das ligações de hidrogênio da celulose, aumento da superfície de	Alta demanda de eletricidade, difícil implantação em larga

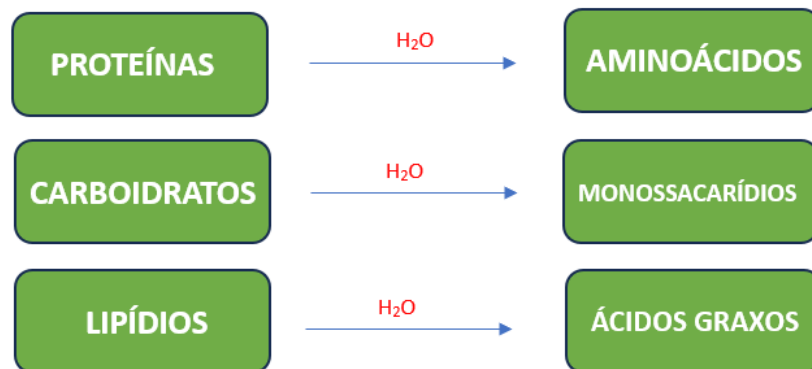
		contato, aumento da transferência de calor	escala
Químico	Ácido	Hidrólise da hemicelulose, simplificação da estrutura da celulose	Alto custo do reagente ácido, formação de inibidores biológicos
	Alcalino	Hidrólise da lignina, simplificação da estrutura da celulose	Custo do reagente alcalino, formação de inibidores biológicos
Físico-Químico	Extrusão	Rompimento da estrutura da celulose, aumento da superfície de contato	Alto consumo energético
	Hidrotérmico	Hidrólise da hemicelulose e da lignina, rompimento da estrutura da celulose	Gasto de água e energia
	Explosão de vapor	Hidrólise da hemicelulose e da lignina, redução da cristalinidade da celulose	Alto consumo energético, formação de compostos recalcitrantes
Biológico	Microbiano	Hidrólise da hemicelulose e da lignina, alteração da estrutura da celulose, não-formação de inibidores biológicos, baixo consumo energético	Processo lento, perda de carbono, necessidade de área estéril extensa
	Enzimático	Alteração da estrutura da celulose, remoção da lignina, hidrólise parcial da hemicelulose, processo rápido, baixo gasto energético	Custo das enzimas, necessidade de adição contínua

2.1 Digestão Anaeróbica

O processo de digestão empregado na produção de biogás é a fermentação realizada por bactérias anaeróbicas, que se desenvolvem em meios nos quais há pouca oferta de oxigênio, e consiste em uma complexa sequência de etapas. Consideram-se as etapas principais para obtenção dos produtos finais dos quais o biogás consiste: hidrólise, fermentação (primária e secundária) e metanogênese. (Mobilian e Craft – 2021)

Hidrólise: Transformação dos macronutrientes (proteínas, açúcares e lipídios) em micronutrientes (aminoácidos, oligossacarídeos e ácidos graxos)

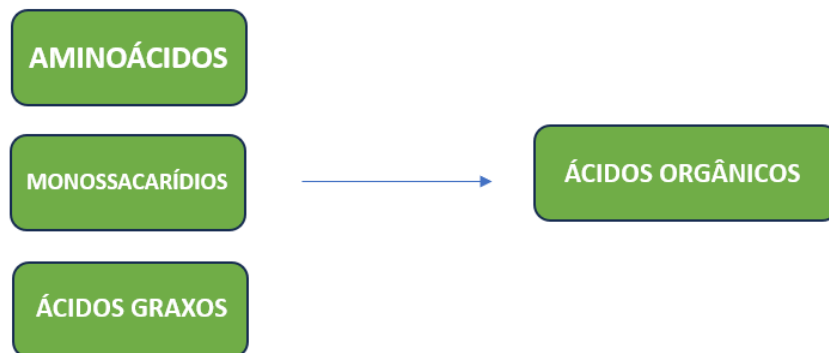
Figura 2: Representação esquemática das etapas de hidrólise dos macronutrientes presente no substrato.



Fonte: o próprio autor

Fermentação Primária ou Acidogênese: Produção de ácidos carboxílicos de cadeia mais curta (ácidos acético, propanoico, butanoico, pentanoico)

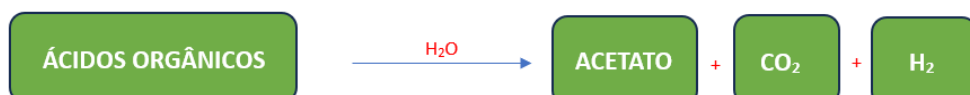
Figura 3: Representação esquemática da etapa de acidogênese da fermentação anaeróbica.



Fonte: o próprio autor

Fermentação Secundária ou Acetogênese: Conversão dos ácidos carboxílicos maiores em ácido acético, tendo como produtos o CO₂ e o H₂

Figura 4: Representação esquemática das etapas de acetogênese da fermentação anaeróbica.

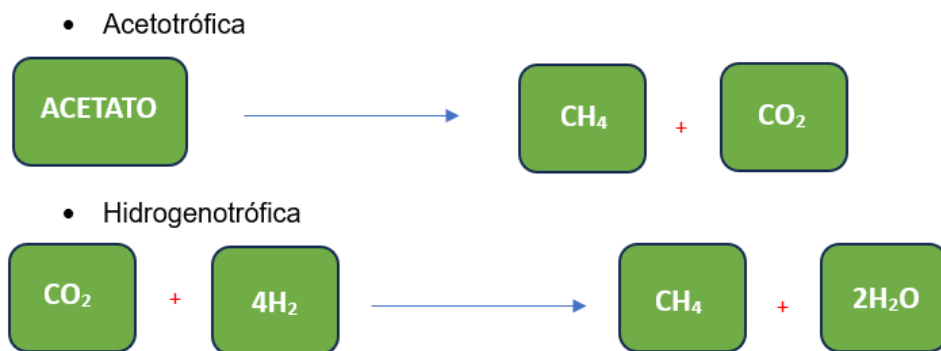




Fonte: o próprio autor

Metanogênese: Geração de CH_4 e CO_2 , principais componentes do biogás, podendo ser metanogênese acetoclástica, hidrogenotrófica ou metilotrófica, a depender do componente precursor.

Figura 5: Representação esquemática da metanogênese acetotrófica e hidrogenotrófica da digestão anaeróbica.



Fonte: o próprio autor

2.2 Fatores que afetam a eficiência da metanogênese:

Uma série de fatores podem ser determinantes para a eficiência do processo de produção de biogás, dentre os quais: composição do substrato, dentre os quais a disponibilidade de nutrientes no substrato e no meio reacional, a temperatura, o pH, a presença de inibidores e a aclimação do sistema. (Zamboni, 2021)

2.2.1 Composição do substrato

A disponibilidade de açúcares, proteínas e lipídios no substrato é fundamental para um bom rendimento de biometano, visto que são os precursores utilizados pelos microrganismos na fermentação e consecutiva metanogênese.

2.2.2 Temperatura

A etapa de metanogênese é mais sensível à temperatura. Existem 2 temperaturas ótimas descritas por Gerardi (2003) para as arqueias metanogênicas. Para as mesofílicas, de cerca de 35°C, e as termofílicas, por volta dos 55°C. A Tabela 1 contém uma relação dos principais organismos metanogênicos, com as respectivas faixas de temperatura ótima.

Tipo de arquea	Gênero da arquea	Faixa de temperatura ótima (°C)
Mesofílica	<i>Methanobacterium</i>	37-45
	<i>Methanobrevibacter</i>	37-40
	<i>Methanosphaera</i>	35-40
	<i>Methanococcus</i>	35-40
	<i>Methanocorpusculum</i>	30-40
	<i>Methanoculleus</i>	35-40
	<i>Methanogenium</i>	20-40
	<i>Methanoplanus</i>	30-40
	<i>Methanospirillum</i>	35-40
	<i>Methanohalophilus</i>	35-45
	<i>Methanolobus</i>	35-40
	<i>Methanosarcina</i>	35-40
	<i>Methanococcoides</i>	30-35
	<i>Methanococcus</i>	65-91
Termofílica	<i>Methanohalobium</i>	50-55
	<i>Methanothermus</i>	83-88
	<i>Methanosarcina</i>	50-55

Tabela 1: principais gêneros de arqueas metanogênicas, e temperaturas ótimas de suas atividades. Fonte: Gerardi (2003)

2.2.3 pH

O pH ótimo para as etapas de metanogênese se dá na faixa de 7 a 7,2, conforme descrito por Gerardi. Na Tabela 2, seguem as faixas de pH ótimo das principais arqueas metanogênicas.

Gênero da arquea	Faixa de pH ótimo
<i>Methanosphaera</i>	6,8
<i>Methanogenium</i>	7,0
<i>Methanospirillum</i>	7,0 – 7,5
<i>Methanococcoides</i>	7,0 - 7,5
<i>Methanomicrobium</i>	6,1 – 6,9
<i>Methanothermus</i>	6,5
<i>Methanohalobium</i>	6,5 – 7,5
<i>Methanlobus</i>	6,5 – 6,8
<i>Methanolacinia</i>	6,6 – 7,2

Tabela 2: faixas de pH ótimo de atividade para alguns dos principais gêneros de arqueas metanogênicas. Fonte: Gerardi (2003)

2.2.4 Presença de nutrientes

A concentração correta de micro e macronutrientes no meio reacional é essencial para um bom rendimento de metano na composição do biogás. Zamboni (2021) cita que muitos cátions são cofatores de enzimas que participam da metanogênese, como por exemplo, níquel, ferro e cobalto.

2.2.5 Presença de Inibidores

Para o sucesso do processo de biodigestão anaeróbia é essencial que não haja oxigênio no meio. Isso porque os microrganismos que participam do processo somente se

desenvolvem na ausência de O₂. Portanto, o digestor precisa ser corretamente isolado do meio externo, para que não haja nem escape do biogás, nem entrada de oxigênio. (Gerardi – 2003)

Também a presença de hidrogênio, amônia, formaldeído, cianeto, HS, compostos aromáticos, ácidos voláteis, ácidos graxos de cadeia longa, metais pesados, álcoois, nitratos, sulfatos, detergentes, desinfetantes e antibióticos são citados por Gerardi como substâncias inibidoras do processo de biodigestão.

2.3 Aclimação do Sistema

Steinmetz et. al. (2016) definiu o procedimento de aclimação do inóculo como crucial para a precisão da estimativa de potencial de produção de biometano (BMP). Isto se dá porque a produtividade das arqueias metanogênicas é extremamente sensível a mudanças de ambiente e substrato e é dependente da sua adaptação ao meio reacional.

O método desenvolvido por Steinmetz et. al. para preparo do inóculo para um teste de BMP consiste em aclimatar misturas de 3 inóculos de origem diferente em condições mesofílicas (temperatura de 37°C) em ciclos de 30 a 45 dias, sendo 23 a 38 dias de alimentação da colônia, e 7 dias de interrupção da alimentação. Ao final de 70 dias deste procedimento, foi obtido um rendimento de biogás de mais de 80% em comparação ao rendimento padrão da celulose microcristalina (600mL/gsv). A análise populacional da colônia revelou uma predominância de arqueias metanogênicas, após o procedimento, com prevalência do gênero *Methanosarcinales*.

Além disso, após a execução do procedimento, os ensaios de BMP passaram a apontar resultados mais consistentes entre si, o que indica um comportamento mais preciso do inóculo aclimatado, mesmo ele tendo sido composto por lodos de origens diferentes. A utilização, portanto, de inóculos aclimatados para os ensaios, é essencial para que o resultado do potencial técnico de produção de biogás seja consistente.

2.4 Modelos de Biodigestor de escala industrial

O Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (2020) descreve alguns modelos de biodigestores que são comumente implementados para plantas de produção de biogás em larga escala. A escolha do modelo tecnológico mais adequado para a planta depende de especificidades ambientais, econômicas e de matéria prima do local onde o processo será implementado. Neste tópico, discorre-se brevemente alguns dos modelos mais usuais mencionados pelo Atlas.

2.4.1 CSTR

O CSTR, do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*, trata-se de um tanque sob agitação contínua de pás mecânicas que homogeneízam o lodo, a fim de garantir a produtividade pela distribuição constante de matéria orgânica pelo volume do tanque. A cobertura de lona funciona como gasômetro, é onde o biogás é coletado. O CSTR é mais indicado para substratos com baixo teor de sólidos totais, como resíduo de estações de tratamento de esgoto, resíduo alimentar ou de resíduos de produção animal ou vegetal.

2.4.2 UASB

O UASB, ou Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente, (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é muito utilizado para tratamento de efluentes. Ele possui um sistema de alimentação de baixo para cima, com baixo tempo de retenção, no qual o substrato atravessa um leito de biomassa ativa; e um sistema de separação na parte superior que recolhe o biogás e separa o líquido tratado e o lodo resultante.

2.4.3 Lagoa Coberta

Lagoas cobertas são sistemas impermeáveis de armazenamento e produção de biogás implantados no subsolo. São mais simples e não apresentam controle de temperatura e agitação, sendo mais empregadas em regiões rurais e em zonas tropicais onde o solo se encontra a uma temperatura ideal para metanogênese. A falta de agitação pode provocar acúmulo de lodo no fundo da lagoa, o que pode prejudicar a produtividade.

4. METODOLOGIA

O VDI-4630 estabelece diretrizes e parâmetros universais para reprodução de testes laboratoriais de potencial de produção de biometano, tanto no que compete à caracterização dos substratos, ao preparo das amostras e à condução do ensaio de fermentação anaeróbia propriamente dito. A norma também orienta que o ensaio seja realizado com um substrato de referência, cujo potencial de produção de biometano seja previamente conhecido, para servir como amostra de controle. No caso do ensaio deste trabalho, foi utilizada a celulose

microcristalina como amostra padrão. Todos os procedimentos descritos nessa seção foram montados em triplicata e seguindo os parâmetros estabelecidos na norma.

A exemplo de ensaios anteriores com outros tipos de substratos realizados na USP, como por exemplo, com bagaço de cana-de-açúcar; a determinação do potencial de produção de biogás do substrato é avaliada a partir de testes laboratoriais utilizando lodo proveniente dos biodigestores CSTR de resíduo alimentar do IEE como inóculo. No tópico 2.3, destaca-se a importância de se levar em consideração a aclimação do sistema microbiano a uma mudança de ambiente e substrato; e como isso deve impactar a consistência dos resultados.

As amostras de resíduo de jardinagem foram coletadas frescas de forma aleatória na área verde do *campus* da CUASO.

Figura 6: Coleta de amostras de jardinagem do campus e de lodo do biodigestor de resíduo alimentar do IEE



3.1 Análise de Sólidos

Para fins de caracterização das amostras empregadas, foram realizadas, em triplicata, a análise do teor de umidade (água, principalmente), e de sólidos totais, sendo estes: sólidos voláteis (orgânicos, principalmente) e sólidos fixos (inorgânicos, principalmente); presentes nos materiais. A condução do ensaio foi feita seguindo procedimento descrito em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th ed. Washington, 2005 (Method 2540 – B e 2540 – C)”.

3.1.1 Preparo das Amostras

Foram separadas e pesadas 9 amostras em 9 cadinhos de porcelana, sendo 3 amostras de poda, 3 amostras de lodo e 3 amostras de celulose. Na Tabela 3 seguem os pesos dos cadinhos vazios e com amostras:

Cadinho	Massa (g)	Amostra	Massa total (g)	Massa de amostra (g)
1	52,6173	Digestato	54,7310	2,1137
2	53,2454	Digestato	55,3100	2,0646
3	51,6103	Digestato	53,7923	2,182
4	50,3821	Celulose	52,3858	2,0037
5	49,3279	Celulose	51,3373	2,0094
6	48,2041	Celulose	50,2098	2,0057
7	37,6346	Poda	39,6789	2,0443
8	37,1358	Poda	39,1509	2,0151
9	49,3029	Poda	51,3851	2,0822

Tabela 3: massa dos cadinhos e das amostras preparadas para análise de sólidos

3.1.3 Procedimento Experimental

As amostras foram submetidas a secagem por 24h em estufa a 60°C; seguida de uma nova pesagem para determinar a massa de sólidos totais.

A porcentagem de sólidos totais e de úmidos nas amostras após a secagem corresponde às equações (1) e (2):

$$ST = 100 \cdot \frac{m_f}{m_i} \quad (1)$$

$$U = 100 \cdot \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (2)$$

Sendo ST a porcentagem de sólidos totais, U a porcentagem de úmidos, m_f a massa de amostra após a secagem e m_i a massa de amostra antes da secagem.

Para a determinação de massa de sólidos fixos, as amostras foram submetidas a calcinação por 24h em mufla a 550°C; e após esta, foi realizada uma pesagem final para determinar a massa de sólidos fixos.

A porcentagem de sólidos voláteis e de sólidos fixos nas amostras após a calcinação corresponde às equações (3) e (4):

$$SF = 100 \cdot \frac{m_f}{m_i} \quad (3)$$

$$SV = 100 \cdot \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (4)$$

Sendo SV a porcentagem de sólidos voláteis, SF a porcentagem de sólidos fixos, m_f a massa de amostra após a calcinação e m_i a massa de amostra antes da calcinação.

3.2 Potencial de Produção de Biometano

3.2.1 Preparo das Amostras

Foram preparados 3 recipientes de 1L de capacidade para cada uma das amostras em estudo, conforme disposto na Tabela 4, de forma a garantir aproximadamente 10g de sólidos voláteis de inóculo em todos eles, 5g de sólidos voláteis de celulose nos reatores C1, C2 e C3; e 5g de sólidos voláteis de poda nos reatores P1, P2, e P3; conforme resultado obtido no experimento de análise de sólidos. Também foram preparados 3 recipientes (I1, I2 e I3) de 1L contendo somente inóculo, para avaliar sua produção de biogás, sem substrato. Os recipientes foram preenchidos com água até 800mL.

Reator	Amostra	V H ₂ O (mL)	m inóculo (g)	m celulose (g)	m poda (g)
I1	Inóculo + H ₂ O	230	570	0	0
I2	Inóculo + H ₂ O	226	574	0	0
I3	Inóculo + H ₂ O	224	576	0	0
C1	Inóculo + Celulose + H ₂ O	228	572	4,277	0
C2	Inóculo + Celulose + H ₂ O	232	568	4,276	0
C3	Inóculo + Celulose + H ₂ O	230	570	4,275	0
P1	Inóculo + Poda	228	572	0	22,187
P2	Inóculo + Poda	230	570	0	22,203

P3	Inóculo + Poda	230	570	0	22,187
-----------	----------------	-----	-----	---	--------

Tabela 4: Reatores montados em triplicata com seus respectivos conteúdos amostrais

3.2.2 Descrição do Equipamento

O equipamento empregado para o ensaio de Potencial de Produção de Biometano é o sistema de fermentação em batelada, fabricado pela Ritter (Figura 7). O sistema consiste em um conjunto de unidades de reação agitadas de 1L, com saída de gás, e acoplado a elas um conjunto de medidores de vazão de gás MilliGasCounter, da Ritter.

Figura 7: Sistema de Fermentação em Batelada, contendo o reator, carregado com as unidades de reação; e acima, os gasômetros.



O medidor de gás funciona a partir do deslocamento mecânico de uma célula preenchida com líquido, que vai sendo expulso à medida que o gás é liberado sob ela. A partir do momento em que a célula é preenchida com uma determinada quantidade de gás, ela o libera e retorna à posição original, ativando um sensor que registra aquela passagem de gás em um software de aquisição de dados. Dessa forma, o software consegue registrar a cada intervalo de tempo uma vazão volumétrica pontual e a vazão acumulada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculo do teor de sólidos

Na tabela 5 constam os dados das pesagens dos 9 cadinhos após a secagem.

Cadinho	Massa (g)	Amostra	Massa seca total (g)	Massa de amostra seca (g)
1	52,6173	Digestato	52,6732	0,0559
2	53,2454	Digestato	53,2988	0,0534
3	51,6103	Digestato	51,6690	0,0587
4	50,3821	Celulose	52,2652	1,8831
5	49,3279	Celulose	51,2069	1,879
6	48,2041	Celulose	50,0742	1,8701
7	37,6346	Poda	38,1060	0,4714
8	37,1358	Poda	37,5679	0,4321
9	49,3029	Poda	49,6994	0,3965

Tabela 5: Resultados da pesagem das amostras após a secagem

Aplicando as equações (1) e (2) às massas iniciais e às obtidas após secagem, consolidam-se os valores de percentual de sólidos totais e de úmidos nas amostras:

Cadinho	Amostra	Sólidos totais (%)	Umidade (%)	Média de sólidos totais (%)	Desvio Padrão
1	Digestato	2,6447	97,3553	2,6404	0,05
2	Digestato	2,5865	97,4135		
3	Digestato	2,6902	97,3098		
4	Celulose	93,9811	6,0189	93,577	0,38
5	Celulose	93,5105	6,4895		
6	Celulose	93,2393	6,7607		
7	Poda	23,0592	76,9408	21,1816	2,02
8	Poda	21,4431	78,5569		
9	Poda	19,0424	80,9576		

Tabela 6: Cálculo de percentual de sólidos totais para digestato, celulose e poda

Na tabela 7 constam os dados das pesagens dos 9 cadinhos após a calcinação.

Cadinho	Massa (g)	Amostra	Massa de amostra seca a 60°C (g)	Massa de amostra calcinação a 550°C (g)
1	52,6173	Digestato	0,0559	0,0196
2	53,2454	Digestato	0,0534	0,0161
3	51,6103	Digestato	0,0587	0,0208
4	50,3821	Celulose	1,8831	-0,0014
5	49,3279	Celulose	1,879	-0,0004
6	48,2041	Celulose	1,8701	0,0013
7	37,6346	Poda	0,4714	0,0571
8	37,1358	Poda	0,4321	0,0654
9	49,3029	Poda	0,3965	0,0695

Tabela 7: Resultados da pesagem das amostras após a calcinação

Aplicando as equações (3) e (4) às massas iniciais e às obtidas após secagem, consolidam-se os valores de percentual de sólidos voláteis e de sólidos fixos em relação ao total de sólidos nas amostras:

Cadinho	Amostra	Sólidos voláteis (%ST)	Sólidos fixos (%ST)	Média aritmética de sólidos voláteis (%ST)	Desvio Padrão
1	Digestato	64,94	35,06	66,45	2,95
2	Digestato	69,85	30,15		
3	Digestato	64,57	35,43		
4	Celulose	100,07	-0,07	100,01	0,07
5	Celulose	100,02	-0,02		
6	Celulose	99,93	0,07		
7	Poda	87,89	12,11	85,07	2,71
8	Poda	84,86	15,14		
9	Poda	82,47	17,53		

Tabela 8: Cálculo de percentual de sólidos voláteis e fixos para digestato, celulose e poda

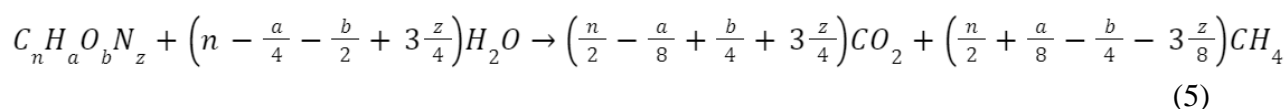
4.2 Determinação do potencial teórico de produção de metano

O potencial teórico de produção de biometano é calculado tendo como base a composição elementar do substrato. Lapuerta, Hernández e Rodríguez (2004) indicam como valores típicos de composição elementar para amostras de poda como as coletadas na Cidade Universitária as quantidades dispostas na Tabela 8:

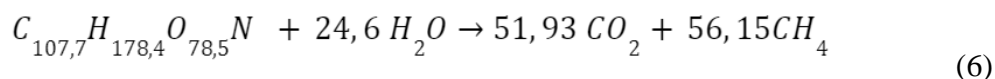
Elemento	% nas amostras de poda
C	47,08
H	6,5
O	45,73
N	0,51
S	0,22

Tabela 9: Dados literários para composição de resíduos de poda típicos da Cidade Universitária

A seguir, substituem-se os dados de composição elementar na Fórmula de O'Rourke (1968) (5), para calcular o potencial teórico:



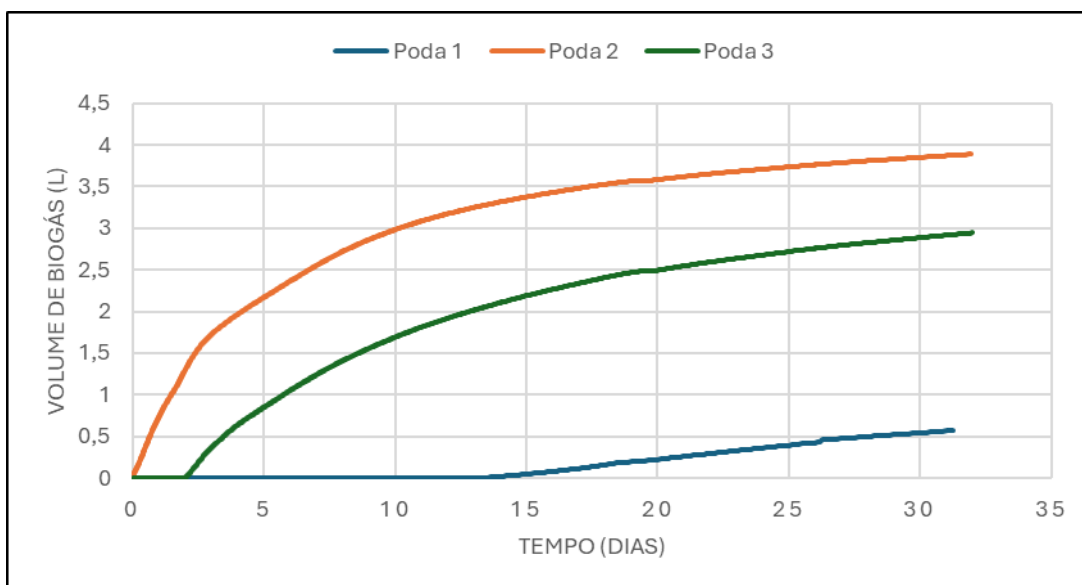
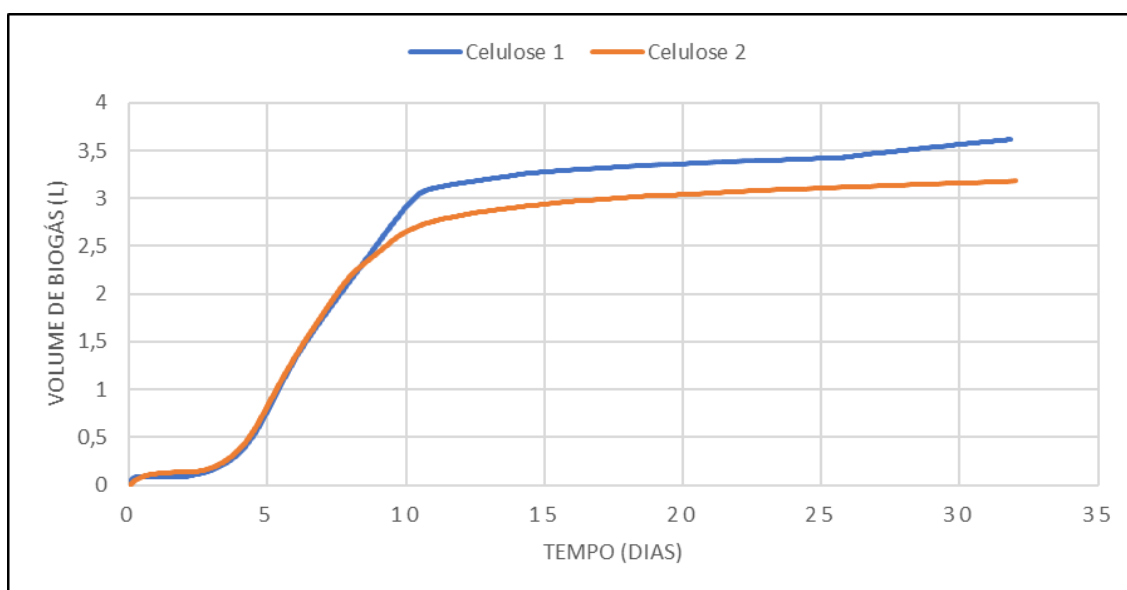
n, a, b e z são índices molares normalizados para o nitrogênio, ou seja $z = 1$ e n, a e b correspondem à razão entre a fração molar do elemento e a fração molar de nitrogênio na amostra.



Ou seja, o gás resultante da degradação dos resíduos de poda coletados na Cidade Universitária apresenta potencial para uma composição teórica de 52% de metano.

4.3 Determinação do potencial técnico de produção de metano

As medidas das vazões volumétricas de gás na saída de cada unidade de reação, e o volume acumulado de gás produzido na biodigestão foram tomadas ao longo de 32 dias no Sistema de Fermentação em Batelada. A amostra C3 de celulose apresentou um problema de vazamento, por isso, seus resultados foram descartados para fins de tratamento dos dados. Seguem nas Figuras 8 e 9, os gráficos de dias de fermentação *versus* volume de gás acumulado, em litros, para as amostras de poda e de celulose.

Figura 8: Volume de biogás produzido pelas 3 amostras de Poda**Figura 9:** Volume de biogás produzido pelas amostras C1 e C2 de Celulose

A norma VDI-4630 orienta que, caso haja um desvio superior a 15% de uma amostra em relação às demais, que seus dados devem ser desconsiderados para fins de cálculo de produção de metano. Por apresentar um desvio de 83% em relação às outras amostras, a amostra de Poda 1 foi desconsiderada para as futuras análises. Após a análise do gás produzido da biodigestão ao longo de 32 dias, obteve-se a composição percentual dos componentes do biogás, sendo os principais deles o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). Os resultados da análise seguem na Tabela 10:

Reator	Amostra	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	Outros (%)
C1	Inóculo + Celulose	38,4	36,9	3,6	3	21
C2	Inóculo + Celulose	45,9	37,1	3,3	2	13,6
C3	Inóculo + Celulose	-	-	-	-	-
P1	Inóculo + Poda	-	-	-	-	-
P2	Inóculo + Poda	35,3	24,9	7,8	0	31,9
P3	Inóculo + Poda	51,9	33,5	2	0	12,6

Tabela 10: Composição do biogás na saída do gasômetro após 32 dias de ensaio

Para o cálculo do potencial de produção de metano, leva-se em conta a razão entre o volume acumulado de metano produzido na batelada (mL) e a massa sólida orgânica de substrato alimentada por litro de reator, determinada na análise de sólidos voláteis.

Amostra	m(g)	%ST*SV	V _{reator} (L)	V _{gás} (mL)	msv (g)	Potencial técnico (mL/ gsv)	Potencial médio (mL/ gsv)
C1	4,277	93,58	0,8	3616,8	5,003	722,92	679,54
C2	4,276	93,58	0,8	3182,0	5,002	636,16	
P2	22,203	18	0,8	3888,3	4,996	778,20	683,81
P3	22,187	18	0,8	2942,9	4,993	589,42	

Tabela 11: Potencial de produção de biogás das amostras

6. CONCLUSÃO

O ensaio com a celulose microcristalina cumpre o papel de amostra de controle, devido ao seu potencial de produção de metano ser conhecido, o que permite verificar a qualidade da atividade biológica do inóculo empregado no experimento. A VDI-4630 assume que a celulose produz em média 745mL/gsv de biogás contendo 50% de metano, ou seja, um potencial de produção de metano de 372,5mL/gsv, e sugere que, caso o ensaio não apresente um desvio superior a 10% em relação a esse valor, o inóculo possui um potencial adequado de desempenho. No caso do presente ensaio, a celulose apresentou uma produção média de

679,54mL/g_{sv} de biogás contendo, em média, 42,15% de metano; o que resulta em um potencial de produção de metano de 286,42mLCH₄/g_{sv}; o que equivale a um desempenho de 76,9% o padrão da celulose da VDI-4630.

Conforme discorrido no capítulo 2.3, caso houvesse sido realizado o procedimento de aclimação do inóculo ao sistema, visto que no ensaio de Steinmetz (2016), este potencial superou a faixa de 80% do padrão da VDI-4630 após o período de aclimação.

7. REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, A. et al. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122725, abr. 2020.
- ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 927–934, mar. 2009.
- ANTAR, M. et al. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, p. 110691, abr. 2021.
- ATELGE, M. R. et al. Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 3, p. 1019–1040, 19 dez. 2018.
- COELHO, S. T. et al. **Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo**. [s.l: s.n.].
- D'AQUINO, C. A. Geração de Energia por Biogás a Partir de Resíduos Orgânicos: Estudo de Caso da Cidade Universitária da USP. 2018.
- GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. Hoboken, N.J: John Wiley, 2003.
- GILCREAS, F. W. Standard methods for the examination of water and waste water. **American Journal of Public Health and the Nations Health**, v. 56, n. 3, p. 387–388, mar. 1966.
- GOSWAMI, R. et al. An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: a step towards sustainable waste management. **3 Biotech**, v. 6, n. 1, 1 jun. 2016.

IOCOLI, G. A. et al. Use of biogas digestates obtained by anaerobic digestion and co-digestion as fertilizers: Characterization, soil biological activity and growth dynamic of *Lactuca sativa* L. **Science of The Total Environment**, v. 647, p. 11–19, 10 jan. 2019.

LI, L. et al. A critical review of experimental and CFD techniques to characterize the mixing performance of anaerobic digesters for biogas production. **Reviews In Environmental Science And Bio/technology**, v. 21, n. 3, p. 665–689, 8 jul. 2022.

MOBILIAN, C.; CRAFT, C. B. **Wetland Soils: Physical and Chemical Properties and Biogeochemical Processes**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128191668000499>>.

MOHR, S. H. et al. Projection of world fossil fuels by country. **Fuel**, v. 141, p. 120–135, fev. 2015.

RASAPOOR, M. et al. Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation. **Fuel**, v. 261, p. 116497, fev. 2020.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? **Our World in Data**, 13 nov. 2023.

STEINMETZ, R. et al. Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 21–28, 1 nov. 2016.

VARGAS-SOPLÍN, A. DE J. et al. The potential for biogas production from autumn tree leaves to supply energy and reduce greenhouse gas emissions – A case study from the city of Berlin. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 187, p. 106598, 1 dez. 2022.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**.

WONG, C. Earth just had its hottest year on record — climate change is to blame. **Nature**, 10 nov. 2023.

World natural gas production by region, 1973-2018 – Charts – Data & Statistics.

Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-natural-gas-production-by-region-1973-2019>>.

World total coal production, 1971-2018 – Charts – Data & Statistics. Disponível em:
<<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-coal-production-1971-2020>>.

ZAMBONI, I. G. **Digestão anaeróbia de bagaço de cana-de-açúcar em batelada para produção de biogás.** [s.l: s.n.]. Disponível em:
<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-07102021-154857/publico/IsabellaGrandoZamboniCorr21.pdf>>.