

CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE BIOGÁS OBTIDO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS PROVENIENTES DO CAMPUS DE HIGIENÓPOLIS DA UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Gabrielle Chrystine Costa Mota e Míriam Tvrzská de Gouvêa

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

O Brasil desperdiça cerca de 265 milhões de toneladas de resíduos de biomassa por ano, que poderiam gerar de 7,7% a 20% da demanda energética brasileira. Diante desse cenário, avalia-se, nesse trabalho, o potencial de geração de energia de resíduos orgânicos provenientes do campus de Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Coletaram-se resíduos provenientes da varrição de jardins e do processamento de alimentos. A partir de ensaios de análise imediata, estimou-se o potencial de geração de energia de metano obtido pela digestão anaeróbia desses resíduos. A identificação de compostos lignocelulósicos nos materiais analisados foi realizada por meio de ensaios de difração de Raios-X. Estimou-se que mensalmente sejam produzidos minimamente 8,4 ton de resíduos orgânicos no referido campus universitário, os quais poderiam ser valorizados por meio da digestão anaeróbia para a geração mensal de 7405 kWh de eletricidade, reduzindo-se, concomitantemente, a emissão de gases de efeito estufa em 936 ton-CO₂-eq. Realizando um investimento de R\$ 200.000,00 para a implementação de uma unidade de geração de energia de biogás obtido da digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos, obter-se-ia um ROI positivo em 12 anos para uma taxa de juros de 7%, passível de ser obtida para empreendimentos envolvendo a geração de bioenergia. O empreendimento se torna viável a partir do quinto ano, apresentando um ROI de 177% após 20 anos.

Palavras-chave: Biomassa. Caracterização. Energia.

ABSTRACT

Brazil wastes around 265 million tons of biomass residues per year, which could generate 7,7% to 20% of Brazilian energy demand. Given this scenario, this work presents an estimate of the potential for generating energy from organic waste from the Higienópolis campus of Universidade Presbiteriana Mackenzie. Waste from garden sweeping and food processing was collected. From immediate analysis tests, the potential for generating energy from methane obtained by anaerobic digestion was estimated. The identification of lignocellulosic compounds in the residues was carried out using X-ray diffraction tests. It was estimated that at least 8,4 tons of the selected organic waste are produced monthly, which could be recovered through anaerobic digestion, producing 7405 kWh of electricity monthly and reducing greenhouse gas emissions by 936 tons-CO₂-eq. Considering an interest rate

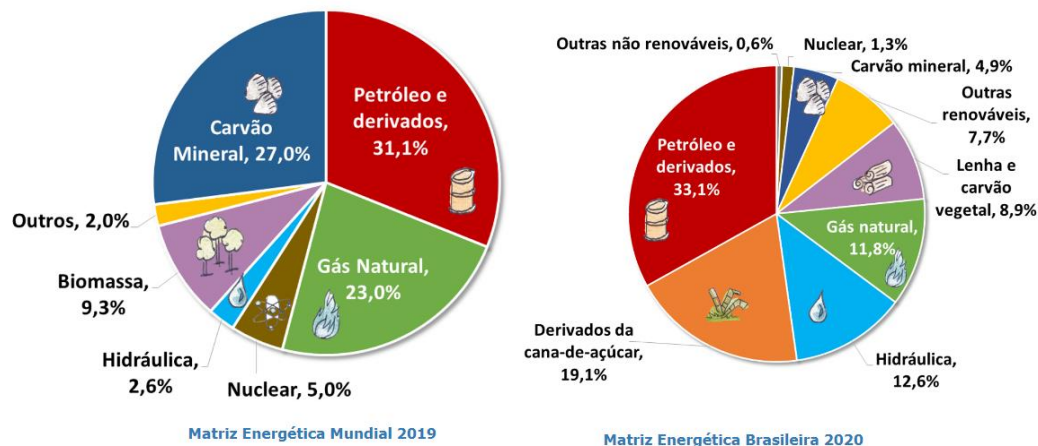
of 7% per year, a positive ROI would be obtained in 12 for an investment of R\$ 200.000,00 in the implementation of a biogas energy generation unit, considering that biogas would be produced from the anaerobic digestion of organic waste. The venture becomes viable from the fifth year onwards, presenting an ROI of 177% after 20 years. The interest rate of 7% a year is available for projects involving the generation of bioenergy.

Keywords: Biomass. Description. Energy.

1. INTRODUÇÃO

A possibilidade de geração de energia em ampla escala divisada pela Revolução Industrial no século XVIII, acarretou uma profunda transformação das sociedades. A energia se tornou essencial para o desenvolvimento socioeconômico. Observa-se a partir dos dados apresentados na Figura 1 que há um predomínio da utilização de fontes de energia não renováveis no mundo e no Brasil (EPE, 2021). Ainda, que no Brasil, a percentagem de uso de fontes de combustível fósseis seja menor, a sua utilização também é acompanhada de alertas preocupantes no que tange à liberação de gases que contribuem com o efeito estufa, ocasionando eventos climáticos extremos (RIPLE *et al.*, 2022). Cumpre destacar que no que se refere à matriz elétrica, o Brasil apresenta um forte diferencial mundial, uma vez que 78,1% da matriz elétrica é proveniente de fontes renováveis.

Figura 1 – Matriz energética brasileira e mundial



Fonte: EPE (2021)

Muito se discute sobre a importância do desenvolvimento sustentável, para que ações presentes não comprometam de forma negativa as gerações futuras. Dentro deste contexto, tem-se discutido o aumento da utilização de fontes de energia renováveis, e em particular, fontes renováveis não sazonais, e a descentralização do sistema de geração de energia. Embora, defenda-se a ampliação da geração de energia por painéis fotovoltaicos, biomassas são uma promissora alternativa de fonte de energia. As biomassas podem ser obtidas de produtos provenientes de plantações de produtos com elevado teor de carboidratos, resíduos de origem animal e da atividade humana, do processamento da agroindústria, e resultantes de resíduos sólidos urbanos orgânicos, os quais incluem podas de árvores e jardins (NUNES *et al.*, 2020). Salienta-se que, de uma forma geral, os resíduos mencionados são abundantes e de baixo custo. Estima-se, por exemplo, que, globalmente, 1,3 bilhões de toneladas de resíduos alimentares sejam descartadas em aterros sanitários anualmente (MAK *et al.*, 2020). O manejo inadequado de aterros resulta em odores, pragas e emissões de gases de efeito estufa, além da contaminação de lenções freáticos, enquanto

a incineração libera poluentes como dioxinas, furanos e material particulado. A decomposição dos resíduos alimentares em aterros sanitários é responsável por 8% das emissões antropogênicas de metano (NANDA *et al.*, 2016).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama da valorização de resíduos

Estima-se que anualmente 2,12 bilhões de toneladas de resíduos são produzidos no mundo e destes valores 61,3% são compostos por alimentos (MEU RESÍDUO, 2022), sendo 30% dos alimentos produzidos no mundo desperdiçados desde a sua produção pela agroindústria até o seu consumo final (OAKES, 2020). Os resíduos orgânicos, como restos de alimentos, resíduos de jardins e folhas, possuem um alto teor de matéria orgânica e podem ser transformados para produzir adubo orgânico de alta qualidade e para gerar energia. No entanto, muitos países ainda não possuem infraestrutura adequada para coletar e processar esses resíduos de forma eficiente, resultando em desperdício de recursos e esgotamento dos aterros sanitários (IPEA, 2020).

No Brasil, que é um país continental, o problema da gestão de resíduos orgânicos é especialmente relevante ao se ter em vista a grande população e a consequente elevada produção de resíduos. Estima-se que cerca de 50% do lixo doméstico gerado seja composto por resíduos orgânicos. Sabe-se que em 2018, o Brasil foi responsável por gerar 79 milhões de toneladas de substratos, sendo 59,5% com destino para aterros sanitários, 40,5% foram despejados de forma inadequada e 6,3 milhões de toneladas não são ao menos coletados (IPEA, 2020). A coleta seletiva e a compostagem ainda são práticas pouco difundidas e efetivas na maioria das cidades brasileiras. Muitos resíduos orgânicos acabam misturados ao lixo comum e são enviados para aterros sanitários, onde se decompõem de forma anaeróbica, liberando metano, um potente gás de efeito estufa que contribui para as mudanças climáticas.

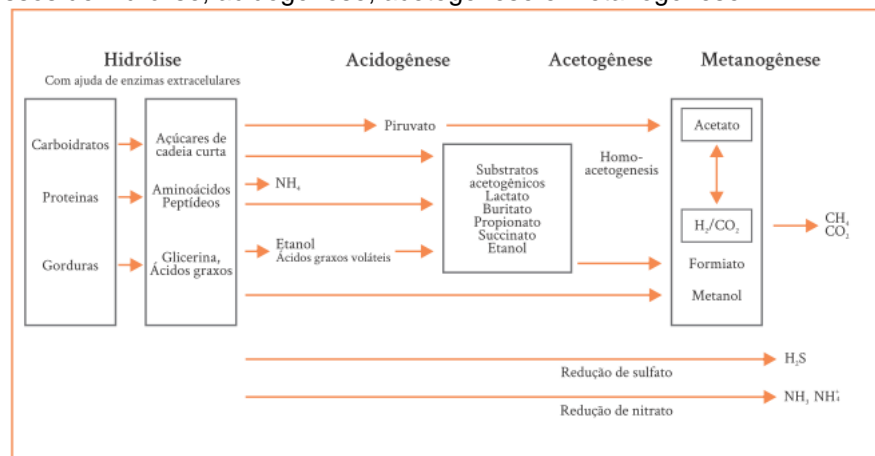
Existem diversas alternativas tecnológicas para a valorização de resíduos orgânicos. A compostagem é um processo simples e eficiente de decomposição controlada de resíduos orgânicos, como restos de alimentos e material vegetal, que resulta na produção de composto orgânico, usado como adubo para a agricultura e jardinagem. Esse método de reciclagem natural é ambientalmente amigável, pois reduz o volume de resíduos em aterros sanitários e contribui para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, mas é importante destacar que não se produz energia e consequentemente o valor agregado do produto de valorização é significativamente inferior em comparação a outras tecnologias.

Rotas químicas, bioquímicas e termoquímicas para geração de energia e/ou produtos de alto valor agregado são processos mais complexos e geralmente estão associadas ao

conceito de biorefinarias. Essas rotas envolvem a transformação química de biomassa em produtos de maior valor energético, como biocombustíveis e produtos de alto valor agregado, como aminoácidos e carboidratos. A operação de tais unidades requer, usualmente, conhecimento técnico avançado e rigoroso controle ambiental devido aos subprodutos e resíduos gerados. Enquanto rotas químicas apresentam potencial para aproveitar resíduos orgânicos de forma bastante eficiente, seu uso prático atualmente está mais voltado para indústrias e plantas de maior escala.

A digestão anaeróbia (DA) é definida como um processo biológico de degradação da matéria orgânica por microrganismos anaeróbicos por meio do qual são produzidos biogás e biodigestado. O biogás pode ser transformado em energia térmica e/ou elétrica e o biodigestado pode ser empregado de diversas formas, destacando-se o seu emprego como biofertilizante, na recuperação de nutrientes minerais ou como matéria prima em biorefinarias para produção de ácidos orgânicos, etanol, biopolímeros (AMPESE *et al.* 2022, PARRA-OROBIO *et al.* 2021, MELGAÇO, 2022). A valorização do resíduo orgânico pela DA faz com que esta rota tecnologia seja considerada como uma das alternativas mais interessantes para o tratamento de resíduos orgânicos, sendo também recomendada para a mitigação de gases de efeito estufa (IPCC, 2022). Adicionalmente, essa abordagem fortalece a economia circular e impulsiona a transição para um futuro mais sustentável e resiliente (COELHO *et al.*, 2018, ORNER *et al.* 2021). O processo da DA é composto por quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos, em simbiose (KUNZ *et al.*, 2019), sendo que o rendimento máximo de cada etapa está associado a diferentes condições operacionais. A Figura 2 esquematiza os processos sequenciais de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Figura 2 – Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese



Fonte: Kunz et al., 2019

Na hidrólise, também conhecida como fase sólida da DA, ocorre a conversão da matéria orgânica insolúvel em matéria orgânica solúvel, degradando-se compostos de elevada massa molar (lipídios, polissacarídeos e proteínas) por meio da ação de enzimas extracelulares excretadas por bactérias hidrolíticas. “Quando a matéria orgânica é complexa e de difícil degradação, a hidrólise pode ser a etapa limitante do processo de DA. O tempo de duração da etapa de hidrólise varia de acordo com as características do substrato, sendo de poucas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídios. Lignocelulose e lignina são hidrolisadas mais lentamente, muitas vezes de maneira incompleta” (KUNZ *et al.*, 2019). A segunda etapa é a acidogênese e constitui na atuação de microorganismos que consomem os produtos provenientes da fase anterior. Há a produção de compostos simples, como ácidos orgânicos de 1 a 5 átomos de carbono (ácidos butírico, propiônico e acético), álcoois, cetonas, amônia, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono. (KUNZ *et al.*, 2019). Já a terceira fase é representada pela acetogênese, sendo considerada como a fase líquida, em que ocorre a oxidação da matéria gerada na segunda etapa, quebrando-se as moléculas de ácidos orgânicos em ácidos com um ou dois átomos de carbono, produzindo-se, concomitantemente gás carbônico e hidrogênio. Na última fase, representada pela metanogênese e conhecida como fase gasosa, ocorre o consumo do material oriundo da fase da acetogênese, produzindo-se em condições estritamente anaeróbicas, metano e dióxido de carbono (KUNZ *et al.*, 2019).

Com relação à rota de valorização de resíduos orgânicos pela DA, recomenda-se iniciar o processo com a redução do tamanho das partículas dos resíduos para facilitar a ação dos microrganismos, além de que devem ser retirados materiais contaminantes, como pedras, metais, vidro ou plástico. Em seguida, o material é conduzido ao processo de digestão anaeróbica (DA), que ocorre em um ambiente livre de oxigênio. Nesse processo, os resíduos orgânicos são decompostos por microrganismos anaeróbicos, como bactérias e arqueas, resultando na produção de biogás e na redução do volume de resíduos. O biogás gerado durante a digestão anaeróbica é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), podendo ser utilizado como fonte de energia renovável. O processo de DA é influenciado por fatores como temperatura, pH, relação carbono/nitrogênio, tempo de retenção hidráulica e carga orgânica. Diferentes consórcios de bactérias podem ser empregados, sendo o uso de bactérias mesofílicas bastante comum. A Tabela 1 sintetiza os parâmetros operacionais ideais para as fases da hidrólise, acidogênese e metanogênese, compilados por KUNZ *et al.* (2019). O controle das condições operacionais do reator de DA possibilita maximizar a produção de biogás. O biogás produzido na DA é usado para a geração de energia térmica ou elétrica, sendo usualmente purificado para a remoção de compostos sulfurosos, podendo ser ainda enriquecido. Os

processos relacionados com o aproveitamento do digestato dependem da escolha da rota de valorização, sendo o emprego mais simples o seu uso como fertilizante.

Tabela 1: Parâmetros operacionais recomendados para a digestão anaeróbia

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura	25 – 35	32 – 42
Ph	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10 – 45	20 – 30
Concentração de matéria seca (%)	< 40	< 30
Potencial Redox (mV)	+ 400 até – 300	< - 200
Relação de C:N:P:S necessária	500: 15: 5: 3	600: 15: 5: 3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: AdaptadFonte: adaptado de Kunz et al., 2019

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS

São diversas as técnicas empregadas para a caracterização de resíduos orgânicos e as diferentes caracterizações estão relacionadas com a rota tecnológica de valorização de resíduos. A análise imediata corresponde ao ensaio básico de biomassas e que não requer mão de obra especializada e é usada para determinar os valores do teor de umidade (TU), de material orgânico volátil ou sólidos voláteis (SV), de carbono fixo (CF) e de cinzas (CZ). A caracterização do poder calorífico do material orgânico é importante para a avaliação de rotas termoquímicas e para caracterizar o potencial energético de biomassas. Quando da inexistência de equipamentos específicos para a determinação do poder calorífico, pode-se empregar os resultados da análise imediata para a estimativa do poder calorífico superior de uma biomassa por meio de correlações empíricas (DEMIRBAS *et al.* 1997, PARIKH *et al.* 2005). As Equações (1) a (4), em que o poder calorífico superior (PCS) é determinado em (MJ/kg) são destacadas por empregarem todos os parâmetros determinados na análise imediata.

$$PCS = 20,7999 - \frac{3214}{10000} \frac{SV}{CF} + \frac{51}{10000} \left(\frac{SV}{CF}\right)^2 - \frac{112277}{10000} \frac{CZ}{SV} + \frac{44953}{10000} \left(\frac{CZ}{SV}\right)^2 - \frac{7223}{10000} \left(\frac{CZ}{SV}\right)^3 + \frac{383}{10000} \left(\frac{CZ}{SV}\right)^4 + \frac{76}{10000} \frac{CF}{CZ} \quad (1)$$

$$PCS = 20,7623 - 0,4400 \frac{SV}{CF} + 0,0071 \left(\frac{SV}{CF}\right)^2 - 5,2902 \frac{CZ}{SV} + 4,4921 \left(\frac{CZ}{SV}\right)^2 + 0,0143 \frac{CF}{CZ} \quad (2)$$

$$PCS = 19,2880 - 0,2135 \frac{SV}{CF} + 0,0234 (CF/CZ) - 1,9584 \frac{CZ}{SV} \quad (3)$$

$$PCS = 0,3536 CF + 0,1559 SV - 0,0078 CZ \quad (4)$$

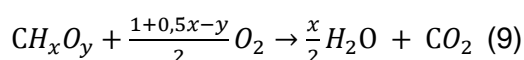
A partir do poder calorífico superior é possível estimar o poder calorífico inferior (PCI) pela Equação (5). O PCI refere-se à quantidade de calor libertado quando um material entra em combustão, considerando toda a água resultante no estado gasoso. Já o PCS representa o calor liberado pela combustão, incluindo-se a energia necessária para a vaporização da água, a qual se encontra na biomassa no estado líquido. Ou seja, para a avaliação do potencial energético das biomassas deve-se empregar o PCI, uma vez que parte do conteúdo energético da biomassa será usada para a vaporização da água líquida. Na Equação (5), a massa de água refere-se à quantidade de água formada na combustão e a mesma pode ser estimada a partir do teor de hidrogênio presente na biomassa. O teor de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio, dentre outros compostos é preferencialmente obtido da análise elementar, contudo o custo do equipamento para essa análise é elevado e assim pode-se utilizar correlações da literatura, apresentadas nas Equações (6) a (8) para a determinação do teor de carbono, hidrogênio e oxigênio (PARIKH *et al.*, 2007), apresentadas nas Equações (11) a (13). Note que os teores estimados são em porcentagens mássicas. Assim, para a determinação da massa de água, deve-se obter a fórmula molecular mínima expressa como CH_xO_y e estimar a massa obtida na combustão completa por meio da reação apresentada na Equação (9), em que o calor latente de vaporização da água a 18°C (L) é dado por 2,453 MJ Kg⁻¹.

$$PCI = PCS - massa\ H_2O \times L \quad (5)$$

$$C\ (\%) = 0,637\ (CF) + 0,455\ (MV) \quad (6)$$

$$H\ (\%) = 0,052\ (CF) + 0,062\ (MV) \quad (7)$$

$$O\ (\%) = 0,304\ (CF) + 0,476\ (MV) \quad (8)$$



A identificação de compostos lignocelulósicos é importante quando do emprego de rotas bioquímicas de valorização de resíduos, uma vez que estes são de difícil digestão. Existem várias técnicas para identificar e quantificar lignina e compostos de celulose, destacando-se as de hidrólise ácida (MARTINS, 2016), o emprego de infravermelho e infravermelho próximo (SALIBA *et al.*, 2001) e ressonância magnética nuclear (FUKUSHIMA & HATFIELD, 2003). Contudo a Análise Termogravimétrica (TGA), que avalia a degradação térmica e a estabilidade de compostos e a difração de Raios-X (DRX) também podem ser usadas para a identificação de compostos lignocelulósicos (DIEGO-DÍAZ *et al.*, 2019). A técnica de difração de Raios-X (DRX) é uma relevante ferramenta analítica usada para estudar a estrutura cristalina dos materiais. Ela é baseada no princípio da difração dos raios-X por um material cristalino, onde a interação dos raios-X com os átomos da estrutura resulta em padrões de difração característicos. A técnica de DRX utiliza um equipamento que emite raios-X em direção à amostra e registra os raios-X difratados por ela. A partir dos

ângulos de difração observados, é possível determinar os espaçamentos entre os planos cristalinos da amostra. A interpretação dos dados de difração permite identificar as fases cristalinas presentes, determinar parâmetros de rede, avaliar a presença de defeitos estruturais e realizar análises quantitativas. Ao analisar a difração de raios-X de uma amostra que contém lignina e celulose, é possível obter informações sobre a organização estrutural geral desses componentes.

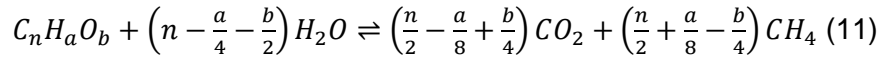
2.3 AVALIAÇÃO TECNO-ECONÔMICA

A avaliação tecno-econômica do potencial de geração de energia a partir de biogás obtido de resíduos orgânicos é uma análise que envolve a avaliação dos aspectos técnicos e econômicos do processo e visa determinar a viabilidade e o potencial de implementação de um projeto de geração de energia a partir de biogás. Devem ser considerados na avaliação estimativas da disponibilidade de resíduos orgânicos para produção de biogás, da geração de energia, de custos de investimentos fixos e operacionais e dos benefícios ambientais. A avaliação tecno-econômica é importante para determinar índices quantitativos de viabilidade e de retorno econômico de um projeto, os quais auxiliam na tomada de decisões sobre a implementação de sistemas de geração de energia a partir de biogás.

Um procedimento bastante empregado (AMPESE *et al.*, 2022) para a estimativa do potencial de geração de energia de biogás obtido da digestão anaeróbia da biomassa é feito pelo emprego da Equação (10). O emprego desta equação pressupõe que se dispõe de uma unidade experimental para a avaliação da produção de biogás. Contudo, para a aquisição dela, é muitas vezes fundamental a possibilidade de retorno de investimentos, por meio de relatórios técnicos. Nesse sentido, a previsão da produção teórica máxima de metano (TMP) obtida de correlações pode subsidiar a elaboração dos relatórios. SONG *et al.* (2021) apresentam a Equação (11), baseada na síntese de metano pela reação química apresentada na Equação (12), para a estimativa da produção máxima teórica de metano em unidades de volume de metano por massa de sólidos voláteis da biomassa usada na digestão anaeróbia, representada pela fórmula molecular genérica $C_nH_aO_b$, independentemente de a biomassa conter também nitrogênio ou enxofre em sua estrutura.

$$EG_{CH_4} = 3,6 * Q_{biogás} * LHV_{CH_4} * C_m * \eta_e \quad (10)$$

Sendo, EG_{CH_4} o potencial de geração de energia elétrica em MWh/ton de biomassa; $Q_{biogás}$ o volume de biogás produzido (m^3 /ton de biomassa); LHV_{CH_4} o poder calorífico inferior do metano, avaliado como 35,59 MJ/ m^3 ; C_m o teor de metano no biogás; η_e a eficiência do sistema de conversão de energia.



$$TMP = \frac{22400\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}\right)}{12n + a + 16b} \quad (12)$$

Conhecido o potencial de geração de energia, a análise de viabilidade econômica é baseada na previsão do investimento inicial da unidade de geração de energia, nos custos operacionais e de manutenção e nas receitas esperadas com a geração de energia, podendo eventualmente incluir receitas advindas da venda de biodigestato. A estimativa do investimento inicial é usualmente feita a partir da especificação do projeto conceitual ou básico das unidades de digestão anaeróbia e de geração de energia (SGANZERLA *et al.*, 2021). Segundo Fernandes *et al.* (2022), os custos de operação e manutenção de uma unidade de geração de energia de biogás de aterros sanitários correspondem a 5% do investimento e o custo de tratamento de biogás sulfurosos pode ser estimado como sendo R\$ 0,023 por volume de biogás tratado.

O valor presente líquido (VPL), obtido da Equação (13) é usado para avaliar a viabilidade econômica do projeto em função da tarifa de venda de energia. O empreendimento torna-se economicamente viável se o valor obtido é positivo. O valor da energia produzida por ano pode ser estimado pela Equação (10), desde que o volume de biogás corresponda à produção anual.

$$VPL = \sum_{n=1}^m \frac{(E_n T) - C_{om}}{(1+i)^n} - I \quad (13)$$

Sendo, E_n energia produzida no ano de análise em MWh; T a tarifa de venda de energia, em R\$/MWh; C_{om} o custo de operação e manutenção, em R\$/ano; i a taxa de juros usualmente correspondente a empréstimos obtidos para financiar os investimentos, I o investimento inicial em R\$; m é o tempo de vida útil do projeto em anos e n é o ano de análise.

Outros parâmetros usados para a avaliação da viabilidade de um empreendimento são o período de retorno simples ou tempo de *payback* simples (PR) e o retorno sobre o investimento (ROI), avaliados pelas Equações (14) e (15). O tempo de *payback* corresponde ao tempo necessário para recuperar o investimento inicial, sendo expresso em anos e o retorno sobre o investimento é expresso em (%) e dá uma ideia de rentabilidade do investimento realizado, necessitando ser maior que 100% para atestar a viabilidade econômica do projeto.

$$PR = \frac{I}{FC} \quad (14)$$

Sendo, FC o Fluxo de Caixa Anual, calculado como o montante líquido monetário gerado pelo projeto a cada ano após a dedução de custos operacionais e outras despesas, i.e., considera-se a receita anual menos os custos anuais.

$$ROI = \frac{VPL-I}{I} \times 100 \quad (15)$$

3. METODOLOGIA

Após a realização de um estudo bibliográfico, focando a valorização de resíduos orgânicos, técnicas de caracterização de biomassas procedimentos de análise econômica de processos de geração de energia de biogás, iniciou-se a parte experimental da pesquisa. Esta correspondeu à seleção, coleta e caracterização de diferentes resíduos orgânicos produzidos no campus de Higienópolis da UPM.

Efetuuou-se a determinação do teor de umidade das amostras e a análise imediata seguindo os procedimentos de APHA (1989). As amostras, trituradas, foram inicialmente secas em estufa mantida a 105°C sem a circulação de ar até apresentarem massa constante e a partir das pesagens das amostras antes e após serem colocadas na estufa, obteve-se o teor de umidade em base úmida (TU) de cada amostra. Para tanto, dividiu-se a quantidade de água evaporada pela massa da amostra úmida. Para a obtenção do teor de sólidos voláteis (SV), inseriu-se 1 g de amostra seca de biomassa em um cadinho também seco e pesado, colocando-se o cadinho com a amostra no interior de uma mufla à temperatura de 900°C, mantendo-se a amostra na mufla por 7 minutos. O cadinho com a amostra foi resfriado no interior de um dessecador e em seguida pesado. O teor de voláteis em base seca é obtido dividindo-se a diferença das massas da amostra ao início e ao final do ensaio pela massa de amostra seca. Para a obtenção do teor de cinzas em base seca (CZ), depositou-se 1g da amostra seca de biomassa em cadinho previamente seco e pesado, colocando-se o cadinho com a amostra no interior de uma mufla a 700°C. A amostra foi mantida por 1h no interior da mufla. O conjunto cadinho com cinzas foi resfriado em dessecador e o teor de cinzas foi calculado dividindo-se a massa residual (cinzas) pela massa da amostra seca. O teor de carbono fixo (CF) é obtido, subtraindo-se de 100% os teores de materiais voláteis e de cinzas.

A partir dos resultados da análise imediata, obteve-se o poder calorífico superior de cada amostra a partir da média dos valores preditos pelas Equações (1) a (4) e o poder calorífico inferior foi obtido da Equação (5), sendo a quantidade de água produzida na combustão completa e a fórmula molecular mínima de cada biomassa avaliadas como apresentado no referencial teórico. Os resultados obtidos foram ainda comparados com dados da literatura. A identificação da existência de componentes lignocelulósicos foi feita

por meio de ensaios de DRX. Salienta-se que algumas amostras foram moídas em moinho de anéis Rocklabs.

Para a avaliação tecno-econômica, calcularam-se os parâmetros VPL, PR e ROI apresentados no item 2.3. Como até a realização desse trabalho, não havia um levantamento dos resíduos orgânicos produzidos no campus, postularam-se algumas hipóteses, documentadas no item de resultados e discussão, as quais incluem tanto a seleção de resíduos considerados nesse trabalho como avaliação das quantidades produzidas. A geração de energia de cada tipo de resíduo avaliado neste trabalho foi obtida da Equação (10), sendo a quantidade de metano produzida estimada pela Equação (16). O item de resultados documenta o procedimento de estabelecimento da massa de cada biomassa considerada. Salienta-se que para a avaliação tecno-econômica somaram-se as gerações de energia de cada biomassa.

$$Q_{biogás}C_m = TMP \cdot m_{biom} \cdot SV \quad (16)$$

Sendo m_{biom} a quantidade de biomassa anual processada.

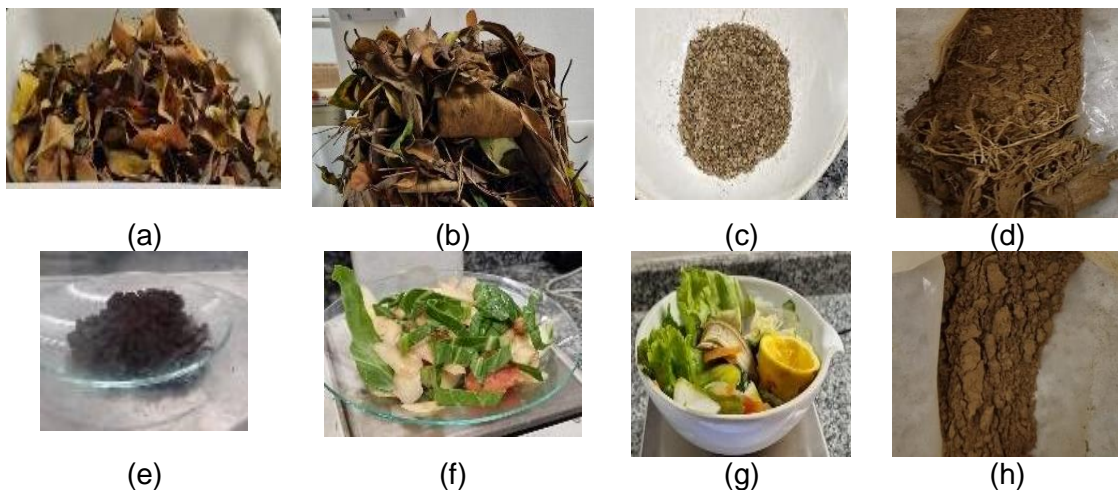
Em conformidade com o procedimento de Ampese *et al.* (2022) foi, ainda, estimada a redução de emissão de gases de efeito estufa a ser alcançada com a implementação da estratégia de valorização de resíduos orgânicos por meio da rota da DA.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

São diversos os tipos de resíduos orgânicos produzidos no campus de Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Com relação aos resíduos de jardins, avaliaram-se, neste trabalho, os resíduos da varrição de jardins (RVJ). A varrição de todo o campus ocorre diariamente de 2ªfeira a sábado, exceto aos feriados. Foram coletadas amostras em junho e agosto de 2023, as quais foram secas e trituradas. A estimativa da quantidade de RVJ foi feita a partir de duas campanhas de pesagem de toda a varrição semanal promovidas pela Coordenadoria de Sustentabilidade do Instituto Presbiteriano Mackenzie (IPM) para a realização deste trabalho. Considerou-se para estimativa do potencial de RVJ a média das pesagens feitas em duas semanas. Além dos resíduos de jardim, ocorrem podas preventivas duas vezes ao ano, produzindo uma quantidade significativa de material, incluindo materiais lignocelulósicos como troncos de árvores. No campus universitário há seis lanchonetes, seis restaurantes, quatro cafeterias e dois quiosques (de *cookies* e churros), os quais, além de servirem colaboradores do IPM, atendem os estudantes universitários e do ensino fundamental e médio da Escola Americana. Segundo informações fornecidas pela Coordenadoria de Sustentabilidade do IPM, o número total de estudantes matriculados no 1º semestre de 2023 foi de 23935. Não há, atualmente, uma política de valorização dos resíduos do processamento de alimentos ou das sobras de alimentos.

Optou-se nesse trabalho por analisar alguns resíduos do processamento de alimentos, uma vez que se acredita ser mais fácil iniciar uma política de gestão de resíduos de alimentos contando com a colaboração das empresas do setor de alimentação que possuem relação contratual com o IPM. Nesse trabalho, avaliaram-se os resíduos da borra de café expresso (RBC) e do processamento de alimentos de um restaurante (RPA). Duas amostras distintas de RPA são apresentadas nesse trabalho e contêm resíduos do processamento de alimentos gerais (alface, couve, molho de salada, cenoura, tomate, cebola, manjeriço, cascas de batatas, abacaxi, banana, laranja e pepino). As amostras RBC e RPA também passaram pelo processo de secagem em estufa. Observou-se que as amostras RPA eram bastante perecíveis, mas dispersando-se, as mesmas na estufa e procedendo com a secagem logo do recebimento das amostras, obteve-se um material seco não perecível. As amostras RVJ e RPA foram ainda pulverizadas para os ensaios de DRX. A Figura 3 apresenta uma seleção de amostras in natura, secas e pulverizadas.

Figura 3 – Fotografia de amostras de biomassa: (a) RVJ-1 in natura – amostra de semana sem chuva (b) RVJ-2 in natura – amostra de semana com chuva (c) RVJ-1 triturado (d) RVJ-1 seco e pulverizado (e) borra de café (f) RPA com salada (g) RPA com cascas de frutas (h) RPA seco e pulverizado



Fonte: Autor (2023)

Para a estimativa da quantidade mensal dos resíduos da varrição de jardins, efetuou-se a média diária de resíduos coletados em cada uma das semanas, em que as campanhas de pesagem foram conduzidas. O valor médio foi multiplicado pelo número médio de dias em um mês e por um fator que leva em conta a perda de biomassa no processo de trituração, sendo o fator de aproveitamento considerado como sendo de 95%. As duas cafeterias de maior circulação de pessoas do campus consomem por semana 18 kg de pó de café expresso cada uma, enquanto uma lanchonete pequena consome 8 kg de pó de café por semana. Considerou-se que apenas duas cafeterias apresentam um consumo de 18 kg de café por semana e que seis estabelecimentos (cafeterias e lanchonetes) consomem 8 kg de café e o fator de aproveitamento foi considerado de 98%, correspondente à extração do café e eventuais perdas no procedimento de coleta da borra

de café. Zotesso *et al.* (2016) efetuaram um levantamento das sobras de alimentos nos estabelecimentos e dos restos de alimentos nos pratos, obtendo índices próximos de 10% para cada um desses fatores. A média do peso preparado de alimento por pessoa foi avaliado como sendo de 700g. Como não existe um levantamento no IPM, consideraram-se esses números como referência, arbitrando-se um aproveitamento bem menor de resíduos, como segue descrito. Considerou-se que apenas 10% dos estudantes matriculados e 100 colaboradores almoçam ou jantam no campus universitário, sendo que se assumiu que cada pessoa consome 500g de alimentos e que as perdas no processamento correspondem a apenas 10%. A Tabela 3 apresenta os resultados de caracterização e avaliação energética de cada tipo de biomassa considerada, obtidos de acordo com o procedimento apresentado nos itens 2 e 3.

Tabela 2 – Características das diferentes biomassas analisadas

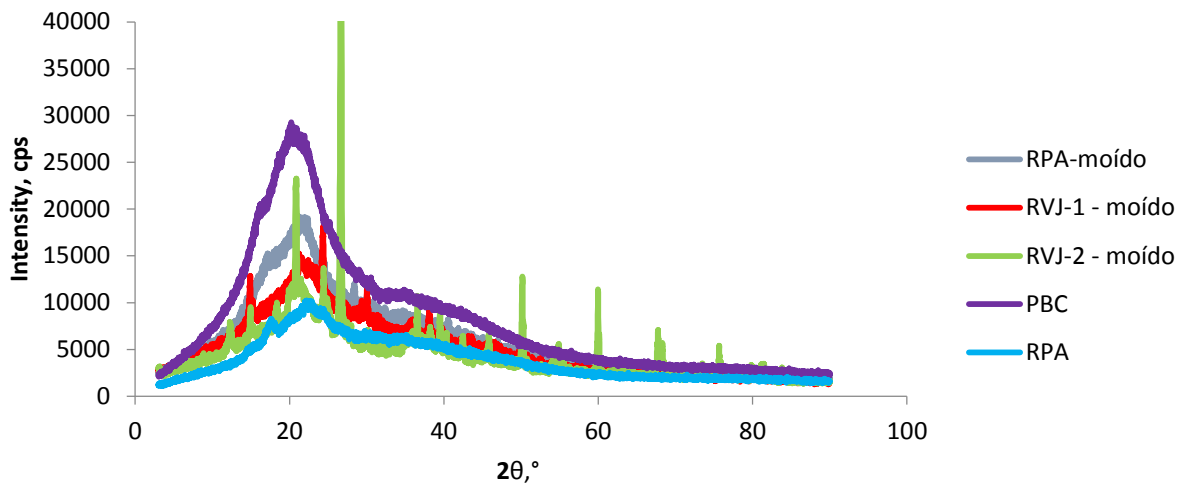
	RVJ-1	RVJ-2	RBC	RPA-1	RPA-2
TU (% _u)	27,0	45,8	51,4	87,3	87,6
SV (% _u)	60,1	43,5	39,5	12,2	11,2
CF (% _s)	11,9	10,9	3,2	4,1	4,4
CZ (% _s)	5,8	9,9	1,9	0,02	4,9
SV/ST	82,4	79,3	94,5	95,9	90,7
PCI (MJ/kg)	15,2	14,9	11,6	13,6	13,2
TMP (mL/gSV)	459,0	457,9	439,9	441,6	442,8
m_{biomassa} (kg/mês)	4218		435	3792	
V_{CH_4} (m ³ /mês)	1606	1522	178	1515	1454
Geração de energia elétrica (kWh/mês)	5990	5749	703	3811	3612
GHG (t _{CO₂-eq} /mês)	757	727	89	482	457

Fonte: Autor (2023).

Os resultados de teor de voláteis em base seca (SV) das amostras de resíduos de alimentos estão em conformidade com valores reportados na literatura que variam de 80 a 98,5% (SONG *et al.*, 2021, ZHANG *et al.*, 2007, LYTRA *et al.*, 2021). O teor de sólidos voláteis de resíduos de jardinagem reportados por Song *et al.* (2021) é de 86% e Braga *et al.* (2016) reportam uma faixa de valores em torno de 75% para resíduos agroflorestais madeireiros e não-madeireiros. Dessa forma, conclui-se que os valores obtidos são coerentes. Com relação ao teor de cinzas, Song *et al.* (2021) reportou um teor de cinzas de 13,9% para os resíduos de jardim e 1,5% para os resíduos de alimentos. Já Braz (2014) apresenta teores para diversos resíduos na faixa de 3,6% a 29,1%. Os teores obtidos nesse trabalho são dependentes da amostra coletada, o que faz sentido, uma vez que diferentes tipos de vegetais e de alimentos estavam presentes em cada amostra. Percebe-se uma significativa variação nos teores de cinzas, mas que são compatíveis com as faixas de valores encontradas na literatura. Na literatura, reporta-se que a celulose, a hemicelulose e a lignina apresentam, respectivamente, valores de TMP de 415, 427 e 727 (mL/gSV) (SONG *et al.*, 2021). O teor de compostos voláteis e de carbono fixo variam entre 90% a quase

100% nas diferentes amostras e todas elas contém compostos lignocelulósicos. Assim, os valores estimados para o TMP de cada amostra indicam a prevalência de compostos de celulose. Os resultados de DRX, apresentados na Figura 4 corroboram essa hipótese, uma vez que se evidencia o pico no ângulo $2\theta = 22^\circ$, característico de celulose-I em todas as amostras. Ressalta-se ainda a grande quantidade de resíduos produzida mensalmente, tendo sido estimado que minimamente produzem-se 8444 kg de resíduos de alimentos e da varrição de jardim por mês.

Figura 4 – Resultados das análises DRX



Fonte: Autor (2023).

O consumo de energia elétrica do campus de Higienópolis no 1º semestre de 2023 foi de 1007,585MWh, correspondendo a uma média mensal de 167,9 MWh. O valor médio no período da tarifa de eletricidade foi de 0,7 R\$/kWh. Song *et al.* (2021) reportaram que a produção de metano na DA a partir de resíduos de jardim e de alimentos em relação ao TMP foi de 72,9% e 92,2%. Nesse trabalho, considerou-se que a produção de metano na DA dos resíduos analisados será de apenas 72% do TMP para fins de estimativa da capacidade mensal de geração de energia elétrica. Somando-se as médias de previsão de geração de energia elétrica obtida a partir de cada tipo de biomassa, estima-se uma geração de eletricidade mensal de 7405 kWh, ocasionando-se uma redução na liberação mensal de gases de efeito estufa da ordem de 936 ton-CO₂eq. Considerando-se que um motogerador funcionasse diariamente por 8h e tendo-se em vista a previsão de energia elétrica a partir dos resultados apresentados anteriormente, necessitar-se-ia de um motogerador de cerca de 30kW de potência. Assim, a aquisição de um gerador de 40kW atenderia a produção de biogás diária. Cervi *et al.* (2010) apresentam o custo de uma unidade de geração de energia de biogás obtido por meio da digestão anaeróbia operando com um motogerador de 40 kW, em que se inclui o custo do biodigestor, mas não de trituradores. O valor apresentado pelos autores de R\$ 51.538,88 baseia-se em dados de custo do ano de 2008. Dessa forma,

considerando-se a inflação acumulada pelo índice do IPCA entre janeiro de 2008 e agosto de 2023, esse valor atualizado corresponderia atualmente a R\$ 125.239,48. Os autores apresentam custos do biodigestor e motogerador, os quais são compatíveis com valores mais recentes reportados na literatura e com valores atuais de mercado de motogeradores. Tomando-se o valor do investimento de Cervi *et al.* (2010) atualizado como base para a avaliação tecno-econômica efetuada neste trabalho consideraram-se alguns cenários, em que o custo de investimento variaria de R\$150.000,00 a R\$200.000,00. O tempo de vida útil da unidade máximo foi considerado como sendo de 20 anos e o custo operacional mínimo foi considerado como sendo de 5% do investimento inicial em conformidade com FERNANDES *et al.* (2022). Atualmente, o cenário de taxa de juros é elevado, mas ainda que existam financiamentos especiais para sistemas de geração de energia de biogás, observa-se uma enorme amplitude na faixa de juros aplicada (BRASIL, 2021). Simularam-se diversos cenários para a avaliação tecno-econômica com taxas de juros de 7 a 11% ao ano, os quais são apresentados na Tabela 3. Observando-se os resultados da Tabela 3, percebe-se que o VPL se torna positivo a partir de 4 a 6 anos do investimento inicial, tornando-se assim viável decorrido este prazo. Já o retorno de investimento será observado no melhor cenário (caso 5) a partir do 8º ano de investimento e do 18º ano para o pior cenário. Decorridos 20 anos do investimento é possível se ter mais de 200% de retorno dos investimentos. Contudo, percebe-se que na ausência de capital inicial disponível, faz-se necessário a procura por taxas de juros mais vantajosas, sendo recomendado obter financiamentos com taxa de juros de até 7% para uma maior segurança econômica do empreendimento. Ressalta-se que na existência de investimento, o retorno de investimento simples se dá entre 2 e 4 anos, sendo a receita anual obtida após a amortização dos investimentos superior a R\$ 45.000,00 para os cenários considerados. Quanto à quantidade de biogás produzido, optou-se pela realização de uma predição conservadora e a energia elétrica produzida corresponde a cerca de 4% da demanda universitária. Mas, é importante frisar que não se considerou a co-geração de energia. Na avaliação tecno-econômica, também não se consideraram possíveis receitas a serem obtidas a partir do biodigestato produzido. Dessa forma, recomenda-se avançar com os estudos iniciados de levantamento da quantidade de biomassas de resíduos orgânicos efetivamente disponíveis no campus universitário e realizar-se ensaios de digestão anaeróbia com os diferentes resíduos para verificar se as estimativas obtidas são corretas.

Tabela 3 – Resultados de avaliação tecno-econômica da implementação de uma unidade de geração de energia de biogás obtido da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos provenientes da varrição de jardins e do processamento de alimentos

Caso	Investimento (R\$)	Custo de manutenção e operação (R\$)	Taxa de juros (%)	Receita anual (R\$)	PR	Número de anos para viabilidade		ROI em 20 anos
						ROI > 100%	VPL>0	
1	200000,00	10000,00	7	52200,00	3,8	12	5	177
2	200000,00	10000,00	9	52200,00	3,8	14	5	138
3	200000,00	10000,00	11	52200,00	3,8	18	6	108
4	200000,00	15000,00	7	47200,00	4,2	14	5	150
5	150000,00	10000,00	7	52200,00	2,9	8	4	269
6	150000,00	10000,00	9	52200,00	2,9	9	4	218
7	150000,00	10000,00	11	52200,00	2,9	10	4	177
8	150000,00	15000,00	7	47200,00	3,2	9	4	233
9	175000,00	10000,00	9	47200,00	3,4	11	5	172
10	175000,00	15000,00	9	47200,00	3,7	13	5	146

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a ampla gama de biomassas disponíveis no campus de Higienópolis da Universidade Presbiteriana Mackenzie, selecionaram-se resíduos orgânicos passíveis de serem coletados e com significativo potencial de geração de energia, os quais incluíram resíduos da varrição de jardins e do processamento de alimentos. Realizaram-se difratogramas de Raios-X e ensaios de análise imediata, que possibilitaram identificar a existência de materiais lignocelulósicos e avaliar o potencial de geração de energia elétrica. Mesmo diante da adoção de premissas conservadoras, observou-se uma quantidade significativa de resíduos orgânicos produzidos no campus universitário, sendo estimada uma produção mensal superior a 8 toneladas, capaz de suprir cerca de 4,4% do consumo total de energia elétrica da universidade. Os estudos preliminares realizados indicam a viabilidade técnica e econômica da valorização dos resíduos pela rota de digestão anaeróbica para a produção de biogás, passível de conversão em energia elétrica. No entanto, salienta-se ser crucial avançar com os estudos realizados, efetuando uma criteriosa quantificação dos resíduos orgânicos ao longo de um ano e proceder com ensaios de digestão anaeróbia para corroborar as estimativas efetuadas. Adicionalmente, recomenda-se efetuar o levantamento de custos a partir da especificação do projeto básico de uma unidade de valorização de resíduos orgânicos pela rota da digestão anaeróbia.

6. REFERÊNCIAS

AMPESE, Larissa Castro; GOUVÊA, Míriam Tvrzská de; BULLER, Luz Selene; SGANZERLA, William Gustavo; ROSA, Maria Thereza de Moraes Gomes; FORSTER-CARNEIRO, Tania. Using thermodynamic models for bioenergy recovery and generation assessment: a case study with açai and macaúba by-products. **Biomass Conversion And Biorefinery**, [S.L.], 9 fev. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-023-03880-z>.

APHA - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (17th Ed). American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), Washington, DC., 1989

BRAGA, Dayse Gonzaga; SOUZA, Lyssa Martins de; QUEIROZ, Wiully Luan Valverde de; BUFALINO, Lina. Análise imediata de diferentes biomassas de origem florestal. Disponível em: <https://www.cbctem.com.br/submissao-trabalho/resumo/trabalho-completo/TDJnRVN3bVpiNGI0YWVwYVA0dnpnUT09/>. Acesso em: 15 set. 2023.

BRASIL. Financiamento para o setor de biogás: desafios e oportunidades para expansão da geração. Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. Relatório Técnico, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/> Acesso em: 15 set.2023

BRAZ, C.E.M. Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia. Dissertação (Mestrado). Departamento de Química da UNESP, Araraquara, 2014.

CERVI, Ricardo G.; ESPERANCINI, Maura S. T.; BUENO, Osmar de C.. VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM GRANJA SUÍNÍCOLA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2010. 14 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

COELHO, Suani Teixeira et al (org.). TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOGÁS E BIOMETANO. São Paulo: Synergia, 2018. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/sites/default/files/anexosnoticias/livro-tecnologias-producao-uso-biogas-biometano.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2023.

DEMIRBAS, A.; GULLU, D.; ÇAGLAR, A.; AKDENIZ, F. Estimation of calorific values of fuels from lignocellulosics. **Energy Sources**, v. 19, p. 765-770, 1997

DIEGO-DÍAZ, Beatriz; DURAN, Adrian; ÁLVAREZ-GARCIA, Mariano R.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Juana. New trends in physicochemical characterization of solid lignocellulosic waste in anaerobic digestion. **Fuel**, v. 245, p. 240-246, 2019

EPE – Empresa Brasileira de Energia. Matriz energética e elétrica, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 10 abril. 2022

FERNANDES, Giovanna Loiola; SANTOS, Ivan Felipe Silva; SILVA, Hellen Luisa Castro e; BARROS, Regina Mambeli. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 67-77, fev. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200210>.

FUKUSHIMA, Romualdo S.; HATFIELD, Ronald D. UM NOVO MÉTODO ANALÍTICO PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGNINA EM PRODUTOS VEGETAIS. In: VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE MÉTODOS DOS LABORATÓRIOS DA EMBRAPA, 8., 2003, Jaguariúna. p. 1-36. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/met/images/arquivos/08MET/Palestras/teorlignina.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LYTRAS, George; LYTRAS, Chris; MATHIOUDAKIS, Dimitrios; PAPADOPOULOU, Konstantina; LYBERATOS, Gerasimos. Food Waste Valorization Based on Anaerobic Digestion. **Waste And Biomass Valorization**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 1677-1697, 2 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z>.

MAK, T.M.W. et al. Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: Policy review, limitations and opportunities. **Bioresource technology**, v. 297, p. 122497, 2020.

MARTINS, Douglas Ferreira. Estudo da influência da hidrólise ácida da celulose extraída do capim Mombaça na produção de nanocristais de celulose com diferentes estruturas polimórficas. 2016. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MELGAÇO, Lucas Antonio de Oliveira. PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DE PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO DO DIGESTATO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS. 2020. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MEU RESÍDUO. Quanto desperdiçamos? Um guia baseado em dados para resíduos e aterros sanitários. Disponível em: <https://www.meuresiduo.com/geral/quanto-desperdicamos-um-guia-baseado-em-dados-para-residuos-e-aterros-sanitarios/>. Acesso em: 15 set. 2023.

NANDA, S.; ISEN, J; DALAI, A.K.; KOZINSKI, J.A.; Gasification of fruit wastes and agro-food residues in supercritical water. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 296-306, 2016.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, p. 109658, 2020.

NHUCHHEN, D. R.; SALAM, P. A. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: a new approach. **Fuel**, v. 99, p. 55-63, 2012.

OAKES, Kelly. Do cultivo ao aterro, desperdício de comida emite mais gases nocivos do que a maioria dos países. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/vert-fut-52906561>. Acesso em: 15 set. 2023.

ORNER, Kevin D.; SMITH, Sarah J.; BREUNIG, Hanna M.; SCOWN, Corinne D.; NELSON, Kara L.. Fertilizer demand and potential supply through nutrient recovery from organic waste digestate in California. **Water Research**, [S.L.], v. 206, p. 117717, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2021.117717>.

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, p. 487-494, 2005

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, v. 86, p. 1710-1719, 2007

PARRA-OROBIO, Brayan Alexis; ROTAVISKY-SINISTERRA, María Paula; PÉREZ-VIDAL, Andrea; MARMOLEJO-REBELLÓN, Luis Fernando; TORRES-LOZADA, Patricia. Physicochemical, microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. **Sustainable Environment Research**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 1-10, 4 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s42834-021-00085-9>.

RIPPLE, William J; WOLF, Christopher; GREGG, Jillian W; LEVIN, Kelly; ROCKSTRÖM, Johan; NEWSOME, Thomas M; BETTS, Matthew G; HUQ, Saleemul; LAW, Beverly e; KEMP, Luke. World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2022. **Bioscience**, [S.L.], v. 72, n. 12, p. 1149-1155, 26 out. 2022. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/biosci/biac083>.

SGANZERLA, William G.; AMPESE, Larissa C.; MUSSATTO, Solange I.; FORSTER-CARNEIRO, Tânia. A bibliometric analysis on potential uses of brewer's spent grains in a biorefinery for the circular economy transition of the beer industry. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 1965-1988, 7 set. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.2290>.

SALIBA, Eloísa de Oliveira Simões; RODRIGUEZ, Norberto Mário; MORAIS, Sérgio Antônio Lemos de; PILÓ-VELOSO, Dorila. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. *Ciência Rural*, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 917-928, out. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782001000500031>.

SONG, Yingjin; MENG, Shuyan; CHEN, Guanyi; YAN, Beibei; ZHANG, Yingxiu; TAO, Junyu; LI, Yihang; LI, Jinlei. Co-digestion of garden waste, food waste, and tofu residue: effects of mixing ratio on methane production and microbial community structure. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 105901, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105901>.

ZHANG, R; ELMASHAD, H; HARTMAN, K; WANG, F; LIU, G; CHOATE, C; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 98, n. 4, p. 929-935, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.039>.

ZOTESSO, Jaqueline Pirão; COSSICH, Eneida Sala; COLARES, Luciléia; TAVARES, Célia Regina Granhen. AVALIAÇÃO DO DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS E SUA RELAÇÃO COM A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM UM RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO. *Engevista*, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 294, 14 dez. 2016. Pro Reitoria de Pesquisa, Pos Graduacao e Inovacao - UFF. <http://dx.doi.org/10.22409/engevista.v18i2.730>.

Contatos: 31989543@mackenzista.com.br e miriam.gouvea@mackenzie.br