

# Principais aspectos da produção de bioenergia por meio de resíduos sólidos urbanos

ESCHHOLZ, Amanda Cristina Cruz  
SERÊJO, Luydson Ferreira

## Resumo

Atualmente, o cenário global apresenta aspectos característicos como o elevado consumo de combustíveis fósseis, crescimento populacional descontrolado, produção crescente e exorbitante de resíduos, além de má gestão, tratamento inadequado e disposição final precária dos mesmos, levando a problemas ambientais como a poluição do solo, das águas e principalmente do ar. Tais aspectos e desafios ambientais refletem significativamente no processo de transição energética e de demanda de energia limpa e renovável, voltando-se então para o processo de recuperação energética dos resíduos como uma forma de enfrentar esses desafios. O objetivo deste trabalho é realizar um levantamento bibliográfico sobre os principais aspectos da produção de bioenergia por meio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU), transparecendo o potencial energético associado a esse processo. Para isso, foram utilizadas plataformas de busca de bibliografia acadêmica como Google Acadêmico, Scielo, Periódico Capes, e entre outros, sendo pesquisado palavras-chaves em língua inglesa e portuguesa como: bioenergia, resíduos sólidos urbanos, *Waste to Energy* (WTE) e, dentre outras, totalizando 21 trabalhos. A partir desses trabalhos selecionados, pode-se afirmar que a utilização dos resíduos sólidos urbanos para a produção de bioenergia é uma alternativa promissora para amenizar os impactos ambientais associados a esses resíduos e, concomitantemente, produzir energia. Isso porque as tecnologias de conversão de RSU em energia, denominadas de *Waste to Energy* (WTE), apesar de exibirem limitações tecnológicas, apresentam viabilidade econômica e estratégica devido demonstrarem eficiência energética razoável e diversas vantagens frente aos problemas abordados, principalmente os associados ao tratamento dos resíduos, indicando um futuro tecnológico promissor.

**Palavras-chave:** Matéria Orgânica; *Waste to Energy* (WTE); Transição Energética.

## Abstract

Currently, the global scenario has characteristics such as the high consumption of fossil fuels, uncontrolled population growth, growing and exorbitant production of waste, as well as poor management, inadequate treatment and precarious final disposal of the same, leading to environmental problems such as soil pollution, water and especially air. Such environmental aspects and challenges significantly reflect in the process of energy transition and demand for clean and renewable energy, turning to the process of energy recovery from waste as a way to face these challenges. The objective of this work is to carry out a bibliographic survey on the main aspects of bioenergy production through the organic fraction of urban solid waste (MSW), showing the energy potential associated with this process. For this, we used academic bibliography search platforms such as Google Scholar, Scielo, Periodical Capes, and among others, searching for keywords in English and Portuguese such as: bioenergy, urban solid waste, Waste to Energy (WTE) and, among others, totaling 21 works. From these selected works, it is arguable that the use of urban solid waste for the production of bioenergy is a promising alternative to mitigate the environmental impacts associated with these wastes and, at the same time, to produce energy. This is because the technologies for converting MSW into energy, called Waste to Energy (WTE), despite exhibiting technological limitations, are economically and strategically viable because they demonstrate reasonable energy efficiency and several advantages in the face of the problems addressed, especially those associated with the treatment of waste, indicating a promising technological future.

**Keywords:** Organic matter; Waste to Energy (WTE); Energetic Transition.

### **Resumen**

En la actualidad, el escenario mundial presenta características como el alto consumo de combustibles fósiles, el crecimiento descontrolado de la población, la creciente y desorbitada producción de residuos, así como el mal manejo, tratamiento inadecuado y precaria disposición final de los mismos, lo que genera problemas ambientales como la degradación del suelo, contaminación del agua y sobre todo del aire. Tales aspectos y desafíos ambientales se reflejan significativamente en el proceso de transición energética y la demanda de energías limpias y renovables, recurriendo al proceso de valorización energética de los residuos como forma de afrontar estos desafíos. El objetivo de este trabajo es realizar un levantamiento bibliográfico sobre los principales aspectos de la producción de bioenergía a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), mostrando el potencial energético asociado a este proceso. Para ello, utilizamos plataformas de búsqueda de bibliografía académica como Google Scholar, Scielo, Periodical Capes, y entre otras, buscando palabras clave en inglés y portugués como: bioenergía, residuos sólidos urbanos, *Waste to Energy* (WTE) y, entre otras, totalizando 21 obras. De estos trabajos seleccionados, se puede decir que el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos para la producción de bioenergía es una alternativa promisoriosa para mitigar los impactos ambientales asociados a estos residuos y, al mismo tiempo, producir energía. Esto se debe a que las tecnologías de conversión de RSU en energía, denominadas *Waste to Energy* (WTE), a pesar de presentar limitaciones tecnológicas, son económica y estratégicamente viables porque demuestran una eficiencia energética razonable y diversas ventajas frente a los problemas abordados, especialmente los asociados a el tratamiento de residuos, lo que indica un futuro tecnológico prometedor.

**Palabras clave:** Materia Orgánica; *Waste to Energy* (WTE); Transición Energética.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, os principais desafios ambientais que o mundo enfrenta referem-se à segurança energética, gestão de resíduos e mudanças climáticas. Relacionados a estes desafios, o aquecimento global, a poluição do ar e da água e a contaminação do solo são os problemas ambientais mais evidenciados nas últimas décadas, sendo decorrentes da elevada produção de resíduos orgânicos e/ou também do elevado consumo de combustíveis fósseis (DABE et al., 2018). O Brasil, por meio da Lei 12.305/10 e de outras normas ambientais, criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos visando proporcionar a gestão adequada dos resíduos sólidos produzidos no país (MÉLO-SCHLUB, 2019).

Em relação aos resíduos sólidos urbanos (RSU), a EOS Organização e Sistemas (2018) relata que a população mundial produz cerca de 1,4 bilhões de toneladas de RSU por ano, o que significa uma média de 1,2 kg per capita ao dia. Já o Brasil possui uma média de 1,0 kg de lixo por dia por pessoa, o que corresponde a 80 milhões de toneladas de resíduos a cada ano (AGÊNCIA BRASIL, 2021). Portanto, existe uma grande quantidade de produção de resíduos em todo o mundo e com estimativa de crescimento, alcançando até 2,2 bilhões de toneladas por ano até o ano de 2025 devido a fatores como a mudança de estilo de vida e desenvolvimento econômico (DABE et al., 2018; VAISH et al., 2016).

Somado às questões ambientais e de gestão de resíduos mencionadas, o crescimento populacional descontrolado resulta no aumento da demanda de energia sustentável, proporcionando a busca por novas fontes e recursos de energia limpa e renovável, como a bioenergia. Além disso, a Agência Internacional de Energia - IEA (2020) aponta que o carvão mineral e o petróleo são as fontes primárias de energia de maior participação no sistema global de energia e, conseqüentemente, de maior contribuição para a emissão de gás carbônico que é um dos gases do efeito estufa, totalizando quase 80% das emissões.

Foi estimado pela IEA que até o ano de 2035 a demanda mundial de energia irá aumentar para 17 bilhões de toneladas de óleo equivalente e a emissão de dióxido de carbono deverá aumentar de 29 para 43 Gt/ano, demonstrando a necessidade do aumento do uso de energias renováveis (VAISH et al., 2016).

Segundo Dabe e colaboradores (2018), a energia produzida a partir da biomassa de resíduos (fração orgânica) como matéria-prima será uma das fontes primordiais de energia renovável e resolverá os desafios de gerenciamento dos resíduos no futuro, podendo ser denotada como “resíduos renováveis”. Esse uso produtivo de resíduos irá beneficiar financeiramente e ambientalmente a sociedade, abrindo caminho para o processo de recuperação e aproveitamento

máximo da energia armazenada nos resíduos, ajudando na descarbonização - reduzindo as emissões nocivas e poluentes de metano, além de reduzir o volume de resíduos - diminuindo o espaço utilizado de aterro e atenuando todos os impactos negativos associados ao descarte dos resíduos pelos diversos setores (DHANYA et al., 2020; UDDIN et al., 2021).

Portanto, considerando a demanda de energia sustentável associada à transição energética global e que a produção de resíduos é inevitável e sua gestão é vital, este artigo tem como objetivo analisar, de forma geral, os principais aspectos da utilização de resíduos RSU para a geração de bioenergia, destacando o cenário global atual, sua importância no cenário futuro além de descrever as características das tecnologias de conversão de biomassa e questões de viabilidade econômica e estratégica.

### **Cenário Atual, Global e Brasileiro**

As taxas de geração de resíduos sólidos urbanos têm aumentado exponencialmente nos países desenvolvidos e em desenvolvimento devido a fatores como a rápida urbanização e crescimento populacional urbano, sendo que 33% do total de resíduos sólidos gerados no mundo referem-se às regiões sul e leste da Ásia (VAISH et al., 2016). Segundo dados do Banco Mundial (2018), o leste Asiático e Pacífico apresentam mais da metade dos resíduos compostos de alimentos e resíduos verdes, resultando em uma porcentagem de 53%. Além disso, apenas 46% do lixo é descartado em alguma forma de aterro, cerca de 9% dos resíduos são reciclados e 24% são incinerados, sobretudo em países de alta renda. No geral, a tendência mundial é que a maioria das nações apresentem resíduos com composição de fração orgânica (FO) por volta de 50%. Outro exemplo refere-se a região da América Latina e Caribe, que possui cerca de 52% dos resíduos sólidos urbanos classificados como alimentos e resíduos verdes e, mais especificamente, a composição típica de RSU do Brasil é de 50% de FO, 40% de embalagens e 10% de inertes, representando disponibilidade de 40 Mt/a de matéria orgânica (DALMO et al., 2018). Estes dados demonstram que as nações apresentam potencial geração de energia a partir da biomassa dos RSU, seja na forma de calor ou eletricidade, visto que apresentam taxas relativamente altas de fração orgânica em comparação ao restante de sua composição.

Ainda em relação a esse potencial energético de biomassa a partir de resíduos sólidos urbanos, Vaish e colaboradores (2016) apontaram os seguintes valores: 1460 megawatts (MW) gerados a partir de resíduos sólidos pela Índia; 1170 PJ/ano em 2020 e 3454 PJ/ano em 2050 pela China; 500–600 PJ de energia pelo Japão; 400 MW pela Malásia; dentre outros. Associado a esses potenciais e também à demanda energética, ocorreu nos últimos anos um aumento considerável de

usinas de energia para resíduos *Waste to Energy* (WTE), sendo que existem atualmente cerca de 2448 dessas usinas operando ao redor do mundo, com 520 localizadas apenas na Europa (ABREN, 2021). Com respeito ao Brasil, Dalmo e colaboradores (2018) relataram que em 2017 havia no país um total de 15 usinas em operação, tal que a usina de São João Biogás, localizada no estado de São Paulo, e a de Salvador, localizada na Bahia, apresentavam as maiores potências outorgadas, correspondendo a 21.560 kW e 19.730 kW, respectivamente. Todavia, a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN) apontou em maio de 2021 que o país pode apresentar em um futuro próximo a construção de 114 novas usinas em 28 regiões metropolitanas com população acima de 1 milhão de habitantes devido a essa abordagem de produção de energia através de resíduos, podendo ser uma solução de saneamento para as cidades. Ainda, segundo a associação (ABREN), as usinas WTE apresentam uma concepção positiva de investimento, podendo atingir mais de R\$ 77 bilhões nos próximos anos e atender até 3% da demanda brasileira de eletricidade (ABREN, 2021).

Assim, a conversão de resíduos em energia é uma das opções disponíveis atualmente para realizar o gerenciamento de resíduos sólidos, apresentando bons aspectos de investimento e permitindo o alcance de metas de sustentabilidade pelas nações em desenvolvimento e desenvolvidas, além de minimizar os problemas ambientais relacionados à quantidade de resíduos e às práticas de gestão inadequadas, visto que o tratamento via WTE reduz em 98% o volume do resíduo urbano e em 70% a massa, eliminando tanto a fração orgânica quanto inorgânica (ABREN, 2021; VAISH et al., 2016).

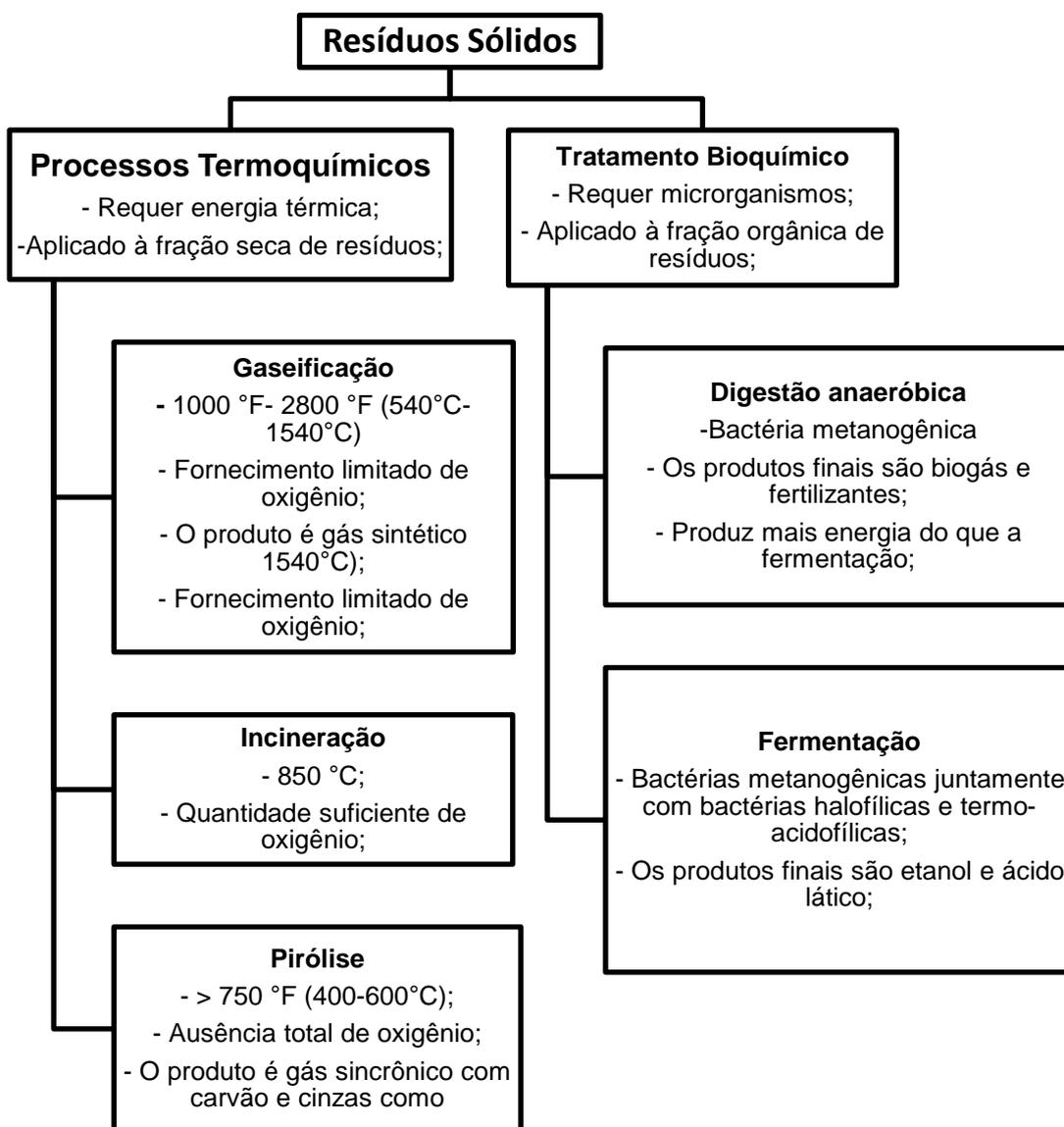
## **Tecnologias de Conversão**

Existem diversas rotas tecnológicas para o processamento da biomassa do RSU visando converter esses resíduos em formas utilizáveis de energia, o que inclui vias por processos termoquímicos ou por tratamento bioquímico (Fluxograma 1). A composição dos resíduos é um fato determinante no tipo de tecnologia a ser utilizada e no conteúdo energético desses resíduos, sendo que essa composição varia de região para região, como apresentado anteriormente (MORELLO, 2020; VAISH et al., 2016).

As estações de tratamento que existem hoje apresentam um histórico de diversos estudos de gerenciamento de resíduos e estágios de desenvolvimento que possibilitaram sua chegada nos países e, para as futuras instalações, não será diferente. Estes estudos incluem análise de fatores como as características da região, tais como a população, condição climática e status

socioeconômico, além de fatores financeiros como o custo de instalação, custo recorrente e custo-benefício. Ainda, vale ressaltar que o objetivo dessas estações é reduzir a quantidade de resíduos e, posteriormente, extrair energia, sendo que o aproveitamento energético por meio desses procedimentos tecnológicos possibilita a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e minimização de problemas oriundos da destinação desses resíduos. Como referência, cerca de 11% dos resíduos produzidos no mundo são tratados pelas usinas WTE, gerando aproximadamente 429 TWh de energia (VAISH et al., 2016).

Figura 1 - Rotas tecnológicas para a conversão de resíduos em energia



Fonte: Adaptado de VAISH et al. (2016).

Em relação às especificações das rotas tecnológicas, apresentadas na Figura 1, destaca-se que os processos termoquímicos são os mais comumente utilizados e dividem-se em incineração, pirólise e gaseificação, sendo mencionados respectivamente na ordem decrescente de usualidade. Em um estudo comparativo das possibilidades tecnológicas existentes feito por Murphy e McKeogh (2004), a gaseificação apresentou-se como preferencial para a produção de energia elétrica, alcançando uma produção elétrica em torno de 1083 kWh/t de RSU em relação, por exemplo, à incineração, que apresentou produção de eletricidade de cerca de 200 kWh/t.

A utilização da incineração dos resíduos para a geração de eletricidade corresponde a um processo térmico realizado em elevadas temperaturas (900°C a 1250°C) que objetiva reduzir o volume de lixo gerado com maior rapidez (VGR, 2020). Em geral, segundo dados de 2014 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o potencial de geração de energia a partir de RSU utilizando a incineração equivale a 3.176MW, mais de três vezes maior que a digestão anaeróbia (DALMO et al., 2018). Entretanto, este tratamento térmico não fornece perfis neutros para o ambiente quando comparado à fermentação, pois o dióxido de carbono, juntamente com o vapor de água, são os principais produtos finais desse processo. Em relação aos produtos químicos gerados nas tecnologias estudadas, a pirólise e a gaseificação também produzem misturas de substâncias, mas, no caso, referem-se a uma combinação de gases e óleos e que podem ser convertidos em combustíveis de transporte (VAISH et al., 2016).

Já os tratamentos bioquímicos separam-se em digestão anaeróbia e fermentação, como observado no Fluxograma 1. A biodigestão anaeróbia oferece vantagens quanto ao rendimento energético além de produzir também fertilizantes e ter capacidade de despoluição elevada, sendo merecida a descrição de suas etapas. Seu processo promove a transformação da matéria orgânica em um vetor portador de energia (biogás) pela ação de microorganismos em condições anóxicas/anaeróbias, ou seja, na ausência de gás oxigênio, gerando como produto o biogás constituído por metano (50-80%), dióxido de carbono e outros gases em menores quantidades. Este processo é constituído por quatro fases: hidrólise enzimática, onde os compostos orgânicos complexos (proteínas, hidratos de carbono e lipídios) são transformados em monômeros (como, por exemplo, aminoácidos e açúcares); acidogênese, caracterizada por uma reação de conversão desses monômeros em ácidos graxos voláteis (como propiônico e butírico); acetogênese, que converte esses produtos intermediários em ácido acético, dióxido de carbono e gás hidrogênio; e a metanogênese, que transforma os ácidos acéticos e demais gases em metano, dióxido de carbono e água (GÍRIO et al. 2020).

O biogás produzido, independente da rota utilizada, pode ser aplicado para a geração de calor e eletricidade, o que inclui processos como: a queima direta em caldeira, de tripla-geração,

com células de combustíveis ou com a utilização de motores-geradores. Entretanto, um desafio para utilização do biogás como fonte de energia é a remoção de contaminantes, visto que, por exemplo, o processamento por digestão anaeróbia (DA) gera biogás com impurezas como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e o monóxido de carbono (CO) que são prejudiciais para a natureza e para a saúde humana e que afetam a quantidade e qualidade do biogás. Ou seja, para o aumento de sua eficiência e rendimento energético, e para atender princípios de segurança química, é necessário atrelar aos sistemas tecnológicos processos de pré-tratamento, conhecidos como tratamentos preventivos, além dos pós-tratamentos para remover as substâncias indesejadas e perigosas (GÍRIO et al. 2020).

Em relação à fermentação, essa rota tecnológica consiste em um processo químico de obtenção de energia baseado na decomposição dos RSU auxiliada por microrganismos adequados, sendo obtido como produtos finais o etanol e ácido lático, que podem ser utilizados comercialmente, além também de poder obter biohidrogênio (HAY *et al.*, 2013). Ademais, destaca-se que as tecnologias de conversão de biomassa de resíduos orgânicos, como a fermentação para produção de bioetanol 2G e a gaseificação para combustíveis gasosos apresentam-se, segundo as perspectivas de valorização da fração biodegradável pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), como tecnologias com maturidade tecnológica desejável para implementações a curto e médio prazo pelas operadoras de gerenciamento dos resíduos.

## **VIABILIDADE ECONÔMICA E ESTRATÉGICA**

As limitações tecnológicas podem ser abordadas por alguns pontos de vista como, por exemplo, o financeiro, o de desafios operacionais e o de desafios políticos. Sabendo disso, o fato de algumas tecnologias serem ainda imaturas e em processo de crescimento de demanda, estimula esse mercado de tecnologia a encontrar soluções de gestão para os RSU e de sua conversão para energia elétrica e/ou biocombustíveis (VAISH et al., 2016).

### **Viabilidade Econômica**

O aspecto financeiro é um dos fatores de grande importância para a instalação de uma usina que converte resíduos em energia, pois há uma diversidade de custos de avaliações preliminares ao design e construção da usina. Investimento em biodigestores, mecanismos de bombeamento, diversas tubulações, além de geradores de energia tornam elevado o investimento inicial (VAISH et al., 2016).

O aproveitamento de eletricidade proveniente dos resíduos urbanos pode apresentar alguns modelos de negócios e que, por consequência, apresentam preços associados de mercados diferentes, sendo apontada melhor viabilidade de negócio para aqueles que combinam a produção de mais de um produto proveniente do lixo, ou seja, produzir em conjunto biometano e eletricidade, por exemplo. Um exemplo de modelo é a contratação via chamada pública pelas distribuidoras (VRES), que apresenta valores de até R\$ 561/MWh para projetos de RSU dependendo da tecnologia de geração distribuída adotada, sendo que esse valor seria suficiente para garantir a viabilidade econômica de biodigestão (BRASIL, 2020).

O custo nivelado de uma planta de incineração a partir de RSU apresenta uma diferença de R\$ 240/MWh a mais em relação ao preço da eletricidade atual médio pago pelas distribuidoras. Portanto, foi estimado que o empreendedor gerador deveria receber uma remuneração adicional em torno de R\$ 46/t ao valor atual recebido pela coleta visando compensar essa diferença e viabilizar a eletricidade a partir dos resíduos urbanos por iniciativa privada (BRASIL, 2020).

Um exemplo relacionado a conversão dos RSU (biomassa) em biocombustível, ou seja, um produto de valor energético, seria o estudo realizado em 2020 pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) que estimou o custo para a implementação de uma usina em um aterro com capacidade de processar 530 toneladas de resíduos por dia para produzir bioetanol, além do uso de RSU com condições de 50% de humidade (GÍRIO *et al.*, 2020). Na Figura 2 estão descritos os detalhes do caso estudado, valores estipulados em conjunto com a empresa Coelho & Diebold Lda.

Figura 2 - Casos de negócio 1: Biorrefinaria de RSU para bioetanol

Dados Básicos:		CAPEX	
Consumo de Biomassa (ton/dia)	530	Equipamentos (€)	16.980.000
Consumo de Biomassa (ton/ano)	185.000	Tecnologia e Engenharia (€)	2.900.000
Humidade da Biomassa	50%	Obras Civas/Outros (€)	1.500.000
Custo da Biomassa (€/ton)	0	<b>Total:</b>	<b>21.380.000</b>
Produção de BioEtanol (m <sup>3</sup> /dia)	49		
Produção de BioEtanol (m <sup>3</sup> /ano)	17.040	Custo dos Produtos Vendidos	
Preço de Venda do BioEtanol (€/m <sup>3</sup> )	750	Biomassa (€/ton)	0
Despesas Financeiras (10 anos)	2,5% ao ano	<sup>1</sup> Recursos Humanos (€/ano)	1.188.000
<b>Investimento (€)</b>	<b>21.380.000</b>	<sup>2</sup> Manutenção (€/ano)	629.000
<b>Receita Líquida (€)</b>	<b>12.780.000</b>	<sup>3</sup> Reagentes/Consumíveis (€/ano)	1.372.000
<b>Custo dos Produtos Vendidos (€)</b>	<b>6.500.000</b>	<sup>4</sup> Vapor e Efluentes (€/ano)	1.075.000
<b>Resultado Operacional (€)</b>	<b>6.275.000</b>	Eletricidade/Água/Outros (€/ano)	517.000
		Depreciação (€)	1.722.000

1. 33 empregados; 5 turnos, €36 k/ano/empregado
2. 4% do CAPEX de equipamentos
3. 90% enzimas, 10% ácidos, bases, nutrientes
4. Custo de vapor de €8/ton

Fonte: Adaptado de GÍRIO et al. (2020).

Já na tabela 1 é apresentado o custo para a produção de bioetanol e biogás por uma biorrefinaria com as mesmas condições citadas anteriormente, que é de €23.380.000 (que no câmbio de set/2020 correspondia a R\$147.211.969,12).

**Tabela 1 - Casos de negócio 2: Biorrefinaria de RSU para bioetanol + biogás + composto**

<b>Indicador</b>	<b>Tecnologia 1 (Bioetanol)</b>	<b>Tecnologia 2 (Bioetanol + Biogás)</b>
CAPEX	€21.380.000	€23.380.000 (€21.380.000 + €2.000.000)
OPEX	€6.500.000	€6.950.000 (€6.500.000 + €450.000)
Receita Líquida	€12.780.000	€13.380.000 (€12.780.000 + €600.000**)

Fonte: GÍRIO et al. (2020).

### **Viabilidade Estratégica**

A gestão de resíduos, como ressaltado ao longo de todo o artigo, é uma preocupação mundial quando se trata de questões ambientais como a redução de resíduos. Essa gestão é marcada por passos básicos como a prevenção, a recuperação e o descarte, e suas estratégias de conversão de resíduos em energia são de longe as mais valiosas do ponto de vista ambiental e econômico (VAISH et al., 2016). Além disso, nos dias de hoje é de extrema necessidade considerar integralmente características econômicas, ambientais e sociais no processo de tomada de decisão no tipo de tecnologia a ser implementada (SCARLAT et al., 2015).

Logo, para a instalação das usinas de transformação de resíduos em energia, deve ser considerado uma gama de objetivos que, por sua vez, devem estar alinhados ao planejamento estratégico para serem concluídos no prazo definido. Esse plano, por sua parte, deve incluir aspectos políticos e assistências técnicas e financeiras atreladas à pesquisa e desenvolvimento de cada vertente tecnológica (BRUNNER; RECHBERGER, 2015). Além do mais, como já foi dito, há desafios políticos para serem superados para a implementação das futuras usinas de

transformação de RSU em energia como: a aceitação social, devido aos possíveis riscos causados pelas substâncias que são manipuladas; o grande número de restrições a ser regulamentados; e a maximização de lucros por entidades sendo que há um custo inicial alto (VAISH et al., 2016).

Por último e, como mencionado anteriormente, a utilização do biogás como fonte de energia requer a implementação de um sistema tecnológico para a purificação dos contaminantes do biogás, pois, caso contrário, impactará na eficiência e função do mesmo. Portanto, o uso desses processos de tratamento preventivo e pós-tratamento geram um custo maior mas, ao mesmo tempo, representam uma estratégia considerável para o sucesso tecnológico (VAISH et al., 2016).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, diante o cenário atual de transição energética e aquecimento global, a produção de bioenergia por meio de resíduos sólidos urbanos torna-se uma oportunidade de dupla utilidade carregada de benefícios, pois além de produzir energia e outros produtos de valor energético, realçando a busca pelo aproveitamento energético, promove a redução do volume e massa desses resíduos, diminuindo conseqüentemente os impactos ambientais causados pelas ações antrópicas.

Em relação à viabilidade e implementação tecnológica, apesar da existência de limitações e desafios de diversas vertentes, todas as tecnologias de conversão disponíveis apresentam utilidade de acordo com a composição dos resíduos demonstrando resultados diferenciados, além de possuírem capacidade de transformar os resíduos em energia com eficiência razoável e valores de até R\$ 561/MWh para projetos de RSU no modelo VRES.

Posto isso, a conversão de RSU em bioenergia é uma alternativa crescentemente promissora conforme o avanço tecnológico e melhorias no âmbito político para suprir, junto com as demais fontes de energia renováveis, a demanda energética futura e a necessidade da conservação e preservação do planeta. Portanto, a perspectiva é de que, no futuro, as usinas *Waste to Energy* estarão completamente difundida, tendo em vista que esta pode ser melhor saída para amenizar nossos problemas crescente de resíduos (ou seja, sua alta produção e à falta de tratamento adequado e seguro) além de exibir um elevado potencial de geração de energia elétrica e de biocombustíveis.

## REFERÊNCIAS

ABREN – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. Brasil pode ter 2,3 GW e solução de saneamento com usinas WTE. *In: Canal Energia*. Rio de Janeiro, 13 mai. 2021.

Disponível em: <https://abren.org.br/2021/05/13/brasil-pode-ter-23-gw-e-solucao-de-saneamento-com-usinas-wte-canalenergia/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *PNE 2050: Plano Nacional de Energia*. Brasília, DF: MME/EPE, 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Modelos de negócios para a geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos*. Brasília - DF, 6 abr. 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/pt\\_](https://www.epe.gov.br/pt_). Acesso em: 30 maio 2022.

BRUNNER P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy—key element for sustainable waste management. *Waste Manag.* Austria, v. 37, p. 3-12, mar. 2015.

DABE S. J.; PRASAD, P. J.; VAIDYA, A. N.; PUROHIT, H. J. Technological Pathways for Bioenergy Generation from Municipal Solid Waste: Renewable Energy Option. *Environ. Prog. Sustain.* Índia, v.38, p. 654-671, 25 set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ep.12981>. Acesso em: 10 dez. 2021.

DALMO F. C. et al. Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: Experiência das políticas públicas brasileiras e internacional. *Rev. Brasileira de Energias Renováveis*, v. 7, n.1, p. 39-50, 25, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v7i1.57966>. Acesso em: 10 dez. 2021.

DHANYA B. S.; MISHRA, A.; CHANDEL, A. K.; VERMA, M. L. Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. *Sci. Total Environ*, v. 723 (138109), 25 jun. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32229385/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

EOS Organização e Sistemas Ltda. Os números dos resíduos sólidos no mundo. *Resíduos Sólidos*. 26 dez. 2018. Disponível em: <https://www.eosconsultores.com.br/os-numeros-dos-residuos-solidos-no-mundo/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

GÍRIO, F., et al. *Tecnologias de conversão de resíduos orgânicos: Âmbito do GT Energia-Resíduos*. LNEG. Portugal, set. 2020. Disponível em: <https://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/3557>. Acesso em: 10 dez. 2021.

GONÇALVES, E. 80 milhões de toneladas de resíduos são produzidos no país a cada ano. *Radioagência Nacional*. Meio ambiente, 13 ago. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/meio-ambiente/audio/2021-08/80-milhoes-de-toneladas-de-residuos-sao-produzidos-no-pais-cada-ano>. Acesso em: 10 dez. 2021.

HAY J. X.; WU, T. Y.; JUAN, J. C.; JAHIM, J. M. Biohydrogen production through photo fermentation or dark fermentation using waste as a substrate: overview, economics, and future prospects of hydrogen usage. *Biofuel Bioprod. Biorefin.* Malásia, v. 7, ed. 3, p. 334-352, 2013.

IEA - International Energy Agency. The oil and gas industry in energy transitions. *Relatório especial do World Energy Outlook*. jan. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-energy-transitions>. Acesso em: 31 mai. 2022.

KAZA, S. et al. What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. *World Bank Group*. Washington, DC, 20 set. 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MÉLO-SCHLUB, A. C. et al. Resíduos sólidos urbanos: potencial fonte de carbono para degradação microbiana e produção de biogás. *Braz. J. Dev.*, v. 5, n. 8, p. 11927-11942, 20 ago. 2019.

Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/2765/2747>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MORELLO, M. et al. Biomassa para produção de Energia Sustentável. *Rev. Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 10. Ed., v. 16, p. 81-102, 31 out. 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/energia-sustentavel>. Acesso em: 31 mai. 2022.

MURPHY, J. D.; McKEOGH, E. Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renew. Energy*, Irlanda, v. 29, p. 1043–1057, 2004.

SCARLT, N. et al. Evaluation of energy potential of municipal solid waste from african urban areas. *Renew. Sust. Energy, Rev.*, Itália, v. 50, p. 1269–1286, 2015.

SCARLT, N. et al. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union - an overview from national renewable energy action plans and progress reports. *Renew. Sust. Energy, Rev.*, Itália, v. 51, p. 969–985, 2015.

UDDIN, M. N. et al. Prospects of Bioenergy Production From Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini Review. *Front. Energy Res.*, China, 25 fev. 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.627093/full>. Acesso em: 10 dez. 2021.

VAISH, B. et al. Exploring untapped energy potential of urban solid waste. *Energy Ecol. Environ*, Varanasi, v. 1, p. 323–342, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40974-016-0023-x>. Acesso em: 10 dez. 2021.

VGR. Quais são as vantagens e as desvantagens da incineração do lixo?. *Tratamento de resíduos*. Belo Horizonte, 23 nov. 2020. Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/quais-sao-as-vantagens-e-as-desvantagens-da-incineracao-do-lixo/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

1 ESCHHOLZ, Amanda Cristina Cruz. Graduanda no curso de Química Bacharelado na Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, com pretensão de concluir em dezembro de 2023. Já atuou como aluna bolsista de iniciação científica (IFQ) no Laboratório de Síntese de Sistemas Heterocíclicos (LaSSH) na UNIFEI e fez parte do Grupo de Síntese Orgânica e Química Medicinal (GSOQM) cadastrado no DGP do CNPq. Realizou no primeiro semestre de 2021 a disciplina optativa intitulada de “Fundamentos de petróleo, gás natural e bioenergia”, onde pode desenvolver o presente trabalho, além de atualmente estar participando do curso de “Política energética, geração e uso de energia”. amandaeschholz@unifei.edu.br

2 SERÊJO, Luydson Ferreira. Possui técnico em Radiologia Médica pela *Escola* de Formação Profissional *Magnífica* e é formado no curso de Agroindústria no Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Maranhão – IFMA. Atualmente é graduando no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e pretende concluir em 2024. Realizou no primeiro semestre de 2021 a disciplina optativa intitulada de “Fundamentos de petróleo, gás natural e bioenergia” na UNIFEI. luydson@unifei.edu.br