



Ministério da Educação – Brasil
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Minas Gerais – Brasil
Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas
ISSN: 2238-6424
Nº. 28 – Ano XIII – 10/2025
<https://revistas.ufvjm.edu.br/vozes>
DOI: <https://doi.org/10.70597/vozes.v13i28.1037>

Avaliação do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Teófilo Otoni – MG

Douglas Adriano Pereira

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Discente do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – ICET
Teófilo Otoni/MG – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5714002251080368>
E-mail: douglas.pereira@ufvjm.edu.br

Lorranny Batista do Santos Keller

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Discente do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – ICET
Teófilo Otoni/MG – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7348693451588133>
E-mail: lorranny.santos@ufvjm.edu.br

Romeu Soares da Silva

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Discente do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – ICET
Teófilo Otoni/MG – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2906013010152491>
E-mail: romeu.silva@ufvjm.edu.br

Carolina Coelho Martuscelli Castañon

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Docente do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – ICET
Teófilo Otoni/MG – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3992383846731653>
E-mail: carolina.martuscelli@ufvjm.edu.br

Aruana Rocha Barros Lopes

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Docente do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – ICET
Teófilo Otoni/MG – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9270383646400992>
E-mail: aruana.barros@ufvjm.edu.br

Resumo: O presente artigo avalia o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de Teófilo Otoni-MG, destacando a possibilidade de geração de energia elétrica a partir do metano produzido pela decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos. Com base em dados populacionais e gravimétricos, aplicou-se a metodologia simplificada do ([Ipcc, 1996](#)), estimando uma produção anual de 2.325 toneladas de metano, com potencial de gerar até 5,8 GWh/ano de energia elétrica. Esse volume seria suficiente para abastecer aproximadamente 3.685 residências, beneficiando mais de 10 mil pessoas — cerca de 7% da população local. O estudo evidencia os impactos da disposição inadequada dos RSU e propõe o aproveitamento energético como alternativa sustentável, alinhada à Política Nacional de Resíduos Sólidos. A adoção de tecnologias de captação e conversão do biogás pode transformar um passivo ambiental em uma fonte renovável, promovendo benefícios ambientais, sociais e econômicos para o município.

Palavras-chave: biogás, energia, metano, resíduos, sustentabilidade.

1 Introdução

Com a evolução da sociedade e o avanço tecnológico ao longo dos anos, o problema da geração de resíduos se agravou consideravelmente. Esse aumento está relacionado à produção em massa de produtos descartáveis, à obsolescência programada e ao consumo excessivo. Esse cenário transformou a gestão dos resíduos em uma preocupação global ([Fing; Gonçalves, 2020](#)). No Brasil, dados do Panorama de 2024 da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (Abrema) apontam uma geração de 81 milhões de toneladas em 2023.

Esse volume expressivo de resíduos, quando mal administrado, traz diversas consequências negativas, tanto ambientais quanto sociais. O descarte inadequado do lixo contribui diretamente para a proliferação de doenças como zika, febre amarela, peste bubônica e dengue — esta última responsável por uma epidemia no Brasil em 2023. Isso ocorre porque o lixo se torna um ambiente propício para a reprodução e abrigo de vetores. Além disso, a má gestão dos resíduos sólidos urbanos agrava problemas como alagamentos e poluição de corpos hídricos, evidenciando a importância do tema não apenas como uma questão ambiental, mas também de saúde pública e econômica ([Gomes; Belém, 2022](#)).

No entanto, em cidades como Teófilo Otoni, localizada no Vale do Mucuri, Minas Gerais, a situação é ainda mais crítica devido à existência de um lixão, que, basicamente, é a única forma utilizada para a disposição dos resíduos sólidos urbanos ([Oliveira et al., 2025](#)). Essa realidade é compartilhada por diversas cidades brasileiras, pois 41% dos resíduos sólidos são dispostos de forma inadequada ([Abrema, 2024](#)), o que evidencia a gravidade da situação, mesmo após a promulgação da Lei nº 12.305/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e proibiu o uso de lixões como forma de disposição final ([Brasil, 2010](#)).

Esse cenário levou, nos últimos anos, a administração pública de Teófilo Otoni a ser multada por manter a prática de descarte inadequado de resíduos sólidos ([Oliveira et al., 2025](#)). Entretanto, com a escassez de recursos da cidade — que conta com um orçamento de R\$ 19.776.300,00 para

a gestão ambiental de todo o município ([Teófilo Otoni, 2023](#)) —, torna-se inviável realizar grandes intervenções estruturais. Diante disso, alternativas viáveis incluem parcerias público-privadas ou consórcios intermunicipais, que poderiam viabilizar soluções mais adequadas e sustentáveis para a destinação dos resíduos na região ([Brasil, 2023](#)).

Apesar dos desafios, há oportunidades que podem reverter esse quadro. Se os resíduos forem corretamente dispostos em aterros sanitários e combinados com práticas de reciclagem, seja por meio da própria gestão municipal ou com o apoio de associações de catadores, como a Associação de Catadores de Materiais Recicláveis Nova Vida (ASCANOVI), presente na cidade ([Santos; Barden, 2023](#)), é possível reduzir significativamente a quantidade de materiais enviados ao aterro. Além disso, essa ação pode gerar receita estável tanto para os catadores quanto para a administração pública ([Dias; Balieiro, 2024](#)).

Adicionalmente, o gás metano gerado pela decomposição da matéria orgânica em ambientes anaeróbicos pode ser convertido em biogás — um recurso energético valioso. Esse biogás pode ser utilizado tanto para a geração de energia elétrica quanto como substituto de combustíveis fósseis ([Abrema, 2024](#)). Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás), o Brasil já possui 1.365 plantas de produção de biogás, sendo que mais de 86% da produção nacional é destinada à geração de eletricidade, demonstrando o potencial financeiro e energético dessa alternativa ([Silva, 2020](#)).

Estudos indicam que o Brasil desperdiça anualmente uma quantidade significativa de energia que poderia ser gerada a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. De acordo com a International Solid Waste Association (ISWA), se os resíduos dispostos de forma inadequada fossem aproveitados energeticamente por meio da recuperação de biogás, seria possível gerar mais de 12 TWh por ano de energia elétrica — o equivalente ao consumo anual de cerca de seis milhões de residências brasileiras.

A ([Abrema, 2024](#)) também destaca que, com uma gestão eficiente e tecnologias já disponíveis no mercado, até 20% da demanda energética residencial do país poderia ser suprida apenas com o aproveitamento energético do lixo orgânico. Esse cenário revela não apenas o desperdício de um recurso estratégico, mas também o potencial transformador dessa abordagem em termos ambientais, energéticos e econômicos.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo avaliar o potencial energético dos resíduos da cidade de Teófilo Otoni (MG), propondo que essa estratégia se configure como uma solução sustentável, capaz de transformar o aterro em uma estrutura autossustentável, especialmente do ponto de vista econômico.

2 Revisão de literatura

2.1 Resíduos sólidos urbanos: conceito e classificação

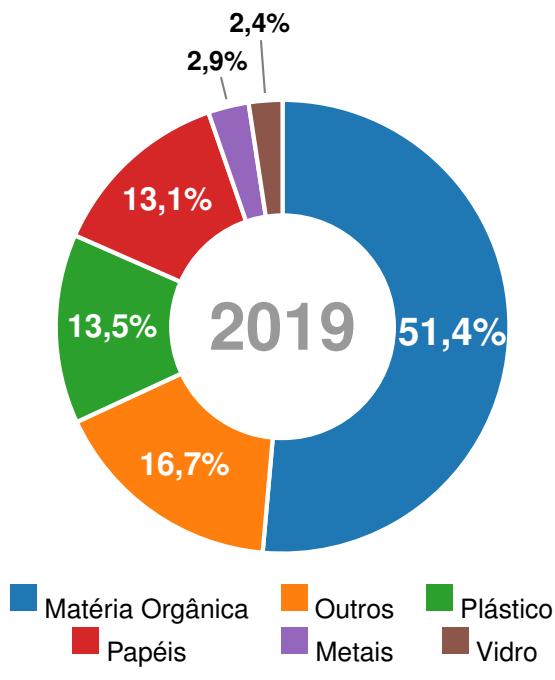
Segundo a PNRS ([Brasil, 2010](#)), os resíduos sólidos podem ser conceituados como todo material, substância, objeto ou bem descartado, resultante das atividades humanas, nos estados sólido ou semissólido. Essa definição evidencia a ampla gama de itens incorporados por essa legislação.

No entanto, os resíduos podem ser classificados, com base em suas propriedades, nas seguintes categorias:

- Matéria orgânica: composta por resíduos de origem vegetal ou animal que se decompõem naturalmente. Exemplos: restos de alimentos, podas, cascas.
- Recicláveis secos: materiais que não sofrem decomposição orgânica e podem ser reaproveitados após o descarte, por meio de processos de reciclagem. Exemplos: papel, papelão, plástico, metais, vidro.
- Rejeitos: resíduos que não apresentam outra destinação viável além da disposição final em local ambientalmente adequado. Exemplos: fraldas descartáveis, absorventes, cerâmica contaminada.
- Resíduos perigosos: aqueles que, devido a características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade ou mutagenicidade, representam riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Exemplos: pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes.

A composição e a quantificação de cada uma dessas classes é denominada composição gravimétrica, a qual varia de acordo com fatores como clima, costumes locais, atividades econômicas, faixa etária da população, entre outros. Realizar essa análise é essencial não apenas para compreender a forma como os resíduos sólidos são gerados no município, mas também para avaliar o potencial energético dos resíduos produzidos (Mattei; Escosteguy, 2007). Na Figura 1 é mostrado um gráfico de composição dos resíduos sólidos no Brasil em 2019.

Figura 1 – Gráfico de composição dos resíduos sólidos no Brasil em 2019



No gráfico de composição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (Figura 1) é evidenciado o alto potencial para o aproveitamento energético desses materiais. A predominância da fração orgânica permite a geração de biogás, enquanto resíduos recicláveis como plásticos e papéis, quando não recuperados, podem ser utilizados em tecnologias de recuperação energética, como a incineração com geração de calor e eletricidade, porém, a maior parte desse material pode ser reciclado. Esse cenário reforça a importância de políticas públicas que promovam a valorização energética dos resíduos (Palermo; Branco; Freitas, 2020).

2.2 Aproveitamento energético dos resíduos sólidos

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos, como já mencionado, pode ser uma alternativa extremamente interessante, pois, além de possibilitar uma forma ambientalmente adequada para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), ainda permite a geração de energia. Inspirado na célebre frase de Lavoisier (1990) “nada se perde, tudo se transforma”, esse princípio se baseia na ideia de transformar aquilo que já não tem mais utilidade em uma nova fonte energética (Palermo; Branco; Freitas, 2020). No entanto, existem diferentes métodos para realizar esse processo:

- **Incineração:** Consiste na queima controlada dos resíduos a altas temperaturas, reduzindo seu volume e gerando energia térmica, que pode ser convertida em eletricidade. É uma técnica eficiente para resíduos com alto poder calorífico, como os plásticos secos, por exemplo. No entanto, gera poluentes atmosféricos e, por isso, exige sistemas rigorosos de controle ambiental para mitigar os impactos negativos à saúde e ao meio ambiente (Palermo; Branco; Freitas, 2020).
- **Gaseificação e pirólise:** São processos termoquímicos que transformam os resíduos em gases combustíveis ou óleos, em condições controladas de ausência ou baixa presença de oxigênio. O gás resultante pode ser usado na geração de energia elétrica ou térmica (Barbosa; Fialho, 2024).
- **Biodigestão anaeróbica:** Processo biológico em que microrganismos decompõem resíduos orgânicos na ausência de oxigênio, produzindo biogás (rico em metano) que pode ser usado como combustível. O resíduo restante pode ser aproveitado como biofertilizante (Palermo; Branco; Freitas, 2020).
- **Aterros com captação de biogás:** A decomposição de resíduos em aterros sanitários gera biogás, que pode ser captado e utilizado como fonte de energia. É uma forma de reduzir emissões de metano e gerar eletricidade ou calor (Palermo; Branco; Freitas, 2020).

A escolha do método mais adequado para o aproveitamento energético dos resíduos depende de diversos fatores, como a composição dos resíduos, o volume gerado, a infraestrutura disponível, os custos envolvidos e os impactos ambientais associados. Cada técnica apresenta vantagens e limitações, sendo mais indicada para contextos específicos. Por exemplo, a incineração pode ser

mais viável em centros urbanos com grande produção de resíduos secos, enquanto a biodigestão anaeróbica é ideal para locais com alto volume de resíduos orgânicos, como zonas rurais ou municípios com forte atividade agroindustrial (Souza *et al.*, 2014).

Além disso, a integração de diferentes tecnologias pode potencializar os resultados, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos. Assim, o aproveitamento energético não apenas contribui para a redução do volume de resíduos destinados a aterros, mas também oferece oportunidades econômicas e ambientais, alinhando-se aos princípios da economia circular e da transição para uma matriz energética mais limpa e diversificada (Palermo; Branco; Freitas, 2020).

2.3 Sustentabilidade e a valorização energética dos resíduos

O impacto ambiental dos resíduos sólidos é uma preocupação crescente, especialmente com o aumento proporcional de sua geração (Mota *et al.*, 2010). Há diversos exemplos desses impactos, como a mortandade de animais marinhos que ingerem resíduos, a contaminação do solo e dos corpos hídricos, fatores que contribuem significativamente para a perda da biodiversidade da fauna e da flora. Dessa forma, é evidente que os resíduos geram uma ampla gama de implicações e problemas ambientais (Zabotto, 2019).

Diante desse cenário, a gestão adequada dos resíduos sólidos não elimina completamente os impactos ambientais, mas busca minimizá-los e evitar casos extremos, como a contaminação de rios, lagos e aquíferos. Essa gestão pode ocorrer de diferentes formas, dependendo da realidade local, da infraestrutura disponível e da conscientização da população, sendo fundamental para a construção de cidades mais sustentáveis e resilientes (Sebrae, 2023).

A sustentabilidade está no equilíbrio entre os fatores econômico, social e ambiental. Por isso, a gestão dos resíduos sólidos deve considerar esses três pilares de forma integrada. É fundamental investir tanto na conscientização da sociedade quanto na busca por soluções economicamente viáveis que garantam a correta destinação final dos resíduos. Além disso, a valorização dos resíduos por meio da reutilização, reciclagem e recuperação energética representa uma estratégia importante para reduzir o impacto ambiental, gerar empregos e fomentar a economia circular (Cunha *et al.*, 2014).

Segundo a PNRS (Brasil, 2010), a gestão dos resíduos sólidos, para ser bem-sucedida, pode utilizar estratégias de engajamento conjunto de governos, empresas e cidadãos. Políticas públicas claras, infraestrutura adequada e educação ambiental são elementos essenciais para promover a redução, o reaproveitamento e o descarte consciente dos resíduos. Assim, é possível avançar rumo a um modelo mais sustentável, que preserve os recursos naturais, proteja os ecossistemas e garanta qualidade de vida para as futuras gerações.

2.4 Indicadores de geração de resíduos

Os indicadores de geração de RSU são ferramentas fundamentais para a formulação, monitoramento e avaliação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos resíduos. Eles permitem

mensurar, de maneira quantitativa, a quantidade de resíduos gerados por uma população em determinado intervalo de tempo, servindo como base para o planejamento de ações de coleta, tratamento e destinação final ([Cetrulo et al., 2020](#)).

O principal indicador utilizado é a produção per capita de resíduos sólidos urbanos, normalmente expressa em quilogramas por habitante por dia (kg/hab.dia). Esse valor pode variar amplamente conforme fatores socioeconômicos, culturais, climáticos e demográficos. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, a média nacional gira em torno de 1,039 kg/hab.dia, segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil ([Abrema, 2024](#)). No entanto, grandes centros urbanos tendem a apresentar valores superiores, devido ao consumo elevado e à urbanização acelerada.

Outros indicadores relevantes incluem:

- **Índice de coleta de resíduos sólidos:** representa a proporção de resíduos efetivamente coletados em relação à quantidade total gerada.
- **Taxa de recuperação de recicláveis:** mede a porcentagem de resíduos que são redirecionados para reciclagem em vez de serem descartados em aterros.
- **Percentual de resíduos orgânicos na composição gravimétrica:** importante para avaliar o potencial de compostagem ou biodigestão anaeróbica (Mattei; Escosteguy, 2027).
- **Índice de disposição adequada:** mostra a fração de resíduos descartados de forma ambientalmente correta, como em aterros sanitários licenciados.

Segundo o estudo de [Besen et al. \(2025\)](#), municípios que integram esses indicadores em seus Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) apresentam melhores resultados em termos de eficiência operacional, controle ambiental e viabilidade econômica. Além disso, tais indicadores são essenciais para avaliar o desempenho da gestão ao longo do tempo, identificar gargalos e propor melhorias contínuas no sistema de manejo.

A correta interpretação desses dados também permite estimar o potencial energético dos resíduos gerados. Por exemplo, um município que apresenta elevada geração de resíduos recicláveis secos e matéria orgânica pode estruturar políticas públicas voltadas à geração de energia via incineração ou biodigestão, reduzindo a dependência de aterros sanitários e contribuindo para a transição energética sustentável ([Pereira et al., 2024](#); [Lange et al., 2023](#))

Dessa forma, os indicadores de geração de resíduos são instrumentos estratégicos não apenas para mensuração e diagnóstico, mas também para a implementação de soluções tecnológicas e sustentáveis no campo da gestão de resíduos sólidos urbanos, em consonância com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos ([Brasil, 2010](#)) e da economia circular.

2.5 Estudos correlatos

[Pereira et al. \(2024\)](#) desenvolveram um estudo voltado ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Niterói (RJ), que possui uma população de aproximadamente

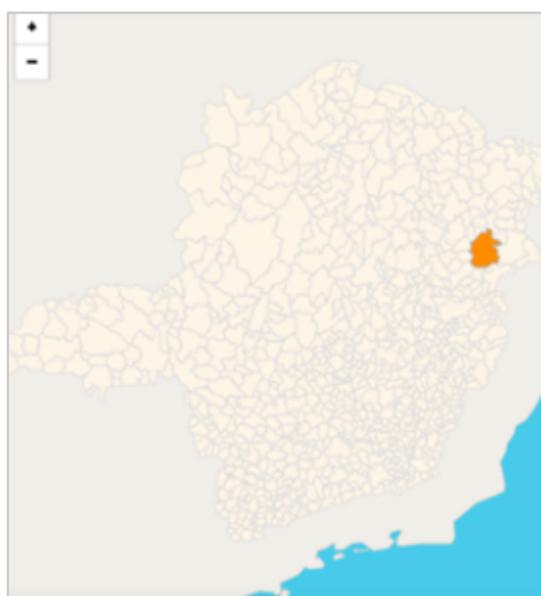
516.720 habitantes ([Brasil, 2023](#)). A pesquisa foi fundamentada no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) e incluiu análises gravimétrica, elementar e imediata dos resíduos coletados. Com base nesses dados, aplicou-se o modelo de Dulong modificado para estimar o poder calorífico médio dos resíduos, que resultou em 10,86 MJ/kg. Os resultados indicam que o avanço da coleta seletiva e a redução da disposição em aterros sanitários tornam viável a adoção de tecnologias como incineração e a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) como alternativas sustentáveis para geração de energia.

Por sua vez, [Lange et al. \(2023\)](#) analisaram o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos destinados ao Aterro Sanitário do Consórcio Intermunicipal Serra São Miguel, localizado no município de Ibirama, em Santa Catarina. A avaliação contemplou a composição gravimétrica, o teor de umidade e o poder calorífico inferior dos materiais. Os resíduos com maior potencial energético foram os plásticos (7,923 kWh/kg) e o papel/papelão (2,825 kWh/kg). Com esses dados, foram simulados diferentes cenários de aproveitamento energético. No cenário sem reciclagem, a tecnologia de gaseificação apresentou o melhor desempenho, com geração estimada de 29,34 MWh/dia — energia suficiente para suprir cerca de 4.366 residências. Já no cenário ideal, com 100% de reciclagem, a geração energética foi de 8,27 MWh/dia, atendendo aproximadamente 1.231 residências, o que representa cerca de 28% do total de domicílios do município.

3 Metodologia

O município de Teófilo Otoni, localizado no Vale do Mucuri, no estado de Minas Gerais, possui uma população estimada em 142.571 habitantes em 2024 e uma área territorial de 3.242,27 km² ([Ibge, 2024](#)), conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Município de Teófilo Otoni, localizado no Vale do Mucuri, no estado de Minas Gerais



Fonte: ([Ibge, 2024](#))

O levantamento dos dados sobre os resíduos sólidos do município foi realizado com base em tabelas do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) ([Brasil, 2023](#)),

sendo utilizados os dados mais recentes disponíveis, referentes ao ano de 2022. Já a análise gravimétrica teve como referência um estudo realizado em 2015 pela empresa SHS Engenharia Sustentável contratada pela própria administração municipal.

Após a obtenção dos dados, passa-se à escolha da metodologia para o cálculo da geração de metano. Neste trabalho, será adotada a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas ([Ipcc, 1996](#)), que apresenta dois métodos: o método simplificado e o modelo de decomposição de primeira ordem. O primeiro permite estimar o total de metano emitido em um determinado ano, com base na quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos gerados. Já o segundo considera o perfil de emissões de biogás ao longo do tempo, permitindo uma análise mais detalhada e temporal. Para os devidos fins, será utilizado o método simplificado.

4 Resultados e discussão

4.1 Resultados

O método simplificado emprega as seguintes equações para o cálculo:

$$Q_{CH_4} = [(Pop_{urb} \times TAXA_{RSU} \times RSU_f \times L_0) - R] \times (1 - OX) \quad (1)$$

Q_{CH_4} : Vazão de metano gerado ($\frac{kg_{CH_4}}{ano}$);

Pop_{urb} : população urbana (*Habitantes*);

$TAXA_{RSU}$: Taxa anual de geração de RSU per capita ($\frac{kg_{RSU}}{Habitantes \cdot ano}$);

RSU_f : Fração de RSU depositada em aterro sanitário;

L_0 : Potencial de geração de metano dos RSU ($\frac{kg_{CH_4}}{kg_{RSU}}$);

R : Metano recuperado ($\frac{kg_{CH_4}}{ano}$);

OX : Fator de oxidação.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

Em que:

MCF : Fator de correção de metano;

DOC : Fração de carbono degradável ($\frac{kg_C}{kg_{RSU}}$);

DOC_f : Fração de DOC dissolvida (que realmente é degradada);

F : Fração de metano no biogás de aterro;

$\frac{16}{12}$: Fator de conversão de carbono para metano (peso molecular médio).

O potencial de geração de metano (L_0) é um parâmetro essencial, sendo utilizado não apenas na metodologia proposta pelo IPCC, como também em diversas outras abordagens voltadas à estimativa da produção de metano.

A fração de carbono degradável (DOC) refere-se à porção de carbono nos resíduos que pode ser decomposta por processos biológicos dentro do aterro. Esse indicador considera tanto a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) quanto os teores de carbono associados a cada tipo de material. Para uma análise mais precisa dos RSU, é necessário

classificá-los em diferentes grupos, como papel, plásticos e metais. No cálculo do DOC, é realizada uma média ponderada do conteúdo de carbono, conforme a proporção de cada categoria presente nos resíduos. A estimativa do DOC pode ser feita com base na equação (3):

$$DOC = 0.4(A) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.30(D) \quad (3)$$

Em que:

A: Percentual de papel e papelão na composição dos RSU;

B: Percentual de resíduos de poda, jardinagem e outros materiais orgânicos não alimentícios (resíduos de parques e jardins) na composição dos RSU;

C: Percentual de resíduos alimentícios orgânicos na composição dos RSU;

D: Percentual de têxteis na composição dos RSU.

E: Percentual de madeiras e resíduos florestais na composição dos RSU.

Como dito anteriormente, foi encontrado um estudo específico e detalhado que apresenta a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e comerciais do município de Teófilo Otoni (MG). Esse levantamento foi realizado em 2015, por meio de uma campanha de amostragem conduzida pela empresa SHS Engenharia Sustentável.

A partir dos resultados da amostragem, obteve-se a composição gravimétrica média dos resíduos sólidos gerados na sede urbana do município, permitindo uma análise mais precisa e adaptada à realidade local. As frações orgânicas e recicláveis foram identificadas com seus respectivos percentuais em massa: matéria orgânica 53,59%, papel e papelão 7,76%, plásticos 15,41%, resíduos têxteis e de madeira incluídos na categoria “outros” (18,27%) e metais ferrosos e não ferrosos 3,11%.

Esses dados possibilitam o cálculo do conteúdo de carbono orgânico degradável (DOC) com maior confiabilidade. Considerando os percentuais específicos para as categorias relevantes: papel e papelão (7,76%), resíduos alimentares (53,59%), resíduos têxteis (inclusos em “outros”), madeira e resíduos florestais (também presentes em “outros”), e utilizando os coeficientes definidos pelas diretrizes do IPCC (2006), foi possível aplicar a equação (3) e encontrar o valor de DOC igual a 0,1198 kgC/kg RSU.

Além da caracterização gravimétrica e da aplicação dos coeficientes para cálculo do DOC, é relevante considerar o potencial energético dos diferentes componentes presentes nos resíduos sólidos urbanos. Esse potencial é avaliado com base no Poder Calorífico Inferior (PCI) e no Poder Calorífico Superior (PCS), que indicam a energia que pode ser obtida durante a combustão dos resíduos.

Materiais como papel, papelão, plásticos e madeira apresentam altos valores de PCI e PCS, tornando-se importantes fontes energéticas em tecnologias de aproveitamento térmico, como a incineração ou a produção de CDR (Combustível Derivado de Resíduos). No Quadro 1, são apresentados os valores médios de PCI e PCS para os principais componentes dos RSU, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2020).

Quadro 1 – Os valores médios de PCI e PCS

Componentes	PCI (Kcal/kg)	PCS (kcal/kg)
Papel	3.330	3.680
Papelão	3.420	3.760
Plásticos	8.320	9.260
Madeira	3.750	4.180
Resíduos alimentares	1.100	1.240
Têxteis	4.190	4.680
Outros	1.280	1.420

Fonte: Abrelpe (2020)

Com relação à fração do carbono degradável efetivamente assimilada (DOCf), foi adotada a equação (4), sugerida pelo IPCC ([Ipcc, 1996](#)):

$$DOC_f = 0.014T + 0.28 \quad (4)$$

Em que:

T: Temperatura na zona anaeróbia $\approx 35^\circ\text{C}$.

Logo, a fração do carbono orgânico degradável efetivamente assimilado, ou seja, a parte que pode gerar metano, é 0,77 ou 77%.

O IPCC define o fator de correção de metano (MCF) de acordo com o tipo de disposição. No Quadro, 2 são apresentados os possíveis valores. Como neste trabalho a disposição final se trata de um lixão a céu aberto, o MCF assume valor igual a 0,4. Adicionalmente, adotou-se um valor padrão de F = 0,5 para a fração de metano no biogás, conforme recomendação do IPCC.

Quadro 2 – Valores possíveis para MCF

Tipo de local de disposição	MCF
Lixão	0,4
Aterro controlado	0,8
Aterro sanitário	1,0
Locais sem categoria (valor padrão)	0,6

Fonte: IPCC (1996). Adaptação

Assim, aplicando a equação (2) do IPCC, tem-se que $L_0 = 0,0641 \text{ Kg} \frac{\text{CH}_4}{\text{Kg}} \text{RSU}$. Esse valor representa o potencial de geração de metano por quilograma de resíduo sólido urbano. Ao dividir esse resultado pela densidade do metano ($\rho \text{CH}_4 = 0,0007168 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$), obtém-se:

$$\frac{L_0}{\rho \text{CH}_4} = \frac{0,0641 \text{ Kg} \frac{\text{CH}_4}{\text{Kg}} \text{RSU}}{0,0007168 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}} \approx 89,94 \text{ m}^3 \frac{\text{CH}_4}{\text{Kg}} \text{RSU}$$

Para estimar a massa anual de metano gerado, utilizou-se a equação (1). Considerando a população urbana de Teófilo Otoni em 2022 (120.880 habitantes), a taxa *per capita* de geração de resíduos sólidos urbanos (0,997 kg/hab.dia, segundo o SNIS, 2023), e uma fração de 82,4% dos resíduos efetivamente dispostos no lixão (RSU_f), além de valores nulos para o fator de oxidação ($OX = 0$) e recuperação de metano ($R = 0$), temos:

$$Q_{CH_4} = [(120.880 \times 363,905 \times 0,824 \times 0,0641) - 0] \times (1 - 0)$$

$$Q_{CH_4} = 2.325.162 \text{ } Kg \frac{CH_4}{ano}$$

Esse resultado representa a quantidade anual de metano gerada pela fração biodegradável dos resíduos sólidos urbanos dispostos no lixão de Teófilo Otoni. A estimativa evidencia a importância de medidas que promovam a mitigação das emissões, como a recuperação energética do biogás ou a implementação de aterros sanitários com sistemas de captação e queima controlada do metano.

4.1.1 Cálculo da produção de energia elétrica

A estimativa da produção de energia foi realizada com base na vazão anual de metano, previamente determinada por meio das Equações (5) e (6), conforme descrito por Ferreira *et al.* (2018). Para as propriedades do gás, consideraram-se uma massa específica de 1,3372 kg/m³ e um poder calorífico de 3.281,92 kcal/kg, de acordo com o mesmo autor, que utilizou os dados contidos no Quadro 3 como base para seus cálculos, por meio de interpolação dos valores.

Quadro 3 – Comparação das tecnologias de conversão de biogás em eletricidade

Tecnologias de conversão	Potência instalada	Eficiência	Emissões de NOx (ppm)
Motor a gás (Ciclo Otto)	30 kW - 20 MW	30% - 34%	250 - 3000
Motor Diesel (Biogás + Diesel)	-	30% - 35%	Em média 27
Turbina a Gás (Médio porte)	500 kW - 150 MW	20% - 30%	35 - 50
Microturbina (pequeno porte)	30 kW - 100 kW	24% - 28%	<9

Fonte: Pecora (2006) Adaptação

$$P_x = Q_x \times \eta \times PCI_D \quad (5)$$

Em que:

P_x : Energia elétrica disponível ($\frac{KWh}{dia}$);

Q_x : Vazão média diária de biogás gerado ($\frac{m^3}{dia}$);

η : eficiência elétrica de conversão (35%);

PCI_D : Poder calorífico inferior disponível ($\frac{KWh}{m^3}$).

$$PCI_D = Y_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times k \quad (6)$$

Em que:

PCI_D : Poder calorífico inferior disponível ($\frac{KWh}{m^3}$);

Y_{CH_4} : Peso específico do metano ($\frac{kg}{m^3}$);

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior do metano ($\frac{Kcal}{kg}$);

k : fator de conversão de kcal em kWh ($\frac{4,19}{3600}$).

Substituindo os valores na equação 6, tem-se:

$$PCI_D = 1,3372 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \times 3281,92 \left(\frac{Kcal}{kg} \right) \times \frac{4,19}{3600}$$

$$PCI_D = 5,11 \left(\frac{KWh}{m^3} \right)$$

Calculando a vazão média diária de metano gerado:

Dados:

$$Q_{CH_4} = 2.325.162 Kg \frac{CH_4}{ano}$$

$$\rho CH_4 = 0,0007168 \frac{t}{m^3} = 0,7168 \frac{Kg}{m^3}, \text{ logo}$$

$$Q_{CH_4} = 3.243.986 m^3 \frac{CH_4}{ano}$$

Convertendo para vazão média diária:

$$Q_x = \frac{3.243.986}{365} = 8.887,63 \frac{m^3}{dia}$$

Agora na equação (5), assumindo um rendimento de 35%, valor típico para geradores a biogás, tem-se:

$$P_x = 8.887,63 \times 0,35 \times 5,11 = 15.895,52 \frac{KWh}{dia} = 5.801.867,08 \frac{KWh}{ano}$$

Ressalta-se que, em determinadas situações, o metano não é aproveitado em sua totalidade, resultando em distintos níveis de utilização do biogás, os quais são expressos em percentuais de uso. De acordo com Ferreira *et al.* (2018), esses níveis podem ser classificados da seguinte forma:

- a) **Primeiro nível:** considera o aproveitamento integral (100%) do potencial do biogás para a geração de energia elétrica;
- b) **Segundo nível:** admite que 40% do biogás seja utilizado como combustível, enquanto os 60% restantes são destinados à geração de energia elétrica;
- c) **Terceiro nível:** projeta uma redução progressiva na utilização do biogás para fins energéticos, com apenas 20% da produção nacional sendo convertida em energia elétrica;
- d) **Quarto nível:** refere-se à fase inicial de inserção do biogás no cenário energético brasileiro, na qual apenas 6% do volume gerado é empregado na produção de energia elétrica.

A avaliação do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do município de Teófilo Otoni-MG foi conduzida com base na metodologia proposta pelo IPCC ([Ipcc, 1996](#)), utilizando o modelo simplificado para estimativa da geração de metano a partir da fração biodegradável dos resíduos. Com base nos dados populacionais de 2022 (120.880 habitantes) e na taxa de geração de RSU de 0,997 kg/hab.dia (equivalente a 363,905 kg/hab.ano), obteve-se uma massa anual total de resíduos de aproximadamente 44.003 toneladas.

Considerando uma fração de 82,4% dos resíduos efetivamente dispostos no lixão e um potencial de geração de metano (L_0) de 0,0641 $\frac{KgCH_4}{KgRSU}$, a estimativa da massa anual de metano gerado foi de aproximadamente 2.323.420 $\frac{KgCH_4}{ano}$. Este valor demonstra um significativo potencial de emissão de gases de efeito estufa associado à destinação atual dos resíduos no município.

Para fins de aproveitamento energético, a densidade do metano foi considerada como 0,7168 $\frac{Kg}{m^3}$, resultando em uma vazão total de 3.243.986 $\frac{m^3CH_4}{ano}$, o que corresponde a uma vazão média diária de 8.887,63 m^3 . Utilizando um poder calorífico inferior (PCI) do metano de 3.281,92 $\frac{Kcal}{kg}$ e uma massa específica de 1,3372 $\frac{Kg}{m^3}$, o PCI foi convertido para 5,11 $\frac{KWh}{m^3}$. Com uma eficiência de conversão elétrica de 35%, o potencial de geração de energia elétrica foi estimado em 15.895,52 $\frac{KWh}{dia}$, equivalente a 5.801.867,08 $\frac{KWh}{ano}$.

Estes resultados indicam que, caso o metano gerado seja integralmente aproveitado, o município possui uma fonte significativa de energia renovável a partir dos seus resíduos sólidos. Contudo, em cenários de aproveitamento parcial, conforme classificação de Ferreira *et al.* (2018), a energia gerada pode variar de acordo com os níveis de utilização do biogás: 100%, 60%, 20% ou apenas 6% da produção sendo convertida em energia.

Essa conversão depende de diversos fatores técnicos e estruturais, como a existência de sistemas de coleta e captação do biogás no aterro, a eficiência dos equipamentos de geração elétrica (como motores a gás ou microturbinas), a manutenção adequada desses sistemas e a viabilidade econômica do projeto. Além disso, fatores como umidade dos resíduos, composição da matéria orgânica e condições ambientais (como temperatura) influenciam diretamente na quantidade e qualidade do biogás produzido. A inserção de tecnologias de captação e conversão do biogás em energia surge como uma alternativa viável para a redução das emissões, valorização dos RSU, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e transição energética.

De acordo com a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig, 2015), o consumo médio mensal por residência é de 131,2 Kwh. Considerando a produção anual estimada de 5.801.867,08 Kwh a partir dos resíduos sólidos, seria possível atender aproximadamente 3.685 residências. Com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Ibge, 2024), que indicam uma média de 2,73 moradores por domicílio em Teófilo Otoni, estima-se que mais de 10 mil pessoas — cerca de 7% da população do município — poderiam ser beneficiadas por essa energia.

5 Considerações finais

Em síntese, o trabalho evidencia que a geração de metano a partir dos resíduos sólidos urbanos constitui uma alternativa viável e promissora. Além de assegurar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos, essa prática possibilita a produção de energia elétrica, promovendo benefícios econômicos e ambientais ao substituir fontes baseadas em combustíveis fósseis.

Assim, foi estimado um potencial energético de aproximadamente 5.801.867,08 kWh/ano, considerando o aproveitamento integral do metano gerado. Esse montante seria suficiente para abastecer entre 3.685 residências por ano, a depender do consumo, impactando diretamente mais

de 10 mil pessoas. Tal resultado demonstra viabilidade econômica, podendo inclusive contribuir para custear parte dos investimentos na construção de um aterro sanitário, resolvendo assim o problema orçamentário do município.

A análise do potencial energético do metano também é essencial para subsidiar pesquisas futuras e estimular o engajamento da população e dos gestores públicos na adoção de tecnologias sustentáveis. A implementação de sistemas de captação e conversão do biogás tem o potencial de transformar passivos ambientais em ativos estratégicos, alinhando o município às metas globais de sustentabilidade, mitigação das mudanças climáticas e transição energética justa.

Referências

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, SP, 19 dez. 2024.

BARBOSA, Catarina Alexandre; FIALHO, Kauane Fanuse. **Tratamento térmico de resíduos sólidos têxteis: análise da incineração, gaseificação e pirólise**. 2024. 49 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BESEN, Gina Rizpah *et al.* (Ed.). **14 anos da Política Nacional de Resíduos Sólidos: instrumentos de implementação, inovação e reflexões críticas**. São Paulo: IEE-USP: OPNRS, 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. ago. 2010. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Diagnóstico Temático: Visão Geral dos Resíduos Sólidos – SNISA 2023 (atualizado)**. Brasília, 2023.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Relatório da administração e demonstrações financeiras: exercício findo em 31 de dezembro de 2014**. Belo Horizonte, 2015.

CETRULO, Natalia Maragna *et al.* Solid waste indicators in local sustainability assessment systems: a literature review. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 23, p. 1–22, 2020.

CUNHA, Belinda Pereira da *et al.* Política nacional dos resíduos sólidos: análise jurídica a partir da história ecológica, da sustentabilidade, do consumo e da pobreza no brasil. In: CUNHA, Belinda Pereira da; AUGUSTIN, Sérgio (Ed.). **Sustentabilidade ambiental: estudos jurídicos e sociais**. Caxias do Sul: Educs, 2014.

DIAS, Fernanda Boldim; BALIEIRO, Lucas Tarlau. Aterros sanitários: gestão de resíduos sólidos e sustentabilidade ambiental. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação (REASE)**, São Paulo, v. 10, n. 12, p. 2891–2919, dez. 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em serviços públicos**. Rio de Janeiro, 2023.

FERREIRA, André Luís *et al.* **Emissões dos setores de energia e processos industriais: documento de análise 2018**. São Paulo, 2018.

FING, Antônio Carlos; GONÇALVES, Heloísa Alva Cortez. Lixo, o luxo da sociedade: resíduos sólidos eletroeletrônicos, obsolescência programada e pós-consumo. **Direitos Fundamentais & Justiça**, Belo Horizonte, v. 14, n. 42, p. 405–428, jan./jun. 2020.

GOMES, Antonia Ozilane da Silva; BELÉM, Marcelo Oliveira. O lixo como um fator de risco à saúde pública na cidade de fortaleza, ceará. **Sanare**, Fortaleza, v. 21, n. 1, p. 21–28, jan. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Teófilo Otoni (MG): panorama**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024. Acesso em: 2024. Disponível em:
[<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/teofilo-otoni/panorama>](https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/teofilo-otoni/panorama).

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (SAR). Geneva, 1996.

LANGE, Letícia *et al.* Análise do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário consórcio serra são miguel – ibirama/sc. In: **Anais do 6º Congresso Nacional de Resíduos Sólidos (CONRESOL)**. [S. I.]: IBEAS, 2023.

MATTEI, Greice; ESCOSTEGUY, Pedro Alexandre Varella. Composição gravimétrica de resíduos sólidos aterrados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 247–251, set. 2007.

MOTA, José Carlos *et al.* Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. In: **Anais do 1º Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo**. Campina Grande: [s.n.], 2010.

OLIVEIRA, Pedro Henrique *et al.* National solid waste policy: analysis of final disposal in teófilo otóni/mg and the surrounding area. **International Journal of Geoscience, Engineering and Technology**, Diamantina, v. 12, n. 1, p. 78–89, 2025.

PALERMO, Giulia Caetano; BRANCO, David Alfredo Castelo; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de. Comparação entre tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e balanço de emissões de gases de efeito estufa no município do rio de janeiro, rj, brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 635–648, 2020.

PEREIRA, Carolina Alonso *et al.* Tecnologias waste-to-energy: uma avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de niterói. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 17, 2024.

SANTOS, Gustavo Carvalhal; BARDET, Júlia Elisabete. Os resíduos sólidos urbanos como fonte de geração de energia renovável (iv-022). In: **Anais do 6º Congresso Brasileiro de Resíduos Sólidos (CONRESOL)**. São Paulo: IBEAS, 2023.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Você sabe o que é gestão de resíduos?** [S. I.]: [s.n.], set. 2023.

SILVA, Maria Clara Mendes da. **Conversão do gás metano de aterro sanitário em produtos de valor agregado para a indústria química**. 2020. 52 p. Monografia (Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SOUZA, José de *et al.* Usinas para tratamento de rsu: biodigestão anaeróbia versus incineração. **Espacios**, [S. I.], v. 35, n. 11, 2014.

TEÓFILO OTONI. **Lei municipal nº 1.444, de 2023.** Institui o Código de Polícia Administrativa no Município de Teófilo Otoni, MG. 2023. Diário Oficial do Município, Teófilo Otoni, MG, 2023.

ZABOTTO, Alessandro Reinaldo. **Estudos sobre impactos ambientais: uma abordagem contemporânea.** Botucatu: FEPAF, 2019.