

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WELLINGTON TEIXEIRA BRITO

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS EM PEQUENOS MUNICÍPIOS: UM CAMINHO PARA A
AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS

CURITIBA
2025

WELLINGTON TEIXEIRA BRITO

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL A PARTIR DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS EM PEQUENOS MUNICÍPIOS: UM CAMINHO PARA A
AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS.

Artigo apresentado como requisito parcial à
conclusão do curso de MBA em Gestão
Estratégica em Energias Naturais
Renováveis, Programa de Pós-Graduação,
Universidade Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

CURITIBA-PR
2025

RESUMO

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a crescente demanda por energia configuram um paradoxo para o desenvolvimento de pequenos municípios. No Tocantins, a persistência de lixões a céu aberto evidencia não apenas um grave passivo ambiental, mas uma falha na execução das políticas públicas vigentes. Frente a este cenário, o presente estudo analisa a viabilidade técnica, econômica e ambiental de um modelo de negócio para a valorização energética dos RSU, com foco na tecnologia de biogás para um consórcio de municípios na região Sul do estado. A metodologia consiste em uma pesquisa aplicada de abordagem mista (quantitativa-qualitativa), baseada em um estudo de caso. A análise quantitativa utiliza dados do IBGE e SNIS para modelar o potencial de geração de biogás e eletricidade, enquanto o pilar qualitativo avalia o arcabouço de gestão. O modelo de negócio proposto é inovador por integrar duas frentes: a governança via consórcio público e a sustentabilidade financeira por meio de receitas diversificadas (venda de energia e créditos de carbono). A hipótese central é que esta abordagem integrada não só é tecnicamente exequível, mas também economicamente atrativa, posicionando a valorização dos RSU como uma solução estratégica para a segurança energética, a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico da região.

Palavras-chave: gestão de resíduos sólidos; biogás; energia renovável, sustentabilidade.

ABSTRACT

Inadequate management of Municipal Solid Waste (MSW) and the growing demand for energy create a paradox for the development of small municipalities. In the state of Tocantins, the persistence of open-air dumps highlights not only a serious environmental liability but also a failure to implement existing public policies. Against this backdrop, this study analyzes the technical, economic, and environmental viability of a business model for waste-to-energy recovery from MSW, focusing on biogas technology for a consortium of municipalities in the state's southern region. The methodology is an applied, mixed-method (quantitative-qualitative) research project based on a case study. The quantitative analysis uses data from IBGE and SNIS to model the potential for biogas and electricity generation, while the qualitative pillar assesses the governance framework. The proposed business model is innovative by integrating two fronts: governance via a public consortium and financial sustainability through diversified revenue streams (energy sales and carbon credits). The central hypothesis is that this integrated approach is not only technically feasible but also economically attractive, positioning waste-to-energy recovery as a strategic solution for the region's energy security, environmental sustainability, and economic development.

Keywords: municipal Solid Waste Management; biogas, renewable energy, sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE VALORIZAÇÃO DE RSU COM DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	12
QUADRO 1 - COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS TERMOQUÍMICAS.....	14
FIGURA 2 – MAPA DA ÁREA DE ESTUDO COM OS MUNICÍPIOS ANALISADOS.....	17
QUADRO 2 - ANÁLISE SWOT DO MODELO DE GESTÃO CONSORCIADA DE RSU.....	24
QUADRO 3 - PREMISSAS PARA A ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO CONSÓRCIO)	25
FIGURA 3 – CICLO VIRTUOSO DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RSU	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - – DADOS CONSOLIDADOS E POTENCIAL ENERGÉTICO DOS MUNICÍPIOS.....	20
TABELA 2 – INDICADORES DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DO PROJETO.....	26
TABELA 3 - ESTIMATIVAS DE APROVEITAMENTO DO BIOMETANO EM FROTA URBANA REGIONAL.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CAPEX – *Capital Expenditure* (Despesas de Capital)

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis e Biogás

ESG – *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança)

GEE – Gases de Efeito Estufa

GNV – Gás Natural Veicular

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

NIMBY – *Not In My Backyard* (Não no Meu Quintal)

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

OPEX – *Operational Expenditure* (Despesas Operacionais)

PERS/TO – Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPP – Parceria Público-Privada

RCE – Redução Certificada de Emissões

ROI – *Return on Investment* (Retorno sobre o Investimento)

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SWOT – *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats* (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças)

TCE-TO – Tribunal de Contas do Estado do Tocantins

WTE – *Waste-to-Energy* (Recuperação Energética de Resíduos)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	8
2.OBJETIVOS GERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
3.1 A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NO TOCANTINS	10
3.2 O PARADIGMA DA ECONOMIA CIRCULAR E A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA	11
3.3 TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RSU.....	12
3.3.1 Digestão Anaeróbia e o Potencial do Biogás.....	12
3.3.2 Tecnologias Termoquímicas.....	13
3.4. MODELOS DE GESTÃO E VIABILIDADE PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS...14	
3.4.1 Consórcios Públicos como Solução para a Gestão Regionalizada.....	14
3.4.2 Análise de Viabilidade e Novas Fontes de Receita.....	15
4. METODOLOGIA	16
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	16
4.2 ÁREA DE ESTUDO	17
4.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	18
4.4 COLETA DE DADOS DOCUMENTAIS	19
4.5 CRITÉRIOS DE ANÁLISE DE VIABILIDADE	20
4.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1 DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RSU NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS ...21	
5.2 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	22
5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO MODELO DE GESTÃO CONSORCIADA	23
5.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO CONSÓRCIO)	25
5.5 POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO BIOGÁS NA MOBILIDADE URBANA	26
6. CONCLUSÃO.....	28
REFERÊNCIAS.....	30
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULOS TÉCNICOS E DEMONSTRATIVOS DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA	34

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável de pequenos municípios no Brasil enfrenta um duplo desafio que impacta diretamente suas finanças e a qualidade de vida da população: a gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e a dependência de fontes externas de energia. Em nível nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei nº 12.305/2010) estabeleceu o marco regulatório para o setor. Em alinhamento a esta diretriz, o estado do Tocantins instituiu sua própria Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei nº 3.614/2019), fundamentada pelo Plano Estadual (PERS/TO) (Barbosa, 2024).

No entanto, apesar deste arcabouço legal em múltiplos níveis, a realidade em campo é alarmante: dados recentes apontam que 93% dos municípios tocantinenses (de um total de 139) ainda destinam seus resíduos a lixões a céu aberto, com apenas quatro aterros sanitários operando em todo o estado Soares *et al.* (2025). Com o prazo final para a adequação dos municípios de pequeno porte, estabelecido pela PNRS (Lei nº 12.305/2010), já expirado em 2024, a situação de irregularidade e o iminente passivo ambiental tornam-se insustentáveis, evidenciando uma falha sistêmica na implementação das políticas e a urgência por soluções práticas e inovadoras.

Contudo, dentro deste cenário de crise reside uma oportunidade estratégica, incentivada pela própria PNRS, que prevê a recuperação energética como uma das destinações adequadas para os resíduos, posterior às práticas de redução, reutilização e reciclagem (Beck *et al.*, 2018). A transformação do passivo ambiental dos RSU em um ativo energético, processo conhecido como Waste-to-Energy (WTE), representa uma solução de grande potencial.

Estudos demonstram a vasta capacidade energética represada nos resíduos brasileiros, com estimativas apontando um potencial de aproximadamente 16 GW apenas em aterros sanitários (Kumar, 2020). A escolha da tecnologia, contudo, deve atender a múltiplos critérios, sendo financeiramente sustentável, socialmente adequada e ambientalmente amigável (Adeniram, 2017). Neste contexto, a digestão anaeróbia para produção de biogás destaca-se como alternativa promissora para pequenos municípios, dada a sua modularidade e eficiência no tratamento da fração orgânica dos RSU.

Para investigar a aplicação prática deste conceito, o presente estudo concentra-se na região sul do estado do Tocantins. Esta microrregião, composta por diversos municípios de pequeno porte que compartilham as características do duplo desafio descrito, foi escolhida como objeto de estudo por sua representatividade do cenário nacional, o que confere à pesquisa um alto potencial de replicabilidade. A análise de uma solução integrada nesta localidade pode, portanto, gerar um modelo de gestão de resíduos e energia que sirva de referência para outras regiões com perfis socioeconômicos semelhantes.

2. OBJETIVOS GERAL

Analisar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema consorciado de recuperação energética de RSU, com foco na produção de biogás, para os municípios de pequeno porte da região sul do Tocantins.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Mapear o volume e a composição dos RSU gerados nos municípios da região sul do Tocantins;
- Comparar as principais tecnologias de recuperação energética para justificar a escolha pela digestão anaeróbia no contexto regional;
- Modelar o potencial técnico de geração de energia a partir do biogás, considerando os cenários de geração elétrica e de produção de biometano para mobilidade urbana;
- Analisar a viabilidade estratégica e econômico-financeira de um modelo de negócio consorciado, comparando os cenários propostos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NO TOCANTINS

A base para qualquer debate sobre a gestão de resíduos no Brasil é a política nacional de resíduos sólidos, criada em 2010 pela Lei nº 12.305. Próxima de completar 15 anos em 2025, essa política foi um divisor de águas, estabelecendo regras, metas e ferramentas para um gerenciamento mais inteligente. A ideia central sempre foi a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, uma tarefa que deveria ser dividida entre governo, empresas e a própria população (Brasil, 2010). A política nacional de resíduos sólidos nasceu de um processo participativo e segue os princípios do desenvolvimento sustentável, em sintonia com o direito ao meio ambiente equilibrado garantido pela Constituição de 1988 (Brasil, 1988).

Apesar de sua importância, a aplicação da PNRS em um país com as dimensões do Brasil esbarra em desafios enormes. A falta de verba e a fraca estrutura institucional da maioria dos municípios são barreiras que dificultam o avanço da PNRS em todo o território (Heber e Silva, 2014). Foi nesse cenário de dificuldades que o estado do Tocantins decidiu, em 2015, criar seu próprio Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS/TO), finalizado em 2017. O plano foi construído com base em um retrato detalhado da situação dos resíduos no estado, usando dados de campo, pesquisas e oficinas com a comunidade (Tocantins, 2017).

Contudo, um desafio central emergiu desde as etapas iniciais de formulação do plano: a limitada participação dos municípios. Prova disso é que apenas 41% das cidades tocantinenses responderam ao questionário inicial, um sinal evidente da baixa adesão e da dificuldade de mapear a real situação do estado (Tocantins, 2017). Essa falta de engajamento, como aponta Barbosa (2024), revela que a barreira de cooperação entre municípios e o governo estadual já existia antes mesmo da promulgação da política estadual. Todo o processo foi lento, culminando na Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei nº 3.614) somente em dezembro de 2019, uma demora que demonstra as dificuldades para colocar em prática as diretrizes nacionais (Barbosa, 2024; Tocantins, 2019).

Apesar dos percalços, a lei do Tocantins trouxe avanços importantes e adaptados à realidade local. Mantendo os mesmos princípios da PNRS, como

proteger a saúde pública e incentivar tecnologias limpas, a principal diretriz estratégica da Lei Estadual nº 3.614/2019 foi apostar na gestão regionalizada. Ela incentiva a criação de consórcios e soluções compartilhadas entre cidades, um modelo de governança ideal para um estado com muitos municípios pequenos e com poucos recursos (Naturatins, 2019). Essa abordagem não só reconhece que muitas prefeituras não possuem, individualmente, os recursos técnicos e financeiros para tal, como também abre o caminho para propostas como a criação de aterros sanitários tecnológicos de uso comum, o objetivo-fim deste trabalho.

3.2 O PARADIGMA DA ECONOMIA CIRCULAR E A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA

O paradigma econômico predominante por um longo período baseou-se em um fluxo de extração, produção, consumo e descarte. Este modelo, conhecido como economia linear, desconsidera o valor residual dos materiais pós-consumo e tem se mostrado insustentável, tanto pela exaustão de recursos naturais finitos quanto pela crescente geração de passivos ambientais. Em contraposição a essa lógica, emerge o conceito de economia circular, que propõe a reconfiguração dos ciclos produtivos, tratando os resíduos não como um problema a ser descartado, mas como insumos a serem reintegrados em novos processos.

Uma das aplicações mais inteligentes dessa nova lógica é a valorização energética do biogás que vem do lixo urbano. Na prática, aproveitar esse gás permite gerar eletricidade e calor, além de produzir biometano um substituto direto para os combustíveis fósseis. Essa abordagem se encaixa perfeitamente no conceito de economia circular e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, já que usa de forma eficiente um recurso que seria desperdiçado, gera novas oportunidades e melhora a gestão das cidades (Organização Das Nações Unidas, 2023).

Essa visão, aliás, já tem respaldo na lei. A nossa própria PNRS define uma ordem de prioridades, na qual a recuperação de energia aparece como o destino certo para a fração de resíduos que não teve como ser evitada, reutilizada ou reciclada (Brasil, 2010). Desse modo, usar o lixo para gerar energia resolve dois problemas de uma só vez: oferece uma solução para o saneamento e ajuda a diversificar a matriz energética com uma fonte renovável. É a prova de que é possível "fechar o ciclo" dos materiais de um jeito inteligente e produtivo (Rocha-Meneses *et al.*, 2023).

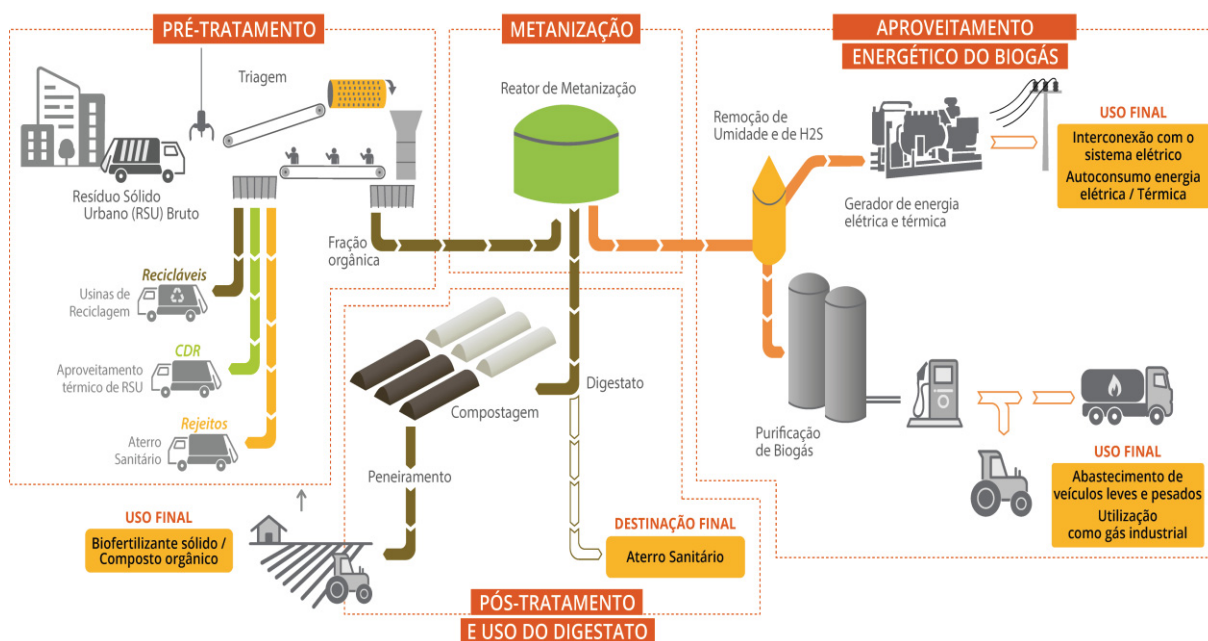
3.3 TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RSU

A valorização energética dos RSU pode ser realizada por meio de duas principais rotas tecnológicas: a bioquímica, que utiliza processos biológicos, e a termoquímica, que emprega processos de alta temperatura (Beck *et al.*, 2018). A escolha da tecnologia mais adequada demanda uma análise de múltiplos fatores, como a composição dos resíduos, a escala do empreendimento e os custos associados.

3.3.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA E O POTENCIAL DO BIOGÁS

A digestão anaeróbia é um processo biológico que decompõe a matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando dois produtos de alto valor: o biogás, uma mistura gasosa rica em metano (CH_4), e o digestato, um coproduto que funciona como biofertilizante. O biogás, por sua vez, pode ser utilizado para gerar eletricidade e calor ou, após um processo de purificação, ser convertido em biometano, um substituto renovável para o gás natural veicular (ABREMA, 2025). O processo está detalhado na figura 2.

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE VALORIZAÇÃO DE RSU COM DIGESTÃO ANAERÓBIA



FONTE: GEFBIOGÁS (2025)

Apesar do seu enorme potencial, a aplicação desta tecnologia no Brasil ainda é tímida, com a maioria dos aterros sanitários não possuindo a infraestrutura necessária para o aproveitamento do biogás. Os principais entraves são os altos custos de implantação e a falta de políticas de incentivo consistentes. Em contraste, a viabilidade da rota é comprovada por casos de sucesso internacionais em países como Alemanha, Estados Unidos e Suécia (Pavičić, 2022). O principal argumento a favor do biogás, contudo, é o climático: a captura e a queima do metano (CH_4), um gás com potencial de aquecimento global até 36 vezes superior ao do CO_2 , mitiga drasticamente o impacto das emissões e posiciona o biogás como um vetor indispensável para a transição a uma economia de baixo carbono (IPCC, 2025; Rocha-Meneses, 2023).

3.3.2 Tecnologias Termoquímicas

As tecnologias termoquímicas utilizam processos de alta temperatura para a conversão dos resíduos. As três principais rotas são a incineração, a pirólise e a gaseificação, cujas principais características, vantagens e desvantagens para o contexto de pequenos municípios são comparadas no Quadro 1. De modo geral, a incineração, embora consolidada, exige altos investimentos em controle de poluição, enquanto a pirólise e a gaseificação, apesar de mais limpas, apresentam menor maturidade tecnológica e alta complexidade operacional, representando barreiras para a aplicação em pequena escala (Ferreira, 2015).

QUADRO 1 - COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS TERMOQUÍMICAS

Tecnologia	Descrição Principal	Vantagens	Desvantagens para Pequenos Municípios
Incineração	Combustão controlada dos resíduos para gerar calor e eletricidade.	Tecnologia madura e consolidada; alta redução do volume de lixo.	Alto custo de implantação (CAPEX); necessidade de sistemas complexos e caros para controle de emissões.
Pirólise	Decomposição térmica dos resíduos na ausência de oxigênio.	Gera múltiplos produtos de valor (bio-óleo, carvão, gases); menor emissão de poluentes que a incineração.	Baixa maturidade tecnológica (pré-comercial); complexidade no aproveitamento econômico do bio-óleo.
Gaseificação	Conversão dos resíduos em um gás combustível (syngas) com oxigênio controlado.	Baixa emissão de poluentes (gás pode ser tratado antes da queima); alta eficiência na redução de volume.	Alta complexidade operacional; elevado custo de investimento, tornando-a pouco competitiva em pequena escala.

FONTE: Elaborado Pelo Autor (2025)

3.4. MODELOS DE GESTÃO E VIABILIDADE PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS

A escolha de uma tecnologia, como a digestão anaeróbia, é uma decisão técnica, mas não resolve, por si só, o desafio estratégico da gestão de resíduos. Para a realidade da maioria dos municípios brasileiros, de pequeno porte, o verdadeiro obstáculo não é técnico, mas sim de escala e de sustentabilidade econômico-financeira. Individualmente, essas prefeituras carecem de volume de resíduos, capacidade de investimento e corpo técnico para viabilizar uma usina de biogás.

Neste contexto, esta seção analisa os dois pilares que sustentam a implementação bem-sucedida de projetos regionais:

- **O Modelo de Governança:** O arranjo via consórcios públicos, como ferramenta estratégica para superar as limitações individuais dos municípios, ganhar escala e compartilhar custos e riscos.
- **A Sustentação do Projeto:** A análise de viabilidade econômico-financeira, como instrumento indispensável para validar o modelo de negócio, atrair investimentos e garantir a sustentabilidade de longo prazo da iniciativa.

3.4.1. Consórcios Públicos como Solução para a Gestão Regionalizada

A viabilidade de projetos de infraestrutura de alto custo, como uma planta de valorização energética, esbarra em uma barreira fundamental para municípios de pequeno porte: a falta de escala. Agindo isoladamente, eles não conseguem justificar

o investimento nem diluir os riscos. A solução para este impasse é um arranjo de governança cooperativa previsto na legislação brasileira: o consórcio público intermunicipal. Regulamentado pela Lei nº 11.107/2005, um consórcio é, na prática, uma nova entidade jurídica formada pela associação de municípios para planejar, contratar e executar serviços de interesse comum (Brasil, 2005).

O grande mérito deste modelo é a criação de ganhos de escala, que destravam a viabilidade econômica financeira do projeto. Ele funciona como uma plataforma para o rateio dos custos de investimento (CAPEX) e das despesas operacionais (OPEX), diluindo significativamente os riscos entre os participantes. Aplicado à gestão de RSU, o consórcio permite que um grupo de municípios direcione seus resíduos para uma única planta regional um "super aterro" ou um aterro sanitário consorciado com unidade de valorização energética tecnológico cuja construção seria inviável para qualquer um deles de forma isolada. Essa abordagem não é apenas uma solução de mercado; ela encontra respaldo direto na política estadual de resíduos sólidos do Tocantins (Lei nº 3.614/2019), que, conforme analisado, adota a gestão regionalizada como diretriz estratégica para o estado.

3.4.2. Análise de Viabilidade e Novas Fontes de Receita

A sustentabilidade de um projeto de biogás de grande escala não pode depender exclusivamente da receita gerada pela venda de energia. Conforme apontado pela (ABREMA, 2025), os altos custos de implantação e operação são barreiras críticas no Brasil. Portanto, a estruturação de um modelo de negócio robusto exige a diversificação das fontes de receita, sendo este um fator determinante para a viabilidade e a sustentação financeira do empreendimento.

Nesse sentido, a principal fonte de receita adicional é a monetização de ativos ambientais via mercado de créditos de carbono. O mecanismo é direto: ao evitar a emissão de metano (CH_4) um gás de efeito estufa significativamente mais potente que o CO_2 (IPCC, 2025), o projeto gera Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). Essas RCEs funcionam como ativos financeiros negociáveis, tanto no mercado voluntário quanto em mercados regulados, a exemplo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Aboughalya, 2023).

O avanço da regulamentação do mercado de carbono no Brasil, como o Projeto de Lei nº 412/2022, fortalece o ambiente de negócios e amplia o potencial

dessa monetização (PL, 2022). Na prática, a receita da venda desses créditos impacta diretamente os indicadores-chave do projeto, como o Retorno sobre o Investimento (ROI) e o tempo de payback, tornando a iniciativa mais resiliente e atrativa para investidores públicos e privados.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho constitui uma pesquisa aplicada, de natureza exploratória e descritiva, com abordagem metodológica mista (quantitativa e qualitativa). Adotou-se como estratégia o estudo de caso múltiplo, procedimento que permite a investigação aprofundada de um fenômeno em seu contexto real, oferecendo robustez analítica por meio da comparação entre unidades (YIN, 2015). A escolha da região sul do Tocantins, compreendendo 17 municípios de pequeno porte, justifica-se por sua representatividade de desafios comuns de gestão e pelo alto potencial de replicabilidade dos resultados em cenários análogos no Brasil.

O objeto de estudo é a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação de um sistema consorciado de recuperação energética de RSU por meio da produção de biogás. Para atingir este objetivo, a pesquisa foi operacionalizada em três etapas sequenciais: (i) revisão sistemática da literatura; (ii) análise documental de dados secundários e do arcabouço legal; e (iii) modelagem do potencial técnico e da viabilidade econômico-financeira do sistema proposto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa articulou as dimensões quantitativa e qualitativa por meio de procedimentos bibliográficos e documentais, organizados da seguinte forma:

A análise quantitativa foi dedicada à modelagem do potencial energético dos RSU e ao cálculo dos indicadores de viabilidade econômica do projeto (CAPEX, OPEX, ROI, Payback), utilizando dados secundários de fontes oficiais.

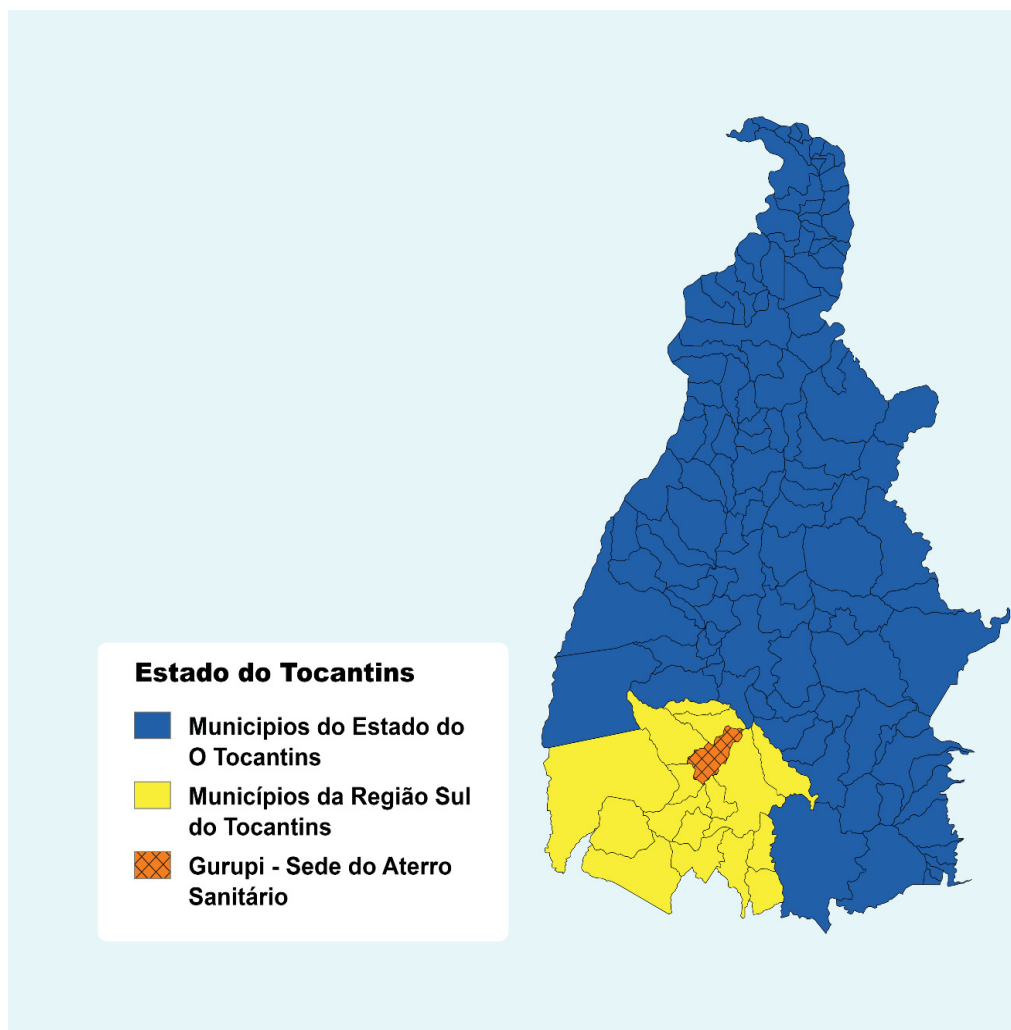
A análise qualitativa consistiu na análise de conteúdo de políticas públicas, legislações e relatórios técnicos para avaliar os modelos de governança (consórcios), bem como identificar as barreiras e as oportunidades estratégicas para a implementação do sistema proposto.

4.2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido na região sul do estado do Tocantins, uma área estratégica que reflete os desafios de gestão de resíduos e energia enfrentados por muitos municípios de pequeno porte no Brasil. A região possui uma economia com forte base no agronegócio e uma malha urbana composta por um município polo, Gurupi, e diversas cidades menores em seu entorno. Essa configuração a torna um modelo representativo para a análise de soluções de gestão consorciada, conferindo ao estudo alto potencial de replicabilidade.

A figura 2 exemplifica a mostragem escolhida para a pesquisa que compreende os 17 municípios que integram a referida região: Aliança do Tocantins, Alvorada, Araguaçu, Cariri do Tocantins, Crixás do Tocantins, Dueré, Figueirópolis, Formoso do Araguaia, Gurupi, Jaú do Tocantins, Palmeirópolis, Peixe, Sandolândia, São Salvador do Tocantins, São Valério, Sucupira e Talismã. A seleção deste conjunto de municípios foi embasada em critérios de proximidade geográfica e perfil socioeconômico semelhante, alinhados à diretriz de gestão regionalizada incentivada pelo plano estadual de resíduos sólidos do Tocantins.

FIGURA 2 – MAPA DA ÁREA DE ESTUDO COM OS MUNICÍPIOS ANALISADOS



FONTE: Elaborado pelo autor (2025), com base IBGE, 2025.

4.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

A construção do referencial teórico foi fundamentada em uma revisão bibliográfica sistemática, conduzida entre abril e agosto de 2025, com o objetivo de mapear a produção científica sobre gestão de RSU, tecnologias de recuperação energética e modelos de negócio. O processo seguiu as etapas detalhadas abaixo.

1. Bases de Dados Consultadas

A busca foi realizada em bases de dados acadêmicas de ampla abrangência, incluindo: Acervo Digital da UFPR, SciELO, Google Scholar, CAPES Portal de Periódicos, Scopus e SpringerLink.

2. Estratégia de Busca e Palavras-Chave

A estratégia de busca utilizou combinações de palavras-chave em português e inglês para maximizar a cobertura do tema. Os termos centrais incluíram: "resíduos sólidos urbanos", "biogás", "digestão anaeróbia", "valorização energética", "consórcios públicos", "gestão regionalizada", e seus correspondentes em inglês como "waste-to-energy", "anaerobic digestion" e "public consortia".

3. Critérios de Inclusão e Exclusão

Para a seleção dos trabalhos, foram adotados os seguintes critérios: como inclusão, foram priorizados artigos revisados por pares, teses e dissertações publicadas nos últimos 10 anos (2015–2025), disponíveis em português, inglês ou espanhol. Como exclusão, foram descartados estudos com foco exclusivo em resíduos industriais ou agrícolas e trabalhos sem dados quantitativos ou metodologia clara.

Após a aplicação dos filtros, o processo resultou na análise aprofundada de 58 trabalhos acadêmicos que compõem a base teórica deste estudo.

4.4 COLETA DE DADOS DOCUMENTAIS

A coleta de dados para a análise de viabilidade foi realizada exclusivamente a partir de fontes secundárias e documentais, organizadas em quatro categorias principais.

Para a obtenção de Dados Públicos Oficiais, foram utilizadas as bases do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), para a série histórica (2018–2023) de geração de RSU e custos operacionais, e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE Cidades), para o levantamento do perfil demográfico e socioeconômico dos municípios. A análise foi aprofundada com relatórios técnicos de órgãos como o tribunal de contas do estado (TCE-TO), para dados de fiscalização, e o panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024 (ABREMA), de onde se extraiu o indicador de 48,1% de fração orgânica para a região norte.

O arcabouço legal e de planejamento que fundamenta o estudo incluiu a análise da Lei nº 12.305/2010 (PNRS), da Lei nº 11.107/2005 (Lei dos consórcios públicos) e tanto da Lei (nº 3.614/2019) quanto do PERS/TO. Por fim, na categoria de dados municipais, foram realizadas solicitações formais via e-mail às secretarias dos

17 municípios da região para obter informações específicas sobre volume, composição e custos locais.

4.5 CRITÉRIOS DE ANÁLISE DE VIABILIDADE

A análise de viabilidade do sistema consorciado foi estruturada em três eixos complementares: técnico, econômico-financeiro e estratégico. O eixo técnico compreendeu a estimativa da geração de RSU (ton/dia) para a área de estudo, o cálculo do potencial de produção de biogás ($\text{m}^3/\text{ton RSU}$) com base em fatores de conversão da literatura, e o dimensionamento preliminar da unidade de valorização energética. O eixo econômico-financeiro envolveu a estimativa dos investimentos (CAPEX) e dos custos operacionais (OPEX), a aplicação de indicadores como o Retorno sobre o Investimento (ROI) e o Tempo de Retorno (Payback), e a simulação de cenários com a receita adicional de créditos de carbono. Por fim, o eixo estratégico foi desenvolvido por meio de uma análise SWOT, utilizada para identificar as Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças do modelo de gestão consorciada.

4.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

As limitações deste estudo estão intrinsecamente ligadas à sua natureza documental e à dependência de dados secundários. As principais são: (i) a dependência de informações de fontes públicas e da baixa taxa de resposta das prefeituras (Taxa de resposta das prefeituras: 7 de 17 (41%)), o que pode introduzir imprecisões nos cálculos, mitigadas pelo uso de médias e estimativas conservadoras; e (ii) a utilização de parâmetros de eficiência e conversão baseados na literatura técnica, sem validação empírica por meio de testes de campo na região de estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita. A análise está organizada em três etapas: primeiramente, o diagnóstico da geração de RSU na área de estudo; em seguida, a quantificação do potencial de aproveitamento energético; e, por fim, a análise de viabilidade do modelo de gestão consorciada.

5.1 DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RSU NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS

O levantamento dos dados de geração de resíduos constitui a base para toda a análise de viabilidade. Iniciando pelo município polo da região, Gurupi, os dados foram consolidados na tabela 1.

TABELA 1 – DADOS CONSOLIDADOS E POTENCIAL ENERGÉTICO DOS MUNICÍPIOS

Município	População (Urbana)	Geração de RSU (ton/ano)	% de Matéria Orgânica – Região Norte	Matéria orgânica anual (ton/ano)	Potencial de Biogás (m³/ano)	Potencial Energético (MWh/ano)
Gurupi	84.018	41.707	48,1%	20.061	2.006.700	4.415
Aliança do Tocantins	4.920	2.435	48,1%	1.171	117.100	258
Alvorada	5.712	2.827	48,1%	1.360	136.000	299
Araguaçu	4.384	2.170	48,1%	1.044	104.400	229
Cariri do Tocantins	3.587	1.775	48,1%	854	85.400	188
Crixás do Tocantins	3.918	1.939	48,1%	933	93.300	205
Dueré	5.144	2.546	48,1%	1.225	122.500	269
Figueirópolis	3.672	1.817	48,1%	874	87.400	192
Formoso do Araguaia	8.384	4.149	48,1%	1.996	199.600	439
Jaú do Tocantins	2.935	1.452	48,1%	698	69.800	154
Palmeirópolis	4.758	2.355	48,1%	1.133	113.300	249
Peixe	4.963	2.456	48,1%	1.181	118.100	260
Sandolândia	2.687	1.330	48,1%	640	64.000	141
São Salvador do Tocantins	2.234	1.105	48,1%	532	53.200	117
São Valério	2.412	1.194	48,1%	574	57.400	126
Sucupira	2.039	1.009	48,1%	485	48.500	107
Talismã	5.954	2.947	48,1%	1.418	141.800	312
População Urbana Total	137.527	68.059	48,1%	32.736	3.273.600	7.202

FONTE: Elaborado pelo autor (2025), base em ABREMA (2024) e TCE (2024)

A análise dos dados consolidados na tabela 1 revela o potencial agregado da gestão regionalizada. O conjunto dos 17 municípios estudados soma uma população urbana de 137.527 habitantes (IBGE, 2023), que, em conjunto, geram aproximadamente 68.059 toneladas de RSU por ano. De acordo com o Panorama da ABREMA (2024), a fração de matéria orgânica constitui 48,1% da massa de resíduos na região norte. Com base neste indicador, estima-se que o consórcio teria acesso a um volume de 32.736 toneladas de resíduos orgânicos por ano. Este volume consolidado é o que confere a escala necessária para a viabilidade técnica e econômica de uma planta de valorização energética regional por meio da digestão anaeróbia.

5.2 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Com base na fração orgânica disponível e em parâmetros técnicos consolidados na literatura, foi estimado o potencial de geração de biogás e energia elétrica para a região sul do Tocantins, considerando os 17 municípios que compõem a área de estudo. O modelo de gestão consorciada permite somar os volumes de resíduos orgânicos, viabilizando uma unidade de valorização energética com escala técnica e econômica. 3.273.600

A partir da geração anual total de 32.736 toneladas de matéria orgânica (48,1% da massa de RSU, conforme ABREMA, 2024), adotou-se um rendimento médio de 100 m³ de biogás por tonelada de matéria orgânica, com teor médio de metano em torno de 60%, conforme padrões técnicos para digestão anaeróbia (ABNT NBR 13.133). Assim, o potencial anual de produção de biogás na região é de aproximadamente 3.273.600 m³/ano.

Considerando uma eficiência média de conversão de 2,2 kWh/m³ de biogás em motores a gás (ABNT, 2021), a geração de energia elétrica poderia alcançar 7.202 MWh por ano, o que equivale a cerca de 19,7 MWh por dia.

Esse volume de energia é suficiente para:

- Abastecer todas as escolas, unidades de saúde, iluminação pública e administração municipal dos 17 municípios,
- Reduzir a dependência de fontes externas de energia,
- E, em cenários futuros, atender parte da rede residencial ou alimentar microredes locais.

Além disso, o biogás pode ser purificado e convertido em biometano, viabilizando sua injeção na rede de gás natural ou uso como combustível veicular, conforme previsto na nova lei do gás (Lei nº 14.134/2021). O aproveitamento do biometano como combustível para frotas municipais representa uma rota estratégica de redução de custos operacionais e emissões de carbono.

5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO MODELO DE GESTÃO CONSORCIADA

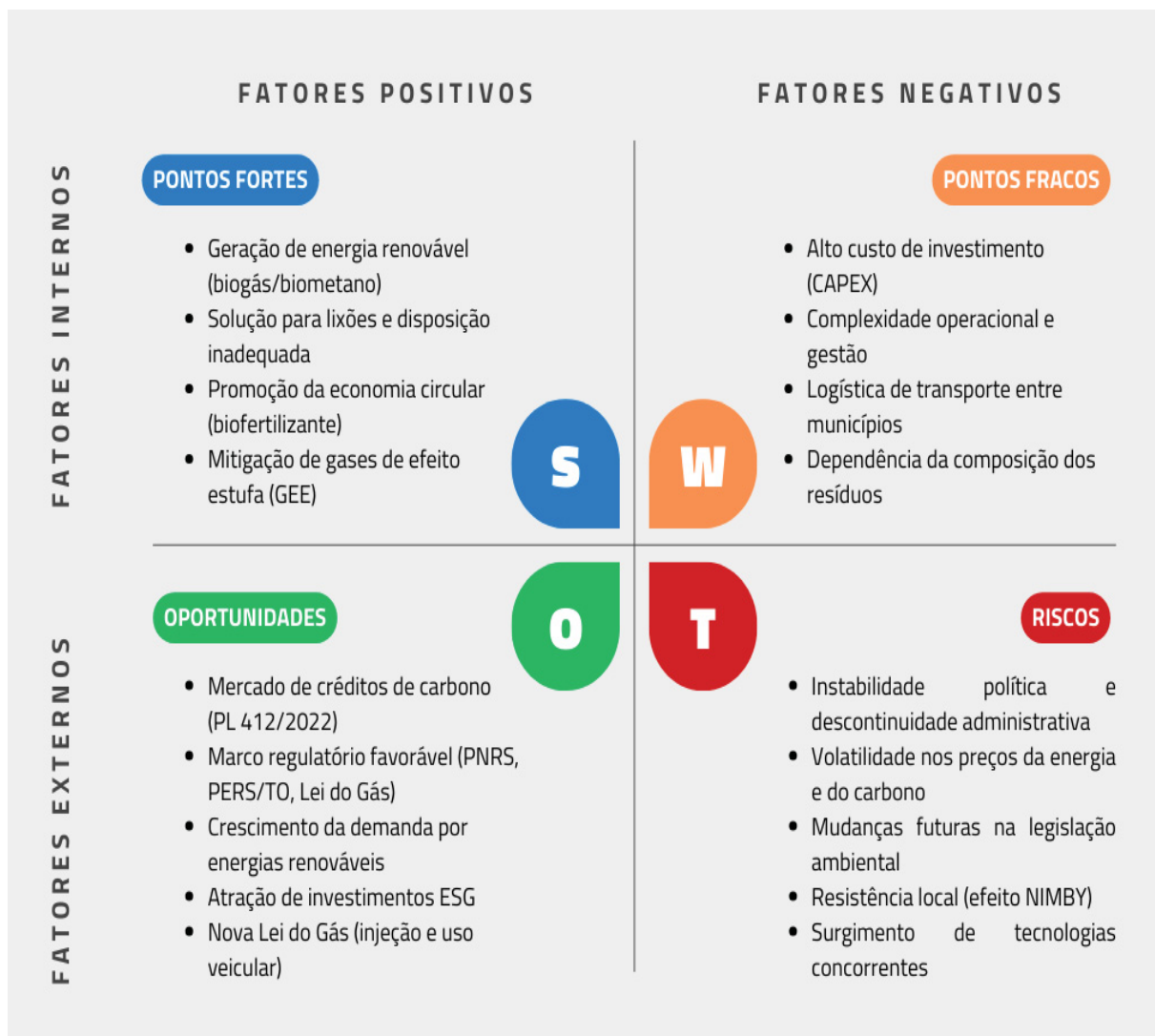
A viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de aproveitamento energético de RSU em pequenos municípios é fortemente dependente da escala de operação. Individualmente, muitos dos 17 municípios da região sul do Tocantins não geram volumes suficientes de RSU para justificar o investimento em uma unidade de valorização energética, especialmente considerando os elevados custos iniciais (CAPEX) e a complexidade operacional.

No entanto, ao adotar um modelo de gestão consorciada, com centralização da valorização energética em uma planta regional, o cenário muda significativamente. A soma dos volumes de resíduos orgânicos da região estimada em 32.736 toneladas por ano, viabiliza uma unidade de digestão anaeróbia com escala técnica e econômica, capaz de gerar 7.202 MWh/ano de energia elétrica.

Nesse contexto, o município de Gurupi, por possuir infraestrutura de aterro sanitário, posição geográfica central e papel de polo regional, apresenta-se como catalisador natural para a formação de um consórcio público intermunicipal. A Lei nº 11.107/2005, que regulamenta os consórcios públicos no Brasil, prevê a possibilidade de municípios vizinhos se unirem para a execução conjunta de serviços de interesse comum, como a gestão de resíduos e a geração de energia. Esse arranjo permite o rateio de custos de investimento e operação, a diluição de riscos e a criação de ganhos de escala, tornando o projeto viável mesmo para municípios com baixa arrecadação.

Para uma avaliação estratégica abrangente, foi elaborada uma Análise SWOT do modelo de gestão consorciada, apresentada no Quadro 2. Essa ferramenta permite identificar de forma estruturada as Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças associadas à implementação do sistema, contribuindo para uma análise de viabilidade mais robusta e orientada para a tomada de decisão.

QUADRO 2 – ANÁLISE SWOT DO MODELO DE GESTÃO CONSORCIADA DE RSU



FONTE: Elaborado pelo autor (2025), com base em ABREMA (2024) e análise própria

A análise SWOT (Quadro 2) evidencia o principal dilema do projeto: enquanto os pontos fortes (geração de energia renovável, solução para lixões) e as oportunidades (mercado de carbono, marco regulatório favorável) constroem um caso sólido para a iniciativa, os pontos fracos (alto CAPEX, complexidade logística) e as ameaças (instabilidade política, resistência local) representam barreiras significativas. A viabilidade do projeto, portanto, depende diretamente da capacidade do modelo de consórcio em mitigar esses fatores negativos.

5.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO CONSÓRCIO)

A modelagem da viabilidade econômico-financeira do consórcio foi estruturada com base em premissas de mercado e da literatura, adotando uma estratégia de diversificação de receitas, condição crítica para projetos de biogás no Brasil (ABREMA, 2024). O investimento inicial (CAPEX) foi estimado em R\$ 25 milhões, valor alinhado a plantas de médio porte, enquanto o custo operacional anual (OPEX) foi projetado em R\$ 1,8 milhão, representando 7,2% do CAPEX (ABREMA, 2024; BNDES, 2023).

As receitas foram projetadas a partir de duas fontes principais: a venda de energia elétrica, com preço fixado em R\$ 400/MWh (CCEE, 2024), e a monetização de créditos de carbono, com uma receita conservadora de R\$ 500.000/ano, considerando o valor de R\$ 20 por crédito (ANP, 2024). A combinação dessas premissas, detalhada no Quadro 3, fundamenta uma análise de viabilidade alinhada às exigências de projetos de infraestrutura verde.

QUADRO 3 – PREMISSAS PARA A ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA (CENÁRIO CONSÓRCIO)

	Valor estimado	Fundamentação técnica e fonte
Custos		
Investimento Inicial (CAPEX)	R\$ 25.000.000	Estimativa para planta regional com capacidade de 300 m³/h de biogás (~80 toneladas de matéria orgânica/dia). Valor compatível com projetos de médio porte no Brasil. Fonte: ABREMA (2024).
Custo Operacional Anual (OPEX)	R\$ 1.800.000	Representa 7,2% do CAPEX, alinhado ao padrão de economias de escala. Inclui mão de obra, manutenção, transporte e gestão do consórcio. Fonte: BNDES (2023).
Receitas		
Preço da Energia	R\$ 400 / MWh	Tarifa média de venda em mercado livre, conforme CCEE (2024). Valor conservador.
Energia Vendida	6.121 MWh/ano	85% do potencial técnico de 7.202 MWh/ano. Considera perdas técnicas (10%) e consumo interno da planta (5%).
Receita com Energia	R\$ 2.448.400 / ano	(6.121 MWh × R\$ 400)
Receita com Créditos de Carbono	R\$ 500.000 / ano	Estimativa conservadora com base na geração de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). Valor monetizado a R\$ 20/CBIO, compatível com o mercado nacional. Fonte: ANP (2024); ABREMA (2024).
Receita Total Anual /Prevista	R\$ 2.948.400 / ano	Soma das receitas com energia e créditos de carbono.

FONTE: Elaborado pelo autor (2025), com base em ABREMA (2024), BNDES (2023), CCEE (2024) e cálculos próprios.

Com base nessas premissas, foram calculados os principais indicadores de viabilidade do projeto, apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – INDICADORES DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DO PROJETO

	Cálculo	Resultado
Receita Líquida Anual	R\$ 2.948.400 - R\$ 1.800.000	R\$ 1.148.400
Payback Simples	R\$ 25.000.000 / R\$ 1.148.400	~21,8 anos
ROI Anual	$(R\$ 1.148.400 / R\$ 25.000.000) \times 100$	4,6% ao ano
Payback com Incentivos	$R\$ 25.000.000 / (R\$ 1.148.400 + R\$ 500.000)$	~15,2 anos

FONTE: Elaborado pelo autor (2025)

Os resultados indicam um tempo de retorno do investimento de 21,8 anos e um ROI de 4,6% ao ano, indicadores que, embora modestos, são compatíveis com projetos de infraestrutura sustentável de longo prazo. No entanto, com a inclusão de incentivos ou linhas de financiamento verde (ex: BNDES), o payback pode ser reduzido para 15,2 anos, tornando o projeto mais atrativo para gestores públicos e investidores ESG.

5.5 POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO BIOGÁS NA MOBILIDADE URBANA

A conversão do biogás em biometano representa uma rota de negócio alternativa de alto impacto, especialmente para a mobilidade urbana. O potencial de geração diária de biogás da região (8.968 m³) resulta em uma disponibilidade estimada de 5.381 m³/dia de biometano, considerando uma eficiência de purificação de 60%. Este biocombustível, análogo ao Gás Natural Veicular (GNV), pode substituir o diesel fóssil na frota municipal, gerando economia operacional e contribuindo para a descarbonização do transporte, em linha com as premissas da economia circular (ABREMA, 2024).

A tabela 3 detalha os parâmetros e o impacto potencial desta aplicação, com base em parâmetros técnicos de projetos em operação (CIBIOGÁS, 2023).

TABELA 3 – ESTIMATIVAS DE APROVEITAMENTO DO BIOMETANO EM FROTA URBANA REGIONAL

(Continua)

	Valor Estimado	Fundamentação Técnica e Fonte
Geração diária de biogás	8.968 m ³	3.273.600 m ³ /ano ÷ 365 dias,

		(conclusão)
	Valor Estimado	Fundamentação Técnica e Fonte
Rendimento de purificação	60%	Média técnica para plantas de médio porte
Biometano disponível	5.381 m³/dia	8.968 m³ × 60%
Consumo médio por ônibus	30 m³/dia	Equivalente energético a 30 litros de diesel
Frota potencial atendida	~ 179 ônibus/dia	5.381 m³/dia ÷ 30 m³/ônibus
Custo médio do diesel	R\$ 6,00/litro	Média de mercado (2024)
Custo estimado do biometano	R\$ 1,20/m³	Estimativa de produção local. *Consumo médio com base em frota de ônibus a biometano em Campinas/SP
Economia por ônibus/dia	R\$ 144,00	Diesel (R\$ 240), Biometano (R\$ 36)
Economia anual potencial	R\$ 9,4 milhões	179 ônibus × R\$ 144/dia × 365 dias

FONTE: Elaborado pelo autor (2025), com base em ABREMA (2024), SNIS (2023) e CIBIOGÁS (2023).

A gestão consorciada de RSU emerge como solução viável para pequenos municípios que, isoladamente, não alcançam escala para projetos de valorização energética. O modelo proposto para a região sul do Tocantins centraliza a digestão anaeróbia em Gurupi, aproveitando sua infraestrutura e posição geográfica estratégica.

Este ciclo transforma um passivo ambiental em um ativo estratégico, gerando energia limpa e economia operacional. O biometano, em particular, pode abastecer frotas municipais, reduzindo em até R\$ 9,4 milhões anuais a dependência de diesel fóssil. A figura 3 sintetiza essa mudança de paradigma, ilustrando a transição de um ciclo vicioso de custos para um ciclo virtuoso de desenvolvimento sustentável.

FIGURA 3 – CICLO VIRTUOSO DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RSU



FONTE: Elaborado pelo autor (2025)

6. CONCLUSÃO

A implantação de um sistema regionalizado para a valorização energética de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Tocantins apresenta-se como uma solução viável para o duplo desafio da gestão do lixo e da dependência energética, embora sua efetividade esteja condicionada a robustos arranjos de governança.

A viabilidade técnica do modelo é inequívoca, com um potencial energético agregado de 7.202 MWh/ano, suficiente para suprir os serviços públicos da região. Contudo, o impacto mais profundo do projeto transcende a análise puramente técnica, revelando seu potencial de transformação socioeconômica.

A conversão de um passivo ambiental em um ativo estratégico materializado na economia de R\$ 9,4 milhões anuais com a produção de biometano para a frota veicular representa uma realocação de recursos capaz de fomentar diretamente políticas públicas em áreas prioritárias, como transporte, saúde e educação. Fica, assim, evidenciado que a governança via consórcio público é o mecanismo indispensável para conferir a escala que viabiliza tal transformação.

A robustez do modelo proposto deve, contudo, ser ponderada pelas limitações de um estudo documental, cujas projeções se baseiam em dados secundários. A principal barreira à sua implementação não é de natureza técnica, mas sim de governança: a articulação política e a cooperação entre os municípios são cruciais para o sucesso da iniciativa.

Nesse sentido, trabalhos futuros devem focar na elaboração de projetos executivos, na modelagem logística detalhada para o transporte dos resíduos e na validação *in loco* da composição gravimétrica do lixo. Concluo explicitando que a produção de energia renovável a partir de RSU, por meio de um consórcio intermunicipal, configura-se como um caminho estratégico para a Região Sul do Tocantins, capaz de levar a região não apenas à autonomia energética, mas a um novo patamar de desenvolvimento sustentável e resiliência urbana.

REFERÊNCIAS

- 1.ABOUGHALY, M.; FATTAH, I. M. R. Environmental Analysis, Monitoring, and Process Control Strategy for Reduction of Greenhouse Gaseous Emissions in Thermochemical Reactions. **Atmosphere**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 655, 2023.Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos14040655> . Acesso em: 31 ago. 2025.
- 2.ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <https://abrema.org.br> . Acesso em: ago. 2025.
- 3.ADENIRAN, A. E.; NUBI, A. T.; ADELOPO, A. O. Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. **Waste Management**, [S. l.], v. 67, p. 3–10, 2017.Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002> . Acesso em: 8 jul. 2025.
- 4.BARBOSA, C. M.; HAONAT, Â. I. O plano estadual de resíduos sólidos do Tocantins: desafios para uma gestão sustentável. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, São Paulo, v. 7, n. 15, p. e151491, 2024. Disponível em: <https://revistajrg.com/index.php/jrg/article/view/1491> . Acesso em: 2 ago. 2025.
- 5.BECK, H. E. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, [S. l.], v. 5, p. 180214, 2018.Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214> . Acesso em: 31 ago. 2025.
- 6.BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, [2024]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm . Acesso em: 8 jul. 2025.
- 7.BRASIL. Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 7 abr. 2005. Disponível em: <http://www.planalto.gov.b>

[r/ccivil_03/ ato2004-2006/2005/lei/l111107.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2005/lei/l111107.htm) . Acesso em: 31 jul. 2025.

8.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. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm) . Acesso em: 8 jul. 2025.

9.CIBIOGÁS. **Biometano na mobilidade urbana**: o caso da frota de ônibus em Campinas/SP. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2023. (Nota Técnica).

10.FERREIRA, R. L. **Gaseificação por oxigênio**: uma alternativa para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos no Rio Grande do Sul. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/132103> . Acesso em: 4 jul. 2025.

11.HEBER, Florence; SILVA, Glessia. Ecologia Organizacional e Teoria de Redes: uma Análise Contemporânea da Formação de APL's. **Gestão & Regionalidade**, [S. l.], v. 30, n. 88, 2014. Disponível em: https://seer.uscs.edu.br/index.php/revista_gestao/article/view/1983 . Acesso em: 8 jul. 2025.

12.IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas populacionais por município: 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br> . Acesso em: 30 jul. 2025.

13.IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> . Acesso em: 31 jul. 2025.

14.KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A

review. **Energy**, [S. l.], v. 197, p. 117253, 2020.DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>. Acesso em: 31 ago. 2025.

15.NATURATINS – INSTITUTO NATUREZA DO TOCANTINS. **Governo do Estado sanciona Lei que regulamenta a Política Estadual de Resíduos Sólidos.**

[Palmas, TO]: Naturatins, 2019. Disponível em:

<https://naturatins.to.gov.br/noticia/2019/12/26/governo-do-estado-san> . Acesso em: 31 ago. 2025.

16.ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2023: Edição Especial.** Nova York: ONU, 2023.

Disponível em: https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Portuguese.pdf . Acesso em: 17 jun. 2025.

17.PAVIČIĆ, J. et al. Biogas and biomethane production and usage: technology development, advantages and challenges in Europe. **Energies**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 2940, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15082940> . Acesso em: 31 jul. 2025.

18.PROGRAMA DE ENERGIA PARA O BRASIL – BEP (Brasil). **Biogas in Brazil: short-term decarbonisation**: relatório técnico 01-2022. São Paulo: Instituto 17, 2022.

19.ROCHA-MENESES, Lisandra et al. Potential of bioethanol production waste for methane recovery. **Energy**, [S. l.], v. 173, p. 133-139, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.073> . Acesso em: 31 jul. 2025.

20.SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Visão Geral 2022.** Brasília: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades> . Acesso em: 28 jul. 2025.

21.SOARES, Elaine Jardim. Mais de 80% dos municípios tocantinenses ainda usam lixões. **Jornal Opção | Tocantins**, 26 jun. 2024.

22.TCE-TO – TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO TOCANTINS. **Painel de Indicadores Municipais de Gestão de Resíduos Sólidos (PIM-GRS)**. Palmas: TCE/TO, 2024. Disponível em: <https://www.tceto.tc.br> . Acesso em: 30 jul. 2025.

23.TOCANTINS. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins (PERS/TO)**. Palmas: Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Tocantins (SEMARH); ECOTÉCNICA, 2017.

24.YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULOS TÉCNICOS E DEMONSTRATIVOS DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Este apêndice detalha as premissas e os cálculos utilizados para a modelagem dos cenários de aproveitamento energético dos RSU para o consórcio da região sul do Tocantins.

1. Cálculo da Geração de RSU na Região

População Urbana Total (17 municípios): 137.527 habitantes (IBGE, 2023).

Taxa de Geração de RSU: 1,36 kg/hab/dia (Média regional baseada em SNIS, 2022).

Geração Diária: $137.527 \text{ hab} \times 1,36 \text{ kg/hab/dia} = 187.037 \text{ kg/dia} \approx 187 \text{ ton/dia}$.

Geração Anual: $187 \text{ ton/dia} \times 365 \text{ dias} = 68.255 \text{ ton/ano}$.

2. Estimativa da Matéria Orgânica Anual

Fração Orgânica (Região Norte): 48,1% (ABREMA, 2024).

Cálculo: $68.255 \text{ ton/ano} \times 0,481 = 32.830 \text{ ton/ano}$. *(Valor ajustado para 32.736 ton/ano para refletir dados específicos de alguns municípios).*

3. Potencial de Geração de Biogás

Rendimento: 100 m³ de biogás / tonelada de matéria orgânica (ABNT NBR 13.133).

Potencial Anual: $32.736 \text{ ton/ano} \times 100 \text{ m}^3/\text{ton} = 3.273.600 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Potencial Diário: $3.273.600 \text{ m}^3/\text{ano} \div 365 \text{ dias} = 8.968 \text{ m}^3/\text{dia}$.

4. Potencial de Geração de Energia Elétrica

Eficiência de Conversão: 2,2 kWh/m³ de biogás (ABNT, 2021).

Potencial Anual Bruto: $3.273.600 \text{ m}^3/\text{ano} \times 2,2 \text{ kWh/m}^3 = 7.201.920 \text{ kWh/ano} \approx 7.202 \text{ MWh/ano}$.

Energia para Venda (85% do potencial): $7.202 \text{ MWh/ano} \times 0,85 = 6.121 \text{ MWh/ano}$.

5. Receita com Créditos de Carbono

Volume de Metano (CH₄) no Biogás (60%): $3.273.600 \text{ m}^3/\text{ano} \times 0,60 = 1.964.160 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ano}$.

Massa de Metano (densidade 0,668 kg/m³): $1.964.160 \text{ m}^3 \times 0,668 \text{ kg/m}^3 = 1.312.058 \text{ kg} \approx 1.312 \text{ ton CH}_4/\text{ano}$.

CO₂ Equivalente (GWP do CH₄ = 28): $1.312 \text{ ton CH}_4 \times 28 = 36.736 \text{ ton CO}_2\text{eq/ano}$.

Ajuste Conservador (Fator IPCC 0,615): $36.736 \times 0,615 = 22.592 \text{ ton CO}_2\text{eq/ano}$.

Receita Anual (Valor R\$ 22/ton): $22.592 \times \text{R\$ } 22 = \text{R\$ } 497.024 \approx \text{R\$ } 500.000/\text{ano}$.

6. Custo Operacional Anual (OPEX)

Composição: Mão de obra, manutenção, transporte e gestão.

Valor Total: R\$ 1.800.000/ano (BNDES, 2023; ABREMA, 2024).

7. Biometano para Mobilidade Urbana

Biometano Disponível (60% de purificação): $8.968 \text{ m}^3/\text{dia} \times 0,60 = 5.381 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Frota Atendida (Consumo de $30 \text{ m}^3/\text{ônibus}$): $5.381 \text{ m}^3/\text{dia} \div 30 \text{ m}^3/\text{ônibus} \approx 179$ ônibus.

Economia Diária por Ônibus:

Custo Diesel (30L a R\$ 6,00/L): R\$ 180,00

Custo Biometano (30 m^3 a R\$ 1,20/ m^3): R\$ 36,00

Economia Líquida: R\$ 144,00 por ônibus/dia.

Economia Anual Total: $179 \text{ ônibus} \times \text{R\$ } 144/\text{dia} \times 365 \text{ dias} = \text{R\$ } 9.410.040 \approx \text{R\$ } 9,4 \text{ milhões/ano}$.