

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Avaliação da Viabilidade Técnico-Econômica e Térmica de um Sistema  
de Cogeração a Biogás com Base em Dados Experimentais em Escala  
Laboratorial**

**Gabriel Pavan Campani**

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos

**Orientação:** Prof. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa

**São Carlos - SP**

**2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Pavan Campani, Gabriel

Avaliação da Viabilidade Técnico-Econômica e Térmica de um Sistema de Cogeração a Biogás com Base em Dados Experimentais em Escala Laboratorial. / Gabriel Pavan Campani - 2025.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos.

Orientador (a): Paula Rúbia Ferreira Rosa

Banca Examinadora: Fábio Bentes Freire, Paula Rúbia Ferreira Rosa, Cali Laguna Achon

1. Cogeração. 2. Biogás. 3. Digestão anaeróbia. I. Campani, Gabriel

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Gabriel Pavan Campani, realizada em 08/12/2025:

---

Professor da Disciplina - Prof. Dr. Fábio Bentes Freire  
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

---

Professor Orientador - Prof. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa  
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos

---

Professor da Disciplina - Prof. Dra. Cali Laguna Achon  
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos

## AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à minha família, em especial aos meus pais, Elizete e Gilson, que dedicaram suas vidas à minha formação, me educando com valores sólidos, apoio incondicional e incentivo constante. A eles devo não apenas a oportunidade de chegar até aqui, mas também a força para persistir nos momentos difíceis. Aos meus irmãos e demais familiares, agradeço pela torcida sincera, apoio nos mais diversos momentos e por contribuírem para que esse caminho fosse o mais leve possível.

Agradeço à minha namorada, Carolina, por trazer leveza e clareza aos meus dias e pensamentos. Por estar ao meu lado nos momentos de incerteza e impaciência, oferecer apoio sincero e palavras que me ajudaram a seguir em frente mesmo quando tudo parecia difícil.

Agradeço à minha orientadora, Prof. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa, por toda a orientação, paciência e dedicação ao longo deste trabalho. Sua disponibilidade em me instruir, esclarecer dúvidas e revisar cada etapa foi essencial para o desenvolvimento do projeto. Agradeço também ao professor Prof. Dr. Fábio Bentes Freire, ministrante da disciplina, pela condução sólida e direcionamento preciso e motivador no decorrer do processo. Por fim, agradeço à professora convidada Dra. Cali Laguna Achon, pela sua disponibilidade e atenção ao meu trabalho.

Agradeço também à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pela estrutura sólida, pela qualidade do ambiente acadêmico e pelas inúmeras oportunidades oferecidas ao longo da minha formação. As atividades de extensão, projetos e vivências proporcionados pela instituição foram fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional, permitindo que eu desenvolvesse habilidades para além do conhecimento técnico e construísse experiências que levarei para toda a vida.

Por fim, agradeço aos meus amigos, que me apoiaram diariamente nas dificuldades enfrentadas.

## RESUMO

Este trabalho avaliou a viabilidade de um sistema hipotético de cogeração a biogás em escala piloto na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), utilizando resíduos alimentares do Restaurante Universitário e resíduos de poda do campus. Com base em dados de caracterização e em ensaios de mono e co-digestão em bancada, foram estimados os fluxos de biogás em escala institucional, modelado o desempenho de um motor gerador ciclo Otto e dimensionado um biodigestor compatível com a oferta de substratos.

Os cenários estudados mostraram comportamentos distintos. A mono-digestão apresentou maior potencial energético, produzindo aproximadamente 3,46 kWh por mês de eletricidade e 4,58 kWh por mês de calor, enquanto a co-digestão resultou em cerca de 2,94 kWh por mês de energia elétrica e 3,89 kWh por mês de energia térmica. As potências nominais contínuas estimadas foram de 5,34 kW para mono-digestão e 4,54 kW para co-digestão, e volumes hipotéticos de biodigestor de 44 m<sup>3</sup> e 83 m<sup>3</sup>, respectivamente. A eficiência global de 79% reforçou a adequação da cogeração para aplicações de pequena escala, com destaque para o atendimento térmico ao Restaurante Universitário.

Foram também avaliados cenários de operação intermitente, que apresentaram potências nominais mais elevadas, porém associados a custos maiores e tempos de retorno inviáveis, sendo considerados inadequados para implantação. Na análise econômica, verificou-se que a recuperação térmica exerce papel determinante, proporcionando economias anuais de 58.080,20 reais para mono-digestão e 62.007,21 reais para co-digestão. Os tempos de retorno variaram de 4 a 25 anos, a depender do CAPEX implementado, indicando maior viabilidade no cenário de co-digestão contínua.

Conclui-se que a cogeração a biogás na UFSCar é tecnicamente viável e apresenta potencial econômico quando operada em regime contínuo com co-digestão, contribuindo para a valorização de resíduos, redução de custos e fortalecimento das ações institucionais de sustentabilidade.

Palavras-chave: cogeração; biogás; digestão anaeróbia; resíduos alimentares; resíduos de poda; análise econômica

## ABSTRACT

This work evaluated the technical, energetic, and economic feasibility of a pilot-scale biogas cogeneration system at the Federal University of São Carlos (UFSCar), using food waste from the University Restaurant and pruning residues generated on campus. Based on characterization data and bench-scale mono and co-digestion assays, institutional scale biogas flows were estimated, the performance of an Otto-cycle engine-generator was modeled, and a pilot biodigester was sized according to substrate availability.

The scenarios analyzed exhibited distinct behaviors. Mono-digestion showed higher energy potential, producing approximately 3.46 kWh per month of electricity and 4.58 kWh per month of heat, whereas co-digestion resulted in about 2.94 kWh per month of electrical energy and 3.89 kWh per month of thermal energy. The estimated continuous nominal capacities were 5.34 kW for mono-digestion and 4.54 kW for co-digestion, with digester volumes of 44 m<sup>3</sup> and 83 m<sup>3</sup>, respectively. A global efficiency of 79 percent reinforced the suitability of cogeneration for small-scale applications, particularly for meeting the thermal demands of the University Restaurant.

Intermittent operation scenarios were also evaluated, yielding higher nominal power outputs but incurring greater costs and impractical payback times, thus being considered unsuitable for implementation. The economic analysis highlighted the decisive role of heat recovery, providing annual savings of 58,080.20 BRL for mono-digestion and 62,007.21 BRL for co-digestion. Payback times were between 4 and 25 years, according with the CAPEX oscillation, indicating greater feasibility for continuous co-digestion.

It is concluded that biogas cogeneration at UFSCar is technically viable and economically promising when operated continuously with co-digestion, contributing to waste valorization, cost reduction, and the strengthening of institutional sustainability initiatives.

Keywords: cogeneration; biogas; anaerobic digestion; food waste; pruning residues; economic analysis.

# SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	7
LISTA DE SIGLAS .....	9
1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVOS .....	12
2.1. Objetivos Específicos .....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
3.1 Resíduos Orgânicos e seu Potencial Energético no Contexto da Transição Sustentável .....	13
3.2. Digestão Anaeróbia: Fundamentos e Aplicações .....	20
3.3. Composição e Qualidade do Biogás .....	30
3.4. Cogeração de Energia (CHP) a Partir do Biogás .....	36
3.5. Ciclo Otto e Aplicações em Microgeração .....	44
3.6. Aproveitamento Energético em Sistemas de Cogeração .....	50
3.7. Aspectos Econômicos de Sistemas de Cogeração .....	54
3.8. Síntese e Lacunas Identificadas na Literatura .....	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	60
4.1. Quantificação da Disponibilidade de SV dos RA e Poda .....	60
4.2. Quantificação da Produção de Biogás e Metano nos Cenários de Mono e Co-digestão .....	62
4.3. Potencial Energético do Biogás nos Cenários de Mono e Co-digestão .....	64
4.4. Dimensionamento Teórico do Sistema CHP .....	65
4.5. Potencial Aproveitamento e Eficiência Global do Sistema .....	66
4.6. Análise Econômica Preliminar .....	67
4.7. Recomendações Técnicas para implementação Piloto na UFSCar, São Carlos ..	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	74
5.1. Disponibilidade de Sólidos Voláteis nos Resíduos Alimentares e de Poda na UFSCar São Carlos .....	74
5.2. Quantificação da Produção de Biogás e Metano nos Cenários de Mono e Co-digestão .....	75
5.3. Potencial Energético do Biogás nos Cenários de Mono e Co-digestão .....	78
5.4. Dimensionamento Conceitual do Sistema CHP .....	80
5.5. Potencial Aproveitamento e Eficiência Global do Sistema .....	82
5.6. Análise Econômica Preliminar .....	84
5.7. Recomendações Técnicas Implantação Piloto na UFSCar, São Carlos .....	90

<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>

## **LISTA DE SIGLAS**

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RA – Resíduo Alimentar

FORSU – Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos

SV – Sólidos Voláteis

DA – Digestão Anaeróbia

GEE - Gases do Efeito Estufa

AGVs - Ácidos Graxos Voláteis

CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

IRENA – International Renewable Energy Agency

CIBiogas - Centro Internacional de Energias Renováveis

Abiogás - Associação Brasileira do Biogás

I/S – Relação inóculo substrato

CHP – Combined Heat and Power

GLP – Gás liquefeito de petróleo

RU – restaurante universitário

HU – Hospital universitário

TRH – Tempo de retenção hidráulica

CAPEX - Capital Expenditure

OPEX - Operational Expenditure

FC - Fator de Carga

SGAS – Secretaria geral de gestão Ambiental e sustentabilidade

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

PGRS – Programa de gerenciamento de resíduos sólidos

ODS – Objetivos de desenvolvimento sustentável

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos, especialmente da fração orgânica (FORSU), representa um dos principais desafios ambientais e de infraestrutura enfrentados pelas cidades contemporâneas. No Brasil, esse cenário se agrava devido à expansão populacional, ao aumento do consumo e à destinação inadequada de resíduos, que contribui para a formação de chorume e para a emissão de gases de efeito estufa (CETESB, 2022; ABRELPE, 2023). A fração orgânica se destaca por sua elevada biodegradabilidade, o que a torna adequada a processos de tratamento como a compostagem e a digestão anaeróbia (DA) (EMBRAPA, 2019). Quando manejada inadequadamente, entretanto, essa fração intensifica problemas ambientais, como a geração de metano em aterros e a contaminação de corpos hídricos (Kurihara, 2024; EPA, 2023).

Diante desse contexto, destaca-se a necessidade de soluções que combinem tratamento adequado dos resíduos e geração de energia renovável. A DA surge como uma tecnologia relevante nesse cenário, possibilitando simultaneamente a estabilização da matéria orgânica e a produção de biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono (EMBRAPA, 2019; Oliveira et al., 2022). Este biocombustível pode ser utilizado para diversas finalidades, incluindo a cogeração de energia elétrica e térmica, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a redução de emissões de gases de efeito estufa (IRENA, 2018).

Estudos recentes apontam que o resíduo alimentar (RA) e restos de poda apresentam características físico-químicas complementares para fins energéticos, sobretudo devido ao alto teor de umidade e compostos nitrogenados dos RA e ao conteúdo lignocelulósico da poda urbana (Gueri et al., 2024; Demichelis et al., 2025). Essa complementaridade favorece sua utilização conjunta em sistemas de biodigestão, viabilizando operações mais estáveis e eficientes. Além disso, a valorização energética desses resíduos integra-se aos princípios da economia circular e às metas globais de mitigação climática, ao reinserir materiais antes descartados no ciclo produtivo (Kakkar et al., 2024; Bristol et al., 2024).

No âmbito das instituições de ensino superior, a adoção de tecnologias sustentáveis para a gestão de resíduos tem ganhado destaque. Universidades dispõem de infraestrutura, capacidade técnica e perfil institucional adequados para implementação de soluções demonstrativas e replicáveis, alinhadas ao tripé ensino–pesquisa–extensão (Cunto et al.,

2022; Freitas; Soares, 2020). Estudos apontam que campi universitários concentram uma fração significativa de FORSU, frequentemente sem tratamento adequado, o que revela uma oportunidade estratégica para projetos de valorização energética (Silva; Andrade, 2023; Pereira, 2023). Além disso, as instituições podem servir como modelos para municípios de médio e pequeno porte, promovendo inovação tecnológica e alfabetização ambiental.

Nesse contexto, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) apresenta um ambiente favorável para o desenvolvimento de sistemas descentralizados de DA e cogeração. Além da geração contínua de RA no Restaurante Universitário (RU) e de resíduos de poda nas áreas verdes, a universidade possui iniciativas voltadas à sustentabilidade e à gestão responsável de resíduos, como os vistos nos trabalhos de Gomes et al., 2019. A adoção de sistemas de cogeração a biogás baseados nesses resíduos pode, portanto, contribuir tanto para a redução dos impactos ambientais quanto para o avanço de pesquisas aplicadas em energia renovável.

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade de um sistema hipotético de cogeração a biogás fundamentado em dados experimentais de DA em escala laboratorial. A análise integra a caracterização físico-química dos RA e de poda, os rendimentos específicos de produção de biogás obtidos em reatores de bancada e a modelagem energética de um sistema CHP (*Combined Heat and Power*) baseado em motogerador ciclo Otto. Por meio dessa abordagem, busca-se oferecer subsídios para a eventual implantação de uma unidade piloto na UFSCar, contribuindo para o fortalecimento da sustentabilidade institucional e para o avanço do conhecimento sobre tecnologias de valorização energética em ambientes universitários.

## **2. OBJETIVOS**

O presente trabalho de graduação tem como objetivo geral avaliar a viabilidade hipotética de um sistema de cogeração a biogás, fundamentado nos dados experimentais de DA conduzidos em reatores de bancada de 250 mL, utilizando RA do Restaurante Universitário (RU) e resíduos de poda da Universidade Federal de São Carlos. Essa abordagem busca integrar a caracterização real dos substratos, os rendimentos específicos de produção de biogás observados em laboratório e a aplicação potencial do biogás em um motogerador ciclo Otto adaptado para sua utilização na instituição.

## 2.1. Objetivos Específicos

Têm-se como objetivos específicos:

- a) Estimar a disponibilidade de sólidos voláteis (SV) disponíveis nos RA e de poda gerados na instituição, a partir dos dados experimentais de caracterização destes resíduos;
- b) Quantificar a produção de biogás e metano na escala institucional, a partir da mono e co-digestão dos RA e de poda, utilizando exclusivamente os rendimentos experimentais obtidos nos reatores de 250 mL;
- c) Estimar o potencial energético do biogás gerado a partir dos dados experimentais, por ambos cenários de DA (mono e co-digestão), convertendo a disponibilidade de metano em energia química e, posteriormente, em energia elétrica e térmica a partir do uso teórico em um motogerador ciclo Otto;
- d) Dimensionar conceitualmente o sistema de cogeração CHP, especificando a potência elétrica e térmica resultante;
- e) Avaliar o aproveitamento potencial do sistema, estimando a eficiência global e a capacidade de atendimento das demandas internas do campus de energia elétrica e térmica;
- f) Realizar uma análise econômica preliminar, contemplando investimentos de capital (CAPEX), custos de operação e manutenção (OPEX), custos evitados com o aproveitamento da energia gerada pelo sistema e tempo de retorno (*payback*);
- g) Propor recomendações técnicas para uma eventual implantação piloto na UFSCar.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Resíduos Orgânicos e seu Potencial Energético no Contexto da Transição Sustentável

A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) corresponde à parcela biodegradável composta principalmente por restos alimentares, cascas de frutas e vegetais, borra de café, resíduos de jardinagem e outros materiais de origem vegetal ou animal (CETESB, 2022). Essa fração apresenta elevada capacidade de decomposição biológica, sendo adequada ao tratamento por compostagem e DA (EMBRAPA, 2019). Além disso, por seu alto teor de umidade e matéria orgânica, a disposição inadequada da

FORSU em aterros sanitários favorece a produção de chorume e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo metano, cuja intensidade de aquecimento global é muito superior à do CO<sub>2</sub> (EPA, 2023; Remmas et al., 2023). Em escala nacional, a geração de resíduos tem aumentado nas últimas décadas, acompanhando o crescimento populacional e padrões de consumo. Segundo a ABRELPE (2024), o Brasil produziu cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2022, frente a aproximadamente 60 milhões em 2012.

A geração de lixiviado de aterros, resultante da degradação da matéria orgânica dos resíduos, contribui diretamente para a formação do biogás de aterro, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono (Kurihara, 2024). Estudos recentes demonstram que a FORSU pode apresentar poder calorífico inferior entre 3 e 6 MJ/kg, reforçando seu potencial energético em sistemas de conversão térmica ou biológica (Bristol et al., 2024; Arshad et al., 2025). Entretanto, grande parte desse recurso permanece subutilizado. Estima-se que mais de 30% dos resíduos urbanos globais ainda não recebem manejo adequado, agravando impactos ambientais e dificultando avanços na transição energética (Bristol et al., 2024). No contexto brasileiro, a FORSU representa cerca de 50% dos resíduos coletados, majoritariamente composta por RA e restos de poda urbana (ABRELPE, 2023).

Nesse cenário, a DA destaca-se como alternativa tecnológica capaz de reduzir emissões dos GEE, estabilizar a matéria orgânica e produzir biogás e biofertilizantes. Trabalhos recentes indicam que a aplicação de sistemas descentralizados de DA pode aumentar a recuperação energética e contribuir para estratégias locais de mitigação climática (Santos et al., 2023), além de favorecer a substituição de combustíveis fósseis, o biogás gerado a partir da FORSU pode elevar a segurança energética de instituições e centros urbanos (Kakkar et al., 2024). Em algumas regiões, observa-se inclusive o coprocessamento da FORSU em fornos de cimento ou sua utilização para geração de biocombustíveis avançados, ampliando o espectro de valorização energética (ABRELPE, 2024).

Assim, a DA, integrada a sistemas de cogeração, constitui uma solução alinhada aos princípios da economia circular ao reinserir os resíduos orgânicos no ciclo produtivo como energia e insumos agrícolas. A adequada gestão da FORSU, portanto, não apenas reduz os impactos associados à disposição em aterros, como também representa uma oportunidade estratégica para reforçar a sustentabilidade e a eficiência energética de ambientes urbanos e institucionais.

### 3.1.1. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos

A gestão dos resíduos no Brasil, representa um dos principais gargalos ambientais e de infraestrutura nas cidades, exigindo soluções que englobem diversos setores. Os desafios se intensificam em relação a FORSU, que, apesar de corresponder a cerca de 50% dos resíduos urbanos gerados (ABRELPE, 2023), ainda enfrenta barreiras nos sistemas convencionais de coleta e tratamento. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2023), mais de 40% dos municípios brasileiros ainda não contam com sistemas ambientalmente adequados de destinação final, e apenas uma pequena parcela realiza algum tipo de aproveitamento dos resíduos orgânicos.

Entre os principais desafios para a gestão eficaz da FORSU estão a falta de investimentos públicos, a ausência de políticas estruturadas de incentivo ao reaproveitamento energético e agrícola, bem como dificuldades logísticas, técnicas e institucionais. Além disso, muitas cidades brasileiras preocupam-se com a destinação final dos resíduos, mas não com a redução nas fontes de geração, o que acaba por reduzir as políticas públicas acerca da prevenção da poluição, colocando em destaque a responsabilidade social de cada indivíduo e dos governos (Berticelli; Pandolfo; Korf, 2016).

De acordo com Silva et al. (2022), os recursos destinados à gestão da FORSU representam, em média, menos de 0,3 % do orçamento municipal, sendo direcionados majoritariamente às etapas de coleta e transporte. Esse cenário reflete a limitada destinação de investimentos para o tratamento e valorização da FORSU, justamente a parcela com maior potencial de aproveitamento energético e recuperação de nutrientes. Conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2023) e o Ministério do Meio Ambiente (2024), a ausência de infraestrutura adequada para o processamento da FORSU compromete as metas de redução de emissões e desperdiça oportunidades de geração de biogás e biofertilizantes, reforçando a necessidade de estratégias municipais integradas de valorização orgânica e transição sustentável no setor de resíduos.

Apesar das diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a implementação efetiva de sistemas de compostagem ou DA ainda não são eficazes em razão da baixa priorização orçamentária e da carência de instrumentos de fomento à inovação tecnológica (Santos et al, 2023). Nesse cenário, a FORSU acaba sendo tratada como rejeito, sem qualquer tipo de segregação, o que compromete tanto seu

reaproveitamento quanto os processos de reciclagem de outros materiais, pela contaminação dos recicláveis secos. Esses obstáculos são vistos também em instituições federais, que deveriam demonstrar seu papel efetivo neste cenário. Este fato foi observado pela falta de Planos de Gerenciamento de Resíduos (PGRS) vista em muitos destes locais, e pela falta de ações afirmativas que auxiliem os estudantes e docentes a segregar, acondicionar, tratar e destinar corretamente esses resíduos. As instituições de ensino poderiam ser locais demonstrativos de soluções descentralizadas de tratamento de resíduos (Carvalho, 2024).

Além disso, estudos recentes apontam que a descentralização do tratamento de resíduos orgânicos, por meio de sistemas locais de valorização energética, pode representar uma solução viável frente à escassez de infraestrutura pública e aos altos custos de grandes centrais de processamento (Arshad *et al.*, 2025). Essa abordagem permite alinhar os objetivos de segurança energética e mitigação ambiental com a realidade orçamentária e operacional de municípios de médio e pequeno porte, sobretudo em países do Sul Global.

Apesar dessas limitações, observa-se que a iniciativa privada começa a despontar como agente promotor de inovação e investimentos no setor, especialmente com a crescente valorização de modelos de economia circular e a busca por fontes alternativas de energia. Exemplos como o projeto de biodigestores implantado no Ceasa de Curitiba (PR), com capacidade de processar até 30 toneladas de RA por dia e gerar biogás para uso térmico e elétrico, mostram o potencial de parcerias entre instituições público e privadas no enfrentamento do problema (Mendonça; Costa, 2021). De maneira semelhante, startups e cooperativas têm se destacado com soluções locais de compostagem e aproveitamento energético, embora ainda operem em escala limitada frente à dimensão do problema nacional.

A DA surge, nesse contexto, como uma estratégia promissora para o tratamento descentralizado dos resíduos orgânicos urbanos. Além de reduzir o volume da FORSU enviada a aterros sanitários e as emissões de gases de efeito estufa, esse processo permite a geração de biogás e biofertilizante, promovendo benefícios ambientais, energéticos e econômicos (EMBRAPA, 2019; Oliveira *et al.*, 2022). No entanto, para que essa tecnologia seja adotada em larga escala, é necessário criar ambientes regulatórios mais favoráveis, linhas de financiamento específicas, incentivos fiscais e programas de educação ambiental voltados à segregação na fonte e valorização de resíduos.

Portanto, a superação dos desafios relacionados à gestão da FORSU demanda um esforço conjunto entre os setores público, privado e a população como um todo. A adoção de tecnologias como a DA e a inserção da energia contida na FORSU, convertida em biogás, na matriz energética urbana são medidas fundamentais para uma transição energética justa e sustentável, alinhada com os compromissos internacionais de redução de emissões e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

### 3.1.2. O papel das universidades e o contexto da UFSCar

As universidades públicas exercem papel estratégico na promoção do desenvolvimento sustentável, por meio das suas funções de ensino, pesquisa e extensão. Na gestão de resíduos, por exemplo, podem servir como espaços de demonstração tecnológica e formação crítica, moldando a futura mão de obra do país e funcionando como referência para a sociedade.

No enfrentamento de desafios urbanos, como a gestão de resíduos sólidos, essas instituições podem atuar como agentes catalisadores de inovação, capacitação e disseminação de práticas sustentáveis. Por contarem com autonomia administrativa e infraestrutura, as universidades configuram-se como espaços privilegiados para experimentos e validação de tecnologias ambientais, funcionando como cobaias, onde soluções sustentáveis podem ser testadas em escala real (Ribeiro *et al.*, 2021).

Nesse contexto, destaca-se a importância das instituições federais no avanço de tecnologias para o reaproveitamento energético da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. A Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) apresenta um cenário particularmente propício para a aplicação de sistemas descentralizados de DA e cogeração de energia com biogás. Localizada em um município com tradição em ciência e tecnologia, e reconhecida nacionalmente por sua atuação em áreas como engenharia ambiental, química e gestão pública, a UFSCar dispõe de um ambiente institucional e técnico adequado para a incorporação de práticas alinhadas aos princípios da economia circular (Gomes *et al.*, 2019; UFSCar, 2022).

Conforme destacado por Arshad *et al.* (2025), instituições descentralizadas como universidades configuram-se como espaços estratégicos para experimentação e expansão de tecnologias de valorização energética de resíduos, especialmente em países em desenvolvimento.

A universidade gera diariamente uma quantidade significativa de resíduos orgânicos, oriundos principalmente dos restaurantes universitários, hortas experimentais, resíduos

de poda e atividades laboratoriais. No entanto, a destinação desses resíduos ainda é predominantemente tradicional, com envio a aterros sanitários ou sistemas municipais convencionais, o que evidencia uma lacuna entre as práticas operacionais e os objetivos institucionais de sustentabilidade (UFSCar, 2022; Gomes et al., 2019). A ausência de um programa institucional robusto de valorização da FORSU, que incorpore segregação na fonte, logística interna e tecnologias de aproveitamento como compostagem ou DA, revela uma desconexão entre o discurso e a prática ambiental universitária, limitando o potencial de geração de biogás (Freitas; Soares, 2020; Silva; Andrade, 2023). Estudos e iniciativas locais, como ensaios conduzidos por estudantes em escala laboratorial (Carvalho, 2024), demonstram que há capacidade técnica e material dentro do campus para implantar projetos-piloto; contudo, sua expansão depende de planejamento institucional, alocação orçamentária e articulação interdepartamental.

Isso representa uma perda de oportunidade para a autossuficiência energética e a formação prática de estudantes em tecnologias sustentáveis. Segundo estudo de Silva e Andrade (2023), mais de 70% dos resíduos gerados em campi universitários brasileiros são compostos por FORSU, e poderiam ser integralmente tratados com tecnologias como a DA, caso houvesse apoio institucional e articulação interdepartamental.

Pereira (2023) também destaca que, apesar da existência de diretrizes ambientais em muitas instituições de ensino superior, a maior parte ainda não implementa de forma estruturada mecanismos de monitoramento e ações nos eixos de resíduos e energia. A pesquisa aponta ainda a carência de articulação entre departamentos e a baixa integração entre ensino, gestão institucional e sustentabilidade operacional.

Na UFSCar, experiências anteriores como pesquisas de práticas de compostagem, estações de recuperação de resíduos perigosos e outras iniciativas demonstram o compromisso institucional com a sustentabilidade. Estudos recentes sobre a gestão de resíduos em universidades brasileiras reforçam esse papel estratégico das instituições de ensino na promoção de práticas sustentáveis. Cunto (2022) destacam que programas de compostagem e educação ambiental em campi universitários contribuem significativamente para a redução de resíduos enviados a aterros e fortalecem a cultura de responsabilidade socioambiental. Assim, a introdução de biodigestores experimentais, acompanhados de sistemas de monitoramento acadêmico, não apenas representaria a redução dos impactos ambientais das atividades universitárias, como também proporcionaria um ambiente real de ensino e aprendizagem interdisciplinar e voltado à resolução de problemas concretos (Freitas; Soares, 2020).

Portanto, ao integrar seus resíduos orgânicos em sistemas locais de reaproveitamento energético, a UFSCar pode consolidar-se como modelo replicável de universidade sustentável, promovendo conhecimento, inovação e responsabilidade socioambiental. Assim, ao alinhar a gestão de resíduos com políticas de transição energética e economia circular, a universidade pode ampliar seu impacto local e fortalece sua relevância nacional no enfrentamento da crise climática e na promoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

### 3.1.3. Potencial de valorização energética de resíduos alimentares e podas

RA e restos de poda urbana representam biomassas urbanas de alta disponibilidade e valor energético, geradas em larga escala e de forma contínua em centros urbanos, especialmente em instituições como universidades, mercados municipais, parques e restaurantes coletivos (IPT, 2023). No entanto, como já destacado, ainda são amplamente descartados como rejeitos.

A literatura evidencia que essas biomassas apresentam características físico-químicas complementares para fins energéticos. Resíduos de cozinha, são ricos em umidade, lipídios e compostos nitrogenados, enquanto os resíduos da poda, como folhas, galhos e grama, contêm altos teores de fibras lignocelulósicas e carbono estrutural, conferindo maior estabilidade térmica e poder calorífico às misturas (Gueri *et al.*, 2024). Gueri *et al.* (2024) destacam ainda que folhas e galhos apresentam baixa densidade energética quando não compactados ou secos, exigindo estratégias de pré-processamento simples, como secagem ao ar, para melhorar a eficiência da queima ou do aproveitamento térmico.

Segundo Demichelis *et al.* (2025), resíduos lignocelulósicos como poda apresentam poder calorífico superior (PCS) entre 12 e 20 MJ/kg, enquanto RA frescos, dependendo da composição, variam entre 4 e 10 MJ/kg. Já Shrestha *et al.* (2023) reforçam que, mesmo em sistemas de pequena escala, o aproveitamento energético de RA pode fornecer energia suficiente para cozinhar ou aquecer água em unidades públicas, a depender da densidade populacional e da frequência de coleta.

Além do aproveitamento biológico por DA, a valorização energética da FORSU também pode ocorrer por rotas complementares, como o uso térmico controlado ou a integração a microssistemas híbridos, desde que adequadamente dimensionados às características locais (Kakkar *et al.*, 2024). Tais abordagens ampliam as possibilidades de

recuperação de energia e reduzem a dependência de fontes fósseis, sobretudo em instituições públicas e ambientes urbanos descentralizados.

A integração dessas biomassas em soluções energéticas urbanas está alinhada aos princípios da economia circular e da redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo o aproveitamento local de recursos e a autossuficiência parcial em energia térmica. Conforme Castro et al. (2025), o uso do calor proveniente de resíduos de poda pode suprir demandas específicas, como o aquecimento de água em laboratórios, refeitórios e outras instalações públicas, quando integrado a sistemas de recuperação energética já existentes.

Por fim, a valorização energética da FORSU possui elevada relevância estratégica para a transição energética, redução das emissões de gases de efeito estufa e promoção de soluções circulares nos centros urbanos, devendo ser explorada de forma tecnicamente adequada segundo a vocação local e a disponibilidade dos resíduos.

### **3.2. Digestão Anaeróbia: Fundamentos e Aplicações**

A DA é uma técnica consolidada para o tratamento de resíduos orgânicos, especialmente aqueles de origem doméstica, agroindustrial e institucional. O processo baseia-se na degradação da matéria orgânica por sistemas microbianos em ambiente isento de oxigênio, resultando na produção de biogás, composto majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além do digestato, rico em nutrientes e com potencial uso como biofertilizante (Khanal, 2008; Demirbas, 2010; Sharma *et al.*, 2025).

A DA é composta por quatro etapas: hidrólise, sendo a etapa inicial e limitante do processo, visando principalmente a quebra de carboidratos, proteínas e lipídios; acidogênese, onde ocorre a metabolização das bactérias fermentadas em ácidos graxos, álcool, hidrogênio e ácido carbônico, permitindo assim um ambiente ácido; acetogênese permitindo que o álcool e os ácidos graxos sejam transformados em ácido acético, assim como o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos por bactérias acetogênicas, mantendo assim o equilíbrio desse processo; e metanogênese, sendo a etapa final da DA, convertendo os substratos em metano e ácido carbônico (Santos *et al.*, 2023).

No contexto de instituições públicas e centros urbanos, a DA tem ganhado destaque como ferramenta educativa, ambiental e energética, permitindo que esses locais apliquem e utilizem biodigestores para tratar resíduos de restaurantes e hortas, produzindo energia térmica e elétrica em pequena escala, conseqüentemente pode-se envolver estudantes e

pesquisadores na operação e monitoramento desses sistemas (Sharma *et al.*, 2025). Na Universidade Federal do Rio de Janeiro, foi conduzido um estudo experimental em escala de bancada avaliando a digestão de RA e esgoto em biodigestores anaeróbios, com resultados positivos na geração de biogás e na eficiência de conversão da matéria orgânica (Brunhara *et al.*, 2019). De forma semelhante, a Universidade Estadual de Campinas firmou parceria institucional para implantação de um biodigestor em restaurantes universitários, com o objetivo de aproveitar RA e promover práticas de economia circular no campus (UNICAMP, 2025). Essas experiências demonstram o papel das universidades como espaços de inovação e difusão de tecnologias sustentáveis no contexto da transição energética.

Dessa forma, compreender os fundamentos bioquímicos da DA é essencial para avaliar o desempenho do processo em diferentes contextos aplicados. Essa compreensão permite identificar os fatores que condicionam sua estabilidade, como a composição dos substratos, o balanço de nutrientes e as variáveis operacionais do reator. Considerando o foco deste trabalho, a seguir são discutidos os principais parâmetros físico-químicos que influenciam a eficiência da DA, com ênfase nos RA e de poda urbana, por representarem fluxos significativos e de alta relevância em ambientes institucionais.

### 3.2.1. Fatores que afetam a eficiência: composição e pré-tratamento

A eficiência da DA depende de uma série de fatores físico-químicos e operacionais que influenciam diretamente a atividade microbiana e a estabilidade do processo. Segundo Cremonez *et al.* (2021), parâmetros como pH, temperatura, relação carbono/nitrogênio, tempo de retenção hidráulica (TRH), concentração de sólidos e carga orgânica aplicada são determinantes para o desempenho do sistema. Alterações bruscas em qualquer um desses fatores pode comprometer a atividade das bactérias metanogênicas, resultando em desequilíbrios, queda na produção de metano ou até falhas no processo. Além disso, a presença de compostos tóxicos, como amônia e metais pesados, pode inibir o metabolismo microbiano, exigindo controle rigoroso das condições de operação. Dessa forma, o conhecimento e o monitoramento contínuo desses parâmetros são essenciais para garantir a estabilidade, a eficiência e a viabilidade técnica dos sistemas de DA.

Ademais, a eficiência do processo DA é fortemente condicionada pela composição físico-química da biomassa utilizada, especialmente quando se trata de RA e resíduos de

poda urbana. Nesse contexto, o uso de co-substratos, isto é, a combinação de dois ou mais resíduos com características complementares, é uma estratégia reconhecida para melhorar o balanço nutricional, aumentar a estabilidade do processo e potencializar a produção de metano (Kakkar *et al.*, 2024; Shrestha *et al.*, 2023).

Esses substratos apresentam características distintas e complementares: os RA são altamente biodegradáveis, ricos em umidade e nutrientes, enquanto a poda urbana possui estrutura lignocelulósica resistente, com alto teor de carbono fixo e baixa solubilidade. A codigestão desses resíduos tem se mostrado eficiente para equilibrar a relação C/N e promover maior estabilidade e rendimento no processo de DA (Gueri *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2023; Carvalho, 2024).

Entre os parâmetros mais relevantes, destacam-se: a relação carbono/nitrogênio (C/N) ideal entre 20 e 30:1, o pH próximo à neutralidade (6,8–7,5), a temperatura de operação (mesofílica ou termofílica), a concentração de S e a presença de compostos inibitórios, como amônia e metais pesados (Khanal, 2008). A co digestão, que combina resíduos com perfis complementares, como alimentos e podas urbanas, tem se mostrado eficiente para melhorar a estabilidade do processo e otimizar a produção de metano (Khanal, 2008; Shrestha *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023).

Além desses fatores, os pré-tratamentos aplicados à biomassa desempenham papel crucial, sobretudo no caso dos resíduos de poda, cuja estrutura lignocelulósica dificulta a quebra enzimática na etapa de hidrólise. Os pré-tratamentos têm por objetivo romper as barreiras físicas e químicas, solubilizar compostos orgânicos complexos e tornar os substratos mais acessíveis à ação microbiana. (Prasad *et al.*, 2024). A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais categorias de pré-tratamento aplicáveis a resíduos lignocelulósicos e mistos, como poda e RA, com seus respectivos mecanismos, vantagens e limitações. Enquanto a Tabela 3.2 traz aplicações do pré-tratamento aplicado para a DA.

**Tabela 3.1.** Vantagens e limitações de diferentes pré-tratamentos

<b>Tipo</b>	<b>Mecanismo Principal</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>	<b>Referência</b>
Físico	Trituração, moagem, peneiramento.	Simples, baixo custo, fácil aplicação, aumento da área superficial para etapas subsequentes (AD, compostagem). Par RA há uma melhora das rotas de valorização.	Não aumenta por si só a biodegradabilidade; demanda energética necessária; sensível à contaminação e heterogeneidade dos resíduos urbanos.	Gueri <i>et al.</i> (2024); Shrestha <i>et al.</i> (2023).
Térmico	Aquecimento (70–180 °C), secagem, estabilização térmica.	Aumento da solubilidade, melhoria da sanitização, viabilização de rotas térmicas pela secagem.	Alto consumo energético (RA úmido), necessidade do controle das emissões de rotas térmicas, pode ocorrer a formação de subprodutos.	Pradeshwaran <i>et al.</i> (2024); Shrestha <i>et al.</i> (2023).
Químico	Uso de álcalis (NaOH), ácidos (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) e ajuste de pH para rotas biológicas.	Alta eficiência na quebra de lignocelulose, favorecimento da formação de biogás.	Riscos ambientais e corrosividade, requer também manuseio seguro dos reagentes.	Gueri <i>et al.</i> (2024); Shrestha <i>et al.</i> (2023)
Biológico	Pré-hidrólise enzimática	Processo brando, seu à utilização de reagentes tóxicos, relevante na integração de cadeias urbanas de biogás.	Lento, dependente de condições específicas, necessidade de controle biológico.	Gueri <i>et al.</i> (2024); Shrestha <i>et al.</i> (2023)
Térmico-alcalino	Combinação de calor com NaOH ou Ca(OH) <sub>2</sub> para solubilizar fibras.	Alta eficiência de desestruturação em resíduos lignificados com ganhos de solubilidade.	Elevado custo operacional, necessidade de neutralização e manejo de sais.	Gueri <i>et al.</i> (2024); Shrestha <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Autor (2025)

**Tabela 3.2.** Trabalhos com pré-tratamento aplicado a DA de RA e poda

<b>Tipo de Pré-tratamento</b>	<b>Referência</b>	<b>Substrato</b>	<b>Resultado/Observação</b>	<b>Limitações</b>
Físico	Shrestha <i>et al.</i> (2023)	RA + Poda	Trituração e moagem aumentam área de contato microbiana	Limitação energética para grandes volumes
Térmico	Ghimire <i>et al.</i> , (2021) Shahriari <i>et al.</i> (2012)	RA + Poda	Hidrotérmico e micro-ondas aumentam a solubilização	Alto custo energético e risco de inibição
Químico	Gueri <i>et al.</i> (2024)	RA + Poda	NaOH a 3% por 12h resultou em aumento de produção de metano	Custo do reagente e neutralização posterior
Biológico	Uçkun Kiran <i>et al.</i> (2015)	RA + Poda	Tratamento enzimático aumentou rendimento de CH <sub>4</sub>	Longo tempo de processo, necessidade de microrganismos específicos
Térmico-alcalino	Dai <i>et al.</i> (2016) Edwiges <i>et al.</i> (2019)	Poda + lodo	Melhora simultânea da produção de metano e sua concentração	Exige controle rigoroso de pH
Biológico	Sharma <i>et al.</i> (2025)	Poda e RA	Pré-tratamento enzimático melhorou a eficiência de conversão e reduz TRH	Custo com enzimas comerciais
Físico + Térmico + Químico	Pradeshwaran <i>et al.</i> (2024)	Poda	Integração de métodos elevou a produção de metano e a solubilização da matéria orgânica	Maior complexidade operacional
Físico (separação manual e trituração)	Shrestha <i>et al.</i> (2023)	RA	Melhora na homogeneização, reduz entupimentos e facilita o bombeamento	Impacto limitado na produção de metano
Biológico	Pandey <i>et al.</i> (2025)	Poda	Aumento de 168% na produção de metano até o 9º dia e maior diversidade microbiana	Variabilidade do substrato floral e sazonalidade

**Fonte:** Autoria Própria (2025).

Estudos apontam que o pré-tratamento térmico/alcalino apresenta os melhores resultados em resíduos de poda, com ganhos médios de até 70 a 78% na produção de metano quando comparado à digestão sem tratamento (Guerri et al. 2024; Santos *et al.*, 2023). Damaceno (2022), enfatiza ainda que proteínas podem ser removidas nesse processo, chegando a uma eficiência de 68%, o que auxilia na produção de metano e biogás. Essa eficiência é atribuída ainda à despolimerização de lignina e hemicelulose, aumentando a superfície disponível para ataque enzimático. No entanto, trata-se de uma técnica de maior custo operacional e complexidade, devendo ser cuidadosamente avaliada em contextos institucionais.

Por outro lado, métodos físicos como trituração ou moagem prévia da poda, combinados à diluição dos RA, representam alternativas viáveis e de menor custo, especialmente em projetos de escala reduzida. Essas soluções se mostram apropriadas para contextos como a UFSCar, onde há disponibilidade local de substratos, mas limitação de recursos técnicos e financeiros. Conforme apontado por Carvalho (2024), em sistemas descentralizados de universidades, a trituração da poda associada ao ajuste da umidade dos RA se mostrou eficaz na homogeneização da mistura e na melhoria da DA. Outro exemplo que pode ser destaca é o da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, os resíduos da poda são destinados ao bosque da instituição, com o intuito que auxiliem como aporte de biomassa e na composteira, como fonte de carbono (Terra, 2021).

Portanto, a escolha do pré-tratamento mais adequado deve ser orientada por uma análise técnico-econômica, considerando o tipo de resíduo disponível, os objetivos do sistema e os recursos operacionais. Em unidades universitárias, a combinação entre trituração mecânica da poda e o uso de RA fresco pode representar uma solução eficiente, de fácil implementação e com ganhos reais em rendimento energético. Tecnologias e métodos de biodigestão em pequena escala

Sistemas de DA em pequena escala têm se mostrado estratégicos para o tratamento descentralizado de RA e poda urbana, especialmente em ambientes como universidades públicas, cooperativas, zonas periurbanas e propriedades rurais de pequeno porte. Esses sistemas são capazes de transformar biomassa residual em biogás e biofertilizante, com viabilidade técnica e econômica, sobretudo quando adaptados à disponibilidade local de substratos e às restrições operacionais de cada contexto (Demichelis *et al.*, 2025; Castro *et al.*, 2025).

Entre as principais configurações de reatores anaeróbios utilizados em pequena escala, destacam-se os modelos do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), que operam de forma contínua com agitação constante, promovendo boa homogeneização dos substratos líquidos e estabilidade operacional. Já os reatores de batelada são frequentemente escolhidos por sua simplicidade construtiva e facilidade de operação, embora apresentem limitações quanto à eficiência e regularidade da produção de biogás. Outra alternativa relevante é o reator *plug flow*, especialmente indicado para substratos mais pastosos ou sólidos, como podas trituradas e restos de alimentos. Essa configuração permite o fluxo contínuo do substrato em um tubo ou canal, promovendo uma separação natural das fases do processo e tempos de retenção diferenciados (Santos *et al.*, 2023; Shah *et al.*, 2024).

Uma tecnologia com crescente destaque em aplicações descentralizadas é o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), tradicionalmente utilizado no tratamento de efluentes líquidos. Nesse sistema, o fluxo ascendente permite que os sólidos fiquem suspensos em uma manta de lodo anaeróbio, o que assegura alta retenção de biomassa e maior eficiência na conversão da matéria orgânica em biogás. Embora existam poucos estudos que apliquem diretamente essa tecnologia à digestão de RA e poda, esta apresenta potencial de adaptação, especialmente quando combinada com estratégias de pré-tratamento e controle rigoroso de carga orgânica e sólidos (Oliveira; Silva, 2018).

Além da eficiência técnica, esses sistemas são frequentemente construídos com materiais de baixo custo e exigem manutenção simplificada, o que os torna particularmente adequados para ambientes acadêmicos e projetos-piloto em instituições públicas. Em universidades brasileiras, como demonstrado por Santos *et al.* (2023) e Castro *et al.* (2025), reatores compactos têm sido utilizados não apenas para o tratamento de resíduos dos restaurantes universitários e áreas verdes, mas também como ferramentas pedagógicas, experimentais e de demonstração tecnológica, alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Nesse sentido, os sistemas de biodigestão em pequena escala se alinham diretamente com o conceito de energia descentralizada, que, segundo Arshad *et al.* (2025), representa uma solução promissora para promover a segurança energética, reduzir desigualdades no acesso à energia e fortalecer a resiliência local. Em contextos como universidades públicas brasileiras, essa abordagem permite converter resíduos orgânicos *in situ* em energia térmica e elétrica, ao mesmo tempo em que estimula práticas sustentáveis e fortalece o papel pedagógico das instituições. A descentralização energética, além de

reduzir custos com insumos fósseis, contribui para o empoderamento comunitário e a disseminação de tecnologias adaptadas às realidades locais.

A Tabela 3.3 apresenta uma comparação entre os principais modelos tecnológicos empregados nesses sistemas. São descritos os principais mecanismos de operação, vantagens e limitações específicas, bem como os contextos de aplicação mais adequados. Reatores CSTR, por exemplo, mostram desempenho superior em substratos líquidos e condições de operação mais controladas, enquanto os modelos de batelada são ideais para usos educacionais e experimentais de menor escala. Já os *plug flow* se destacam pelo uso eficiente de substratos sólidos, como poda triturada, com menor exigência de agitação e maior estabilidade térmica.

**Tabela 3.3.** Tipos de reatores anaeróbios para aplicações em pequena escala utilizando RA e Poda

Reator	Características	Vantagens	Limitações	Aplicações	Fonte
CSTR	Mistura Contínua	Homogeneização e estabilidade	Demanda energética	Substratos líquidos e ambientes institucionais	Castro <i>et al.</i> (2025); Santos <i>et al.</i> (2023)
Batelada	Alimentação única; sem agitação	Simples operação e construção	Descontinuidade e baixa eficiência	Pequenas propriedades e projetos educacionais	Demichelis <i>et al.</i> (2025)
Plug Flow	Sem mistura retroativa	Alta eficiência em substratos sólidos	Obstruções e difícil homogeneização	Resíduos sólidos em menor escala	Demichelis <i>et al.</i> (2025)
UASB	Fluxo ascendente	Boa retenção de biomassa	Sensível a sólidos suspensos	Tratamento conjunto de resíduos com poucos sólidos suspensos	Carmona <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Autor (2025)

Por fim, apesar do reator UASB não ser ainda amplamente aplicado com RA e poda, este continua relevante no debate técnico por sua eficiência e robustez no tratamento de efluentes e pela possibilidade de adaptação futura, sendo incluído na Tabela 3.3 com indicação de que novas pesquisas são necessárias. A análise integrada dessas tecnologias permite orientar a seleção do modelo mais adequado a cada realidade institucional, reforçando a importância do dimensionamento técnico, da disponibilidade de substrato e dos objetivos educacionais e ambientais do projeto.

### 3.2.2. Aplicações em instituições públicas e experiências em campus universitários

A DA tem sido adotada com sucesso em diversas instituições públicas, particularmente em universidades, onde a presença de múltiplas áreas do conhecimento e a geração contínua de resíduos orgânicos criam um ambiente favorável para sua aplicação. A sinergia entre os objetivos ambientais, energéticos e educacionais torna o campus universitário um laboratório real para o desenvolvimento e validação de tecnologias sustentáveis, como os sistemas de biodigestão em pequena escala.

No Brasil, a Universidade de São Paulo (USP) desenvolveu um projeto piloto de co-digestão utilizando RA do RU e restos de poda da área verde do campus da Escola de Engenharia de Lorena. O sistema operou com reator de 430 litros e produziu biogás com teor médio de 62% de metano, adequado para aplicações térmicas e estudos de cogeração. Além da operação estável por mais de 280 dias, o digestato gerado foi utilizado como biofertilizante, integrando os conceitos de economia circular (Santos *et al.*, 2023; Bassi *et al.*, 2023).

Outro caso relevante é o da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), que mantém um programa de gestão de resíduos sólidos com ênfase na segregação, compostagem e valorização energética. Em 2021, iniciou-se a implantação de um biodigestor piloto no campus de Barão Geraldo, com foco em resíduos do RU e de eventos institucionais. O projeto visa, além da geração de biogás, o uso didático em cursos de engenharia ambiental e agronomia (UNICAMP, 2022).

Na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), o grupo de pesquisa em saneamento ambiental (GERSA) implantou um sistema de biodigestão com reator UASB adaptado para estudar a viabilidade de tratamento de FORSU da comunidade acadêmica. A planta, mesmo em pequena escala, permitiu gerar dados reais de desempenho e formar estudantes em tecnologias limpas (Moura *et al.*, 2020).

A Universidade Estadual de Londrina (UEL) investigou os desafios técnicos e operacionais da DA utilizando RA do RU como substrato. Os experimentos revelaram a importância do controle da carga orgânica e da segregação na fonte para viabilizar a produção de biogás em sistemas em escala laboratorial (Bortoloti; Challiol, 2023).

Na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), uma equipe multidisciplinar propôs a implantação de sistemas de biodigestão modular utilizando resíduos do RU e áreas

verdes, com foco em viabilidade termoenergética e replicabilidade institucional (Sousa *et al.*, 2021).

Na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), o Departamento de Engenharia Sanitária desenvolveu projetos voltados ao aproveitamento energético de RA por biodigestores, com ênfase em capacitação técnica e valorização de resíduos em escolas e campi universitários (Ferreira *et al.*, 2021).

A Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) operou uma planta piloto com reatores semi-contínuos (400 L úteis) utilizando codigestão de lodo secundário, resíduo alimentar e glicerol bruto. Os ensaios indicaram aumento de até 114% na produção específica de metano com a codigestão ternária, destacando o potencial de integração entre resíduos urbanos e efluentes tratados (Ferreira, 2021).

No cenário internacional, universidades como a *University of California*, Davis, operam há mais de uma década com sistemas de biodigestão para tratamento de RA do campus, com produção de eletricidade e calor utilizados em unidades administrativas. A planta da UC Davis, construída em parceria público-privada, trata até 20 toneladas por dia de resíduos e gera aproximadamente 5.600 MWh/ano (UC DAVIS, 2021).

Experiências similares são relatadas na Alemanha, onde a Universidade de Hohenheim mantém uma estação experimental de biodigestão ligada ao centro de biotecnologia ambiental, e na Índia, onde o *Indian Institute of Technology* – IIT Delhi opera biodigestores em série em seu refeitório central com recuperação de calor para aquecimento de água (IRENA, 2018).

Esses exemplos evidenciam que, com dimensionamento adequado e integração com as demandas locais, é possível viabilizar a produção de energia renovável e biofertilizante em escala universitária. Além dos benefícios ambientais e econômicos, tais sistemas promovem vivências práticas para estudantes e pesquisadores, reforçando o papel das universidades como núcleos de inovação e transição energética. A consolidação dessas experiências reforça a necessidade de políticas públicas que estimulem a descentralização energética, conforme discutido por Arshad *et al.* (2025), especialmente em ambientes institucionais que concentram geração de resíduos e demanda por energia térmica e elétrica.

No caso da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), os setores de maior potencial para essa integração são o RU e o Hospital Universitário (HU), que concentram geração de resíduos orgânicos e demandas térmicas e elétricas contínuas, conforme já discutido em capítulos anteriores. Adicionalmente, a UFSCar tem avançado na

estruturação de um modelo experimental de DA descentralizada, com base em dados obtidos por meio de ensaios conduzidos pelo trabalho de Carvalho (2024). Os experimentos, realizados em frascos de 250 ML, avaliaram diferentes proporções de RA e poda triturada, fornecendo dados promissores sobre a produção específica de metano e os efeitos da razão inóculo:substrato (I/S) e do tamanho de partícula (Carvalho, 2024).

Complementando essa abordagem, o trabalho de Carvalho (2024) propôs um sistema de cogeração térmica e elétrica utilizando o biogás gerado na própria instituição, com base na simulação de um motor a combustão interna operando em ciclo Otto.

### **3.3. Composição e Qualidade do Biogás**

O biogás é uma mistura gasosa obtida a partir da DA da matéria orgânica, composta predominantemente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Além desses, podem estar presentes em menores proporções contaminantes como sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vapor d'água, nitrogênio, oxigênio e siloxanos. A composição do biogás é altamente variável e depende de fatores como a natureza dos substratos (ex.: RA e de poda), o tipo de reator empregado, o regime de operação (batelada ou contínuo), bem como as condições operacionais: temperatura, pH, relação C/N e THR (Gupta *et al.*, 2023; Garkoti *et al.*, 2025).

A qualidade do biogás está diretamente relacionada ao seu teor de metano, que determina seu poder calorífico e sua eficiência na conversão energética. Por outro lado, a presença de contaminantes como  $\text{H}_2\text{S}$ , vapor d'água e siloxanos representa um desafio técnico, exigindo processos de purificação prévios ao uso, devido ao potencial de corrosão, incrustação e desgaste prematuro de peças metálicas. A remoção dessas impurezas é especialmente importante quando o biogás será comprimido, purificado para biometano ou utilizado em motores de alto rendimento (Farajollahi *et al.*, 2025; CIBiogás, 2020; IRENA, 2018).

Uma caracterização precisa da composição do biogás é essencial para o dimensionamento de sistemas de purificação e para a seleção de equipamentos apropriados, influenciando diretamente a viabilidade técnica e econômica da planta. Além disso, essa análise permite definir estratégias de operação mais seguras, eficientes e sustentáveis, alinhadas ao perfil do substrato e à finalidade energética.

### 3.3.1. Parâmetros de qualidade: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S

O metano (CH<sub>4</sub>) é o principal componente energético do biogás, determinando diretamente seu poder calorífico inferior (PCI). O PCI do metano puro é de aproximadamente 35,8 MJ/m<sup>3</sup>. Valores típicos entre 55% e 70% são considerados ideais para aplicações energéticas descentralizadas, como cogeração ou geração térmica local (Garkoti *et al.*, 2025; Gupta *et al.*, 2023). Abaixo desse limite, a queima se torna instável, reduzindo a eficiência térmica e exigindo ajustes operacionais, como a razão ar-combustível e o ponto de ignição (CIBiogás, 2020; Dalpaz *et al.*, 2020).

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), embora não tóxico, atua como gás inerte, diluindo o biogás e reduzindo a densidade energética. Concentrações superiores a 35% afetam negativamente a ignição e a eficiência térmica, e podem comprometer o desempenho de motores ou caldeiras. Sistemas mais exigentes, como injeção em rede de gás ou veículos, demandam remoção parcial ou total do CO<sub>2</sub>, utilizando tecnologias como adsorção por pressão, membranas seletivas ou lavagem com água pressurizada (Gupta *et al.*, 2023; Farajollahi *et al.*, 2025). O sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) é um dos contaminantes mais críticos. Mesmo em concentrações de 100 ppm, o H<sub>2</sub>S é altamente corrosivo, causando degradação acelerada de componentes metálicos em motores, caldeiras e trocadores de calor. O uso seguro do biogás em cogeração requer que o teor de H<sub>2</sub>S esteja abaixo de 250 ppm, enquanto aplicações como injeção em rede ou uso veicular exigem limites inferiores a 5 ppm (Cunto, 2022). Para atender a essas exigências, são aplicadas técnicas de dessulfurização como filtros de óxidos de ferro, carvão ativado impregnado e lavagem com soluções alcalinas, com alta eficiência em sistemas de pequena escala (Garkoti *et al.*, 2025). O vapor d'água também é um componente crítico, pois o biogás sai saturado com a temperatura do reator. A condensação desse vapor durante o resfriamento pode causar acúmulo de água nos dutos e corrosão. Por isso, sistemas de secagem com resfriamento-condensação, sílica-gel ou zeólitas são recomendados antes da compressão ou uso em equipamentos de geração (Gupta *et al.*, 2023).

A Tabela 3.4 apresenta um panorama consolidado desses parâmetros, permitindo uma visão clara das exigências técnicas mínimas para o aproveitamento eficiente e seguro do biogás em motores do ciclo Otto, caldeiras e sistemas de cogeração.

A análise dos dados apresentados na Tabela 3.4 evidenciam que a proporção de metano é o principal indicador da qualidade energética do biogás. Valores típicos de biogás bruto situam-se entre 50 e 70% de metano, e teores mais elevados resultam em

maior poder calorífico e estabilidade da combustão. Estudos e relatórios técnicos indicam que concentrações relativamente baixas de metano (em torno de 50–55% ou inferiores) tendem a reduzir o desempenho em motores ciclo Otto, exigindo ajustes na taxa de compressão ou enriquecimento da mistura para manter eficiência e confiabilidade operacional (IRENA, 2018; Rossetto et al., 2013; Siahaan, 2023). Já o dióxido de carbono, embora inerente ao processo de DA, atua como diluente da mistura e precisa ser controlado em aplicações que exijam biometano de alta pureza.

A presença de contaminantes como H<sub>2</sub>S e siloxanos impõe sérios desafios operacionais, exigindo tratamento prévio do biogás. O H<sub>2</sub>S, mesmo em concentrações modestas, compromete a durabilidade dos motores e pode inviabilizar a injeção do biogás em redes ou sistemas de cogeração se não tratado adequadamente. O vapor d'água, por sua vez, embora muitas vezes negligenciado, pode causar corrosão severa se condensado em dutos e válvulas.

Esses dados reforçam a necessidade de um sistema de purificação eficiente, especialmente em instalações que operam com substratos de alta umidade ou em condições termofílicas. A escolha da estratégia de purificação deve considerar o perfil de aplicação energética desejado (térmica, elétrica ou biometano) e os custos associados aos processos de dessulfurização, secagem e filtração de siloxanos.

**Tabela 3.4.** Parâmetros críticos do biogás, efeitos operacionais e recomendações técnicas para aplicação energética

Componente	Concentração	Efeito sobre a Conversão Energética	Recomendações	Fonte
H <sub>2</sub> O	Saturado com a temperatura do reator	Condensação causa corrosão e entupimento em dutos e válvulas	Remover por resfriamento-condensação ou adsorventes (sílica-gel)	Dalpaz <i>et al.</i> (2020)
O <sub>2</sub>	< 1%	Risco de explosão; afeta combustão e estabilidade do sistema	Evitar entrada de ar no sistema; controle de vedação e pressão	Cunto (2022)
CO <sub>2</sub>	30–50%	Reduz o PCI; dificulta ignição e estabilidade da chama	Reduzir para <3% em biometano; tolerado em motores com ajustes	Gupta <i>et al.</i> , (2023)
Siloxanos	Pequenos Traços (ppb a ppm)	Formação de depósitos em motores e catalisadores	Filtragem com carvão ativado ou métodos de adsorção específicos	Gupta <i>et al.</i> (2023)
CH <sub>4</sub>	50–70%	Define o poder calorífico; abaixo de 50% prejudica a combustão	Ideal >55% para motores Otto e cogeração; >96% para biometano	Gupta <i>et al.</i> (2023); Garkoti <i>et al.</i> , (2025)
H <sub>2</sub> S	<100 ppm (motores), <5 ppm (biometano)	Corrosivo para motores e trocadores de calor; gera SO <sub>2</sub> na queima	Remoção por filtros de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , carvão ativado ou lavagem alcalina	Farajollahi <i>et al.</i> , (2025)

Fonte: Autor (2025)

### 3.3.2. Implicações para a conversão energética e operação de motores

Como mostrado, a composição do biogás exerce influência decisiva sobre sua eficiência energética e a confiabilidade dos equipamentos destinados à conversão térmica e elétrica. Motores de combustão interna, especialmente os baseados no ciclo Otto, demandam biocombustíveis de qualidade relativamente constante, livres de contaminantes agressivos, para garantir desempenho adequado e longevidade dos componentes. Ademais, a presença de compostos corrosivos e abrasivos pode comprometer de forma significativa a integridade estrutural e funcional dos motores.

O sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), mesmo em concentrações moderadas, promove a corrosão acelerada de peças metálicas sensíveis, como pistões, válvulas e velas de ignição, especialmente em ambientes quentes e úmidos típicos de sistemas de combustão interna. Segundo a SAE International (2022), a presença de  $H_2S$  acima de 100 ppm já é considerada crítica, sendo capaz de reduzir a vida útil dos motores e elevar os custos de manutenção preventiva e corretiva. A necessidade de dessulfurização do biogás torna-se, portanto, um pré-requisito indispensável para garantir a segurança operacional e a economicidade do sistema. Essa exigência torna-se ainda mais crítica em sistemas operados de forma intermitente, como é comum em contextos universitários e institucionais, onde os motores são acionados por demanda ou para fins experimentais. A operação intermitente favorece a condensação de umidade e a deposição de compostos corrosivos nos períodos de inatividade, acelerando o desgaste e aumentando a frequência de manutenção. Por isso, recomenda-se a instalação de sistemas de purificação e desumidificação mesmo em unidades de pequeno porte, quando o regime de operação não for contínuo (Garkoti *et al.*, 2025; Gupta *et al.*, 2023).

Além do  $H_2S$ , outros contaminantes merecem atenção. O vapor d'água, normalmente presente em saturação conforme a temperatura do reator, pode condensar em tubulações e câmaras de combustão, causando corrosão localizada, falhas mecânicas e redução na eficiência térmica do motor. Técnicas de desumidificação, como a condensação por resfriamento ou o uso de materiais adsorventes como sílica-gel e zeólitas, são amplamente recomendadas antes da compressão e queima do biogás (CIBiogás, 2020; Gupta *et al.*, 2023; Garkoti *et al.*, 2025). Esses procedimentos são fundamentais para evitar a corrosão de dutos e falhas operacionais, especialmente em sistemas de cogeração que exigem estabilidade térmica e elétrica.

Outro contaminante relevante são os siloxanos, compostos orgânicos voláteis originários principalmente de RA contaminados com cosméticos e produtos de higiene pessoal. Durante a combustão, esses compostos são convertidos em sílica amorfa, que se deposita como material abrasivo sobre superfícies metálicas, promovendo desgaste acelerado em pistões, cilindros e turbinas. De acordo com IRENA (2018), a remoção prévia de siloxanos, mediante filtros de carvão ativado ou processos de adsorção, é imprescindível, sobretudo quando o biogás for utilizado em aplicações que demandam operação contínua, como sistemas de cogeração.

A experiência acumulada em projetos de cogeração em instituições públicas corrobora a necessidade de pré-tratamento mesmo em instalações de pequena escala. No projeto conduzido pela Universidade de São Paulo (USP), envolvendo a codigestão de RA e poda urbana, foi verificada a necessidade de dessulfurização do biogás para viabilizar sua utilização segura em simulações de conversão energética. O processo empregou filtração com carvões ativados e recirculação de gases, garantindo a redução dos contaminantes a níveis adequados para aplicações térmicas e elétricas de menor exigência (Santos *et al.*, 2023).

Em contextos institucionais e de pequena escala, como o da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), os métodos mais adequados de purificação do biogás são os filtros de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e os leitos de carvão ativado, pela simplicidade de operação, baixo custo e boa eficiência na remoção de  $\text{H}_2\text{S}$ . Esses filtros permitem reduzir as concentrações de sulfeto de hidrogênio para níveis inferiores a 50 ppm, o que é suficiente para operação segura de motores de ciclo Otto (Ryckebosch, Drouillon e Vervaeren, 2011). Complementarmente, a condensação por resfriamento forçado, utilizando trocadores de calor e drenos automáticos, é recomendada para a remoção de vapor d'água antes da compressão, evitando corrosão e falhas elétricas. Em sistemas que operam de forma intermitente, a combinação dessas etapas com adsorção em sílica-gel ou zeólitas regeneráveis oferece um equilíbrio entre custo e desempenho. Em aplicações de ensino e pesquisa, onde a simplicidade e a segurança são prioritárias, essas tecnologias representam a solução mais viável e replicável (Angelidaki *et al.*, 2018; CIBiogás, 2020).

No contexto da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a destinação do biogás produzido contempla potenciais usos na microgeração elétrica, tal aplicação requer rigoroso controle sobre a qualidade do biogás, especialmente no que tange à remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  e à desumidificação, para assegurar a integridade dos equipamentos e a segurança das instalações. A implementação de sistemas de purificação adequados representa,

portanto, um componente fundamental no planejamento técnico e econômico de plantas de cogeração em ambientes universitários.

Em síntese, a viabilidade e a eficiência dos sistemas de cogeração a partir de biogás estão intrinsecamente vinculadas ao controle da qualidade do combustível, demandando intervenções tecnológicas específicas para o tratamento e a adequação do biogás antes de sua utilização. Ignorar essas etapas compromete não apenas o desempenho energético, mas também a segurança operacional e a sustentabilidade econômica do empreendimento.

### **3.4. Cogeração de Energia (CHP) a Partir do Biogás**

A cogeração, também conhecida como geração combinada de calor e energia elétrica *CHP*, consiste em uma tecnologia que permite a conversão simultânea de uma única fonte primária de energia em duas formas úteis: eletricidade e calor. Quando aplicada ao biogás, essa tecnologia representa uma estratégia particularmente eficiente e sustentável para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, promovendo a substituição de fontes fósseis e a redução das emissões de gases de efeito estufa (CIBiogás, 2020; Gupta *et al.*, 2023).

O princípio fundamental da cogeração reside na maximização do aproveitamento do combustível, utilizando o calor que, em sistemas convencionais de geração elétrica, seria majoritariamente dissipado na exaustão e no sistema de arrefecimento. Enquanto as usinas termoeletricas tradicionais apresentam rendimentos globais da ordem de 30% a 40%, os sistemas de cogeração podem alcançar eficiências superiores a 80%, dependendo das tecnologias empregadas e do perfil de demanda térmica do local de instalação (Farajollahi *et al.*, 2025).

Nos últimos anos, a tecnologia CHP movida a biogás tem ganhado destaque em ambientes descentralizados devido à sua adaptabilidade a diferentes escalas e perfis de consumo energético. O uso combinado com sistemas fotovoltaicos e a possibilidade de integração com sistemas térmicos de aquecimento de água têm ampliado suas aplicações em zonas urbanas, rurais e institucionais.

No contexto da DA, o biogás se configura como um vetor energético ideal para sistemas de cogeração, dada sua composição predominantemente metanosa e seu potencial de produção descentralizada. A energia térmica recuperada nos sistemas CHP pode ser direcionada para processos como aquecimento de água, climatização de

ambientes, esterilização e secagem de produtos, enquanto a eletricidade gerada pode suprir demandas locais ou ser exportada para a rede pública, dependendo da regulamentação vigente e da escala do sistema (Garkoti *et al.*, 2025; Dalpaz *et al.*, 2020).

Essa característica torna a cogeração com biogás especialmente atrativa para ambientes institucionais e públicos, como universidades, hospitais e indústrias, que frequentemente apresentam demandas simultâneas por energia térmica e elétrica ao longo de todo o ano. Em instituições de ensino superior, como é o caso da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a aplicação de sistemas de cogeração a partir de biogás proveniente de RA e de poda urbana pode contribuir significativamente para a redução de custos operacionais, além de reforçar o compromisso institucional com a sustentabilidade e a inovação tecnológica (Carvalho; 2023)

Adicionalmente, o uso de sistemas de cogeração integra-se plenamente aos princípios da economia circular e da gestão eficiente de resíduos, permitindo que o potencial energético dos resíduos orgânicos seja aproveitado in loco, evitando o transporte e a disposição inadequada em aterros sanitários. Como ressaltado por Cunto (2022), essa descentralização contribui também para a resiliência energética e a diversificação da matriz energética em ambientes urbanos e institucionais. A geração descentralizada de energia também proporciona maior segurança energética e resiliência das instituições frente a oscilações de preço e disponibilidade do fornecimento convencional.

O avanço da cogeração a partir do biogás tem sido impulsionado, ainda, por políticas públicas e marcos regulatórios que reconhecem a importância da geração distribuída e das fontes renováveis na matriz energética. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem estabelecido normativas específicas para a micro e minigeração distribuída, criando um ambiente favorável para a expansão de projetos desse tipo, inclusive no setor público (Resolução Normativa nº 1031/2022 – ANEEL).

Dessa forma, a cogeração a partir do biogás destaca-se como uma solução tecnológica madura e promissora para a valorização energética de resíduos orgânicos, especialmente em contextos institucionais e urbanos, onde a sinergia entre a geração de resíduos e o consumo de energia pode ser plenamente explorada. Nos tópicos seguintes, serão apresentados os conceitos e benefícios específicos da cogeração, as tecnologias aplicáveis em pequena escala e as regulamentações e incentivos que orientam sua implementação no Brasil.

### 3.4.1. Conceitos e benefícios da cogeração

Os sistemas de cogeração baseados na utilização de biogás são, em sua maioria, compostos por motores de combustão interna, geralmente do tipo ciclo Otto ou ciclo Diesel modificado, que acionam geradores elétricos para a produção de energia. Paralelamente à geração elétrica, o calor gerado durante o processo de combustão, que normalmente seria dissipado pelo sistema de arrefecimento do motor e pelos gases de exaustão, é recuperado e aproveitado mediante a instalação de trocadores de calor. Esse calor pode ser utilizado para o aquecimento de água, ambientes ou processos industriais, promovendo uma utilização integral da energia contida no combustível (Gupta *et al.*, 2023).

Uma vantagem da cogeração reside na sua elevada eficiência energética global, que pode alcançar até 85% a 90%, uma marca significativamente superior àquela obtida por sistemas convencionais de geração de eletricidade, os quais, tipicamente, operam com rendimentos entre 30% e 40% (CIBiogás, 2020; Farajollahi *et al.*, 2025). Ao aproveitar a energia térmica que seria tradicionalmente desperdiçada, a cogeração não apenas melhora a eficiência no uso dos recursos energéticos, mas também proporciona uma redução significativa nos custos operacionais com energia, podendo chegar a economias de 20% a 30% em algumas instituições (Centrica Business Solutions, 2025).

Outro benefício relevante está associado ao aumento da independência energética das instituições que adotam sistemas de cogeração. A possibilidade de gerar, *in loco*, parte significativa de suas necessidades energéticas confere às instituições maior resiliência frente a oscilações no fornecimento de energia convencional e à variação nos preços das tarifas públicas. Além disso, ao substituir fontes fósseis por biogás oriundo do tratamento de resíduos orgânicos, a cogeração promove uma redução das emissões específicas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por unidade de energia produzida, contribuindo para o cumprimento de metas institucionais de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas (Cunto, 2022).

Estudos recentes também destacam a relevância de integrar sistemas CHP a estratégias de gestão inteligente de energia em campus universitários, permitindo o controle dinâmico das cargas térmicas e elétricas, além da possibilidade de integração com outras fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica (Garkoti *et al.*, 2025).

A aplicabilidade descentralizada da cogeração é outro aspecto que a torna atrativa, especialmente para instalações de pequena e média escala, como campus universitários,

hospitais e unidades industriais. Diferentemente de grandes centrais termelétricas, os sistemas de cogeração a biogás podem ser dimensionados conforme a disponibilidade de resíduos e o perfil de demanda energética local, permitindo uma integração mais eficiente e sustentável com os fluxos materiais e energéticos do território onde se inserem (Gómez; Wirth, 2019; Sharma *et al.*, 2025).

Com foco específico na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a implantação de um sistema de cogeração a biogás possui fatos que agregam a iniciativa, dada a presença de instalações que usualmente exigem demandas térmicas constantes, como as lavanderias do HU, o RU e diversos laboratórios, que podem vir a utilizar água aquecida em experimentos específicos. A possibilidade de utilizar a FORSU gerada na própria universidade como fonte de energia reforça a sustentabilidade do modelo, promovendo um ciclo virtuoso de gestão de resíduos, geração de energia e redução de impactos ambientais. Essa proposta já vem sendo analisada nos trabalhos de Carvalho (2024), indicando o potencial real da integração energia-resíduo em escala institucional.

Dessa forma, a cogeração a partir de biogás configura-se não apenas como uma solução tecnológica eficiente, mas também como uma ferramenta para a promoção da sustentabilidade institucional e da inovação, alinhada aos princípios da economia circular e a busca por sistemas energéticos mais resilientes e de baixo carbono.

### 3.4.2. Tecnologias aplicáveis em pequena escala

A escolha da tecnologia de cogeração a partir do biogás, especialmente em aplicações de pequena escala como universidades, cooperativas ou empreendimento agrícolas, depende de diversos fatores, como o perfil de carga térmica e elétrica da instituição, a composição e regularidade do biogás produzido e a disponibilidade local para manutenção e operação técnica. Além disso, o nível de pureza do biogás e a frequência de operação influenciam diretamente a escolha do sistema, exigindo maior robustez em contextos com variação de carga ou baixa continuidade operacional (*Centrica Business Solutions*, 2025). A avaliação desses aspectos é essencial para garantir a viabilidade técnica, econômica e ambiental do sistema.

Entre as opções tecnológicas mais comuns, destacam-se os motores de combustão interna ciclo Otto adaptados para biogás, que são amplamente utilizados devido ao seu custo acessível, confiabilidade operacional e maturidade tecnológica. Esses motores apresentam eficiência elétrica típica entre 25% e 35%, (podendo atingir até 38% em

modelos otimizados), e eficiência térmica entre 40% e 50%, totalizando rendimento global acima de 80% em condições ideais (Garkoti *et al.*, 2025). São particularmente compatíveis com reatores de co-digestão e sistemas descentralizados, como aqueles propostos para ambientes institucionais (Müller; Rech, 2015). Entretanto, apresentam sensibilidade à presença de contaminantes como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e os siloxanos, exigindo processos prévios de purificação do biogás e manutenção periódica.

As microturbinas a gás surgem como alternativa relevante, especialmente em contextos onde se valoriza a maior tolerância a variações na composição do biogás e uma operação com menor necessidade de manutenção. Essas turbinas apresentam eficiências elétricas na faixa de 20% a 30%, com possibilidade de recuperação térmica que eleva o rendimento global para até 60%. Entre suas vantagens destacam-se o baixo nível de ruído e a maior durabilidade, embora o investimento inicial seja relativamente mais elevado e a operação demande maior controle eletrônico (IRENA, 2018).

Sistemas baseados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) e em motores Stirling representam tecnologias emergentes com potencial crescente em aplicações de pequena escala. O ORC permite a geração de eletricidade a partir de fontes térmicas de baixa temperatura, como o calor residual da combustão do biogás, operando com fluidos orgânicos em vez de vapor de água. Essa tecnologia apresenta baixa eficiência elétrica, entre 10% e 20%, mas elevada eficiência térmica, podendo superar 60%, sendo indicada para situações em que se deseja maximizar a recuperação de calor e minimizar impactos ambientais (CIBiogás, 2020). Sua operação silenciosa e a possibilidade de aproveitamento de fontes térmicas de baixa entalpia tornam o ORC promissor para unidades hospitalares e laboratoriais com restrições acústicas e térmicas.

Por sua vez, o motor Stirling, que opera por combustão externa, caracteriza-se pela capacidade de funcionar com biogás de baixa pureza, apresentando alta tolerância a contaminantes e operação silenciosa. Sua eficiência elétrica situa-se entre 15% e 25%, com aproveitamento térmico de até 60%, embora sua potência unitária seja geralmente limitada e o custo elevado (Gómez; Wirth, 2019).

Além dessas, existem os geradores a combustão externa, que se destacam pela operação estável e pela adaptação a aplicações acadêmicas e experimentais, embora ainda sejam pouco difundidos comercialmente. Tais sistemas são apropriados para testes de desempenho e análise de viabilidade em laboratórios universitários, contribuindo para a formação prática de estudantes e o desenvolvimento de inovações tecnológicas (SAE INTERNATIONAL, 2022). Além disso, seu uso em bancadas experimentais permite

estudar a tolerância de diferentes tecnologias à composição variável do biogás produzido em campus, especialmente no caso de substratos com elevada umidade ou presença de siloxanos.

De modo a sistematizar as principais características de cada tecnologia, apresenta-se a seguir a Tabela 3.5, que sintetiza dados sobre eficiência, tolerância à qualidade do biogás, vantagens e limitações.

Cabe destacar que as faixas de eficiência e as limitações apresentadas na Tabela 3.5 refletem valores de referência consolidados, mas que podem variar conforme o fabricante, a pureza do biogás e o regime de operação. Estudos recentes indicam melhorias graduais na eficiência dos motores ciclo Otto e dos sistemas ORC, bem como o fortalecimento do uso de microturbinas em aplicações institucionais que operam com biogás purificado (Gupta *et al.*, 2023).

A escolha da tecnologia mais adequada deve considerar, portanto, não apenas os parâmetros técnicos, mas também aspectos econômicos, institucionais e ambientais. Em projetos de pesquisa e desenvolvimento, como o proposto neste trabalho, os motores ciclo Otto configuram-se como a opção de melhor custo-benefício, combinando relativa simplicidade operacional, boa eficiência energética e compatibilidade com o perfil de geração de biogás em sistemas de co-digestão em pequena escala.

**Tabela 3.5.** Tecnologias de cogeração aplicáveis em pequena escala a partir de biogás

Tecnologia	Eficiência Elétrica (%)	Eficiência Térmica (%)	Tolerância à Qualidade do Biogás	Vantagens	Limitações	Aplicações Típicas	Fonte
Motor ciclo Otto	25–38%	40–50%	Média	Custo acessível	Sensível a H <sub>2</sub> S e siloxanos; requer manutenção frequente	Restaurantes, lavanderias hospitalares, laboratórios com consumo elétrico térmico	<i>Centrica Business Solutions</i> (2025)
Microturbina a gás	20–30%	50–65%	Alta	Baixo ruído; maior durabilidade	Alto custo inicial; exige controle eletrônico	Climatização; aquecimento de água em hospitais e centros esportivos	IEA (2020)
Ciclo Orgânico de Rankine (ORC)	10–22%	60–70%	Alta	Baixo impacto ambiental; uso de calor residual de baixa entalpia; operação silenciosa	Baixa eficiência elétrica; tecnologia emergente	Aproveitamento de calor residual em lavanderias e caldeiras de baixo consumo	CIBiogás (2020) Gupta <i>et al.</i> , (2023)
Motor Stirling	15–25%	50–60%	Muito alta	Silencioso; funciona com biogás de baixa pureza	Baixa potência unitária; custo elevado	Ambientes silenciosos; laboratórios, hospitais e universidades	Gómez; Wirth (2019)
Gerador a combustão externa	12–20%	40–50%	Alta	Operação estável; ideal para testes acadêmicos	Pouco difundido comercialmente	Pesquisas acadêmicas; projetos de demonstração em engenharia	SAE INTERNATIONAL (2022)

Fonte: Autor (202

### 3.4.3. Regulamentações e incentivos

A cogeração a partir do biogás enquadra-se no modelo de geração distribuída (GD), regulamentado no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Desde 2012, a Resolução Normativa nº 482 permitiu que micro e minigeradores injetassem energia na rede pública, assegurando o direito à compensação do excedente gerado. Essa política foi posteriormente reforçada pela Lei nº 14.300/2022, que instituiu o Marco Legal da Geração Distribuída, estabelecendo maior segurança jurídica e regras claras para a transição tarifária, criando um ambiente mais atrativo para a inserção de fontes como o biogás e o biometano na matriz elétrica (ANEEL, 2022).

Adicionalmente, a Resolução Normativa nº 1.000/2021 e regulamentações setoriais, como a Portaria nº 1.031/2021 do Ministério de Minas e Energia (MME), estabeleceram diretrizes específicas para a operação de sistemas de cogeração a partir de fontes renováveis, reconhecendo o biogás como uma alternativa estratégica a segurança energética e a descarbonização do setor elétrico brasileiro. Um dos principais incentivos previstos é a isenção parcial das tarifas de uso do sistema de distribuição (TUSD) para projetos implementados até 2029, o que melhora significativamente a atratividade econômica e o retorno financeiro desses empreendimentos (ABiogás, 2022, CIBiogás, 2023).

Além dos aspectos elétricos, a regulamentação ambiental também é um componente-chave para a viabilização de projetos de cogeração. No estado de São Paulo o Plano Paulista de Energia (PPE 2050) destaca o biogás como vetor essencial para a diversificação da matriz energética e para a promoção da sustentabilidade. No que se refere ao licenciamento ambiental, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) estabelece critérios específicos para a implantação de sistemas de DA e de cogeração, garantindo a viabilidade legal desses projetos em ambientes institucionais, como o campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) (CETESB, 2020).

Adicionalmente, o biogás é contemplado em políticas públicas como o Programa Combustível do Futuro (Decreto nº 11.141/2022) e o Plano Nacional de Energia (PNE 2050), que sinalizam a intenção do governo federal de ampliar os incentivos para tecnologias renováveis com elevado valor agregado, como é o caso da cogeração em pequena escala.

Assim, o cenário regulatório vigente, tanto em nível federal quanto estadual, favorece a implantação de sistemas de cogeração com biogás, oferecendo segurança jurídica e incentivos econômico e respaldo institucional, que são fundamentais para a expansão de soluções sustentáveis no setor público e em instituições de ensino.

### **3.5. Ciclo Otto e Aplicações em Microgeração**

O Ciclo Otto descreve o funcionamento de motores de combustão interna por ignição por centelha, amplamente usados em veículos e facilmente adaptáveis para sistemas de microcogeração com biogás, sobretudo em escalas descentralizadas. Essa tecnologia é particularmente atrativa para aplicações institucionais, como universidades e agroindústrias, devido à sua confiabilidade, facilidade de manutenção e custos relativamente baixos (Dalpaz *et al.*, 2020). Em sistemas de cogeração, o motor Ciclo Otto permite a conversão simultânea do biogás em eletricidade e calor, aumentando a eficiência energética total. No estudo de Dalpaz *et al.* (2020), por exemplo, a utilização de um motor gerador adaptado com potência de 60 kW e biogás com diferentes teores de metano resultou em geração de até 3,57 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica e 1,67 kWh/m<sup>3</sup> de energia térmica, com eficiência global próxima a 54%. Esses dados evidenciam o bom desempenho da tecnologia mesmo em condições variáveis de pureza do combustível.

Além disso, o motor Otto apresenta vantagens operacionais em comparação a motores Diesel quando alimentado com biogás, que possui menor poder calorífico. A ignição por centelha permite operação estável com misturas pobres em metano, evitando a necessidade de altas taxas de compressão (Cengel; Boles, 2014). Entretanto, o desempenho do sistema depende fortemente do controle da qualidade do biogás, sendo necessária a dessulfurização e a remoção de umidade e siloxanos, conforme discutido em Seções anteriores. Dalpaz *et al.* (2020) também destaca a importância de adaptar o sistema de recuperação de calor, como o uso de trocadores tipo casco e tubo, para maximizar o aproveitamento da energia térmica gerada pelos gases de exaustão. Isso reforça a aplicação do Ciclo Otto em configurações de cogeração em pequena escala, com alto potencial de replicabilidade em contextos institucionais brasileiros.

#### **3.5.1. Princípios do ciclo Otto e funcionamento**

O ciclo Otto ideal descreve o funcionamento termodinâmico básico dos motores de combustão interna por ignição por centelha, amplamente utilizados em sistemas de

microgeração alimentados por biogás. Esse ciclo é composto por quatro transformações fundamentais, que podem ser visualizadas no diagrama pressão-volume (p-v) apresentado na Figura 3.1, o qual ilustra as variações de pressão e volume da mistura gasosa durante cada etapa do processo.

O ciclo inicia-se com a compressão adiabática da mistura ar-combustível (etapa 1–2), na qual o pistão sobe, reduzindo o volume e elevando simultaneamente a pressão e a temperatura do gás, sem que haja troca de calor com o meio externo. Em seguida, ocorre a combustão em volume constante (etapa 2–3), etapa caracterizada pela ignição por centelha, que provoca a rápida liberação de calor e um expressivo aumento da pressão dentro do cilindro, enquanto o volume permanece praticamente inalterado. A terceira etapa corresponde à expansão adiabática (etapa 3–4), na qual os gases quentes se expandem, empurrando o pistão e realizando o trabalho mecânico que será convertido em energia útil. Por fim, na exaustão em volume constante (etapa 4–1), as válvulas se abrem para liberar os gases queimados, preparando o cilindro para reiniciar o ciclo.

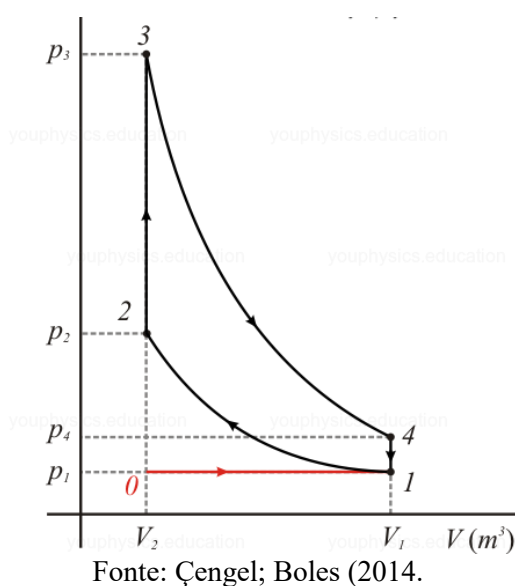
A eficiência térmica ideal do ciclo Otto depende diretamente da taxa de compressão ( $r$ ) e da razão entre os calores específicos ( $\gamma = c_p/c_v$ ), sendo expressa pela forma clássica, demonstrada na Equação 1.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (1)$$

No caso do ar seco,  $\gamma$  apresenta valores típicos entre 1,3 e 1,4. Entretanto, quando se utiliza biogás, essa razão tende a ser inferior, em função das propriedades termo físicas do CO<sub>2</sub>, resultando em uma leve redução da eficiência ideal quando comparada a combustíveis como o gás natural. Essa diferença implica em uma leve redução da eficiência térmica ideal, quando comparada à obtida com combustíveis como o gás natural (Cengel; Boles, 2014; Dalpaz *et al.*, 2020).

Apesar dessa diferença, na prática, os motores ciclo Otto adaptados para operar com biogás demonstram desempenho satisfatório, atingindo eficiências elétricas entre 25% e 35%. Quando associado a sistemas de recuperação de calor do arrefecimento e dos gases de exaustão, é possível elevar a eficiência global a até 80%, configurando uma solução técnica altamente eficiente e compatível com os princípios da geração descentralizada e da economia circular. Tais características tornam o Ciclo Otto uma das tecnologias mais apropriadas para aplicações institucionais em sistemas de microgeração com biogás (CIBiogás, 2020).

**Figura 3.1.** Diagrama p-v do ciclo Otto



### 3.5.2. Exemplos de aplicação com biogás

Diversos estudos demonstram a viabilidade técnica a robustez operacional e o bom desempenho energético da aplicação de motores ciclo Otto em sistemas de cogeração a biogás, sobretudo em contextos de pequena e média escala. No experimento conduzido por Santos *et al.* (2023), foi operado um sistema de co-digestão de RA e restos de poda urbana, que produziu biogás com teor de metano suficiente para alimentar motores comerciais adaptados. A simulação indicou que, com uma planta de 430 m<sup>3</sup>, seria possível gerar energia elétrica e térmica capaz de suprir parte da demanda do campus da Universidade de São Paulo (USP), demonstrando o potencial de integração entre gestão de resíduos e produção descentralizada de energia.

Além da experiência da USP, a *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2018) também documenta casos bem-sucedidos de utilização de motores automotivos reconvertidos para operar com biogás em comunidades rurais da América Latina, que adotaram motores automotivos reconvertidos para operar com biogás. Esses sistemas demonstraram alto grau de autonomia local, mesmo com infraestrutura simplificada, utilizando estratégias básicas de dessulfurização e filtragem. Essa solução viabilizou o fornecimento estável de energia elétrica e térmica para atividades produtivas, com ganhos significativos de eficiência energética e redução de custos com combustíveis fósseis.

A Tabela 3.6 sintetiza os principais estudos recentes que avaliaram a aplicação do biogás em sistemas de cogeração, destacando o tipo de substrato, a escala de operação e os resultados energéticos obtidos.

Em território nacional, diferentes instituições de ensino e pesquisa têm investigado soluções semelhantes, com destaque para a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), que aparece em diversos estudos como referência em cogeração experimental. Nogueirão et al. (2022) projetaram um sistema completo de cogeração a biogás no campus, utilizando resíduos orgânicos provenientes de refeitórios e laboratórios. O modelo considerou um motor Diesel modificado de 30 kW acoplado a gerador elétrico e trocadores de calor, resultando em geração estimada de 7,7 MWh/mês de energia elétrica e 9,8 MWh/mês de energia térmica. O investimento previsto foi de R\$ 211 mil, com economia anual próxima de R\$ 91 mil e retorno financeiro em cerca de 2,3 anos, demonstrando boa viabilidade técnico-econômica mesmo em escala universitária.

De forma complementar, Carvalho (2024), Ferreira (2024) apontam que o biogás atualmente produzido nos reatores de co-digestão experimental da UFSCar apresenta potencial real para alimentar motores estacionários adaptados. Locais como o RU, o HU e laboratórios com demandas térmicas constantes poderiam aproveitar o calor residual para aquecimento de água e climatização, promovendo uso racional e eficiente da energia no campus.

Outras universidades também têm se destacado. Rocha et al. (2023), na Universidade Federal de Sergipe (UFS), avaliaram resíduos de um RU em biodigestores de pequena escala construídos com garrafas PET. Embora em nível laboratorial, o estudo demonstrou a produção média de 18 mL de biogás por dia, equivalente a 321 kWh/mês de energia elétrica potencial, evidenciando o caráter didático e replicável da tecnologia em instituições públicas.

Em uma escala superior, Roa et al. (2024) modelaram a viabilidade de um sistema de micro cogeração na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), processando 1 t/dia de RA em um reator anaeróbio tubular de 126 m<sup>3</sup>. A simulação indicou produção diária entre 360 e 390 kWh de eletricidade, a partir de motores a gás e microturbinas de 30 % de eficiência, confirmando o potencial de geração distribuída em ambientes universitários.

**Tabela 3.6.** Exemplos de aplicação de sistemas de cogeração a biogás

Fonte	Contexto	Tecnologia	Escala	Resultados	Cenário
Santos et al. (2023)	Co-digestão de RA e poda	Ciclo Otto	Simulação (430 m <sup>3</sup> )	Geração de energia elétrica e térmica para parte da demanda local	Universidade de São Paulo (USP)
Nogueirão et al. (2022)	RA e resíduos laboratoriais	Motor Diesel modificado	Projeto Teórico	7,7 MWh/mês (elétrica) e 9,8 MWh/mês (térmica)	Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Rocha et al. (2023)	RA	Biodigestores de PET	Laboratorial	Produção de 18 mL/dia de biogás	Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Roa et al. (2024)	RA	Reator anaeróbio (126 m <sup>3</sup> ) + motor a gás (120 kW) / microturbina (30%)	Modelagem computacional	360–390 kWh/dia	Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Oliveira et al. (2024)	RA	Biodigestor + gerador GE (CHP)	Escala real / comercial	1.368.750 m <sup>3</sup> /ano de biogás; 14 % da demanda elétrica;	Shopping Center – São Paulo (UNINOVE / USP / UNICAMP)
Dalpaz et al. (2020)	Biogás de origem agrícola	Motor ciclo Otto	Experimental	Eficiência elétrica > 30 %; aproveitamento térmico de calor	Análise comparativa internacional

Fonte: Autor (2025)

Estudos de simulação energética também reforçam a robustez dessa tecnologia. Modelagens computacionais recentes, como as realizadas por Serat *et al.* (2024), indicam que sistemas híbridos integrando biogás, energia solar e eólica são mais resilientes a flutuações na oferta de substratos e variações na demanda energética. Nesses cenários, os motores ciclo Otto desempenham papel estratégico ao manter a estabilidade operacional do sistema de cogeração, ajustando-se à disponibilidade do biogás.

Enquanto os estudos acadêmicos exploram soluções em pequena e média escala, o setor privado também tem demonstrado resultados concretos. Oliveira et al. (2024) analisaram uma planta de cogeração em um centro de abastecimento alimentar de um shopping em São Paulo. O sistema, que utilizou um biodigestor acoplado a um gerador da General Electric, produziu 1 368 750 m<sup>3</sup> de biogás/ano, atendendo cerca de 14 % da demanda elétrica do empreendimento, com economia anual de US\$ 854 mil, retorno sobre investimento (ROI) de 433 % e payback de aproximadamente um ano. O projeto contou com participação de pesquisadores da UNINOVE, USP e UNICAMP, evidenciando a sinergia entre setor acadêmico e empresarial.

De modo geral, os estudos nacionais demonstram que a cogeração a biogás é tecnicamente viável e apresenta bom desempenho energético quando associada a motores ciclo Otto ou microturbinas. Além da geração elétrica, o aproveitamento do calor residual, que pode representar até 40 % do balanço energético total, um diferencial importante dos sistemas CHP, aumentando a eficiência global e reduzindo a dependência de fontes fósseis (Oliveira et al., 2024; Roa et al., 2024).

Além disso, Dalpaz et al. (2020) reforçam esses achados ao demonstrar que sistemas de micro cogeração com motores ciclo Otto podem atingir eficiências elétricas superiores a 30 %, com aproveitamento térmico expressivo, especialmente quando o calor do arrefecimento é utilizado em processos de aquecimento de água e climatização. Esses resultados corroboram o potencial da cogeração a biogás como tecnologia consolidada para aplicações descentralizadas e sustentáveis.

De modo geral, os casos analisados convergem para a conclusão de que o biogás é uma alternativa estratégica para geração distribuída de energia, transformando passivos ambientais em oportunidades econômicas e contribuindo para uma matriz energética mais limpa e eficiente (Nogueirão et al., 2022; Rocha et al., 2023; Oliveira et al., 2024; Roa et al., 2024).

### **3.6. Aproveitamento Energético em Sistemas de Cogeração**

O aproveitamento energético total do biogás em sistemas de cogeração representa uma das estratégias mais eficazes para a valorização de resíduos orgânicos, especialmente em instituições com demandas térmicas e elétricas simultâneas. O sucesso desses sistemas não depende apenas da eficiência na conversão elétrica, mas também da capacidade de recuperar e utilizar o calor gerado durante a combustão do biogás. Diferentemente das usinas termoelétricas convencionais, onde grande parte da energia térmica é dissipada no ambiente, a cogeração visa maximizar o rendimento global do sistema, com eficiências que podem ultrapassar 80% em configurações bem projetadas (Sadovoy et al., 2025) Esse desempenho é alcançado por meio da combinação entre motores de combustão interna e sistemas de recuperação térmica integrados ao processo, permitindo o uso do calor residual para aquecimento de água, climatização de ambientes e processos industriais.

Em instituições públicas como universidades, hospitais e centros de pesquisa, a integração entre geração elétrica e térmica se mostra estratégica, pois contribui para a redução de custos operacionais, o aumento da autossuficiência energética e a diminuição da pegada de carbono institucional, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade institucional. A Tabela 3.7 resume alguns exemplos de aplicação de sistemas de cogeração a biogás, destacando os substratos utilizados, as tecnologias adotadas e os principais resultados alcançados em diferentes contextos institucionais e operacionais.

**Tabela 3.7.** Exemplos de Aplicação de Cogeração com Biogás

Substrato	Tecnologia de Cogeração	Eficiência/Resultado	Referência
RA + poda	Motor ciclo Otto + simulação de CHP	62% CH <sub>4</sub> no biogás; viabilidade de cogeração térmica/elétrica	Santos <i>et al.</i> , (2023)
Biogás	Motores automotivos convertidos	Operação contínua e estável em zonas rurais	IRENA (2018)
RA	Microgeração elétrica por motor ou microturbina	Produção com estimativa de 360kWh/d (motor) ou 390kWh/d (turbina)	Roa <i>et al.</i> (2024)
RA + esgoto	Motor Otto e análise comparativa com Stirling	CHP até 74%; motores Otto mostraram melhor custo-benefício	Farajollahi <i>et al.</i> , (2025)
RSU	Sistema de cogeração, integrado com geração de energia térmica	Potencial aproveitamento energético otimizado	Pinheiro <i>et al.</i> (2025)

Fonte: Autor (2025)

### 3.6.1. Eficiência elétrica

A eficiência elétrica de um sistema de cogeração a biogás está diretamente relacionada a fatores como o tipo do motor, a composição do biogás, o regime de operação e as práticas de manutenção adotadas. Motores ciclo Otto adaptados para biogás, apresentam eficiência elétrica típica entre 25% e 35%, podendo atingir até 38% em condições ideais com biogás purificado e teor de metano estável (*Centrica Business Solutions*, 2025; *Biogas Info*. 2025). Contudo, variações na qualidade do biogás, especialmente no teor de CH<sub>4</sub>, na presença de H<sub>2</sub>S e umidade, impactam diretamente o desempenho dos motores. Biogás não purificado tende a provocar queda de rendimento, falhas mecânicas e aumento da frequência de manutenção. Por isso, a adoção de tecnologias de purificação, como filtros de carvão ativado e dessulfuradores com óxidos metálicos, é recomendada para assegurar estabilidade operacional (Farajollahi *et al.*, 2025).

Simulações realizadas na Universidade de São Paulo USP, com um sistema de co-digestão de RA e poda urbana, indicaram que mesmo com teor de CH<sub>4</sub> em torno de 60%,

seria possível obter até 180 kWh por tonelada de resíduo fresco tratado, o que reforça o potencial técnico da cogeração em instituições de ensino (Santos *et al.*, 2023).

Além disso, o dimensionamento adequado do sistema é essencial. Sistemas superdimensionados operam com carga parcial, o que reduz a eficiência e acelera o desgaste mecânico, enquanto sistemas subdimensionados não suprem adequadamente as demandas térmicas e elétricas. Assim, análises energéticas prévias e testes de desempenho são fundamentais para otimizar o projeto.

### 3.6.2. Recuperação de calor

Durante a combustão do biogás em motores ciclo Otto, uma parcela significativa da energia dissipada sob a forma de calor, principalmente nos gases de exaustão e no sistema de arrefecimento do motor. A recuperação deste calor é uma etapa crítica para elevar a eficiência global da cogeração, que pode superar 70% a 80%, dependendo da tecnologia empregada e da intensidade da demanda térmica local (Farajollahi *et al.*, 2025).

As principais estratégias para a recuperação térmica incluem:

- Trocadores de calor no circuito de arrefecimento do motor, que permite o aquecimento de água ou outros fluidos de processo,
- Recuperadores nos gases de exaustão, direcionando calor para sistemas de aquecimento de ambientes, processos industriais ou geração de água quente sanitária.

A energia térmica recuperada pode ser aplicada a diversas finalidades, como o aquecimento de água para chuveiros e cozinhas, processos de lavagem e esterilização hospitalar, ou ainda para climatização de ambientes por meio de sistemas de refrigeração por absorção. A escolha da aplicação depende das demandas térmicas específicas da instalação, da proximidade entre o ponto de geração e consumo e da capacidade de armazenamento ou distribuição do calor.

Estudos mostram que a eficiência térmica pode atingir até 50%, quando o calor é efetivamente reaproveitado, especialmente em locais com demanda contínua de aquecimento, como lavanderias hospitalares, cozinhas industriais e laboratórios (Sadovoy *et al.*, 2025)

Na UFSCar, a integração desses sistemas com o HU, o RU e prédios administrativos pode viabilizar ganhos reais de eficiência, ao substituir caldeiras convencionais e reduzir o consumo de energia elétrica da rede. Essa abordagem fortalece o papel da universidade como polo de inovação em tecnologias sustentáveis e protótipo de cidades inteligentes.

### 3.6.3. Aplicações térmicas na UFSCar

Na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), o RU representa uma das principais cargas térmicas contínuas, configurando-se como um setor com elevado potencial para o aproveitamento do calor residual gerado em sistemas de cogeração a biogás. Esse calor pode ser utilizado no aquecimento de água destinada à lavagem de utensílios, panelas e bandejas, atividades que demandam volumes significativos de água quente e que, atualmente, consomem quantidades expressivas de energia térmica.

Outra aplicação importante no RU é o pré-aquecimento de água para sistemas de cocção a vapor, como marmiteiros e caldeiras, aumentando a eficiência térmica do processo e reduzindo o consumo direto do GLP. Além disso, o calor recuperado pode ser direcionado para ciclos de limpeza automatizada (CIP, *Clean in place*), melhorando a eficiência da higienização de superfícies e equipamentos contribuindo para o cumprimento de boas práticas sanitárias com menor consumo energético.

Para a viabilidade dessas aplicações, é essencial avaliar a proximidade entre a unidade de geração de calor, o motor ciclo Otto acoplado ao biodigestor, e os pontos de consumo térmico, como o RU. O transporte de calor via água quente sofre perdas térmicas proporcionais à distância percorrida e à qualidade do isolamento térmico das tubulações.

Distâncias superiores a 50 metros podem resultar em perdas térmicas significativas na ausência de isolamento adequado, conforme demonstrado em estudos sobre transporte de calor em sistemas industriais (Dalpaz *et al.*, 2020). Por isso, uma alternativa viável é a instalação de minissistemas CHP em contêineres, mais próximos ao ponto de consumo, mesmo que com menor capacidade instalada, o que pode reduzir as perdas e aumentar a eficiência global do sistema (Garkoti *et al.*, 2025).

Outras aplicações potenciais na UFSCar incluem o aquecimento de água para banheiros e vestiários em centros esportivos, HU, alojamentos estudantis e laboratórios experimentais, bem como sistemas de climatização por absorção, que permitem o resfriamento de ambientes a partir do calor de baixa temperatura, com baixo consumo elétrico. Entretanto, ressalta-se que a dispersão geográfica dos pontos com demanda térmica expressiva dificulta o aproveitamento do sistema CHP em todas as áreas, em razão das perdas associadas a distâncias, mencionadas no capítulo anterior.

A identificação precisa das cargas térmicas e o mapeamento da demanda sazonal de calor são fundamentais para o dimensionamento correto do sistema de cogeração. Esse

alinhamento técnico entre geração e consumo térmico é essencial para maximizar a eficiência do sistema, evitar desperdícios de energia e garantir retorno econômico ao investimento. Além disso, essas aplicações reforçam o compromisso institucional da UFSCar com a transição energética, a sustentabilidade e a inovação em soluções descentralizadas de gestão energética.

Para sistematizar as possibilidades de uso térmico do biogás na UFSCar, elaborou-se a Tabela 3.8 que mostra possíveis aplicações potenciais de calor recuperado em diferentes setores do campus.

**Tabela 3.8.** Resumos de possibilidades de aplicações térmicas na UFSCar

<b>Tipo de Uso</b>	<b>Localização</b>
Aquecimento de água para lavagem de utensílios	Restaurante Universitário (RU)
Pré-aquecimento de água para caldeiras/cozimento	Restaurante Universitário (RU)
Limpeza no RU	Restaurante Universitário (RU)
Aquecimento de água no HU	Hospital Universitário (HU)
Lavanderia hospitalar	Hospital Universitário (HU)
Pré-aquecimento para esterilização no HU	Hospital Universitário (HU)
Água sanitária em vestiários e alojamentos	Blocos acadêmicos e alojamentos
Climatização por absorção em setores administrativos	Setores administrativos/acadêmicos
Aquecimento de água para utilização laboratorial	Laboratórios de Ensino

Fonte: Autoria Própria (2025).

### 3.7. Aspectos Econômicos de Sistemas de Cogeração

A análise econômica de sistemas de cogeração é fundamental para avaliar a viabilidade de implantação em instituições públicas, como universidades. Além dos ganhos em eficiência energética, a decisão pela adoção desse tipo de sistema deve considerar cuidadosamente a relação entre os custos de investimento e operação (CAPEX e OPEX) e os benefícios financeiros e energéticos obtidos, tais como a economia na conta de energia elétrica, a redução de custos térmicos e, eventualmente, a geração de créditos de energia pela injeção do excedente na rede.

Estudos recentes indicam que sistemas de cogeração bem dimensionados, operando com substratos de baixo custo e localmente disponíveis, podem apresentar retorno

financeiro positivo em prazos entre 4 a 7 anos, mesmo considerando os custos com purificação, automação e manutenção (Santos *et al.*, 2023; Dalpaz *et al.*, 2020). Esse retorno é ainda mais expressivo em ambientes onde há integração térmica e energética com setores como restaurantes universitários e hospitais, reduzindo o consumo de energia convencional e promovendo ganhos ambientais adicionais (D'Aquino *et al.*, 2022).

Embora sistemas de cogeração a biogás, especialmente em pequena escala, apresentem barreiras iniciais associadas ao investimento em infraestrutura, que incluem a construção de biodigestores, instalação de motores, sistemas de purificação, trocadores de calor, sensores e automação, quando bem dimensionados e instalados próximos a unidades com alta demanda térmica e elétrica, os sistemas demonstram retorno econômico competitivo, mesmo frente a variações tarifárias. Essa viabilidade se intensifica com o uso de resíduos internos, reduzindo significativamente os custos com transporte e destinação final e promovendo ganhos indiretos via economia circular (CIBiogás, 2023).

### 3.7.1. Estimativas de CAPEX e OPEX

Os custos de capital (CAPEX) associados à instalação de plantas de DA e cogeração apresentam grande variabilidade na literatura, refletindo diferenças na escala, no escopo de fornecimento e no nível de sofisticação tecnológica. As estimativas internacionais mostram que plantas compactas, com menor integração de sistemas, tendem a apresentar custos específicos por kW mais baixos, enquanto plantas completas, incluindo pré-tratamento, purificação do biogás, sistemas de segurança, compressão e infraestrutura civil apresentam custos significativamente superior.

Estudos recentes de engenharia econômica compilados por Eftaxias *et al.* (2024) indicam faixas de custo para plantas completas entre 4.500 e 6.000 €/kW<sub>e</sub>, correspondendo aproximadamente a 24.750 a 33.000 R\$/kW<sub>e</sub> considerando câmbio médio de 5,50 R\$/€ (2024). Esses valores são compatíveis com sistemas de pequeno porte que integram DA, motogeradores ciclo Otto e recuperação térmica.

Pesquisa nacional mais recente conduzida por Silva *et al.* (2025) apresenta faixas de 30.000 a 34.000 R\$/kW para plantas compactas com alto nível de automação e purificação completa, situando-se dentro da literatura internacional, mas refletindo as condições de custo brasileiras, como maior preço relativo de componentes e limitações de escala.

Por sua vez, o relatório IEA Bioenergy Task 37 (2015) apresenta faixas amplas, 22.950 a 56.100 R\$/kW, englobando tanto unidades rurais simplificadas quanto plantas completas equipadas com sistemas avançados de purificação e instrumentação. Essa amplitude é fundamental para análise de viabilidade, pois evidencia que sistemas de pequeno porte, quando exigem alto grau de purificação, podem apresentar valores específicos de CAPEX comparáveis ou até superiores aos de plantas maiores.

No que diz respeito ao custo operacional (OPEX), a literatura é igualmente consistente ao indicar que a escala da planta influencia diretamente os custos anuais. Estudos realizados no âmbito da IEA Bioenergy demonstram que plantas médias e grandes operam tipicamente com custos anuais entre 3% e 6% do CAPEX (LANTZ et al., 2017; IEA BIOENERGY, 2018). No entanto, plantas compactas, como é o caso de unidades universitárias ou rurais, apresentam custos proporcionalmente maiores devido a menor beneficiamento da economia de escala. Relatórios da Danish Energy Agency, DEA (2022) e análises de Sánchez-Martín et al. (2022) demonstram que sistemas de pequena escala podem apresentar OPEX anuais entre 6% e 15% do CAPEX, dependendo do nível de purificação, horas de operação e tipo de substrato.

Essas faixas consolidadas na literatura formam o conjunto de parâmetros usualmente empregados em estudos técnico-econômicos de plantas de pequena escala e constituem a base de comparação utilizada em análises aplicadas.

### 3.7.2. Modelos de payback e custo evitado

O payback simples é um dos indicadores mais utilizados para avaliar a atratividade econômica de projetos de cogeração a biogás, representando o tempo necessário para que os ganhos financeiros proporcionados pelo sistema sejam equivalentes ao valor investido na sua implantação.

Outro indicador essencial na análise econômica é o custo evitado, ou seja, o valor correspondente à energia que deixaria de ser adquirida da rede elétrica ou do gás convencional. Esse indicador permite calcular o retorno incremental do sistema ao longo de seu ciclo de vida, sendo fortemente influenciado pelo nível de integração térmica da cogeração.

Adicionalmente, sistemas de cogeração a biogás podem se beneficiar de linhas de financiamento específicas, e subsídios específicos, como o FINEP, o BNDES Fundo Clima e o Programa Nacional de Geração Distribuída com Fontes Renováveis (ProGD),

que visam fomentar projetos de sustentabilidade e inovação tecnológica. Universidades públicas, ao aliarem cogeração à pesquisa, podem acessar recursos de editais de P&D, ampliando o impacto institucional da implantação (IRENA, 2018; CIBiogás, 2023).

Dessa forma, a análise combinada de indicadores financeiros e institucionais é estratégica para a tomada de decisão, permitindo não apenas avaliar a viabilidade econômica direta, mas também mensurar os impactos indiretos associados à sustentabilidade, inovação tecnológica e economia circular.

### 3.7.3. Estudos de caso relacionados à temática

A literatura internacional apresenta uma variedade de estudos de caso relacionados à implantação de sistemas de DA acoplados à cogeração (CHP), abrangendo desde plantas de pequena escala para gerenciamento de resíduos agrícolas até instalações institucionais e agroindustriais de maior porte. Entretanto, apenas uma parte desses trabalhos fornece dados econômicos completos e verificáveis, especialmente referentes a CAPEX e OPEX específicos por unidade de potência instalada.

O Technology Catalogue da Danish Energy Agency (DEA, 2022) é um dos documentos mais referenciados em avaliações de sistemas de biogás e cogeração na Europa. Ele apresenta parâmetros padronizados de desempenho e custo para plantas de pequeno e médio porte, considerando tecnologias amplamente comercializadas. Os valores reportados refletem plantas consolidadas no mercado dinamarquês, caracterizadas por elevada automação, integração térmica e ótima qualidade de engenharia. As faixas de CAPEX entre 1.000 e 3.000 €/kW<sub>e</sub> são frequentemente citadas em estudos comparativos e representam sistemas já maduros e otimizados, típicos de regiões com forte política de incentivo ao biogás.

Estudos como Eftaxias et al. (2024) ampliam essa discussão ao avaliar instalações entre 50 a 400 kW em diferentes graus de complexidade. Esses autores incluem custos de DA, adaptação, purificação e sistemas de cogeração, o que explica a faixa de investimento mais elevada observada (4.500–6.000 €/kW<sub>e</sub>). As análises são particularmente relevantes por representarem plantas completas, semelhantes ao escopo considerado em projetos institucionais, envolvendo desde o processamento do substrato até a recuperação térmica do módulo CHP.

A compilação internacional da IRENA (2019) oferece um panorama abrangente de custos globais para plantas de biogás com cogeração, incorporando dados de diversos continentes. A ampla faixa de valores observada (US\$ 2.500–6.100/kW<sub>e</sub>) reflete diferenças de escala, de custos de mão de obra, de rigor normativo e de condições de mercado. Essa base é essencial para estudos comparativos que necessitam contextualizar sistemas em regiões com diferentes níveis de maturidade do setor energético.

Por fim, Sánchez-Martín et al. (2022) analisam economicamente plantas pequenas dotadas de adaptações para biometano e módulos CHP, concentrando-se em soluções tecnicamente robustas, porém de escala limitada. Os custos elevados (3.000–8.000 €/kW<sub>e</sub>) refletem a natureza desses sistemas, que operam com maior rigor de purificação e equipamentos adicionais de alto valor agregado. Esse estudo contribui para a compreensão de como plantas menores tendem a apresentar custos unitários mais elevados, especialmente quando incluem tratamento avançado do biogás.

A seguir, a Tabela 3.9 sintetiza os principais parâmetros financeiros extraídos dessas referências, convertidos para R\$/kW<sub>e</sub> com base nas taxas de câmbio aproximadas, fornecendo um panorama comparativo dos custos reportados para sistemas de cogeração a biogás.

**Tabela 3.9.** Parâmetros financeiros para diferentes estudos.

Fonte	Escala	Faixa CAPEX	CAPEX Aproximado	Faixa OPEX
IRENA (2019)	Diversas	US\$ 2.500 a 6.100/kW <sub>e</sub>	R\$ 12.500 – 30.500/kW <sub>e</sub>	3 – 10%
DEA (2022)	Pequena	1.000–3.000 €/kW <sub>e</sub>	R\$ 5.500 – 16.500/kW <sub>e</sub>	3 – 10%
Sánchez-Martín et al., (2022)	Pequenas plantas adaptadas	3.000–8.000 €/kW <sub>e</sub>	R\$ 16.500 – 44.000/kW <sub>e</sub>	4 – 12%
Eftaxias et al., 2024	Média Escala	4.500–6.000 €/kW <sub>e</sub>	R\$ 24.750 – 33.000/kW <sub>e</sub>	3 – 8%

Fonte: Autor (2025)

As diferenças entre as faixas observadas nos estudos de caso e os valores mais conservadores frequentemente adotados em avaliações acadêmicas derivam principalmente do escopo de custos considerado. Trabalhos que apresentam CAPEX reduzido usualmente incluem apenas o módulo CHP ou sistemas simplificados de purificação, enquanto estudos que consideram o sistema completo, como digestor, purificação, automação, obras civis e recuperação térmica, tendem a apresentar valores

significativamente superior. Além disso, plantas de pequeno porte apresentam custos unitários maiores devido a menor economia de escala, enquanto instalações industriais consolidadas, como as analisadas por DEA e IRENA, se beneficiam de tecnologias padronizadas e cadeias de suprimento maduras. Dessa forma, a variação nas faixas de CAPEX e OPEX observadas não representa inconsistência entre as fontes, mas sim diferentes configurações, contextos e níveis de complexidade tecnológica.

### **3.8. Síntese e Lacunas Identificadas na Literatura**

A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho abordou de forma integrada os aspectos técnicos, energéticos, regulatórios e econômicos associados à cogeração de energia a partir do biogás, com ênfase na aplicação em instituições públicas como universidades. Foram explorados os fundamentos da DA, a qualidade do biogás, o funcionamento do ciclo Otto, as possibilidades de recuperação térmica e os indicadores de viabilidade econômica. A seguir, são destacadas as principais sínteses e lacunas observadas nos estudos analisados, que justificam a continuidade da pesquisa experimental proposta neste TCC.

#### **3.8.1. Integração entre dados experimentais reais e simulação térmica**

Diversos estudos oferecem simulações robustas de sistemas de cogeração com base em softwares como HOMER Pro ou MATLAB, utilizando dados padrão de eficiência e produção de biogás (Serat *et al.*, 2024; IRENA, 2018). No entanto, observa-se uma escassez de trabalhos que integrem dados experimentais reais, coletados em reatores operando em pequena escala, com modelagens energéticas térmicas específicas para o contexto de campus universitário.

Projetos como o de Santos *et al.* (2023), que conduziram mais de 280 dias de operação contínua de reatores com RA e podas, ainda são exceção. A literatura carece de estudos que validem os dados obtidos em reatores experimentais com as condições reais de consumo térmico e elétrico das instituições, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil.

Outro ponto pouco explorado na literatura refere-se à integração entre análises econômicas detalhadas (CAPEX, OPEX e custo evitado) e o aproveitamento térmico em instituições de ensino. Estudos frequentemente abordam a viabilidade técnica ou energética de forma isolada, sem incorporar a realidade orçamentária, as tarifas

institucionais e os desafios de operação contínua, o que compromete a aplicabilidade dos resultados.

### 3.8.2. Falta de estudos aplicados a instituições de ensino

Embora os benefícios da cogeração com biogás estejam bem documentados em setores como o agroindustrial e cooperativas rurais, são raros os estudos que avaliem de forma completa sua aplicação em instituições de ensino superior. Quando presentes, tais trabalhos geralmente se limitam ao levantamento do potencial de geração a partir dos resíduos produzidos por restaurantes universitários, sem incluir a análise detalhada de viabilidade térmica, localização de unidades consumidoras e logística de implementação (CIBiogás, 2020).

Também são escassos os estudos que consideram a inserção da cogeração em políticas institucionais de sustentabilidade, ou que proponham o uso pedagógico dos sistemas como parte das atividades de ensino, pesquisa e extensão universitária.

### 3.8.3. Justificativa do presente trabalho

Diante das lacunas identificadas, este trabalho propõe a avaliação técnico-econômica e térmica de um sistema de cogeração a biogás em escala laboratorial, baseado em dados de bancada obtidos com a co-digestão de resíduos gerados na própria UFSCar. A proposta é conectar os dados de produção de biogás a um modelo que permita simular o aproveitamento do calor gerado em setores estratégicos da universidade como o RU.

Ao adotar um enfoque aplicado e interdisciplinar, baseado em dados experimentais e com potencial de replicação, este estudo pretende contribuir com evidências para a tomada de decisão sobre a implantação de sistemas energéticos renováveis em ambientes públicos, reforçando o papel das universidades como agentes de inovação e sustentabilidade.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Quantificação da Disponibilidade de SV dos RA e Poda

A quantificação da disponibilidade de SV dos RA e de poda vegetal foi realizada a partir de dados reais fornecidos pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e por caracterizações físico-químicas experimentais obtidas no trabalho de Carvalho (2024), utilizado como referência laboratorial para este estudo.

#### 4.1.1. Dados de geração de RA

As quantidades diárias de RA produzidos no RU foram obtidas através de comunicação interna, contendo valores mínimos, máximos e médios de geração diária de RA no restaurante, dados estes disponíveis na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Dados de geração de RA no RU UFSCar, campus São Carlos

<b>Parâmetro</b>	<b>kg / Dia</b>
Valor Mínimo	55
Valor Máximo	230
Estimativa Média Diária	180

Fonte: UFSCar, 2024

A estimativa média diária considerou 5 dias de consumo máximo e 2 de consumo mínimo. Para estimar o valor mensal, e posteriormente o anual, considerou-se as bases de 30 dias no mês e 12 meses no ano, possibilitando a estimativa da quantidade mensal e anual de RA obtidos através do RU.

#### 4.1.2. Dados de geração de resíduos de poda

Os dados anuais de resíduos vegetais foram fornecidos pelo Setor de Gestão Ambiental da UFSCar (SGAS/UFSCar), contendo volumes coletados nos anos de 2019 e 2023. Reforça-se ainda que os volumes são aproximados e baseados em estimativas, visto que a universidade não possui procedimento formal de contagem ou mensuração dos resíduos removidos. Para conversão do volume ( $m^3$ ) para massa fresca (kg), utilizou-se a densidade aparente média de resíduos de poda recomendada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), igual a  $140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (IPT, 2024), valor indicado para resíduos lignocelulósicos. A Tabela 4.2. resume os dados utilizados.

Analogamente ao procedimento mencionado na Seção 4.1.1. os valores anuais são convertidos para mensais utilizando as bases de 30 dias no mês e 12 meses no ano.

O procedimento para conversão do volume, oriundo da informação disponibilizada, para parâmetros mássicos é mostrado na Equação 2.

**Tabela 4.2.** Dados de geração de resíduos de poda na UFSCar, campus São Carlos

<b>Ano</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
2019	200
2023	680
<b>Média Aritmética</b>	<b>440</b>

Fonte: SGAS/UFSCar 2023

$$\text{Resíduo de Poda (kg)} = \text{Volume (m}^3\text{)} \cdot 140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

### 4.1.3. Quantificação de sólidos voláteis

As frações de SV (gSV/g de massa fresca) utilizadas neste trabalho, foram obtidas e disponibilizadas a partir da caracterização experimental conduzida pelo trabalho de Carvalho (2024), seguindo os métodos de determinação de ST e SV descritos nas normas APHA (2017). As frações de SV do RA e da poda correspondem, respectivamente, a 0,783 gSV/g e 0,50 gSV/g.

A disponibilidade de SV pode ser obtida aplicando a fração de SV sobre a massa mensal de cada um dos substratos, segundo a Equação 3.

$$SV = \text{Massa Fresca} \times \text{Fração de SV} \quad (3)$$

## 4.2. Quantificação da Produção de Biogás e Metano nos Cenários de Mono e Co-digestão

### 4.2.1. Dados de referência

A estimativa da produção mensal de biogás e metano nos cenários de mono-digestão e co-digestão foi realizada exclusivamente a partir dos rendimentos obtidos nos ensaios laboratoriais conduzidos pelo trabalho de Carvalho (2024), utilizando reatores de 250 mL operados em DA em batelada. Os dados experimentais fornecidos incluíram composição dos substratos, rendimentos específicos de biogás e características físico-químicas de RA, poda vegetal e lodo inoculante.

Para determinação dos rendimentos e produção de biogás com as quantidades de resíduos disponíveis na UFSCar, definidos anteriormente, é necessário a utilização dos resultados ótimos obtidos na escala experimental, para os cenários de mono e co-digestão. Em ambos cenários, os experimentos foram realizados em reatores de 250 mL, com

headspace de 60%, operados em regime mesofílico e seguindo metodologia de ensaio BMP (Biochemical Methane Potential), com duração de 40 dias, conforme as diretrizes gerais descritas por Angelidaki et al. (2009).

Os reatores experimentais de referência foram os que apresentaram maiores volumes acumulados de biogás, para os cenários de co e mono-digestão, conforme Carvalho (2024). Os dados específicos são mostrados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Condições obtidas em DA em escala laboratorial

<b>Digestão</b>	<b>Co-Digestão</b>	<b>Mono-Digestão</b>
<b>Substrato</b>	80% RA e 20% Poda (em SV)	100% RA
<b>Inóculo</b>	Lodo inoculante à 6gSV/L	
<b>Pré-tratamento RA</b>	Moagem em partículas de diâmetros de 6mm	
<b>Pré-tratamento Poda</b>	Autoclavagem (120°C e 30 minutos)	-
<b>Proporção I/S</b>	1:2 (em SV)	
<b>Biogás Produzido</b>	535,0mL	787,5 mL
<b>Adição de Substrato</b>	2,11 gSV	
<b>Rendimento Biogás</b>	253,15 mL/gSV <sub>Substrato</sub>	372,63 mL/gSV <sub>Substrato</sub>

Fonte: Adaptado de Carvalho, 2024

#### 4.2.2. Escalonamento para cenário da UFSCar, São Carlos

Para escalonamento da produção de biogás para a escala de resíduos geradas na UFSCar, inicialmente, define-se as quantidades de substrato (RA e poda) que serão alimentadas mensalmente.

Para o cenário de mono-digestão, a definição do substrato, unicamente RA, é simples, sendo o próprio valor disponível no campus.

Para a co-digestão, é necessário realizar a estimativa através da proporção de RA e poda idealizada no reator experimental, de 80% de RA e 20% de poda, em SV. Para converter essa proporção para base de massa fresca, com auxílio das frações de SV, já abordadas anteriormente (0,783gSV/g para o RA e 0,5gSV/g para a poda), utiliza-se o procedimento descrito nas equações 4 e 5, onde  $x_{RA}$  e  $x_{poda}$  são as proporções em base de massa fresca para RA e poda, respectivamente.

$$x_{RA} = \frac{\frac{0,80}{0,783gSV/g}}{\frac{0,80}{0,783gSV/g} + \frac{0,20}{0,5gSV/g}} \quad (4)$$

$$x_{Poda} = \frac{\frac{0,20}{0,5gSV/g}}{\frac{0,80}{0,783gSV/g} + \frac{0,20}{0,5gSV/g}} \quad (5)$$

Sabendo-se que, para o cenário de co-digestão, a quantidade de RA é o fator limitante, ou seja, a partir dele delimitaremos a quantidade de resíduo de poda que poderá ser utilizada, que será estimada com o uso da Equação 6.

$$Alimentação\ Poda = \frac{Alimentação\ RA \cdot x_{Poda}}{x_{RA}} \quad (6)$$

A partir da definição de substrato, em quantidade de SV, é possível seguir com a obtenção do volume de biogás e, conseqüentemente, metano gerado pela DA destes resíduos. A obtenção do volume de biogás é dada pela Equação 7, onde é mostrado o produto da quantidade de SV e o rendimento específico da digestão em base de SV de substrato adicionados ( $\Upsilon$ ), em aplicação (mono ou co-digestão), mostrada na Seção anterior.

$$Volume\ de\ biogás = SV \cdot \Upsilon \quad (7)$$

Para obtenção da fração específica de metano, é utilizado a fração volumétrica de metano no biogás de 65% (Santos *et. al*, 2023). Pelo produto do volume de biogás gerado com esse parâmetro chave, define-se a geração de biogás, oriunda da DA dos resíduos do Campus São Carlos (Equação 8).

$$Volume\ de\ Metano = Volume\ de\ Biogás \cdot 65\% \quad (8)$$

### 4.3. Potencial Energético do Biogás nos Cenários de Mono e Co-digestão

A conversão dos volumes mensais de metano obtidos nos cenários de mono e co-digestão em energia elétrica e térmica é realizada com base no poder calorífico inferior (PCI) do metano e nas eficiências típicas de um motogerador ciclo Otto operando com biogás.

O cálculo da energia química potencialmente recuperável a partir do metano foi realizado utilizando o PCI do metano, valor amplamente difundido na literatura de biogás. Para este trabalho adotou-se o valor de 35,8 MJ/m<sup>3</sup>, conforme publicado pelo Centro

Internacional de Energias Renováveis, CIBiogás (2020), referência técnica nacional amplamente empregada no setor de biogás.

A energia química ( $E_{quim}$ ) é estimada multiplicando-se o volume de metano obtido em cada cenário pelo seu PCI, procedimento este descrito na Equação 9. Adicionalmente, tratando-se de fins energéticos, é válido estipular a conversão das unidades para kWh, definida pela Equação 10, onde E pode se referir a qualquer energia tratada neste trabalho (química, térmica ou elétrica).

$$E_{quim} (MJ) = \text{Metano} (m^3) \cdot 35,8 \left( \frac{MJ}{m^3} \right) \quad (9)$$

$$E (kWh) = E (MJ) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) \quad (10)$$

Para estimar a energia elétrica e térmica efetivamente recuperáveis por um sistema de cogeração a biogás, aplicaram-se eficiências típicas de motores ciclo Otto operando com gás pobre (biogás). A literatura recente apresenta faixas consolidadas, nas quais motores de pequeno porte apresentam eficiências elétricas de 25–38% e térmicas de 40–50%. Nesse contexto, foram adotados eficiência elétrica de 34% e térmica de 45%, conforme valores reportados por *Centrica Business Solutions* (2025), para motores ciclo Otto alimentados por biogás. A energia útil, elétrica ( $E_{el}$ ) e térmica ( $E_{ter}$ ), é dada pelas equações 11 e 12, respectivamente, onde  $\eta_{el}$  e  $\eta_{ter}$  referem-se as eficiências elétrica e térmica típicas do motogerador.

$$E_{el} = E_{quim} \cdot \eta_{el} \quad (11)$$

$$E_{ter} = E_{quim} \cdot \eta_{ter} \quad (12)$$

#### 4.4. Dimensionamento Teórico do Sistema CHP

O dimensionamento teórico do sistema de cogeração baseou-se diretamente nas energias elétrica e térmica mensais obtidas a partir dos volumes de metano produzidos nos cenários de mono e co-digestão, calculadas conforme metodologia apresentada no item anterior. Os valores de energia mensal (kWh/mês) são utilizados como entrada para a determinação das potências médias e da potência nominal requerida pelo motogerador.

Inicialmente, estima-se a potência elétrica associada ao funcionamento do sistema. Para isso, adota-se uma hipótese de operação contínua do motogerador, prática comum no dimensionamento preliminar de micro e mini-CHP, na qual se considera o sistema

operando 30 dias por mês e 24 horas por dia, totalizando 720 horas mensais. Essa abordagem está alinhada a diretrizes técnicas internacionais para sistemas de cogeração a biogás (EPA, 2015; CIBiogás, 2020). Entretanto, considerando a escala pequena e características específicas da instituição, onde a operação contínua pode ser de difícil instauração, considerou-se um cenário de operação intermitente, equivalente à 8 horas diárias, apenas em dias úteis, totalizando assim 160 horas mensais. Assim, a potência média é calculada dividindo-se a energia útil mensal pelo número de horas de operação mensais, a depender do cenário em análise, de acordo com a Equação 13.

$$Potência_{m\u00e9dia} = \frac{E_{el,mensal}}{Horas\ Mensais} \quad (13)$$

Para determinar a potência nominal, que ditará os parâmetros de escolha do sistema de CHP, adotou-se a prática usual de considerar que o equipamento deve operar dentro de uma faixa de carga realista, de aproximadamente 50% a 90% de sua potência nominal. Esse intervalo está de acordo com recomendações técnicas para motores estacionários a biogás, apresentadas por documentos da EPA (2015), IEA-ETSAP (2020). A potência nominal foi estimada aplicando-se um fator de capacidade (FC) compatível com sistemas de pequeno porte, adotado como 0,9. A determinação é realizada conforme Equação 14.

$$Pot\u00eancia\ Nominal = \frac{Pot\u00eancia_{m\u00e9dia}}{FC} \quad (14)$$

#### 4.5. Potencial Aproveitamento e Eficiência Global do Sistema

A avaliação do aproveitamento potencial do sistema de cogeração foi conduzida a partir da energia útil gerada nos cenários de mono e co-digestão, previamente calculada com base na produção mensal de metano e nas eficiências elétrica e térmica típicas de motogeradores ciclo Otto alimentados a biogás, conforme valores reportados na literatura técnica recente (Sadovoy *et al.*, 2025). A partir dessas energias, determinou-se a eficiência global ( $\eta$ ) do sistema, entendida como a fração da energia química do metano efetivamente convertida em energia elétrica e térmica utilizável. Essa eficiência é obtida pela relação da Equação 15.

$$\eta = \frac{E_{el} + E_{ter}}{E_{quim}} \quad (15)$$

Para avaliar a capacidade do sistema em atender demandas internas da universidade, foram utilizados dados operacionais fornecidos pela UFSCar referentes ao consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) do RU. O registro institucional indica a aquisição

quinzenal de 1.774,1 kg de GLP, cujo custo médio informado é de aproximadamente 5,30 R\$/kg. O conteúdo energético do GLP foi determinado a partir do poder calorífico inferior de 46,1 MJ/kg, conforme dados oficiais da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2023). O consumo térmico quinzenal do RU é calculado pela Equação 16.

$$E_{térmica,RU} (MJ) = massa\ GLP\ (kg) \cdot 46,1 \left(\frac{MJ}{kg}\right) \quad (16)$$

A cobertura da demanda térmica pelo sistema de cogeração foi estimada por meio da comparação direta entre a energia térmica útil produzida pelo conjunto CHP e o consumo térmico mensal do RU, utilizando a relação da Equação 17.

$$Cobertura\ Térmica = \frac{E_{ter}}{E_{térmica,RU}} \quad (17)$$

Além da análise térmica, foi realizada a estimativa da contribuição do sistema para a demanda elétrica geral do campus. Foram utilizados os dados de consumo anual de eletricidade da UFSCar apresentados no trabalho de Camila Carvalho (2024), que reporta um consumo anual de 7.918.336,8 kWh (659.861,4 kWh/mês). Esse valor foi convertido para base mensal dividindo-se por 12, de forma a possibilitar a comparação direta com a energia elétrica útil obtida pelo motogerador. A porcentagem de atendimento da demanda elétrica foi calculada pela Equação 18.

$$Cobertura\ Elétrica = \frac{E_{el}}{E_{el.\ UFSCar}} \quad (18)$$

O conjunto desses procedimentos permite avaliar, em bases energéticas reais, a relevância técnica do sistema de cogeração para o atendimento das necessidades térmicas do RU e da demanda elétrica institucional, de forma alinhada às metodologias utilizadas em estudos de aproveitamento energético de biogás.

#### **4.6. Análise Econômica Preliminar**

A análise econômica preliminar do sistema de cogeração foi conduzida visando estimar a viabilidade financeira do conjunto CHP proposto, considerando os custos evitados pela geração de energia elétrica e térmica, os investimentos de capital (CAPEX), os custos anuais de operação e manutenção (OPEX) e os indicadores de retorno do investimento. O procedimento foi dividido em três etapas metodológicas: cálculo dos custos evitados, estimativa de CAPEX e OPEX, e cálculo do tempo de retorno (*payback*) simples e descontado.

#### 4.6.1. Custos evitados

Os custos evitados representam a economia anual resultante da substituição parcial das fontes convencionais de energia elétrica, térmica e das despesas de manejo de poda vegetal do campus.

A economia elétrica é calculada diretamente a partir da energia útil elétrica mensal fornecida pelo sistema de cogeração, ressalta-se ainda que, como a geração é inferior ao consumo total da universidade, não é necessário inserção em rede, não contemplando tarifas ou burocracias maiores. Adotou-se o valor tarifário de 0,85 R\$/kWh, parâmetro compatível com as faixas superiores das tarifas homologadas pela ANEEL para distribuidoras brasileiras em 2024, cujo valor máximo registrado alcança aproximadamente 0,94 R\$/kWh (ANEEL, 2024). Esse valor foi utilizado como referência para representar um cenário conservador e coerente com o custo real da eletricidade em instituições de grande porte. Assim, a economia elétrica mensal resulta da Equação 19.

$$Economia\ Elétrica = E_{el.\ mensal} \cdot 0,85 \left(\frac{R\$}{kWh}\right) \quad (19)$$

Para o cálculo da economia térmica, utilizaram-se dados institucionais referentes ao consumo de GLP do RU, que registra 1.774,1 kg de GLP por quinzena, ao custo médio de 5,30 R\$/kg. O conteúdo energético do GLP foi determinado a partir do seu poder calorífico inferior PCI = 46,1 MJ/kg (ANP, 2023). O consumo térmico mensal foi calculado pela Equação 20, em que a cobertura térmica (definida pela Equação 17, na Seção 4.5) representa a porcentagem de atendimento da energia térmica oriunda do sistema CHP em relação a demanda do RU.

$$Economia\ Térmica = Cobertura\ Térmica \cdot 5,30 \left(\frac{R\$}{kg}\right) \cdot 1774,1 \frac{kg}{quinzena} \cdot 2 \frac{quinzena}{mês} \quad (20)$$

Outros caminhos para obtenção da economia térmica foram avaliados, como a utilização do valor monetário por kWh útil de calor, entretanto, visto a disponibilidade do dado real e confiável, oriundo da instituição, a respeito do preço do quilograma de GLP, optou-se por seguir com este parâmetro para estimativa.

Também foi incorporado o custo evitado com o transporte de resíduos de poda vegetal, considerando que parte desse material deixa de ser enviada para manejo externo devido ao seu aproveitamento como substrato na DA. O Setor de Gestão Ambiental e

Sustentabilidade (SGAS/UFSCar) informou o custo médio de 70 R\$/m<sup>3</sup> para transporte de poda. Assim, a economia associada ao aproveitamento da fração utilizada pelo sistema foi definida através da Equação 21.

$$Economia\ Poda = Volume\ de\ Poda\ Utilizada \cdot 70 \left(\frac{R\$}{m^3}\right) \quad (21)$$

A soma dos três componentes fornece o total de custos evitados.

#### 4.6.2. Estimativas CAPEX e OPEX

A estimativa do CAPEX foi organizada considerando dois escopos distintos de implantação, uma vez que os valores disponíveis na literatura se referem a conjuntos de equipamentos com abrangências diferentes. No caso de sistemas que contemplam apenas o módulo de cogeração a biogás, incluindo motor-gerador, recuperação de calor, trocador térmico, painel elétrico local, sistema de partida, silencioso e interligação imediata, as faixas de custo mais recentes situam-se entre aproximadamente vinte e trinta e três mil reais por kW<sub>e</sub>. Para a implantação completa de uma planta no campus, abrangendo DA, pré-tratamentos, limpeza e polimento do biogás, desumidificação, remoção de H<sub>2</sub>S, compressão, instrumentação, integração elétrica e térmica, abrigos técnicos e obras associadas, os valores reportados localizam-se entre cerca de vinte e dois mil e cinquenta e seis mil reais por kW<sub>e</sub>. As faixas de valores encontradas são mostradas a seguir:

- 24.750 a 33.000 R\$/kW<sub>e</sub> (Eftaxias et al., 2024)
- 30.000 a 34.000 R\$/kW<sub>e</sub> (Silva et al., 2025)
- 22.950 a 56.100 R\$/kW<sub>e</sub> (IEA Bioenergy, 2015)

Como o presente estudo considera a implantação integral do sistema de produção e condicionamento do biogás, foi adotado o valor de referência de em diferentes faixas, de 33.000,00 a 56.100 R\$/kW<sub>e</sub>. A escolha deste valor se justifica com a previsão de inclusão do módulo CHP, os trocadores de calor, o silencioso, o painel elétrico, o sistema de partida, além dos sistemas auxiliares, como de desumidificação, remoção de H<sub>2</sub>S, polimento do biogás, compressão, instrumentação de segurança e as obras necessárias à instalação. Dessa forma, o CAPEX total foi definido conforme a Equação 22, considerando a potência nominal do sistema.

$$CAPEX = \frac{R\$}{kW_e} \cdot Potência_{nominal} \quad (22)$$

O custo anual de operação e manutenção (OPEX) foi estimado a partir da literatura consolidada sobre plantas de DA e micro-cogeração. Segundo Lantz et al. (2017) e IEA Bioenergy, Task 37 (2018), plantas de biogás apresentam OPEX entre 3% e 6% do CAPEX anual, variando com o porte e o nível de automação. Para sistemas de pequena escala, o Danish Energy Agency (2022) e Sánchez-Martín et al. (2022) mostram que o OPEX tende a situar-se entre 6% e 15% do CAPEX, devido à maior frequência de manutenção do motor, substituição recorrente de filtros e necessidade de monitoramento técnico mais intenso.

Considerando as características de pequena escala do sistema avaliado, adotou-se uma taxa de 10% do CAPEX anual, calculada como demonstra a Equação 23.

$$OPEX = 0,10 \cdot CAPEX \quad (23)$$

#### 4.6.3. Tempo de retorno

O tempo de retorno do investimento foi determinado a partir do *payback* simples, calculado como a razão entre o investimento inicial (CAPEX) e os custos evitados anuais obtidos pelas equações anteriores, o procedimento é mostrado na Equação 24.

$$Payback\ Simple = \frac{CAPEX}{Economia\ Total\ Anual - OPEX} \quad (24)$$

Esta abordagem permite estimar o período necessário para que a economia gerada pela operação do sistema iguale o investimento inicial, considerando que parte da economia é consumida pelo custo anual de operação e manutenção.

Também se fez uso do *payback* descontado, que embute em suas contabilizações taxas de desconto previstas para os anos seguintes, que trazem maior robustez para a análise. A definição do *payback* descontado é obtida através da Equação 25, onde  $i$  se refere a taxa de desconto anual,  $n$  o número de anos necessários para que a soma dos fluxos de caixa descontados iguale o CAPEX, sendo este parâmetro o próprio *payback* descontado.

$$\sum_{t=1}^n \frac{Fluxo\ de\ Caixa}{(1+i)^t} = CAPEX \quad (25)$$

Para projetar o *payback* descontado, adotou-se uma taxa de desconto anual de 8%, fundamentada em relatórios regulatórios da ANEEL, conforme documentos oficiais e estudos acadêmicos (IPEA, ANEEL, ABCustos).

#### **4.7. Recomendações Técnicas para implementação Piloto na UFSCar, São Carlos**

A formulação das recomendações técnicas para uma possível implantação piloto de um sistema de DA seguido de cogeração na UFSCar foi conduzida a partir da integração de três bases metodológicas principais: o conjunto de resultados técnicos obtidos nos objetivos anteriores; os critérios de concepção de unidades piloto estabelecidos na literatura técnico-científica de biogás; e as orientações e parâmetros técnicos extraídos do documento institucional de referência disponibilizado por Cunto (2022), bem como das normas e práticas consolidadas para biodigestores, purificação de biogás e operação de micro-CHP.

O método adotado consiste em estabelecer um procedimento estruturado de seleção, baseado na caracterização experimental dos resíduos, nos rendimentos experimentais obtidos em escala laboratorial (250 mL) e nas condições operacionais mais adequadas a instalações de pequeno porte. O processo metodológico segue quatro eixos: definição do tipo de biodigestor, estimativa de volume útil do reator, definição do sistema de purificação e condicionamento do biogás, e seleção de requisitos mínimos de segurança e infraestrutura.

Para a determinação do tipo de biodigestor, utilizou-se como referência o comportamento físico dos substratos envolvidos, caracterizados previamente: resíduo alimentar de alta umidade e baixa lignocelulose, combinado com poda vegetal de caráter fibroso. A literatura recomenda que misturas com elevada fração particulada e tendência à sedimentação adotem sistemas do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), com agitação mecânica ou hidráulica, garantindo homogeneização e contato adequado entre micro-organismos e substrato (Appels et al., 2008; Mata-Alvarez et al., 2014). A convergência das características observadas com os requisitos mencionados, somada às orientações de implantação piloto reportadas por Cunto (2022), fundamenta a escolha metodológica de reatores do tipo CSTR como configuração de referência.

A definição do volume de substrato ( $V_{sub}$ ) do biodigestor piloto foi baseada no princípio de dimensionamento por tempo de retenção hidráulico (TRH), método amplamente empregado em estudos de viabilidade e no projeto de sistemas reais (Angelidaki et al., 2018; CIBiogás, 2020). A estimativa do volume útil segue a Equação geral, mostrada na Equação 26:

$$V_{sub} (m^3) = Alimentação Substrato \left( \frac{m^3}{dia} \right) \cdot TRH(dias) \quad (26)$$

em que a vazão de alimentação é o volume diário de substrato fresco (mistura RA/poda), obtido nos cálculos anteriores, e TRH é o intervalo adotado conforme recomendações da literatura para RA e co-digestão com materiais lignocelulósicos. Adotou-se o valor de 30 dias para TRH, valor usualmente adequado de acordo com abordagens tratadas em Cunto (2022) e (Mata-Alvarez et al., 2014).

Como as vazões de alimentação dos substratos estão em unidades mássicas, faz-se necessário o uso de densidades aparentes para conversão para base volumétrica.

A estimativa da densidade dos substratos utilizados no estudo foi fundamentada em valores reportados na literatura para materiais com características físicas semelhantes. Para a poda triturada e autoclavada, tratamento similar aos aplicados na escala laboratorial, utilizou-se o valor de 171,5 kg/m<sup>3</sup>, valor este embasado em estudos de caracterização de poda autoclavada (Scherzinger et al, 2020), que mostram que o pré-tratamento aumenta a fração de partículas finas e a densidade aparente do material. No caso do resíduo alimentar triturado, pesquisas aplicadas à DA relatam densidades entre 0,60 e 0,90 kg/L, correspondentes a resíduos orgânicos úmidos submetidos à trituração fina e com alto teor de umidade (KIM; LEE; PARK, 2014; LI et al., 2018), se optou por seguir com o limite superior, de 900 kg/m<sup>3</sup>. Esses intervalos fornecem base adequada para estimativas preliminares de volume em sistemas de DA, até que medições específicas possam ser realizadas em condições reais de operação. As conversões de base mássicas para volumétricas são feitas como mostrado na Equação 27.

$$Alimentação Substrato \left( \frac{m^3}{dia} \right) = \frac{Vazão Alimentação \left( \frac{kg}{dia} \right)}{Densidade Aparente \left( \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (27)$$

Com o volume e alimentação de substrato definidos, é de suma importância definir o volume de inoculante a ser aplicada para início da operação do reator. Como abordado nos estudos experimentais em escala laboratorial em Carvalho (2024), e demonstrados na Seção 4.2, a proporção I/S é equivalente a 1:2, em base de SV. Dessa forma, utilizando dos valores de: alimentação de substrato; razão I/S; densidade de SV do inoculante (todos definidos na Seção 4.2.), obtêm-se a fração de SV oriundas do lodo e, por conseguinte, o volume de inoculante ( $V_{in}$ ) a ser utilizado no biodigestor, como mostra o procedimento descrito na Equação 28.

$$V_{in}(m^3) = \frac{SV_{substrato} \cdot Razão \frac{I}{S}}{6 \frac{gSV_{inóculo}}{L}} \quad (28)$$

Finalizando a definição do volume real do biodigestor a ser implementado, faz-se necessário a avaliação conjunta dos volumes de substrato, inóculo e total do reator. A princípio, define-se o volume útil, sendo este a soma dos volumes de inóculo e substrato, posteriormente, com a implicação de um *headspace* de 60%, definido nos trabalhos de Carvalho (2024), abordados na Seção 4.2, através da Equação 29 calcula-se o volume total do biodigestor a ser instalado.

$$V_{total}(m^3) = \frac{V_{in} + V_{Sub}}{(1 - headspace)} \quad (29)$$

Para fins de purificação do biogás, o procedimento metodológico envolveu a seleção das tecnologias adequadas à escala do sistema e às exigências do motogerador escolhido. Seguindo a revisão bibliográfica, optou-se por avaliar tecnologias simplificadas e compatíveis com micro-CHP, incluindo desumidificação por condensação, remoção de H<sub>2</sub>S por leito de óxido de ferro ou filtros de carvão ativado, e polimento final por filtros têxteis ou resinas (Ryckebosch et al., 2011; Abatzoglou & Boivin, 2009). A escolha do conjunto de etapas fundamenta-se nos parâmetros mínimos de pureza exigidos para motores ciclo Otto a biogás, tipicamente abaixo de 200 ppm de H<sub>2</sub>S e com umidade reduzida, conforme indicado em manuais de fabricantes e nas diretrizes apresentadas por Cunto (2022) para pequenas unidades demonstrativas.

Por fim, os requisitos de segurança e infraestrutura são definidos com base nas normas e orientações aplicáveis a sistemas de biogás de pequeno porte, incluindo ventilação natural, áreas classificadas, válvulas corta-chama, sensores de metano e H<sub>2</sub>S, e sinalização adequada, conforme diretrizes abordadas em Cunto (2022) e recomendações gerais do IEA Bioenergy (2018).

O método descrito fornece o arcabouço necessário para, na etapa de resultados e discussão, apresentar recomendações específicas para a realidade da UFSCar, garantindo coerência com as características dos resíduos disponíveis, com os rendimentos experimentais obtidos e com a viabilidade operacional de um sistema piloto em ambiente universitário.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Disponibilidade de Sólidos Voláteis nos Resíduos Alimentares e de Poda na UFSCar São Carlos

Com base nos valores médios de RA e de poda, que foram adotados no trabalho, a massa mensal de RA foi estimada em 5400 kg/mês. Aplicando a fração de SV de 0,783gSV/g na Equação 3, obtêm-se a massa mensal de SV oriundos dos RA.

$$SV = 5400 \frac{kg}{mês} \times 0,783 \frac{gSV}{g} = 4288,2 \frac{kgSV}{mês} \quad (3)$$

Tratando-se da poda, com o dado de 440 m<sup>3</sup>/ano, ou seja, 36,67 m<sup>3</sup>/mês, têm-se a quantidade mássica de resíduo mensal através da utilização da Equação 2.

$$Resíduo\ de\ Poda\ (kg) = 36,67 \frac{m^3}{mês} \cdot 140 \frac{kg}{m^3} = 5133,8 \frac{kg}{mês} \quad (2)$$

Aplicando novamente a Equação 3, com a fração de SV de 0,5 gSV/g, obteve-se a massa mensal de SV oriundos da Poda.

$$SV = 5133,4 \frac{kg}{mês} \times 0,5 \frac{gSV}{g} = 2566,7 \frac{kgSV}{mês} \quad (3)$$

A Tabela 5.1. mostra a síntese dos resultados de SV mensais.

**Tabela 5.1.** Disponibilidade de resíduos na UFSCar São Carlos

Resíduo	Massa (kg/mês)	Fração de SV	kgSV/mês
RA	5400,0	0,783	4228,2
Poda	5133,4	0,500	2566,7
<b>Total</b>	<b>10533,4</b>	-	<b>6794,9</b>

Fonte: Autor (2025)

Os resultados mostram que os RA e sua elevada fração de SV resultam em maior contribuição absoluta de SV. Ademais, a poda vegetal possui menor massa disponível, e com fração biodegradável reduzida, típica de resíduos lignocelulósicos com alto teor de fibra e lignina, conforme discutido na literatura (Li et al., 2018; Mata-Alvarez et al., 2014).

## 5.2. Quantificação da Produção de Biogás e Metano nos Cenários de Mono e Co-digestão

A quantificação da produção de biogás e metano para os cenários de mono e co-digestão foi realizada com base nos rendimentos específicos de produção obtidos experimentalmente nos reatores de bancada de 250 mL, conforme descrito na Seção 4.2. Os valores médios de produção específica (em m<sup>3</sup> de biogás por kg de SV adicionados) foram aplicados aos fluxos mensais de SV de RA, poda urbana e lodo, permitindo estimar a geração mensal de biogás e a correspondente fração de metano para cada cenário simulado.

### 5.2.1. Co – digestão

Inicialmente, é necessário definir a quantidade de resíduos, oriundos da poda e do RA que serão utilizadas na alimentação do reator neste cenário. Como aplicado na escala laboratorial, foi utilizado uma proporção de 80/20 de razão entre RA e poda, em base de SV. Logo, faz-se a conversão desta base para fração mássica da alimentação através das equações 4 e 5.

$$x_{RA} = \frac{\frac{0,80}{0,783gSV/g}}{\frac{0,80}{0,783gSV/g} + \frac{0,20}{0,5gSV/g}} = 71,86\% \quad (4)$$

$$x_{Poda} = \frac{\frac{0,20}{0,5gSV/g}}{\frac{0,80}{0,783gSV/g} + \frac{0,20}{0,5gSV/g}} = 28,14\% \quad (5)$$

Com as frações mássicas de alimentação da poda e RA em base de massa fresca é possível definir as quantidades de cada um dos resíduos a serem utilizadas. Neste cenário, sabe-se que o resíduo limitante é o RA, logo sua alimentação será o valor total disponível no campus, (5400 kg/mês). Com a Equação 6, estima-se a alimentação da poda neste cenário.

$$Alimentação\ Poda = \frac{Alimentação\ RA \cdot x_{Poda}}{x_{RA}} = \frac{5400 \frac{kg}{mês} \cdot 28,14\%}{71,86\%} = 2114,1 \frac{kg}{mês} \quad (6)$$

A partir da massa fresca dos resíduos a serem utilizadas no biorreator, com uso da Equação 3, define-se a quantidade de SV presentes em cada uma destas frações de resíduos alimentados.

$$SV\ RA = 5400 \frac{kg}{mês} \times 0,783 \frac{gSV}{g} = 4288,2 \frac{kgSV}{mês} \quad (3)$$

$$SV\ Poda = 2114,1 \frac{kg}{mês} \times 0,5 \frac{gSV}{g} = 1057,05 \frac{kgSV}{mês} \quad (3)$$

Definida a quantidade total de SV adicionadas mensalmente, estima-se quantidade de biogás e metano gerada, pelo rendimento obtido experimentalmente, com as equações 7 e 8, para o cenário de co-digestão.

$$V_{biogás} = SV_{Adicionados} \cdot Y = 5285,3 \frac{kgSV}{mês} \cdot 253,1 \frac{L\ biogás}{kgSV} \cdot \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 1338,0 \frac{m^3}{mês} \quad (7)$$

$$V_{Metano} = Volume\ de\ Biogás \cdot 65\% = 1338,0 \cdot 65\% = 869,69 \frac{m^3}{mês} \quad (8)$$

Dessa forma, têm-se os parâmetros de produção de biogás e metano, assim como as alimentações de substratos no biorreator na condição de co - digestão, mostrados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2.** Parâmetros de entrada e saída da DA em co-digestão

<b>Substrato</b>	<b>Alimentação</b> <b>(kg/mês)</b>	<b>SV</b> <b>(kgSV/mês)</b>	<b>Biogás</b> <b>(m<sup>3</sup>/mês)</b>	<b>Metano</b> <b>(m<sup>3</sup>/mês)</b>
RA	5400,0	4228,2	-	-
Poda	2114,1	1057,1	-	-
<b>Total</b>	<b>7514,1</b>	<b>5285,2</b>	<b>1338,0</b>	<b>869,7</b>

Fonte: Autor (2025)

### 5.2.2. Mono – digestão

A alimentação do biorreator em mono-digestão utiliza de todo o RA disponível no campus. Desta forma- a quantidade de SV adicionados mensalmente refere-se a própria disponibilidade de SV oriundos do RA na instituição, valor este apresentado na Tabela 5.1.

Similarmente ao procedimento realizado na Seção anterior, estima-se quantidade de biogás e metano gerada, pelo rendimento obtido experimentalmente, com as equações 7 e 8., para o cenário de mono-digestão.

$$V_{biogás} = SV_{Adicionados} \cdot Y = 4228,2 \frac{\text{kgSV}}{\text{mês}} \cdot 372,6 \frac{\text{L biogás}}{\text{kgSV}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 1575,6 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \quad (7)$$

$$V_{Metano} = \text{Volume de Biogás} \cdot 65\% = 1575,6 \cdot 65\% = 1024,12 \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \quad (8)$$

Dessa forma, têm-se os parâmetros de produção de biogás e metano, assim como as alimentações de substratos no biorreator na condição de mono - digestão, mostrados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3.** Parâmetros de entrada e saída da DA em mono-digestão

<b>Substrato</b>	<b>Alimentação (kg/mês)</b>	<b>SV (kgSV/mês)</b>	<b>Biogás (m<sup>3</sup>/mês)</b>	<b>Metano (m<sup>3</sup>/mês)</b>
RA	5400,0	4228,2	-	-
Poda	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>5400,0</b>	<b>4228,2</b>	<b>1575,6</b>	<b>1024,1</b>

Fonte: Autor (2025)

### 5.2.3. Comparação de cenários

Dos cenários construídos, é válido fazer a comparação de ambos. A Tabela 5.4 apresenta a comparação entre eles.

**Tabela 5.4.** Parâmetros de entrada e saída da DA em diferentes cenários

<b>Parâmetro</b>	<b>Co-Digestão</b>	<b>Mono-Digestão</b>
SV Substrato	5285,3 kgSV/mês	4228,2 kgSV/mês
Biogás	1338,0 m <sup>3</sup> /mês	1575,6 m <sup>3</sup> /mês
Metano	869,7 m <sup>3</sup> /mês	1024,1 m <sup>3</sup> /mês

Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos evidenciam diferenças importantes entre os cenários de mono e co-digestão, as quais podem ser compreendidas à luz da literatura consolidada sobre a DA. A mono-digestão apresenta maior produção de biogás e metano, este comportamento está associado à elevada biodegradabilidade dos RA, que possuem frações significativas de carboidratos, lipídios e proteínas facilmente hidrolisáveis. Esse resultado é coerente com o que relatam Appels et al. (2008), que destacam o rápido metabolismo desses

compostos e a consequente maior conversão em biogás quando comparados a resíduos lignocelulósicos, como a poda urbana.

Por outro lado, a co-digestão, mesmo apresentando menor produtividade específica, tende a conferir maior estabilidade operacional ao processo. Isso ocorre devido ao equilíbrio nutricional promovido pela mistura entre substratos com características complementares. Segundo Mata-Alvarez et al. (2014) e Esposito et al. (2012), a combinação de resíduos ricos em nitrogênio (caso do RA) com materiais estruturalmente mais resistentes e com maior teor de fibras (como a poda) melhora a relação C/N, reduz riscos de acidificação e favorece a manutenção da atividade metanogênica. Esse comportamento também foi descrito por Santos et al. (2023), que observaram ganhos de estabilidade e robustez operacional em sistemas de co-digestão envolvendo RA e biomassa lignocelulósica.

Adicionalmente, a presença do lodo anaeróbico como inoculante contribui para o aumento da resiliência do processo, especialmente no cenário de co-digestão. Conforme discutido por Angelidaki e Ahring (2003) e Chen et al. (2008), o aporte adequado de biomassa ativa reduz oscilações metabólicas, melhora a adaptação das comunidades microbianas e mitiga efeitos inibitórios associados à rápida degradação dos RA. Assim, embora a mono-digestão apresente maior volume absoluto de metano, a literatura indica que a co-digestão proporciona um processo mais estável e potencialmente mais adequado para operação contínua, especialmente em escalas maiores.

### **5.3. Potencial Energético do Biogás nos Cenários de Mono e Co-digestão**

#### **5.3.1. Co - digestão**

O potencial energético do biogás gerado nos cenários de DA é mensurado através da energia química disponível no mesmo. Esta é definida pela Equação 9.

$$E_{quim} (MJ) = \text{Metano} (m^3) \cdot 35,8 \left( \frac{MJ}{m^3} \right) = 869,69 (m^3) \cdot 35,8 \left( \frac{MJ}{m^3} \right) = 31134,9 \frac{MJ}{mês} \quad (9)$$

Tratando-se de fins energéticos, a conversão para a unidade de kWh é feita com uso da Equação 10.

$$E (kWh) = E \left( \frac{MJ}{mês} \right) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) = 31134,9(MJ) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) = 8648,6 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \quad (10)$$

A partir da energia química, encontra-se a elétrica e térmica, através dos usos das equações 11 e 12.

$$E_{el} = E_{quim} \cdot \eta_{el} = 8648,59 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \cdot 34\% = 2940,52 \frac{kWh}{mês} \quad (11)$$

$$E_{ter} = E_{quim} \cdot \eta_{ter} = 8648,59 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \cdot 45\% = 3891,86 \frac{kWh}{mês} \quad (12)$$

### 5.3.2. Mono - digestão

Para estimar o potencial energético da mono-digestão, segue-se o mesmo processo realizado na Seção 5.3.1. substituindo a quantidade de biogás gerado pelo cenário deste modelo de operação.

$$E_{quim} (MJ) = \text{Metano} (m^3) \cdot 35,8 \left( \frac{MJ}{m^3} \right) = 1024,11 (m^3) \cdot 35,8 \left( \frac{MJ}{m^3} \right) = 36663,1 \frac{MJ}{mês} \quad (9)$$

$$E (kWh) = E \left( \frac{MJ}{mês} \right) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) = 36663,1(MJ) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) = 10184,2 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \quad (10)$$

$$E_{el} = E_{quim} \cdot \eta_{el} = 10184,21 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \cdot 34\% = 3462,63 \frac{kWh}{mês} \quad (11)$$

$$E_{ter} = E_{quim} \cdot \eta_{ter} = 10184,21 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \cdot 45\% = 4582,89 \frac{kWh}{mês} \quad (12)$$

### 5.3.3. Comparação de cenários

Os resultados obtidos para ambos cenários de DA são mostrados na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5.** Resultados energéticos para diferentes cenários de DA

Parâmetro	Co-Digestão	Mono-Digestão
E química	8648,6 kWh/mês	10184,21 kWh/mês
E elétrica	2940,52 kWh/mês	3462,63 kWh/mês
E térmica	3891,86 kWh/mês	4582,89 kWh/mês

Fonte: Autor (2025)

Pela Tabela 5.5, a mono-digestão supera a co-digestão em todas as métricas em 18% de superioridade. Esses ganhos decorrem do maior potencial do substrato único, que gera mais biogás sem a fração menos biodegradável da poda. Ainda assim, os resultados

reforçam a discussão da Seção 5.2: embora o cenário de mono-digestão apresente potencial energético superior, parâmetros de operação sustentam a co-digestão, como maior estabilidade do reator, amortecimento de variações sazonais, uso de resíduos que seriam manejados externamente e regularidade de alimentação. Em síntese, a decisão não se apoia apenas no resultado energético, mas no possível desempenho do sistema ao longo do tempo e na gestão de resíduos do campus.

#### 5.4. Dimensionamento Conceitual do Sistema CHP

A partir dos valores de energia elétrica mensais obtidos na Seção 5.3, e aplicando-se o tempo de operação definido para cada cenário (720 h/mês para operação contínua e 160 h/mês para operação intermitente), estimaram-se as potências elétrica médias, definidas a partir da energia elétrica disponível no biogás, e a potência nominal requerida, obtida pela aplicação do FC na potência média, representando um cenário realista de operação do motogerador para cada condição.

##### 5.4.1. Co – digestão

Inicialmente, estimou-se as potências médias e nominais para o cenário de operação contínua, com uso das equações 13 e 14.

$$Potência_{m\u00e9dia} = \frac{E_{el,mensal}}{Horas\ Mensais} = \frac{2940,52 \frac{kWh}{m\u00eas}}{720\ h} = 4,08\ kW \quad (13)$$

$$Potência_{Nominal} = \frac{Potencia_{m\u00e9dia}}{FC} = \frac{4,08\ kWe}{0,9} = 4,54\ kW \quad (14)$$

J\u00e1 para o cen\u00e1rio de opera\u00e7\u00e3o intermitente, obt\u00eam-se as pot\u00eancias m\u00e9dias e nominais com o uso das mesmas equa\u00e7\u00f5es, substituindo apenas as horas mensais.

$$Pot\u00eancia_{m\u00e9dia} = \frac{E_{el,mensal}}{Horas\ Mensais} = \frac{2940,52 \frac{kWh}{m\u00eas}}{160\ h} = 18,38\ kW \quad (13)$$

$$Pot\u00eancia_{Nominal} = \frac{Potencia_{m\u00e9dia}}{FC} = \frac{4,08\ kWe}{0,9} = 20,42\ kW \quad (14)$$

##### 5.4.2. Mono – digest\u00e3o

A defini\u00e7\u00e3o das pot\u00eancias m\u00e9dias e nominais para a mono-digest\u00e3o \u00e9 realizada da mesma forma mostrada na Se\u00e7\u00e3o anterior, com substitui\u00e7\u00e3o da energia el\u00e9trica mensal obtida neste cen\u00e1rio de opera\u00e7\u00e3o.

Para a situa\u00e7\u00e3o de opera\u00e7\u00e3o cont\u00ednua t\u00eam-se:

$$Potência_{m\u00e9dia} = \frac{E_{el,mensal}}{Horas\ Mensais} = \frac{3462,63 \frac{kWh}{m\u00eas}}{720 h} = 4,81 kWe \quad (13)$$

$$Pot\u00eancia_{Nominal} = \frac{Pot\u00eancia_{m\u00e9dia}}{FC} = \frac{4,81 kWe}{0,9} = 5,34 kWe \quad (14)$$

Similarmente, para a opera\u00e7\u00e3o intermitente:

$$Pot\u00eancia_{m\u00e9dia} = \frac{E_{el,mensal}}{Horas\ Mensais} = \frac{3462,63 \frac{kWh}{m\u00eas}}{160 h} = 21,64 kWe \quad (13)$$

$$Pot\u00eancia_{Nominal} = \frac{Pot\u00eancia_{m\u00e9dia}}{FC} = \frac{21,64 kWe}{0,9} = 24,05 kWe \quad (14)$$

### 5.4.3. Compara\u00e7\u00e3o de cen\u00e1rios

Para efeito comparativo, agruparam-se os resultados obtidos para os diferentes cen\u00e1rios e modelos de opera\u00e7\u00e3o na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6.** Pot\u00eancias m\u00e9dias e nominais para diferentes cen\u00e1rios de opera\u00e7\u00e3o

<b>Digest\u00e3o</b>	<b>Co - Digest\u00e3o</b>		<b>Mono - Digest\u00e3o</b>	
	<b>Opera\u00e7\u00e3o</b>	<b>Cont\u00ednua</b>	<b>Intermitente</b>	<b>Cont\u00ednua</b>
P m\u00e9dia	4,08 kWe	18,38 kWe	4,81 kWe	21,64 kWe
P nominal	4,54 kWe	20,42 kWe	5,34 kWe	24,05 kWe

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 5.6 mostra que a mono-digest\u00e3o entrega pot\u00eancia m\u00e9dia e nominal maiores em ambos os regimes. Na opera\u00e7\u00e3o cont\u00ednua a m\u00e9dia sobe de 4,08 para 4,81 kWe e a nominal de 4,54 para 5,34 kWe, ganhos de 18%. No regime intermitente o padr\u00e3o se repete, com 18,38 para 21,64 kWe na m\u00e9dia e 20,42 para 24,05 kWe na nominal, tamb\u00e9m com um acr\u00e9scimo de 18%. Observa-se ainda que a pot\u00eancia m\u00e9dia intermitente \u00e9 cerca de 4,5 vezes a cont\u00ednua, sinal de que a mesma energia mensal foi concentrada em uma fra\u00e7\u00e3o menor do tempo, o que exige grupos na faixa de 20 a 24 kWe e reservat\u00f3rio t\u00e9rmico para aproveitar o calor.

Esses resultados se aproximam com a literatura: motores ciclo Otto a biog\u00e1s operam tipicamente com rendimento el\u00e9trico de 30 a 35% e t\u00e9rmico de 40 a 50%, de modo que diferen\u00e7as de pot\u00eancia entre cen\u00e1rios decorrem sobretudo do potencial de metano do substrato. A mono-digest\u00e3o tende a gerar mais biog\u00e1s quando comparada \u00e0 mistura com poda, pois a fra\u00e7\u00e3o lignocelul\u00f3sica reduz a biodegradabilidade do conjunto. Por outro lado, a codigest\u00e3o oferece benef\u00edcios operacionais relevantes para um campus,

como amortecimento de oscilações de carga orgânica, maior regularidade de alimentação e uso de um resíduo que teria custo de manejo externo. Em síntese, a mono-digestão eleva a potência disponível, enquanto a co-digestão pode otimizar a operação e a gestão de resíduos; a escolha do regime contínuo ou intermitente deve considerar o alinhamento com a demanda térmica do RU, a disponibilidade de metano por hora e os custos evitados em cada um dos cenários.

## 5.5. Potencial Aproveitamento e Eficiência Global do Sistema

A partir do potencial energético, definido na Seção 5.3. é calculado o aproveitamento do sistema, assim como seu atendimento com as demandas internas da universidade.

Inicialmente, define-se a eficiência global do sistema, através da utilização da Equação 15, aplicada para os cenários de co e mono-digestão.

$$\eta_{Co-digestão} = \frac{E_{el}+E_{ter}}{E_{quim}} = \frac{2940,52 \frac{kWh}{mês} + 3891,86 \frac{kWh}{mês}}{8648,59 \frac{kWh}{mês}} = 79\% \quad (15)$$

$$\eta_{Mono-digestão} = \frac{E_{el}+E_{ter}}{E_{quim}} = \frac{3462,63 \frac{kWh}{mês} + 4582,89 \frac{kWh}{mês}}{10184,21 \frac{kWh}{mês}} = 79\% \quad (15)$$

Observa-se que, para ambos os modelos, a eficiência global atingida pelo sistema é a mesma. Isso ocorre pelo fato de a eficiência ter como base os rendimentos elétrico e térmico do sistema baseado no ciclo Otto, independentemente da escala de produção energética, oriundas da queima do biogás.

Os demais parâmetros que indicam a efetividade da instalação do sistema na instituição são os comparativos com as demandas térmicas e elétricas da instituição. A demanda elétrica da instituição é simplesmente definida pelos seus dados de consumo divulgados, mostrado na Seção 4.5, equivalente a 659861,4 kWh mensais. Já a definição da demanda térmica, baseada na utilização de GLP, e seu poder calorífico inferior, pelo RU, destinado aos aquecimentos locais, é dada pelo uso da Equação 16.

$$E_{térmica,RU} (MJ) = massa \text{ GLP } (kg) \cdot 46,1 \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 1774,1 \frac{kg}{quinzena} \cdot 2 \frac{quinzena}{mês} \cdot 46,1 \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 163572,02 \left( \frac{MJ}{mês} \right) \quad (16)$$

Tratando-se de fins energéticos, utiliza-se a Equação 10 para conversão para as unidades de kWh.

$$E(kWh) = E \left( \frac{MJ}{mês} \right) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) = 163572 \left( \frac{MJ}{mês} \right) \cdot \frac{1}{3,6} \left( \frac{kWh}{MJ} \right) = 45436,67 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \quad (10)$$

A partir das demandas definidas, define-se o atendimento do sistema CHP as mesmas, através da utilização das equações 17 e 18, para a cobertura térmica e elétrica, respectivamente.

Para o cenário de co-digestão, têm-se:

$$Cobertura\ Térmica_{Co-digestão} = \frac{E_{ter}}{E_{térmica,RU}} = \frac{3891,86}{45436,67} = 8,57\% \quad (17)$$

$$Cobertura\ Elétrica_{Co-digestão} = \frac{E_{el}}{E_{el. UFSCar}} = \frac{2940,52}{659861,4} = 0,45\% \quad (18)$$

Enquanto para a mono-digestão:

$$Cobertura\ Térmica_{Mono-digestão} = \frac{E_{ter}}{E_{térmica,RU}} = \frac{4582,89}{45436,67} = 10,09\% \quad (17)$$

$$Cobertura\ Elétrica_{Mono-digestão} = \frac{E_{el}}{E_{el. UFSCar}} = \frac{3462,63}{659861,4} = 0,52\% \quad (18)$$

Os resultados compilados são mostrados na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7.** Resultados de desempenho e aproveitamento energético

Digestão	Co-Digestão	Mono-Digestão
<b>Demanda Elétrica</b>	659861,4 kWh/mês	
<b>Demanda Térmica</b>	45436,67 kWh/mês	
<b>Eficiência Global</b>	79%	
<b>Cobertura Elétrica</b>	0,45%	0,52%
<b>Cobertura Térmica</b>	8,57%	10,09%

Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos demonstram que, embora o sistema de cogeração apresente uma eficiência global elevada, 79%, o impacto direto sobre as demandas energéticas da universidade é limitado, principalmente devido à grande diferença entre a escala de produção do sistema e a magnitude do consumo institucional. A eficiência global elevada é típica de sistemas de cogeração baseados no ciclo Otto, nos quais a recuperação da fração térmica contribui significativamente para o rendimento total, conforme amplamente relatado na literatura de micro cogeração. Esse resultado indica que o

sistema, do ponto de vista termodinâmico, opera de maneira eficiente, ainda que sua contribuição absoluta à matriz energética do campus seja pequena.

Quando observadas as demandas térmicas e elétricas da instituição, fica evidente que o potencial de atendimento energético do sistema é modesto. A cobertura elétrica, inferior a 1% em ambos os cenários, reflete a elevada demanda mensal da UFSCar, da ordem de 660 MWh, muito superior à capacidade de geração do sistema laboratorial. Já a cobertura térmica apresenta valores mais expressivos, próximos de 9 a 10%, devido à menor escala da demanda térmica associada ao consumo de GLP no RU. Mesmo assim, a contribuição, embora mais relevante, permanece limitada quando considerada a operação da universidade como um todo. Esses valores reforçam que o sistema possui maior pertinência para aplicações descentralizadas e de menor escala, como unidades específicas ou edificações isoladas, e não para suprimento significativo da demanda global do campus.

De modo geral, os resultados mostram que, apesar do bom desempenho energético intrínseco do sistema, suas capacidades de cobertura permanecem condicionadas ao volume de metano disponível e ao porte reduzido do sistema hipotético. Isso evidencia que futuras expansões, integração de novos fluxos de resíduos ou sistemas de armazenamento poderiam ampliar o alcance do sistema dentro da instituição. Ainda assim, o desempenho global observado confirma a viabilidade tecnológica do modelo proposto e sua aplicabilidade como alternativa complementar de geração distribuída e aproveitamento energético de resíduos orgânicos.

## **5.6. Análise Econômica Preliminar**

### **5.6.1. Custos evitados**

Como tratado na Seção 4.6. os custos evitados com a implementação do sistema GHP, assim como o aproveitamento térmico e elétrico das energias geradas, se resumem as reduções no consumo de energia elétrica e energias destinadas ao aquecimento em diversos processos do RU. Ademais, tratando-se da co-digestão, a utilização da poda como substrato reduz a demanda de retirada deste resíduo no campus.

A economia elétrica é estimada com a utilização da Equação 19, para os cenários de co e mono-digestão, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 \text{Economia Elétrica}_{\text{Co-digestão}} &= E_{el} \cdot 0,85 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) = \\
 2940,52 \left( \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \right) \cdot 0,85 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) &= 2.499,44 \frac{\text{R\$}}{\text{mês}} \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Economia Elétrica}_{\text{Mono-digestão}} &= E_{el} \cdot 0,85 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) = \\
 3462,63 \left( \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \right) \cdot 0,85 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) &= 2.943,27 \frac{\text{R\$}}{\text{mês}} \quad (19)
 \end{aligned}$$

A economia térmica, utilizando principalmente como base do cálculo a cobertura térmica, definida na Seção 5.5, é definida com o uso da Equação 20, também para os cenários de co e mono-digestão.

$$\begin{aligned}
 \text{Economia Térmica}_{\text{Co-Digestão}} &= \\
 \text{Cobertura Térmica} \cdot 5,30 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kg}} \right) \cdot 1774,1 \frac{\text{kg}}{\text{quinzena}} \cdot 2 \frac{\text{quinzena}}{\text{mês}} &= \\
 8,57\% \cdot 5,30 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kg}} \right) \cdot 1774,1 \frac{\text{kg}}{\text{quinzena}} \cdot 2 \frac{\text{quinzena}}{\text{mês}} &= 1.610,78 \frac{\text{R\$}}{\text{mês}} \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Economia Térmica}_{\text{Mono-Digestão}} &= \\
 \text{Cobertura Térmica} \cdot 5,30 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kg}} \right) \cdot 1774,1 \frac{\text{kg}}{\text{quinzena}} \cdot 2 \frac{\text{quinzena}}{\text{mês}} &= \\
 10,09\% \cdot 5,30 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{kg}} \right) \cdot 1774,1 \frac{\text{kg}}{\text{quinzena}} \cdot 2 \frac{\text{quinzena}}{\text{mês}} &= 1.896,78 \frac{\text{R\$}}{\text{mês}} \quad (20)
 \end{aligned}$$

Por fim, define-se a economia associada a remoção das podas com a Equação 21. Nesta, destaca-se que, como a mono-digestão utiliza como substrato apenas o RA, a mesma não possibilita a economia neste setor.

$$\begin{aligned}
 \text{Economia Poda} &= \text{Volume de Poda Utilizada} \cdot 70 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{m}^3} \right) = \\
 15,10 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right) \cdot 70 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{m}^3} \right) &= 1.057,05 \frac{\text{R\$}}{\text{mês}} \quad (21)
 \end{aligned}$$

As economias, em ambos os modelos de operação, são apresentadas na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8.** Custos evitados com a implementação do sistema CHP

<b>Digestão</b>	<b>Co-Digestão</b>	<b>Mono-Digestão</b>
<b>Redução Consumo Elétrico</b>	2.499,44 R\$/mês	2.943,27 R\$/mês
<b>Redução Consumo Térmico</b>	1.610,78 R\$/mês	1.896,78 R\$/mês
<b>Redução Remoção de Poda</b>	1.057,05 R\$/mês	-
<b>Total Mensal</b>	5.167,27 R\$/mês	4.840,07 R\$/mês
<b>Total Anual</b>	62.007,21 R\$/mês	58.080,84 R\$/mês

Fonte: Autor (2025)

Os resultados da análise econômica preliminar mostram que o sistema de cogeração, mesmo operando em escala reduzida, proporciona economias mensais significativas ao considerar conjuntamente os setores elétrico, térmico e de manejo de resíduos. As reduções no consumo de energia elétrica e GLP, embora representem uma fração pequena das demandas totais da instituição, traduzem-se em valores financeiros relevantes, especialmente por se tratarem de custos recorrentes e permanentes no orçamento da universidade. Ademais, no caso da co-digestão, a economia associada à redução da necessidade de remoção da poda representa um benefício adicional que não está diretamente ligado ao processo energético, mas que impacta positivamente os custos operacionais do campus, reforçando a multifuncionalidade do sistema.

No entanto, observa-se que, apesar da boa eficiência global do sistema e das economias consolidadas, o impacto financeiro permanece limitado pela escala de produção de biogás. Isso reforça que, para ganhos econômicos mais expressivos, seriam necessárias expansões no volume de resíduos processados, aumento da capacidade instalada ou integração do sistema a outras unidades consumidoras específicas. Ainda assim, a análise indica que o sistema proposto é economicamente promissor, gera benefícios ambientais e financeiros simultaneamente e contribui positivamente para a gestão de resíduos da universidade, demonstrando sua viabilidade como solução descentralizada de pequeno porte.

### 5.6.2. Estimativa CAPEX e OPEX

A estimativa do investimento inicial, utilizada para aquisição de todos os sistemas, principais e auxiliares, envolvidos no sistema CHP é baseada nas potências nominais de cada uma das situações de operação e DA propostas, presentes na Seção 5.4.3. resgatados pela Tabela 5.9.

**Tabela 5.9.** Síntese das potências nominais para os diferentes cenários de operação

<b>Digestão</b>	<b>Co - Digestão</b>		<b>Mono – Digestão</b>	
	<b>Contínua</b>	<b>Intermitente</b>	<b>Contínua</b>	<b>Intermitente</b>
<b>Operação</b>				
P nominal	4,54 kWe	20,42 kWe	5,34 kWe	24,05 kWe

Fonte: Autor (2025)

Aplicando-se a Equação 22, que utiliza três diferentes faixas CAPEX, obtêm-se os resultados previstos para investimentos iniciais. Adicionalmente, com o uso da Equação 23, referenciada em um OPEX de 10% em relação ao CAPEX, define-se, também, os custos anuais estimados de operação. Os resultados são apresentados na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10.** Estimativas de CAPEX e OPEX para diferentes cenários de operação

<b>Faixa</b>	<b>Digestão</b>	<b>Co - Digestão</b>		<b>Mono – Digestão</b>	
		<b>Contínua</b>	<b>Intermitente</b>	<b>Contínua</b>	<b>Intermitente</b>
<b>CAPEX</b>	<b>Payback</b>				
1) 56.100 R\$/kW	CAPEX (R\$)	254.572,78	1.145.577,52	299.774,02	1.348.997,83
	OPEX (R\$/ano)	25.457,28	114.557,75	29.977,40	134.899,78
2) 40.000 R\$/kW	CAPEX (R\$)	181.513,6	816.811,10	213.744,95	961.852,28
	OPEX (R\$/ano)	18.151,36	81.681,11	21.374,50	96.185,23
3) 33.000 R\$/kW	CAPEX (R\$)	149.748,70	673.869,13	176.339,59	793.528,13
	OPEX (R\$/ano)	14.974,87	67.386,91	17.633,96	79.352,81

Fonte: Autor (2025)

Os resultados da estimativa de investimento mostram que o perfil de operação é o fator determinante para a viabilidade econômica do sistema. Embora os cenários de operação contínua apresentem valores de CAPEX compatíveis com sistemas de pequena escala, os cenários de operação intermitente resultam em potências nominais muito superiores, o que, pela relação linear entre potência instalada e custo de aquisição, eleva drasticamente o investimento inicial. Os valores obtidos, superiores a R\$ 1 milhão para a co-digestão e mono-digestão, situam esses cenários muito acima de qualquer faixa de investimento justificável para uma unidade descentralizada de cogeração em ambiente universitário.

Esse comportamento é consequência direta da necessidade de concentrar a geração de energia em apenas 160 horas mensais, o que exige motogeradores de grande porte e alto custo unitário, característica já destacada em estudos sobre micro cogeração e geração distribuída, onde a viabilidade depende fortemente da compatibilidade entre o regime de operação e a escala de produção de energia (Pezzutto et al., 2018). Além do CAPEX, o OPEX anual também se torna proibitivo nesses cenários, alcançando valores superiores a R\$ 100 mil ao ano. Assim, mesmo sem aprofundar em métricas financeiras, torna-se evidente que os modelos de operação intermitente são economicamente inviáveis para implementação no contexto da UFSCar.

Por outro lado, os cenários de operação contínua apresentam custos iniciais e operacionais substancialmente menores e mais coerentes com a escala de energia disponível e com as economias previstas. Diante disso, as análises seguintes se basearão apenas nos cenários de operação contínua.

### 5.6.3. Tempo de retorno

Em finalização das análises econômicas, faz-se de suma importância a definição dos tempos de retorno para avaliar a atratividade da implementação do projeto piloto.

Reforça-se ainda que, devido aos altos investimentos e custos operacionais mensais superiores as possíveis economias, os cenários de operação intermitente já foram descartados, excluindo a necessidade de estarem presentes nesta análise.

Iniciando as análises, com o cálculo do *payback* simples e descontado, através da utilização da Equação 24 e 25, para os cenários de co e mono-digestão, tem-se os valores mostrados na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11.** Estimativas de tempo de retorno (anos) através de payback simples e descontado para diferentes faixas de CAPEX (R\$/kW)

Faixa CAPEX	Payback	Digestão	
		Mono	Co
1) 56.100 R\$/kW	Simples	11 anos	7 anos
	Descontado	25 anos	11 anos
2) 40.000 R\$/kW	Simples	6 anos	4 anos
	Descontado	9 anos	6 anos
3) 33.000 R\$/kW	Simples	4 anos	3 anos
	Descontado	6 anos	4 anos

Fonte: Autor (2025)

Esta análise inicial já permite a visualização de atratividade dos projetos, tendo indicativos de que, mesmo com a contabilização de taxas de desconto e desvalorização, a instalação dos sistemas ainda pode se demonstrar viáveis, variando seus tempos de retorno de 4 a 25 anos, a depender do regime de DA e faixa CAPEX considerada.

A avaliação econômica evidencia diferenças marcantes entre os cenários analisados quando se consideram critérios financeiros mais rigorosos. Embora o payback simples indique tempos de retorno relativamente modestos para ambos os modelos, a introdução da taxa de desconto de 8% revela maior sensibilidade do sistema quando submetido a condições econômicas realistas.

No cenário de co-digestão, o tempo de retorno descontado permanece compatível com a vida útil típica de sistemas de DA e motogeradores baseados em ciclo Otto, que costuma situar-se entre 15 e 20 anos, desde que corretamente operados e submetidos a manutenção periódica (WEF, 2018; KARTAL et al., 2020; SIQUEIRA et al., 2022). Dessa forma, mesmo sob análise conservadora, o sistema mantém atratividade financeira, justificando o investimento inicial. Em contraste, o payback descontado da mono-digestão para a maior faixa de CAPEX (25 anos) ultrapassa a própria vida útil de componentes essenciais, o que inviabiliza economicamente esta configuração, apesar do maior rendimento energético individual observado.

Além disso, a co-digestão apresenta benefícios adicionais que reforçam sua superioridade econômica e ambiental. Ainda que o rendimento elétrico e térmico da mono-digestão seja ligeiramente superior, a impossibilidade de gerar economia associada

à remoção da poda reduz substancialmente seu potencial financeiro. No cenário de co-digestão, esse benefício, representado pela economia mensal com serviços de manejo e transporte de resíduos, contribui diretamente para reduzir o tempo de retorno e melhora o balanço econômico global. Do ponto de vista ambiental, a utilização conjunta da poda também resulta em menor necessidade de destinação externa, reduzindo emissões indiretas associadas ao transporte e evitando práticas inadequadas de disposição, em alinhamento com recomendações internacionais para rotas integradas de manejo de resíduos orgânicos (IEA BIOENERGY, 2022; FAO, 2019).

Assim, ao considerar simultaneamente desempenho energético, custos evitados e impactos ambientais, a co-digestão se consolida como a alternativa mais equilibrada e robusta para implantação de um sistema de cogeração a biogás na universidade, apresentando, em ambos os cenários de *payback* analisados, menores faixas de tempo de retorno. Os resultados demonstram que sua viabilidade deriva não apenas da produção energética, mas também da integração eficiente de fluxos de resíduos, um aspecto central para projetos sustentáveis e economicamente resilientes.

## **5.7. Recomendações Técnicas Implantação Piloto na UFSCar, São Carlos**

A formulação das recomendações técnicas para a implantação de um sistema piloto de DA com cogeração na UFSCar baseou-se nos resultados obtidos nas Seções precedentes, aliados às diretrizes metodológicas descritas na Seção 4.7, bem como referências consolidadas para projeto de unidades em pequena escala. As recomendações estão organizadas conforme os quatro eixos definidos no método: tipo de biodigestor, volume útil do reator, sistema de purificação e condicionamento do biogás e requisitos mínimos de segurança e infraestrutura.

### **5.7.1. Tipo de biodigestor recomendado**

A partir da caracterização dos substratos utilizados nos cenários estudados (RA e poda urbana), ressalta-se predominância de elevada umidade, presença de sólidos finos, e fração fibrosa, correspondente principalmente à poda. Esta combinação faz com que seja necessário um controle eficiente de homogeneização. Conforme a literatura (Appels et al., 2008; Mata-Alvarez et al., 2014) e as diretrizes aplicadas em Cunto (2022), sistemas do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) são os mais adequados para misturas heterogêneas com tendência à sedimentação e necessidade de mistura contínua.

Dessa forma, recomenda-se que o sistema piloto da UFSCar utilize um reator do tipo CSTR, equipado com agitação mecânica de baixa rotação, permitindo homogeneidade interna, evitando formação de crostas e facilitando o contato eficiente entre biomassa e micro-organismos.

### 5.7.2. Volume de reator hipotético

Conforme o método definido na Seção 4.7, o dimensionamento do volume de substrato foi realizado pelo critério de TRH, usualmente aplicado em unidades piloto e de escala real. Adotou-se o TRH de 30 dias.

Como as alimentações de substratos estão impressas em valores mássicos, faz-se necessário o uso de uma densidade aproximada para os resíduos de poda e RA e a conversão para parâmetros volumétricos. Tal procedimento é realizado com uso da Equação 27.

Para a condição de co e mono-digestão, a alimentação de RA é a mesma, então têm-se:

$$Volume\ Substrato\ (RA)\ \left(\frac{m^3}{dia}\right) = \frac{Vazão\ Alimentação\ \left(\frac{kg}{dia}\right)}{Densidade\ Aparente\ \left(\frac{kg}{m^3}\right)} = \frac{180\ \left(\frac{kgRA}{dia}\right)}{900\ \frac{kg}{m^3}} = 0,2\ \frac{m^3}{dia} \quad (27)$$

Complementando a alimentação do substrato, define-se o volume de poda utilizado, presente apenas no cenário da co-digestão, também através do uso da Equação 27.

$$Volume\ Substrato\ (Poda)\ \left(\frac{m^3}{dia}\right) = \frac{Vazão\ Alimentação\ \left(\frac{kg}{dia}\right)}{Densidade\ Aparente\ \left(\frac{kg}{m^3}\right)} = \frac{70,47\ \left(\frac{kgPoda}{dia}\right)}{171,5\ \frac{kg}{m^3}} = 0,41\ \frac{m^3}{dia} \quad (27)$$

Dessa forma, aplica-se as vazões diárias de alimentação na Equação 26, obtendo o volume de substrato presente de reator idealizado, para os cenários de co e mono-digestão, respectivamente.

$$V_{Sub\ Co-digestão} = Alimentação_{Substrato} \cdot TRH = \left(0,2\ \frac{m^3}{dia} + 0,41\ \frac{m^3}{dia}\right) \cdot 30 = 18,33\ m^3 \quad (26)$$

$$V_{Sub\ Mono-digestão} = Alimentação_{Substrato} \cdot TRH = \left(0,2\ \frac{m^3}{dia}\right) \cdot 30 = 6\ m^3 \quad (26)$$

Assim, com uso da Equação 28, define-se os volumes de inóculo presentes no reator, de acordo com a definição de uma razão I/S de 1:2, como definido nos estudos de Carvalho (2024).

$$V_{in\ Co-digestão} (m^3) = \frac{SV_{substrato} \cdot Razão \frac{I}{S}}{6 \frac{gSV_{Inóculo}}{L}} = \frac{176,2 \frac{kg}{dia} \cdot 0,5}{6 \frac{kgSV_{inóculo}}{m^3}} = 14,68 m^3 \quad (28)$$

$$V_{in\ Mono-digestão} (m^3) = \frac{SV_{substrato} \cdot Razão \frac{I}{S}}{6 \frac{gSV_{Inóculo}}{L}} = \frac{140,9 \frac{kg}{dia} \cdot 0,5}{6 \frac{kgSV_{inóculo}}{m^3}} = 11,75 m^3 \quad (28)$$

Por fim, com a Equação 29, considerando o headspace presente na operação do biodigestor, encontra-se os volumes finais de reatores para ambos os cenários de DA.

$$V_{total\ Co-digestão} (m^3) = \frac{V_{in} + V_{Sub}}{(1 - headspace)} = \frac{14,68 + 18,33}{(1 - 0,60)} = 82,52 m^3 \quad (29)$$

$$V_{total\ Mono-digestão} (m^3) = \frac{V_{in} + V_{Sub}}{(1 - headspace)} = \frac{11,75 + 6}{(1 - 0,60)} = 44,36 m^3 \quad (29)$$

Os resultados compilados são mostrados na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12.** Resultados obtidos para os volumes de reator e inóculo.

Digestão	Co-Digestão	Mono-Digestão
Volume Substrato (m <sup>3</sup> )	18,33	6,00
Volume Inóculo (m <sup>3</sup> )	14,68	11,75
Volume Total (m <sup>3</sup> )	82,52	44,36

Fonte: Autor (2025)

Os volumes de reator estimados para os dois cenários apresentam coerência com as características físicas dos substratos e com a metodologia aplicada. No caso da co-digestão, o maior volume requerido (82,52 m<sup>3</sup>) decorre principalmente da reduzida densidade aparente da poda, que eleva o volume total de alimentação em comparação ao cenário de mono-digestão. Embora o resíduo alimentar apresente alta densidade e elevada fração líquida, a incorporação da poda, mesmo em menor proporção mássica, exerce influência significativa sobre o volume total devido à sua baixa compactabilidade. Esse comportamento é compatível com a literatura, que aponta que substratos lignocelulósicos pré-tratados tendem a apresentar maiores vazios estruturais e, conseqüentemente, maior volume ocupado no reator (SCHERZINGER; KULBEIK; KALTSCHMITT, 2020; MATA-ÁLVAREZ et al., 2014).

No cenário de mono-digestão, a ausência da poda reduz substancialmente a vazão volumétrica e, portanto, o volume demandado pelo reator, resultando em estimativa de 44,36 m<sup>3</sup>.

Ademais, reforça-se e discute-se os principais fatores de escolha e de influência que determinam este volume de reator, sendo eles:

- TRH: valores superiores adotados refletem uma maior retenção de substrato no biodigestor, sendo necessário que o volume do mesmo absorva a alimentação diária;

- *Headspace*: A necessidade significativa (60%) de um espaço livre no reator faz com que o volume total diferencie fortemente do volume útil;

- Densidade de SV de inóculo: Como estratégia para manipular o volume de biodigestor adotado, visando adequações com limitações físicas ou financeiras, é possível operar com diferentes concentrações de lodo, devendo estas terem seus desempenhos na DA avaliados;

### 5.7.3. Purificação e acondicionamento do biogás

A seleção das etapas de purificação do biogás foi realizada com base nas características esperadas do combustível e nos requisitos de operação de motogeradores ciclo Otto, conforme indicado no método da Seção 4.7. Os resultados obtidos nas etapas anteriores indicam produção moderada de biogás e teores de metano compatíveis com aplicações energéticas de pequena escala, de modo que não se justificam sistemas complexos de remoção de contaminantes. Assim, o conjunto adotado para o sistema piloto compreende desumidificação por condensação, remoção de H<sub>2</sub>S em leito adsorvente e etapa de polimento final, configuração alinhada às recomendações reportadas na literatura para micro-CHP alimentado a biogás (ABATZOGLOU; BOIVIN, 2009; RYCKEBOSCH et al., 2011). As etapas selecionadas atendem aos parâmetros mínimos de pureza requeridos para evitar corrosão e garantir operação segura do motor, mantendo simultaneamente a simplicidade necessária para unidades demonstrativas. Dessa forma, o arranjo proposto apresenta robustez suficiente para as condições experimentais esperadas, sem incorrer em complexidade excessiva ou custos incompatíveis com um sistema piloto universitário.

### 5.7.4. Boas práticas de segurança

Os requisitos de segurança definidos para o sistema piloto seguem diretamente as diretrizes apresentadas no método e as orientações técnicas compiladas em Cunto (2022). A operação de biodigestores e microgeradores em ambiente institucional demanda atenção especial à ventilação natural, à instalação de sensores de metano e H<sub>2</sub>S e ao uso

de equipamentos de proteção, como válvulas corta-chama e dispositivos de alívio de pressão. Embora a escala estimada no presente estudo seja reduzida, esses elementos permanecem essenciais para garantir estabilidade operacional e mitigar riscos associados ao acúmulo de gases combustíveis ou tóxicos. Recomenda-se que a área de instalação contemple uma estrutura simples, porém dedicada, permitindo circulação de ar, inspeção visual frequente e isolamento físico do conjunto motogerador. Tais medidas são compatíveis com práticas consolidadas em unidades de pequeno porte e atendem às exigências mínimas de segurança para implantação piloto, assegurando condições adequadas para operação contínua e para atividades de ensino e pesquisa.

#### 5.7.5. Discussão integrada das recomendações técnicas

A integração dos elementos avaliados nas subseções anteriores evidencia que ambos os cenários, mono e co-digestão, apresentam viabilidade técnica para implementação em uma eventual escala piloto, ainda que com exigências operacionais distintas. Os volumes de reator obtidos refletem com fidelidade as propriedades físicas dos substratos, resultando em unidade compacta para o caso da mono-digestão e dimensões moderadamente superiores no caso da co-digestão. A escolha do tipo de reator, baseada em características de sedimentação e heterogeneidade dos resíduos, converge para a adoção de um sistema CSTR, assegurando mistura adequada e reduzindo o risco de formação de zonas mortas. O conjunto de purificação selecionado mantém coerência com a escala do sistema avaliado, e atende às exigências de qualidade necessárias para operação segura do motogerador, sem incorporar etapas desnecessárias para instalações dessa dimensão. Por sua vez, as recomendações de infraestrutura e segurança representam o conjunto mínimo necessário para garantir confiabilidade operacional e evitar riscos associados ao acúmulo de gases, de modo compatível com o ambiente universitário.

Consideradas conjuntamente, as recomendações formuladas fornecem um cenário para implantação de um eventual sistema na UFSCar, capaz de representar o funcionamento de sistemas de DA integrados à cogeração. Embora a co-digestão demande volume maior de reator e infraestrutura ligeiramente mais robusta, apresenta vantagens operacionais e ambientais associadas ao aproveitamento integrado da poda e do resíduo alimentar. Já a mono-digestão oferece simplicidade construtiva e menor necessidade de área instalada, podendo constituir uma alternativa inicial de implantação. Em ambos os casos, os resultados indicam que as condições operacionais propostas são

tecnicamente coerentes, compatíveis com a escala e alinhadas às recomendações da literatura e de documentos institucionais, permitindo avanço seguro para uma etapa de demonstração tecnológica.

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou de forma abrangente a viabilidade de um sistema de cogeração a biogás na Universidade Federal de São Carlos, utilizando resíduos alimentares do Restaurante Universitário e resíduos de poda gerados no campus. Os ensaios de mono e co-digestão realizados em bancada por Carvalho (2024) permitiram estimar com confiabilidade os rendimentos de metano e projetar a produção mensal de biogás na escala institucional analisada neste trabalho. Esses dados subsidiaram a modelagem do desempenho de um motogerador ciclo Otto, bem como o dimensionamento de um biodigestor piloto, que resultou em volumes de 44 m<sup>3</sup> para mono-digestão e 83 m<sup>3</sup> para co-digestão. Esses volumes refletem diretamente as diferenças entre os cenários, marcadas pela maior fração biodegradável dos resíduos alimentares e pela presença significativa de material lignocelulósico nos resíduos de poda.

A análise energética evidenciou que a mono-digestão apresentou o maior potencial de geração de energia devido à maior produtividade específica de metano, alcançando cerca de 3,46 kWh/mês de eletricidade e 4,58 kWh/mês de calor, enquanto a co-digestão gerou 2,94 kWh/mês de energia elétrica e 3,89 kWh/mês de energia térmica. Esses valores se traduziram em potências nominais contínuas de 5,34 kW para a mono-digestão e 4,54 kW para a co-digestão. Ao longo do trabalho discutiu-se que, embora a diferença entre os cenários seja relevante, ambos os casos consolidam o sistema como uma tecnologia de microcogeração, capaz de fornecer energia de forma descentralizada, estável e com forte apelo térmico, especialmente para atender as demandas do Restaurante Universitário. A eficiência global de 79%, calculada com a integração dos ganhos térmicos e elétricos, reforça o caráter adequado do CHP para aplicações de pequena escala e evidencia que o foco do aproveitamento energético do biogás, na realidade institucional estudada, deve ser a substituição de GLP e não a geração elétrica.

O estudo também avaliou cenários de operação intermitente, motivados por discussões sobre redução da carga diária de substrato, simplificação operacional e estudos de sensibilidade à escala. Os resultados mostraram que, apesar de apresentarem potências nominais mais elevadas, 13,81 kW para mono e 11,71 kW para co-digestão, esses cenários

concentram a produção energética em janelas menores, resultando em custos específicos muito superiores. Essa concentração operacional demanda motogeradores maiores e mais caros, aumenta o custo por quilowatt instalado e eleva significativamente tanto o CAPEX quanto o OPEX. As análises financeiras confirmaram essa tendência, indicando *paybacks* incompatíveis com a realidade institucional e ausência de viabilidade econômica. Assim, o trabalho conclui, em alinhamento com as discussões anteriores, que a operação intermitente é inadequada para uma unidade piloto na UFSCar, uma vez que compromete a relação custo-benefício, reduz o aproveitamento térmico e contraria a lógica de equilíbrio operacional caracterizada pela geração distribuída contínua.

Sob a perspectiva econômica, os resultados reforçam a importância da energia térmica para a viabilidade do sistema, principalmente devido à substituição do GLP no Restaurante Universitário. As economias anuais projetadas alcançaram R\$ 58.080,20/ano para a mono-digestão e R\$ 62.007,21/ano para a co-digestão, valores compatíveis com as necessidades energéticas identificadas e com o perfil de funcionamento do RU. Esses benefícios se refletiram nos tempos de retorno simples 4-11 anos e 3-7 anos para mono e co-digestão, e com *paybacks* descontados de 6-25 e 4-11 anos, respectivamente. Ao longo do trabalho foi discutido que, apesar de a mono-digestão apresentar maior geração elétrica, a co-digestão oferece maior estabilidade operacional, menor risco de acidificação, maior alinhamento com a disponibilidade real de resíduos e melhor desempenho econômico agregado, características que a tornam a alternativa mais adequada para implantação.

Além dos aspectos energéticos e econômicos, o estudo discutiu o papel estratégico de um potencial unidade piloto para a UFSCar. O sistema de cogeração apresenta potencial para fortalecer práticas de gestão sustentável de resíduos, reduzir a dependência de combustíveis fósseis, mitigar emissões de gases de efeito estufa e consolidar o campus como um ambiente de inovação tecnológica. A implantação de um eventual sistema também foi discutida como uma oportunidade relevante para atividades acadêmicas, permitindo o desenvolvimento de protocolos de monitoramento, experimentação aplicada, formação de estudantes e integração entre departamentos e laboratórios. O trabalho ressaltou ainda que a adoção de cogeração a biogás contribui para diversificar a matriz energética institucional e amplia a resiliência energética do campus frente a instabilidades externas.

De forma geral, conclui-se que a implantação do sistema de cogeração a biogás na UFSCar é tecnicamente possível, energeticamente eficiente e economicamente justificável no cenário de co-digestão em operação contínua. A combinação de benefícios ambientais, redução de custos, estabilidade operacional e valorização dos resíduos orgânicos justifica a continuidade do projeto e reforça a relevância da cogeração como estratégia de sustentabilidade. Os resultados apresentados oferecem base técnica sólida para decisões institucionais e abrem caminho para estudos futuros voltados à otimização da biodigestão, melhoria da integração térmica, análises ambientais detalhadas e expansão da aplicação da bioenergia no campus.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 3, p. 42–71, 2009.
- ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. *Panorama do Biogás no Brasil: 2022*. São Paulo: ABIOGÁS, 2022
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. São Paulo: ABRELPE, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. *Poder calorífico inferior do GLP*. Rio de Janeiro, 2023.
- ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa nº 1.059, de 5 de abril de 2022*. Brasília: ANEEL, 2022.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações de Geração – BIG*. Brasília: ANEEL, 2023.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Ranking das Tarifas 2024*. Brasília: ANEEL, 2024.
- APPELS, L. et al. Anaerobic digestion in global bio-energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 208–215, 2008.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Séries Temporais – Taxa de Câmbio PTAX (Euro/Real), média anual 2024*. Brasília: BCB, 2024.
- BIOGAS INFO. *Anaerobic Digestion and Combined Heat and Power (CHP): Technical Overview*. Disponível em: <https://www.biogas-info.co.uk>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- BIOGAS OUTLOOK. *European Biogas Association Market Report 2024*. Brussels: European Biogas Association, 2024.
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Taxa de desconto e avaliação econômica de projetos*. Rio de Janeiro: BNDES, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Estratégia Nacional de Resíduos Orgânicos Urbanos. Brasília: MMA, 2024.

BRAND, M. A. Qualidade da biomassa para uso energético. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

BRUNHARA, J. P. et al. Estudo experimental da eficiência de produção de biogás a partir da codigestão de resíduos orgânicos e esgoto utilizando biodigestores anaeróbios de bancada. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

CARMONA, S. E. V. et al. Anaerobic–aerobic treatment of fruit and vegetable wastes and municipal wastewater. *Processes*, v. 12, n. 7, p. 1326, 2024.

CARVALHO, J. H.. O papel da universidade na valorização energética do biogás a partir de resíduos sólidos urbanos. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2024.

CARVALHO, C. M.. Análise preliminar da viabilidade da cogeração de energia térmica e elétrica: Estudo de caso na UFSCar. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2024.

CASTRO, T. et al. Integrating pruning residues into urban energy systems: technical, environmental and planning implications. *Renewable Energy*, v. 213, p. 891–904, 2025.

CENGEL, Y. A. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Thermodynamics: an engineering approach. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

CENTRICA BUSINESS SOLUTIONS. The essential guide to small scale combined heat and power – the answer to all your combined heat and power questions in one, easy to read guide... Disponível em:

[https://www.centricabusinesssolutions.com/sites/g/files/qehiga126/files/GDE%2001%20ENER-G%20Essential%20Guide%20to%20CHP\\_01\\_v5%20%281%29.pdf?utm](https://www.centricabusinesssolutions.com/sites/g/files/qehiga126/files/GDE%2001%20ENER-G%20Essential%20Guide%20to%20CHP_01_v5%20%281%29.pdf?utm)

Acesso em: 27 nov. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Critérios e procedimentos para a implantação de sistemas de biogás. São Paulo: CETESB, 2020.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário estadual de resíduos sólidos. São Paulo: CETESB, 2022.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Boas práticas de purificação e uso do biogás. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2020.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Panorama do Biogás no Brasil 2023. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2023.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Guia de Viabilidade de Plantas de Biogás – Volume II: Análise de Viabilidade Econômica. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2023.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Manual de Operação de Plantas de Biogás. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2020.

CÔRREA, A. G. Diagnóstico na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: enfoque nas regiões com disposição inadequada. In: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Curitiba, 2024.

COSTA, D. C.; MARTINS, V. S. Remuneração do capital regulatória na distribuição de energia: uma análise crítica. In: Congresso Brasileiro de Custos, 2020.

CREMONEZ, P. A. et al. Digestão anaeróbia: fundamentos, parâmetros e aplicações. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 6, p. 975–989, 2021.

CUNTO, V. A. B. Descarbonizando o Campus UFSCar- Lagoa do Sino a partir da produção de biogás: uma análise de viabilidade ambiental, técnica e econômica. Buri: Universidade federal de São Carlos. 2022

DALPAZ, R. et al. Using biogas for energy cogeneration: an analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 40, p. 100774, 2020.

DAMACENO, F. M. Pré-tratamentos térmicos e alcalinos aplicados em lodo de flotador proveniente de abatedouro de frango visando melhorar o potencial bioquímico de metano. 2022. 77 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

DANISH ENERGY AGENCY – DEA. Technology data: energy plants – biogas and CHP. Copenhagen, 2022.

DEMICHELI, F.; et al. Bio-physical pre-treatments in anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste to optimize biogas production and digestate quality for agricultural use. *Waste Management*, v. 189, p. 114–126, 2024.

EMIRBAŞ, A. Biogas production from organic waste: a review. *Energy Sources Part A*, v. 32, n. 7, p. 649–661, 2010.

EFTAXIAS, A. et al. Techno-economic assessment of anaerobic digestion technology for small- and medium-sized animal husbandry enterprises. 2024.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Gestão de resíduos sólidos e compostagem. Brasília: EMBRAPA, 2019.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Premissas e custos energéticos para análise de projetos. Brasília: EPE, 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Relatório de Biogás no Brasil 2024. Brasília: EPE/MME, 2024.

FAO – Food and Agriculture Organization. The State of Food and Agriculture: moving forward on food loss and waste reduction. Rome: FAO, 2019.

FARAJOLLAHI, Y. et al. Economic evaluation of micro-CHP biogas systems. *Energy Conversion and Management*, 2025.

FERREIRA, C. S. Codigestão de lodo secundário e resíduos alimentares em reatores semi-contínuos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

FREITAS, A. L.; SOARES, R. L. Universidades sustentáveis: o papel da UFSCar na transição para a economia circular. *Revista de Extensão Universitária*, v. 12, n. 3, p. 51–65, 2020.

GARCIA, D. P. et al. Propriedades físicas de cavacos de madeira para fins energéticos. *Revista Árvore*, v. 40, n. 1, p. 159–166, 2016.

GÓMEZ, A. A.; WIRTH, C. Biogas systems: efficiency and performance indicators for small-scale applications. *Renewable Energy*, v. 136, p. 1–13, 2019.

GOMES, D. M. et al. Sustentabilidade e inovação no ambiente universitário: um estudo de caso na UFSCar. *Revista Gestão & Sustentabilidade*, v. 6, n. 1, p. 32–45, 2019.

GUERI, L. et al. Characterization and valorization strategies of green waste for sustainable urban energy systems. *Waste Management*, v. 169, p. 12–25, 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Distributed Generation Market Overview*. Paris: IEA, 2020.

IEA-BIOENERGY. *Task 37 – Country Reports Summary 2025*. Paris: International Energy Agency, 2025.

IEA-BIOENERGY. *Small-scale generation cost update*. Paris International Energy Agency, 2015.

IEA-ETSAP. *Biogas and Anaerobic Digestion – Technology Brief E05*. Paris: International Energy Agency, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). *Prospecção tecnológica de processos de biodigestão anaeróbia com recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos*. São Paulo: IPT, 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. *Remuneração de capital no setor de energia elétrica*. Nota Técnica n. 124, 2022.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Geneva: IPCC, 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency. *Biogas for Domestic and Institutional Applications*. Abu Dhabi: IRENA, 2018.

KAKKAR, P. et al. A critical review of valorization pathways of food waste and garden waste in the context of sustainable urban development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 188, 113002, 2024.

KARTAL, Z. et al. Operational lifetime of biogas CHP systems. *Renewable Energy*, v. 155, p. 1234–1245, 2020.

KHANAL, S. K. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. Ames: Wiley-Blackwell, 2008.

KIM, J.; LEE, C.; PARK, K. Physical and chemical characterization of food waste for anaerobic digestion. *Renewable Energy*, v. 65, p. 186–191, 2014.

KOTHARI, R. et al. Different aspects of anaerobic digestion for sustainable environment and energy generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 174–195, 2014.

KURIHARA, F. T. I. Avaliação do potencial metanogênico de chorume gerado em aterro de resíduos sólidos domiciliares: o caso do consórcio intermunicipal do Pontal do Paranapanema (CIPP). 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2024.

LANTZ, M.; SVENSSON, M.; BJÖRNSSON, L.; BÖRJESSON, P. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden. *Energy Policy*, 2007.

LI, Y. et al. Characteristics of food waste and its implications for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 247, p. 510–518, 2018.

MATA-ÁLVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements: biogas enhancement and digestate quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 412–427, 2014.

MENDONÇA, T. R.; COSTA, E. L. Gestão de resíduos orgânicos com biodigestores: estudo de caso no Ceesa Curitiba. *Revista Brasileira de Bioenergia*, v. 11, n. 1, p. 101–110, 2021.

MOURA, C. R. et al. Uso de reator UASB em ambiente universitário: experiências da UFRN. *Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente*, v. 26, n. 2, p. 113–123, 2020.

MÜLLER, I. L.; RECH, C. S. Aproveitamento energético do biogás em motores Otto. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, v. 3, n. 1, p. 67–78, 2015.

NOGUEIRÃO, R. et al. Projeto conceitual de sistema de cogeração a biogás para o campus da Universidade Federal de São Carlos. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 43, n. 2, p. 41–56, 2022.

OLIVEIRA, A. L. et al. Economic and energy assessment of biogas cogeneration in a Brazilian food-market facility. *Sustainability*, v. 16, n. 7, 2979, 2024.

- OLIVEIRA, L. R. G. et al. Tratamento de resíduos alimentares por codigestão anaeróbia: uma análise técnica e ambiental. *Revista Ambiente & Água*, v. 17, n. 3, p. 1–15, 2022.
- OLIVEIRA E SILVA, S. Reator UASB aplicado à digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 4, p. 601–608, 2018.
- PEREIRA, I. I. Investigação de ações em sustentabilidade em universidades públicas federais nos eixos água, energia e resíduos. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.
- PINHEIRO, J. P. et al. Exergy analysis of a biogas plant for municipal solid waste treatment and energy cogeneration. *Energies*, v. 18, n. 11, p. 2804, 2025.
- PRADESHWARAN, K. et al. Hybrid renewable energy systems for urban biowaste utilization: a pathway to smart and sustainable cities. *Energy Reports*, v. 10, p. 505–520, 2024.
- PRASAD, R. K.; SHARMA, A.; MAZUMDER, P. B.; DHUSSA, A. A comprehensive pre-treatment strategy evaluation of ligno-hemicellulosic biomass to enhance biogas potential in the anaerobic digestion process. *RSC Sustainability*, v. 2, p. 2444–2467, 2024.
- R7. Relator da Aneel propõe WACC de 8,09% para 4º ciclo de revisão tarifária de distribuidoras. 2015.
- REMMAS, N.; MANFÉ, N.; ZERVA, I. et al. A critical review on the microbial ecology of landfill leachate treatment systems. *Sustainability*, v. 15, n. 2, 949, 2023.
- RIBEIRO, M. T. et al. Laboratórios vivos e sustentabilidade em universidades públicas. *Revista Brasileira de Extensão Universitária*, v. 12, n. 1, p. 77–90, 2021.
- ROA, I. D. et al. Economic feasibility of biogas microgeneration from food waste: potential for sustainable energy in Northeastern Brazil. *Sustainability*, v. 16, n. 23, p. 10238, 2024.
- ROCHA, R. M. et al. Avaliação experimental de biodigestores caseiros para geração de biogás a partir de resíduos alimentares. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 5, e39560, 2023.

ROSSETTO, E. A.; DALMOLIN, D.; ZAT, M.; SCHMIDT, R. Performance of an Otto cycle engine using biogas as fuel. *African Journal of Agricultural Research*, v. 8, n. 45, p. 5630–5636, 2013.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1633–1645, 2011.

SADOVOY, O. et al. Electricity generation from biogas: modern technologies and prospects for Ukraine's energy independence. *Machinery & Energetics*, v. 16, n. 1, p. 173–185, 2025. Disponível em: [https://technicalscience.com.ua/web/uploads/pdf/Machinery%20and%20Energetics\\_16\(1\)2025\\_173-185.pdf](https://technicalscience.com.ua/web/uploads/pdf/Machinery%20and%20Energetics_16(1)2025_173-185.pdf). Acesso em: 27 nov. 2025.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J. et al. Economic assessment of biogas upgrading and CHP integration in small-scale AD facilities. *Journal of Cleaner Production*, v. 364, p. 132–148, 2022.

SANZ-MONREAL, L. et al. Techno-economic analysis of biogas-fueled CHP systems under different operational regimes. *Energy Conversion and Management*, v. 305, 118–130, 2025.

SCHERZINGER, M.; KULBEIK, T.; KALTSCHMITT, M. Autoclave pre-treatment of green wastes: effects of temperature, residence time and rotation speed on fuel properties. *Fuel*, v. 273, 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117796.

SAE INTERNATIONAL. *Biogas Engine Applications and Emissions Overview*. Warrendale: SAE International, 2022.

SANTOS, I. F. S. et al. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2023. DOI: 10.1590/S1413-415220200210.

SANTOS, S. C. et al. Bioproducts from anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste: substrate mixing ratios for power, heat and digestate potential assessment as support for scale-up. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 59, 103182, 2023.

SERAT, R. M. et al. Techno-economic assessment of hybrid biogas-based cogeneration systems using institutional organic waste. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, v. 9, p. 1–14, 2024.

SHRESTHA, S. et al. Comparative analysis of urban food waste valorization routes in developing countries: energy recovery and policy challenges. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 198, 107077, 2023.

SHARMA, P.; YADAV, A.; SINGH, S. P. Anaerobic digestion of organic waste: current status and future perspectives for sustainable energy recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 193, 114929, 2025.

SIAHAAN, D. Renewable energy test – biogas as fuel in Otto cycle. *ResearchGate*, 2023. Acesso em: 10 nov. 2025.

SILVA, J. R.; ANDRADE, R. F. Diagnóstico da geração de resíduos em instituições públicas de ensino superior. *Revista Brasileira de Planejamento e Gestão Pública*, v. 10, n. 2, p. 78–91, 2023.

SILVA, F. K. S. et al. Techno-economic assessment of a biogas plant using poultry manure. *Journal of Cleaner Production*, 2025.

SOUSA, M. C. et al. Processos de tratamento do chorume e reaproveitamento: uma revisão. *Blucher Chemistry Proceedings*, v. 3, n. 1, p. 655–664, 2015.

SIQUEIRA, J. A.; LIMA, F. S.; RAMOS, A. P. Avaliação técnica e econômica de motogeradores a biogás no contexto brasileiro. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, p. 1–12, 2022.

TERRA, A. G. Análise do gerenciamento de resíduos sólidos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Campo Mourão. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. Relatório de Sustentabilidade Institucional 2022. São Carlos: UFSCar, 2022.

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Projeto de gestão de resíduos e biogás no Campus de Barão Geraldo. Campinas: UNICAMP, 2022.

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP firma parceria com startup do Parque Científico e Tecnológico para construção do primeiro biodigestor em restaurantes universitários. Campinas: UNICAMP, 2025.

United States Environmental Protection Agency (EPA). Quantifying methane emissions from landfilled food waste. EPA-600-R-23-064, 2023.

UC DAVIS – University of California. Renewable Energy Anaerobic Digestion Project. Davis: UC Davis, 2021.

WEF – Water Environment Federation. Design of wastewater and biosolids treatment facilities. 6. ed. Alexandria: WEF Press, 2018.