

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

**ANÁLISE PRELIMINAR DA VIABILIDADE DA COGERAÇÃO DE
ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO NA UFSCAR**

Camila Mello de Carvalho

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

Orientadora: **Prof^a Gabriela Cantarelli Lopes**

São Carlos – SP

2024

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 19 de Agosto de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Gabriela Cantarelli Lopes (Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar)

Convidado: Paula Rúbia Ferreira Rosa (Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar)

Professor da Disciplina: Ruy de Sousa Junior (Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer minha família que tornou possível a realização de um sonho de cursar uma faculdade renomada e de ensino de qualidade, a qual me ofertou ensino de qualidade ao longo de todos os anos de graduação. À vocês, agradeço pelo apoio incondicional nos momentos bons e também nos momentos difíceis.

Gostaria de agradecer também à minha república que se faz importante até hoje na minha vida e desde 2021 vem se tornando uma peça chave para eu chegar onde eu cheguei na graduação e na vida.

Aos meus colegas de classe, que durante os cinco anos de graduação, compartilharam diversos momentos, aprendizados, alegria, parceria e companheirismo. Obrigada por dividirem essa jornada comigo, tornando todos os momentos vivenciados especiais, únicos e inesquecíveis.

Ao meu namorado, Juliano Amaral, que nunca me deixou desistir e sempre esteve ao meu lado me apoiando e me dando confiança para seguir em frente.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha querida orientadora, professora Gabriela Cantarelli Lopes, quem me apoiou e me ajudou na condução desse trabalho, oferecendo suporte, cuidado e atenção para o desenvolvimento de todas as etapas do estudo. E também, a professora Paula Rúbia Ferreira Rosa, quem gentilmente aceitou nosso convite para compor a banca, além de ter concedido apoio e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Esse trabalho teve como motivação a necessidade de geração de energias renováveis e redução de emissões de gases de efeito estufa, propondo uma análise preliminar da viabilidade técnica e econômica da cogeração de energia térmica e elétrica. A cogeração de energia é uma abordagem eficiente para maximizar a utilização de recursos energéticos, fornecendo simultaneamente calor e eletricidade a partir de uma única fonte de energia, uma vez que a utilização de apenas uma fonte acaba sendo um trabalho mais difícil e caro para implementação. As universidades do Brasil acabam sendo um exemplo de implementação de novas ideias além de serem grandes centros de pesquisas. O estudo visou realizar um estudo de caso na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para a implementação de práticas sustentáveis e inovadoras, buscando gerar benefícios econômicos, ambientais e sociais, criando um modelo replicável para outras instituições interessadas em adotar essas práticas. Além disso, busca-se adotar princípios da economia circular para a gestão de resíduos sólidos, devido à crescente geração de resíduos. Com base no contexto apresentado, os objetivos do trabalho a serem estudados incluíram a avaliação da tecnologia disponível para a cogeração de energia, o levantamento das demandas energéticas da UFSCar, análise preliminar da viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema cogeração na universidade e investimentos necessários, incluindo custos de capital, operacional e benefícios, e a proposição de recomendações para sua implementação bem-sucedida na UFSCar. Os métodos empregados neste trabalho envolveram uma revisão bibliográfica sobre cogeração de energia térmica e elétrica, levantamento das demandas energéticas da UFSCar, estudo de viabilidade técnica, incluindo análises de tecnologias de cogeração disponíveis, análise econômica, incluindo cálculos de custo-benefício e análise de sensibilidade, seguido pela discussão dos resultados e recomendações. O estudo fornece os valores de investimento para a viabilidade da cogeração de energia térmica e elétrica na UFSCar e recomendações práticas para sua implementação na universidade, incluindo a tecnologia mais adequada e as instalações necessárias. Concluiu-se que pelo volume coletado hoje o retorno frente a demanda da universidade é baixo, porém existem diversos benefícios que essa tecnologia é capaz de fornecer, além de ser um modelo reapplicável.

Palavras-chave: Cogeração, Energias renováveis, Resíduos sólidos, Demanda energética, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This work was motivated by the need to generate renewable energy and reduce greenhouse gas emissions, proposing a preliminary analysis of the technical and economic feasibility of cogeneration of thermal and electrical energy. Energy cogeneration is an efficient approach to maximize the use of energy resources, providing both heat and electricity from a single energy source. Relying on only one source tends to be a more challenging and expensive implementation. Universities in Brazil often serve as examples of implementing new ideas and are significant research centers. This study aimed to conduct a case study at the Federal University of São Carlos (UFSCar) for the implementation of sustainable and innovative practices, seeking to generate economic, environmental, and social benefits while creating a replicable model for other institutions interested in adopting these practices. Additionally, it aims to adopt circular economy principles for solid waste management, given the increasing waste generation. Based on the presented context, the study objectives included evaluating the available technology for energy cogeneration, assessing UFSCar's energy demands, conducting a preliminary analysis of the technical and economic feasibility of implementing a cogeneration system at the university, and identifying the necessary investments, including capital and operational costs, as well as benefits. Recommendations for successful implementation at UFSCar were also proposed. The methods employed in this work involved a literature review on thermal and electrical energy cogeneration, assessing UFSCar's energy demands, a technical feasibility study, including analyses of available cogeneration technologies, an economic analysis, including cost-benefit calculations and sensitivity analysis, followed by the discussion of results and recommendations. The study provides investment figures for the feasibility of thermal and electrical energy cogeneration at UFSCar and practical recommendations for its implementation at the university, including the most suitable technology and necessary facilities. It was concluded that, given the current volume collected, the return relative to the university's demand is low. However, there are several benefits that this technology can provide, in addition to being a replicable model.

Keywords: Cogeneration, Renewable energies, Solid waste, Energy demand, Sustainability.

SUMÁRIO

Banca Examinadora.....	Ii
Agradecimentos.....	Iii
Resumo.....	Iv
Abstract.....	V
Lista de Figuras.....	Vii
Lista de Quadros.....	viii
Nomenclatura.....	iv
1- INTRODUÇÃO.....	10
2 - OBJETIVOS.....	13
2.1- Objetivos Específicos.....	13
3- MÉTODOS.....	14
4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4.1- Cogeração de energia.....	17
4.2- Tecnologias existentes.....	20
4.3- Cogeração de energia a partir de resíduos sólidos.....	27
4.4- Cogeração de energia a partir do Biogás.....	28
4.5- O Biogás.....	32
4.6- Aplicações.....	34
4.7- Regulamentações.....	37
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1- Viabilidade técnica da implementação de um sistema de cogeração de energia na UFSCar.....	39
5.2- Viabilidade econômica.....	42
5.3- Considerações.....	48
5.4- UFSCar: Resultados esperados.....	49
6- CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Comparação de eficiência energética em um sistema convencional e um sistema de cogeração de energia.....	18
Figura 2.	Sistema combinado de energia térmica e elétrica.....	18
Figura 3.	Cogeração de energia.....	20
Figura 4.	Ciclo <i>Topping</i>	21
Figura 5.	Ciclo <i>Bottoming</i>	21
Figura 6.	Motor de combustão interna.....	22
Figura 7.	Processo de pirólise e suas aplicações.....	27
Figura 8.	Processo de digestão do material orgânico.....	29
Figura 9.	Produção de biogás.....	30
Figura 10.	Codigestão de materiais orgânicos.....	31
Figura 11.	Potencial de cogeração de energia no Brasil.....	35
Figura 12.	Proposta de instalação de unidade de cogeração na UFSCar.....	41
Figura 13.	Consumo (kWh) e Custo (R\$) de energia em 2022 Campus São Carlos.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.	Comparação de tecnologias existentes.....	25
------------------	---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Fonte de energia para a cogeração.....	36
Tabela 2.	Quantidade de SV em relação a produção de biogás.....	45

NOMENCLATURA

UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
ANELL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EEA	European Environment Agency
CHP	Combined Heat and Power
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
ESG	Environmental Social Governance
SV	Sólidos Voláteis
ORC	Ciclos orgânicos de Rankine
MD	Microgeração Distribuída
MGD	Minigeração Distribuída
SO	Substrato Orgânico
PO	Poda Orgânica

1- INTRODUÇÃO

O crescimento populacional trouxe junto a necessidade do aumento da demanda energética. Devido a essa crescente necessidade e a preocupação ambiental de não utilizar energias não renováveis, fontes de energia limpa começaram a ser interesse de estudos, buscando reduzir a emissão de gases do efeito estufa e diminuir o impacto ambiental através de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Conceitualmente, a energia sustentável ou energia limpa, obtida através de fontes de energia renováveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica, vieram para suprir essas demandas energéticas da sociedade. A sua utilização, além de ser inesgotável e ter diversas outras vantagens, resulta em uma melhoria da qualidade do ar e na mitigação de mudanças climáticas, além de promover um desenvolvimento econômico e social.

Nesse contexto, a cogeração de energia surge como uma alternativa promissora, atraente e complementar à energia sustentável, permitindo a produção simultânea de energia térmica e elétrica a partir de uma única fonte de energia primária. Essa técnica aproveita de maneira mais eficiente os recursos disponíveis, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência energética do sistema como um todo.

Esse tipo de geração de energia renovável, utilizando apenas um combustível como fonte de energia, busca aproveitar o calor residual gerado durante a produção de eletricidade, conhecido como energia térmica, no sistema energético. Com o calor, as partículas presentes que compõem o sistema se movimentam e quanto maior o calor gerado, mais energia térmica o sistema possui. A energia elétrica, por sua vez, provém da movimentação das partículas carregadas de energia, resultando no movimento de turbinas ou outros geradores de energia.

A cogeração aumenta significativamente a eficiência global do processo, em comparação com a eficiência típica das usinas de geração convencionais. Ela também diminui a porção de energia que seria desperdiçada. Isso resulta em menores custos de operação e manutenção e maior eficiência energética, bem como em reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, como o gás carbônico e outros poluentes atmosféricos que alinham os objetivos de desenvolvimento sustentável e um futuro mais verde.

Além disso, a cogeração oferece benefícios adicionais, como a redução da dependência de redes de distribuição de energia elétrica, aumentando a resiliência e a

segurança do suprimento energético. Em muitos casos, a energia produzida localmente por meio da cogeração pode ser mais confiável e econômica do que a energia fornecida pela rede elétrica tradicional, especialmente em regiões remotas ou sujeitas a interrupções frequentes no abastecimento de energia ou com demandas constantes, fornecendo energia contínua e estável proveniente de uma fonte que pode ser obtida facilmente em diversas regiões.

Por conta disso, esse trabalho propõe uma análise preliminar da viabilidade técnica e econômica da cogeração de energia dentro do campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) explorando suas potencialidades e desafios em diferentes contextos.

Utilizando resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário, além de podas provenientes da própria universidade, para construir o sistema de cogeração de energia, através da biodigestão anaeróbia dos resíduos, eles se transformam em biogás, uma fonte de energia renovável composta principalmente por metano e dióxido de carbono. Esse biogás pode ser utilizado para a geração de calor, eletricidade no sistema de cogeração de energia ou até mesmo ter uma outra aplicação como combustível veicular.

Atualmente, a UFSCar tem sua energia proveniente principalmente de energia elétrica fornecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o que traz uma dependência por essa empresa e essa fonte de energia, além de ter gastos muito altos todos os meses. Com a busca de novas tecnologias como a cogeração de energia, a ideia é que a UFSCar tenha parte da sua energia produzida de forma autônoma e eficaz, podendo replicar o seu exemplo em outros locais e universidades.

Esse trabalho, através de uma revisão bibliográfica completa acerca desse tipo de produção sustentável e tecnologias existentes, busca trazer alternativas para uma nova forma de produção de energia sustentável em um sistema de cogeração de energia a partir de resíduos orgânicos do restaurante universitário, alternativa pouco estudada e explorada em ambiente universitário. Esta revisão busca fornecer uma avaliação detalhada da viabilidade técnica e econômica, vantagens e limitações para a implementação de uma usina de produção de energia térmica e elétrica a partir de resíduos orgânicos da UFSCar.

Analisando condições técnicas e de infraestrutura para implementar um sistema como esse na universidade, é possível entender quais as principais considerações que devem ser consideradas antes de iniciar o processo de construção de um sistema como

esse. Além disso, a parte econômica também deve ser levada em consideração, pois os gastos usados com a manutenção devem ser considerados e comparados com os gastos atuais que a universidade já tem, trazendo uma resolução se a geração de energia é uma boa alternativa para a matriz energética.

Além disso, foram analisados estudos de casos de usinas que já estão em funcionamento em diversos países e também no Brasil, dentro e fora de universidades.

2- OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma análise preliminar da viabilidade técnica e econômica da cogeração de energia térmica e elétrica dentro da UFSCar, assim como analisar as tecnologias que já existem atualmente para a sua implementação de forma sustentável e econômica e também as vantagens e desafios dessas tecnologias.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tem-se como objetivos específicos:

- Entender como são aplicadas as formas de cogeração de energia, quais tecnologias existem atualmente e onde elas são implementadas, revisando seu processo produtivo, suas vantagens e limitações.
- Estudar a utilização dos resíduos orgânicos do próprio restaurante da universidade, revisando seus processos para ter melhor eficiência e aproveitamento dos recursos.
- Realizar a análise da viabilidade técnica, entendendo a forma de se instalar um sistema completo dentro do campus e como integrar ao sistema de rede atual, considerando as demandas atuais de energia.
- Realizar a análise econômica, determinando os custos de capital, os custos operacionais e os benefícios econômicos que essa implementação vai trazer para esse cenário.
- Criar uma recomendação para uma implementação bem-sucedida na UFSCar.

3- MÉTODOS

Esse é um trabalho de revisão bibliográfica sobre a implementação de um sistema de cogeração de energia utilizando como alimentação os resíduos orgânicos do restaurante universitário da UFSCar, onde baseado nisso também foi possível analisar a viabilidade técnica e econômica para a implementação na universidade.

Para se chegar ao resultado sobre a possibilidade de implementação desse sistema dentro da universidade, assim como avaliar as questões econômicas desta instalação, foi feita uma coleta de informações e dados de fontes confiáveis na literatura de como essa forma energia é aplicada e quais são as tecnologias utilizadas para que ela seja viável, apresentando as principais semelhanças e diferenças entre as alternativas.

Inicialmente, foram analisados artigos com a temática geral sobre cogeração de energia para compreender melhor esse tipo de produção, suas tecnologias e etapas para obter energia de maneira mais sustentável. Em 2022, realizou-se um encontro significativo nos Estados Unidos, (*Combined Heat and Power/District Energy System Portfolio Meeting*), que reuniu especialistas, pesquisadores e profissionais da área de energia para discutir avanços e desafios na combinação de energia térmica e elétrica em sistemas de produção de energia.

Além dessa reunião importante para o tema, foi possível encontrar na literatura, nos últimos anos, diversos trabalhos sobre esse assunto que foram publicados, principalmente em países como os Estados Unidos, Alemanha, Itália, China e Brasil que são líderes nesse tipo de estudo e investimento. A União Europeia, segundo relatórios da Agência Europeia do Ambiente (EEA do inglês *European Environment Agency*) também tem um esquema de incentivos bem estruturado para promover esse tipo de produção de energia através da cogeração.

Com isso, a revisão bibliográfica foi se direcionando para um tema mais específico semelhante ao apresentado nesse trabalho, ou seja, considerando diferentes fontes de matéria prima para a cogeração.

O estudo de caso, “*A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production*” (Bagdadee et al., 2023), avaliou a cogeração de energia através do esterco de vaca, revisando a integração de biogás produzido a partir dessa matéria prima, energia solar térmica e energia cinética em sistemas híbridos de geração de energia.

Em um estudo realizado na Índia (Prabhakar, 2023), foi avaliado o uso de esterco em uma fazenda leiteira de uma cooperativa de produtores de leite para produzir biogás. Uma planta da Dinamarca (Angelidaki e Ellegaard, 2023) também usa o esterco de vaca e outros materiais orgânicos para a produção de biogás. A Áustria, por sua vez, integra diversas fontes de energia renovável como energia solar, eólica, biomassa e também a produção do biogás a partir do esterco. O Centro de Energia Sustentável de Bangalore, na Índia, usa energia do biogás, juntamente com a energia cinética e solar. Outro exemplo é a Torre Verde em Seul, na Coreia do Sul, que incorpora múltiplas tecnologias de energia renovável, como sistemas solares térmicos, turbinas eólicas e coletores de energia cinética (Farghali, 2022).

No total, foram considerados mais de 10 artigos sobre estudos de casos, sendo a maioria deles de países do Norte, o que reflete muito a realidade desses países principalmente pelo avanço tecnológico e também pela maior presença de centros de pesquisa, como também pela necessidade mais urgente por fontes alternativas de energia, já que é um fator que impacta diretamente a parte econômica e técnica do país, pela falta de fontes de energias renováveis disponíveis.

Dos países que mais focam em pesquisas relacionadas à cogeração de energia, destacam-se a Alemanha, Estados Unidos, Japão, China e Brasil, seguido por França e Reino Unido. No começo do século XXI pra cá, isso começou a ser cada vez mais falado e discutido em artigos por conta do aumento da demanda de energia e avanços tecnológicos.

Entendendo melhor o funcionamento geral de um sistema de cogeração de energia, as diferentes formas de aplicação, os diferentes estudos em cada país, as tecnologias aplicadas, foi possível reunir e traçar caminhos de como funcionaria a utilização de resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário nesse sistema, assim como os subprodutos gerados, avaliando quais eram as vantagens e desvantagens desse processo assim como as limitações e adequações necessárias para serem feitas no local de construção e instalação dos equipamentos dentro da universidade.

Após isso, dados confiáveis da literatura e de artigos científicos sobre a quantidade de energia produzida a partir da queima de resíduos orgânicos foram coletados e utilizados para comparar com o sistema atual de energia na universidade, analisando qual seria a produção e eficiência de um novo sistema a ser implantado.

Foi feita também uma revisão bibliográfica sobre possíveis instalações e

viabilidade técnica da implantação de uma usina de produção de energia dentro da universidade, considerando tecnologias existentes para uma produção menor com equipamentos mais compactos, como também uma comparação com uma produção maior utilizados reatores, trocadores de calor e turbinas em maior escala.

Análises econômicas preliminares foram feitas sobre as condições de implementação de uma usina de cogeração de energia baseado no estudo Santos et al. (2023), para que fosse possível realizar a instalação e para entender os custos de investimento e o tempo esperado de retorno, além de considerar os custos de manutenção e prevenção desse sistema, entendendo como ele conseguiria se encaixar no orçamento e na redução de gastos da universidade através de ferramentas da Engenharia Econômica como tempo de retorno e quantidade de investimento total inicial.

Nesse momento, as mesmas proporções e contas realizadas no estudo de Santos et al. (2023), para a definição de quantidade de energia produzida, produção de biogás e o volume de resíduos orgânicos necessários, assim como a tecnologia mais adequada, foram usadas no cenário da UFSCar para calcular a quantidade de energia que seria produzida, considerando o volume de resíduos gerado na instituição.

Por fim, foi possível fazer uma recomendação sobre a viabilidade, vantagens e desvantagens da instalação do sistema de cogeração de energia dentro da universidade, assim como quais limitações e oportunidades que esse sistema apresenta.

4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção do trabalho são abordados os tópicos teóricos que envolvem o processo de cogeração de energia, desde uma revisão bibliográfica do sistema a ser aplicado, até a revisão dos resíduos orgânicos e por fim a apresentação dos métodos para a análise da viabilidade técnica e econômica do sistema.

4.1 COGERAÇÃO DE ENERGIA

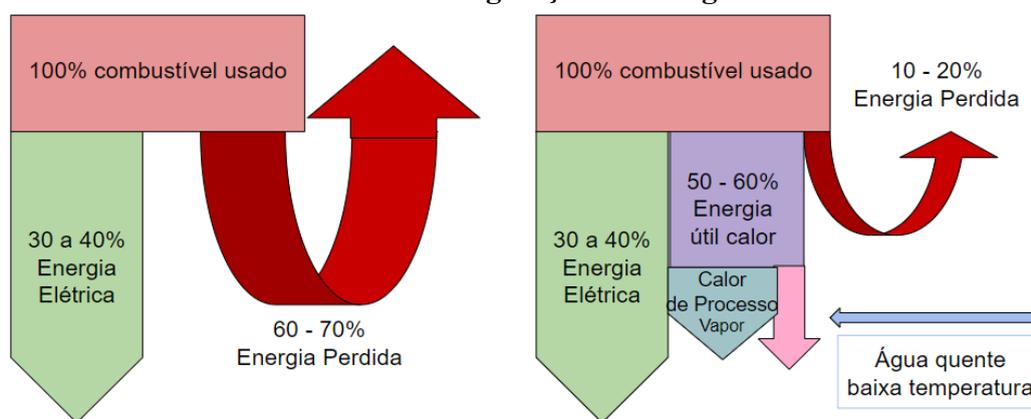
A cogeração de energia, também conhecida como geração combinada de calor e energia (CHP do inglês *Combined Heat and Power*), é um processo que gera simultaneamente energia elétrica e calor útil a partir de um único combustível. A energia térmica é transformada em energia cinética, ou seja, em movimento, que, por sua vez, produz eletricidade através de um gerador. Essa tecnologia eficiente e sustentável oferece diversos benefícios, como economia de energia, redução de emissões de gases de efeito estufa, e diversificação da matriz energética.

Dessa forma, esse processo resulta na redução da emissão de CO₂ na atmosfera. Este motivo, inclusive, foi o que impulsionou o uso da cogeração nas indústrias na década de 90, dada a expectativa nos processos de conversão energética sustentáveis e com menor redução de CO₂, em prol da redução dos impactos globais do efeito estufa.

Nos processos de conversão energética convencionais, uma parte da energia é sempre perdida para o ambiente na forma de calor, pois o sistema possui limitações tecnológicas, de eficiência e ambientais significativas para produção de trabalho útil. Na cogeração, por sua vez, o calor, que normalmente seria perdido para o meio ambiente, é recuperado e aproveitado para fins térmicos como aquecimento de ambientes, água ou equipamentos industriais, maximizando o uso da energia disponível, tendo em vista que esse calor perdido para o ambiente é também um agente intensificador do aquecimento global.

No exemplo da Figura 1, é possível observar uma comparação entre um sistema motor-gerador sem cogeração de energia, representando uma conversão energética convencional que resulta em uma porcentagem alta de energia perdida, e um sistema com cogeração de energia, onde parte da energia que seria perdida, é reutilizada como calor no processo.

Figura 1. Comparação de eficiência energética em um sistema convencional e um sistema de cogeração de energia.

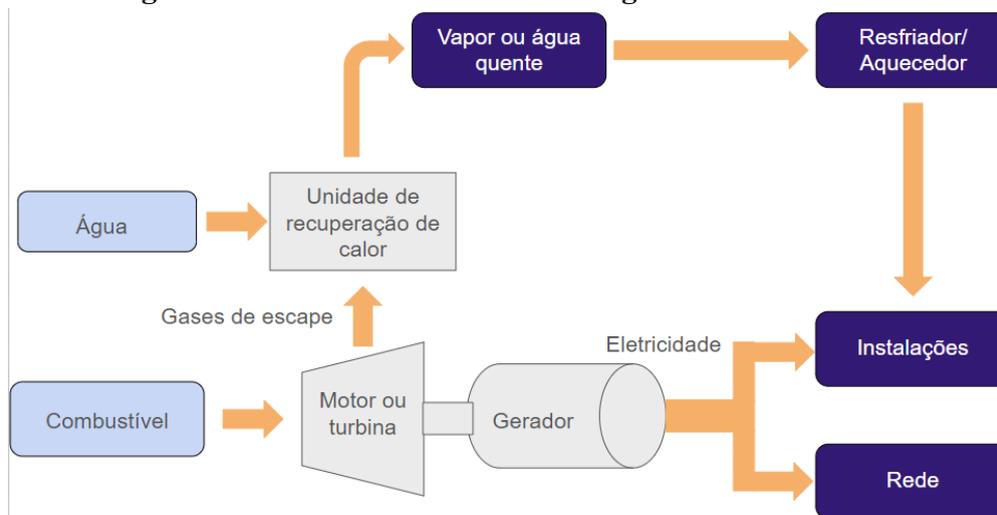


Fonte: Elaboração própria baseada em dados do Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE)

Ao aproveitar o calor residual que seria perdido pelo sistema, é possível atingir uma eficiência global de até 80%, o que representa uma melhoria substancial em comparação com a geração convencional de eletricidade e calor separadamente em um sistema convencional que tem uma eficiência entre 30 e 40% (Programa PotencializEE, 2023).

Dessa forma, uma alternativa é utilizar o calor captado na geração de energia, novamente no sistema para aquecer ou resfriar o mesmo sistema, como representado na Figura 2:

Figura 2. Sistema combinado de energia térmica e elétrica



Fonte: Elaboração Própria baseado no estudo da Califórnia (Desai et al., 2020)

Além dessa forma de reutilizar o calor gerado no próprio sistema, a energia térmica também pode ser destinada diretamente para aquecer ambientes, especialmente em aquecedores de residências, hotéis e hospitais de regiões frias, como também pode fornecer calor para aquecer a água.

Já a eletricidade gerada a partir de motores ou turbinas a gás ou a vapor, pode ser integrada juntamente à rede de energia elétrica já existente, gerando um excedente na produção de energia ou sendo armazenada para quando essa necessidade surgir no sistema elétrico.

A cogeração industrial traz uma série de benefícios que contribuem para a tomada de decisão na implementação dessa tecnologia nas empresas, ela se torna uma opção atrativa para empresas que desejam melhorar sua eficiência energética e reduzir custos operacionais de maneira sustentável alinhada com a Agenda do Meio Ambiente, Social e Governança (ESG, do inglês *Environmental, Social, and Corporate Governance*).

Sobre a construção de uma usina de cogeração de energia próxima ao local onde a eletricidade e o calor são consumidos, verifica-se qual a melhor distribuição de energia que permite que o consumidor se torne (total ou parcialmente) independente da rede elétrica, além de ter uma fonte contínua e estável, aproveitando o máximo dos recursos. Isso também possibilita o recebimento de incentivos econômicos onde, em vários países, as usinas de cogeração estão sujeitas por sua contribuição para a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

As limitações podem estar relacionadas às condições do reator no sistema de cogeração de energia, como pH, temperatura, tempo de retenção e variação de quantidade de matéria prima que pode interferir diretamente na eficiência do sistema (Santos et al., 2023). O local de implementação também pode limitar a produção de energia, caso a fonte de matéria prima esteja longe e precise ser transportada.

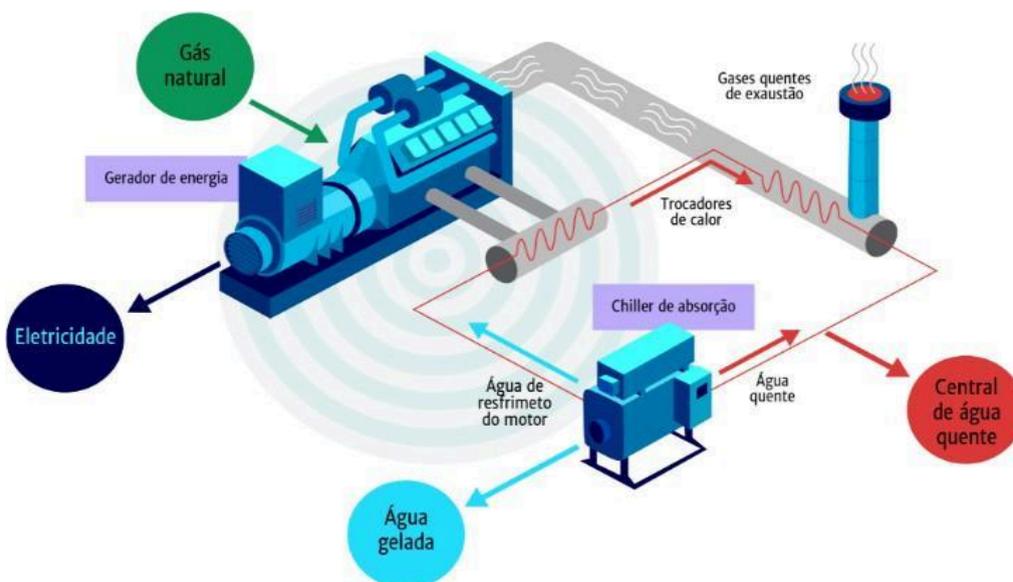
Por fim, existem também os desafios da manutenção de um sistema completo estável e eficaz. A sincronização e otimização da geração de energia a partir de diferentes fontes são identificadas como desafios técnicos. A necessidade de sistemas de controle eficientes e algoritmos de gestão de energia é enfatizada para garantir a utilização ótima de todas as fontes de energia no sistema híbrido.

4.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES

Existem diversos tipos de tecnologias utilizadas para a cogeração de energia, que podem ter diferentes aplicações dependendo da fonte de energia, demanda por calor e eletricidade, local de instalação, avanço tecnológico, investimento inicial, entre outros.

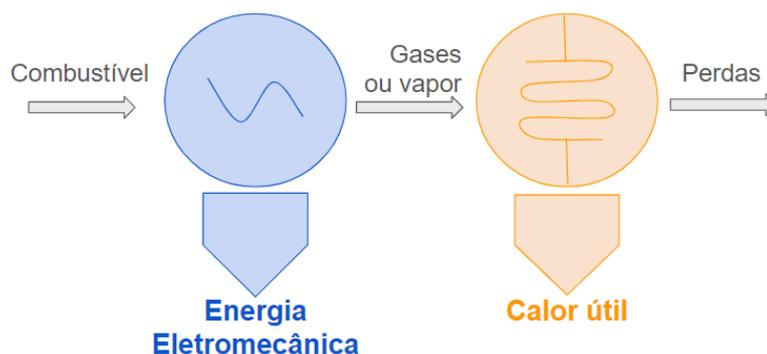
Começando pela tecnologia mais comum, tem-se os ciclos a vapor, que utilizam turbinas a vapor para gerar eletricidade a partir do calor produzido pela queima de combustíveis fósseis ou biomassa. O vapor residual da turbina é então utilizado para aquecer água ou outros fluidos.

Figura 3. Cogeração de energia.



Fonte: MegaWhat Energy, 2024.

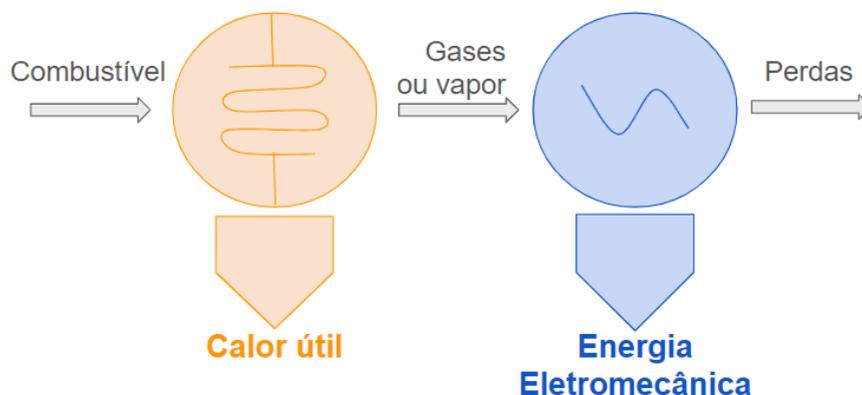
Existem dois arranjos possíveis para os sistemas de cogeração utilizando ciclos de vapor: o *topping* e o *bottoming*. No ciclo *topping*, mais utilizado sobretudo no setor sucroalcooleiro, o produto primário da planta é o combustível em uma turbina a gás ou motor a diesel, que produz energia elétrica ou mecânica. O vapor é direcionado para turbinas, onde é convertido em energia elétrica. O calor residual resultante desse processo é recuperado e utilizado para fins térmicos no processo produtivo.

Figura 4. Ciclo *Topping*.

Fonte: Elaboração própria baseada em Nogueira et al. (1997, p.45).

Esse ciclo é termodinamicamente vantajoso porque permite a produção de eletricidade em alta eficiência a partir do vapor residual de alta temperatura que já existe no sistema. A utilização do calor de condensação do vapor é otimizada, resultando em uma melhor eficiência no momento do uso de um combustível primário.

Por outro lado, outra tecnologia existente são as turbinas a gás, que queimam combustíveis fósseis ou biomassa para gerar eletricidade. O calor residual do escapamento da turbina a gás pode ser utilizado para gerar vapor para aquecimento ou para acionar uma turbina a vapor adicional para produção de mais eletricidade. Nesse caso, ocorre o ciclo *bottoming* (Figura 5), onde a energia térmica residual proveniente de processos industriais a altas temperaturas é utilizada para gerar energia elétrica. Nota-se a mudança na ordem, em que o combustível é queimado para o processo, mas é aproveitado para produzir eletricidade. Essa situação é mais comumente encontrada em indústrias químicas.

Figura 5. Ciclo *Bottoming*.

Fonte: Elaboração própria baseada em Nogueira et al. (1997, p.45).

Resumindo, enquanto o ciclo *topping* prioriza a geração de eletricidade com calor residual aproveitado posteriormente no sistema, o ciclo *bottoming* utiliza primeiro o calor em processos industriais e depois, gera eletricidade a partir do calor residual. Em ambos os casos, o ciclo a vapor é fundamental para converter calor residual em eletricidade, aumentando a eficiência e a sustentabilidade energética.

O ciclo *bottoming* traz algumas desvantagens ao processo, pois são raramente econômicas, já que a eletricidade é gerada com baixa eficiência a partir do calor residual de temperatura relativamente baixa. A eficiência energética também é menor porque a eletricidade é gerada a partir de calor de baixa qualidade energética.

Nos motores de combustão interna, ocorre a conversão da energia térmica em energia mecânica. Isso pode ser feito por meio de uma turbina a vapor, turbina a gás, motor de combustão interna ou outro tipo de conversor de energia. Nesse tipo de motores, é observado um ciclo termodinâmico, conhecido como ciclo Otto.

Esse ciclo idealizado descreve o funcionamento de um típico motor de pistão de ignição com faísca, como os motores presentes na maioria dos automóveis. Ele é composto por quatro etapas distintas: admissão, compressão, combustão e expansão e escape, a combustão de um gás misturado com ar dentro de um cilindro gera calor e pressão, movendo um pistão e produzindo trabalho mecânico. Esse trabalho mecânico pode ser convertido em energia elétrica por meio de um gerador.

Figura 6. Motor de combustão interna.



Fonte: Mundo Educação (2024)

O ciclo Otto é um ciclo teórico e não representa perfeitamente o funcionamento real de um motor de combustão interna, não considerando fatores como atrito, perdas de calor e combustão incompleta que afetam a eficiência real do motor. Apesar das simplificações, o ciclo Otto é uma ferramenta útil para entender os princípios básicos de funcionamento dos motores a combustão interna. Por conta disso, o ciclo Otto é utilizado em diversos tipos de motores a combustão interna, como os motores de automóveis, motocicletas, geradores de energia e aeronaves. O estudo do ciclo Otto é importante para o desenvolvimento de motores mais eficientes, potentes e menos poluentes.

Para o estudo de caso em questão, na implementação desse sistema na UFSCar, o ciclo Otto pode ser utilizado em motores de combustão interna para gerar eletricidade a partir de combustíveis fósseis (gasolina, gás natural, etc.) ou biocombustíveis que seria o caso (biogás, etanol, biodiesel). O calor residual da combustão pode ser aproveitado para aquecimento de água ou vapor, fornecendo energia térmica para diversos usos, como aquecimento de ambientes, processos industriais ou geração de vapor para turbinas.

Existem algumas vantagens na utilização do Ciclo Otto, por ser uma tecnologia relativamente simples e madura com ampla disponibilidade de peças e mão de obra especializada, possui custo relativamente baixo e ter ampla flexibilidade de operar com diversos tipos de combustíveis, o que oferece maior flexibilidade e segurança energética. Porém, existem algumas limitações, como a eficiência energética que é menor do que com outras tecnologias e pode ser também bastante barulhento, o que pode limitar sua aplicação em áreas urbanas ou sensíveis ao ruído.

No geral, a simplicidade e o custo relativamente baixo do ciclo Otto o tornam ideal para pequenas e médias usinas de cogeração, onde a demanda por energia elétrica e térmica não é muito grande. A flexibilidade de combustíveis do ciclo Otto o torna adequado para locais remotos onde o acesso a combustíveis fósseis ou biocombustíveis é mais fácil do que a outras fontes de energia. Ele pode ser utilizado também em um sistemas *off-grid*, fornecendo energia elétrica e térmica para comunidades ou instalações que não estão conectadas à rede elétrica principal.

Em resumo, o ciclo Otto pode ser uma opção viável para cogeração de energia em diversas aplicações, especialmente em pequenas e médias usinas, locais remotos e sistemas *off-grid*. No entanto, é importante considerar as suas limitações em termos de

eficiência, emissões e ruído.

Outro exemplo de tecnologia seriam as células a combustível que produzem energia elétrica e térmica diretamente com a utilização de uma fonte de combustível que geralmente é hidrogênio, sem combustão. Para isso, é necessário realizar uma purificação no biogás para que a sua composição de hidrogênio seja usada na célula para a produção de eletricidade. Outra limitação seria o valor elevado como investimento inicial e pequena vida útil do mecanismo.

Existe um estudo (Rohrer, 1996) que compara diferentes tipos de plantas de cogeração de energia. Nessa discussão é possível ter uma visão comparativa entre turbinas a gás, motores de combustão interna, microturbinas, turbinas a vapor, células a combustível e ciclos orgânicos de Rankine (ORC), que conclui que a escolha da tecnologia depende de necessidades específicas da aplicação, incluindo a disponibilidade de combustível, as necessidades de eficiência, e as condições econômicas e ambientais. Cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens, e a decisão deve ser baseada em uma análise detalhada das condições locais e dos objetivos do projeto.

Um dos aspectos inovadores da tecnologia de cogeração é sua versatilidade e adaptabilidade a diferentes tipos de combustíveis. Embora os combustíveis fósseis, como o gás natural, ainda sejam amplamente utilizados, a cogeração também pode ser implementada com fontes renováveis, como biomassa, biogás e energia solar concentrada. Essa diversidade de opções de fontes renováveis, possibilita reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Cada tecnologia tem seu processo de produção de energia e é preciso ter um sistema de controle para conseguir otimizar essa produção. É preciso também equilibrar essas produções, pois cada fonte tem a sua variabilidade, por exemplo, a quantidade de matéria prima pode variar muito sua disponibilidade e composição, limitando a produção de energia.

Segundo o Quadro 1, é possível observar e entender quais as vantagens e desvantagens de cada tecnologia existente para a cogeração de energia.

Quadro 1. Comparação de tecnologias existentes.

Tecnologia	Descrição	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Motores de Combustão Interna	Utiliza combustíveis renováveis ou não para a produção de energia	Alta eficiência, flexibilidade no tipo de combustível e menor custo inicial	Ruídos, necessidade de manutenção frequente e emissão de gases	Pequenas e médias indústrias, residências e hospitais
Turbinas a gás	Utilizam gás natural ou biogás para a produção de energia	Alta eficiência especialmente em ciclos combinados	Alto custo inicial e dificuldade de operação e manutenção	Grandes indústrias
Turbinas a vapor	Utilizam o vapor gerado a partir do calor residual que gera eletricidade	Alta eficiência especialmente em ciclos combinados	Alto custo inicial, necessidade de grande quantidade de vapor e complexidade de operação	Grandes indústrias
Microturbinas	Pequenas turbinas a gás	Baixa emissão de poluentes	Menor eficiência e alto custo	Pequenas indústrias, edifícios e hospitais
Caldeiras de recuperação de calor	Capturam o calor residual para gerar vapor	Maximização do uso da energia residual, aumento da eficiência	Necessidade de integração complexa	Indústrias no geral
Células a combustível	Produção direta de energia elétrica e térmica	Alta eficiência e baixa emissão de poluentes	Alto custo inicial e para manutenção	Edifícios e residências

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No Brasil, 62% dos sistemas de cogeração utilizam biomassa da cana-de-açúcar que são responsáveis por 8,2% da energia elétrica consumida no Brasil. Em escala mundial, a média gira em torno de 2,3%, mostrando o protagonismo do Brasil na utilização de energia renovável e de baixo carbono na cogeração

(DataCogen, 2019).

Outra forma de tecnologia amplamente estudada e que ainda é um desafio, é a forma de armazenamento dessa energia no final do processo, já que a energia produzida pode não ser usada de imediato e deve ser armazenada para ser destinada ao uso quando necessário. Os estudos estão focados nos desafios de onde armazenar essa energia produzida e os custos para essa implantação, que são altos.

As alternativas que existem hoje são baterias ou armazenamento térmico para disponibilizar a energia quando necessário (Chen e Liangbing, 2018). Os benefícios são os mesmos, buscam o menor impacto ambiental e a máxima produção de energia a longo prazo por conta dessa armazenagem que vai facilitar a disponibilidade de energia de forma contínua. Essa tecnologia pode ser uma alternativa para substituir outras fontes de energia e também para disponibilizar energia para áreas mais remotas.

Um estudo feito na Espanha (Celador et al., 2011), sobre a viabilidade técnica e econômica de um sistema de cogeração de energia para edifícios residências em pequena escala, demonstrou a importância de ter um bom armazenamento da energia produzida. Na Espanha, a maior parte de cogeração está sendo usada para indústrias pela alta e constante demanda, o que não acontece na parte residencial que tem picos de demanda e é utilizada em pequena quantidade, o que pode não suprir os investimentos dedicados. Nesse contexto, o armazenamento de energia se mostra um fator primordial para se expandir o uso de cogeração de energia e explorar sua máxima capacidade.

Um estudo na Inglaterra (Fragaki et al., 2008), também abrange o armazenamento como um ponto principal de uma usina de cogeração de energia, além da própria capacidade de produção. Um artigo sobre o comércio de energia na Alemanha (Streckienė et al., 2009) utiliza simulações para identificar diferentes configurações de uma usina de cogeração com diferentes tecnologias e formas de armazenagem para entender qual a mais viável. Dessa forma, a energia integrada na rede de eletricidade, pode ser usada em momento de alta de valores de combustível e maior demanda, por estarem armazenadas.

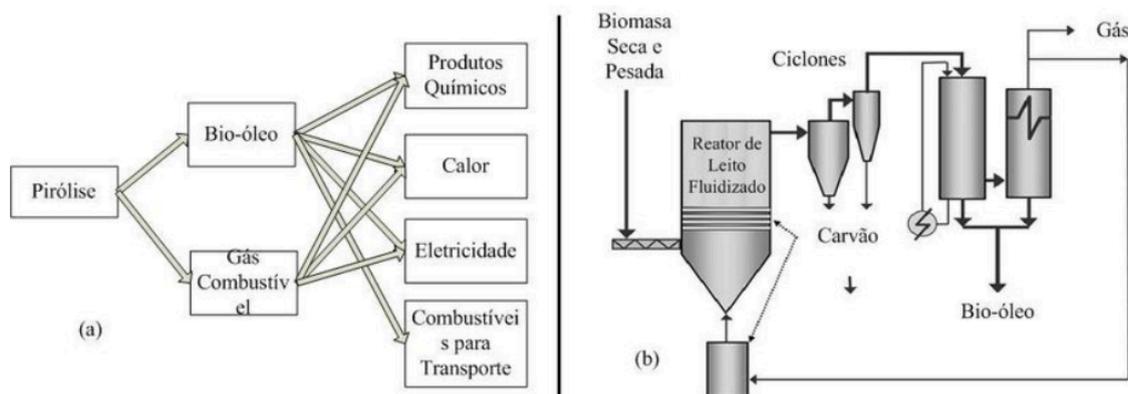
Desenvolvimentos futuros das tecnologias podem melhorar ainda mais a eficiência dessas fontes e formas de produção de energia, reduzindo custos e aumentando a escalabilidade de produção. O investimento em tecnologias de controle, gerenciamento e armazenagem de energia vai melhorar o desempenho e confiabilidade dessa fonte de energia.

4.3 COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS

É possível construir um sistema de cogeração de energia a partir de diversas matérias primas diferentes que vão resultar na produção de energia necessária. Existe uma tecnologia chamada pirólise que é um processo termoquímico em que um material orgânico é decomposto pela ação do calor na ausência de oxigênio. Essa decomposição gera uma mistura gasosa (gás de pirólise), um líquido (bio-óleo) e um resíduo sólido (carvão vegetal) que podem resultar na produção de biocombustível.

O gás de pirólise pode ser utilizado como combustível para gerar energia em motores ou caldeiras, como mostra a Figura 7. O bio-óleo pode ser refinado para produzir combustíveis líquidos, como gasolina, diesel ou querosene.

Figura 7. Processo de pirólise e suas aplicações.



Fonte: Viegas et al. (2015, p.15).

Esse é um processo muito utilizado em alguns países por ser uma tecnologia promissora com potencial para transformar resíduos em produtos úteis e gerar energia renovável. No entanto, é uma tecnologia que possui diversos desafios técnicos, econômicos e ambientais que precisam ser considerados antes de investir na implementação, como o alto custo de investimento, emissões de poluentes na atmosfera, como material particulado e gases tóxicos, necessidade de uma gestão de resíduos de forma adequada para evitar impactos ambientais e necessidade de pesquisa e desenvolvimento para otimizar o processo de pirólise e ampliar a gama de produtos que podem ser obtidos.

Uma outra alternativa, é a produção de energia a partir da queima do biogás e a matéria prima para esse biogás pode ser obtido de diversas fontes como resíduos de animais, plantas, jardinagem, rejeitos urbanos e rurais.

4.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS

Para o caso deste trabalho, foi considerada a coleta de resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário que atende cerca de 6 mil estudantes no Campus São Carlos, o que gera a produção de toneladas de alimentos que muitas vezes não são consumidos. Nesse caso, todo o alimento não utilizado, seria desperdiçado ou enviado para aterros sanitários, o que não iria contribuir para um descarte correto. Quando é estipulado uma coleta de todo esse material, é possível destinar esses resíduos orgânicos para um fim mais limpo que também contribui para a produção de energia.

Para sua aplicação no sistema, primeiro é necessário fazer a preparação dos resíduos que vão ser coletados. A separação é o primeiro passo para obter apenas os resíduos orgânicos que vão ser utilizados. Nela, acontece a remoção de materiais não biodegradáveis, como plásticos e metais e um pré tratamento, destinado a preparar as diversas matérias-primas num único fluxo de alimentação com características dentro de uma faixa especificada (em termos de teor de matéria seca, temperatura, matéria inorgânica).

Após isso, deve ocorrer a trituração para reduzir o tamanho e aumentar a eficiência do processo de decomposição e a homogeneização para garantir uma composição homogênea e uniforme. Por fim, tem-se o ajuste da umidade e o pH dos resíduos para condições ideais de digestão.

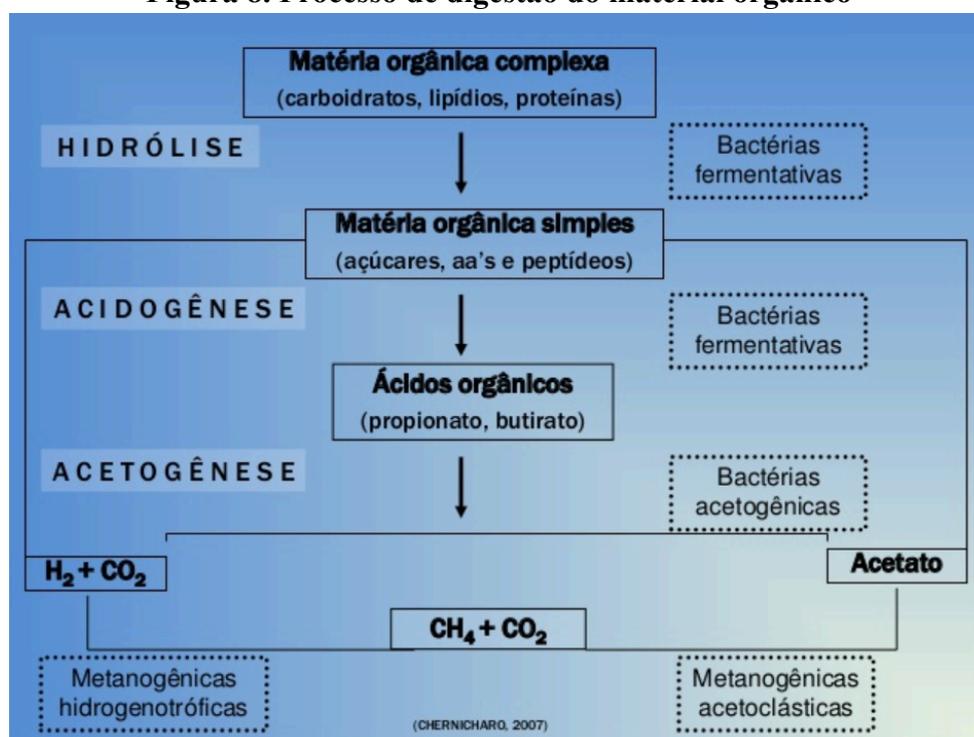
Com os resíduos pré tratados, eles devem ser levados para o processo de biodigestão, em que o biorreator deve ser instalado em um ambiente seguro dentro da universidade e próximo ao restaurante para não ser necessário um grande deslocamento.

Para a digestão do material, inicialmente utiliza-se o processo de hidrólise, depois a acidogênese ou fermentação, seguido pela acetogênese para, por fim, ter a metanogênese que transforma o ácido acético e o hidrogênio em metano e dióxido de carbono. As bactérias anaeróbias decompõem a matéria orgânica dos resíduos na

ausência de oxigênio, produzindo biogás e digestato, que é o material remanescente depois da digestão. O biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de outros gases em menor proporção, o digestato é um material sólido rico em nutrientes que pode ser utilizado como adubo orgânico, como mostra a Figura 8.

Oferecendo mais detalhes, o processo de produção de biogás é complexo e sensível, pois vários grupos de microrganismos estão envolvidos. A etapa de hidrólise é um processo extracelular onde as bactérias hidrolíticas e fermentativas excretam enzimas para catalisar a hidrólise de materiais orgânicos complexos em unidades menores. Os substratos hidrolisados são então utilizados por bactérias fermentativas. Produtos de fermentação como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono podem ser usados diretamente por microrganismos metanogênicos que produzem metano e dióxido de carbono, enquanto outros produtos mais reduzidos, como álcoois e ácidos graxos voláteis superiores, são posteriormente oxidados por bactérias acetogênicas em sintrófica com os metanógenos.

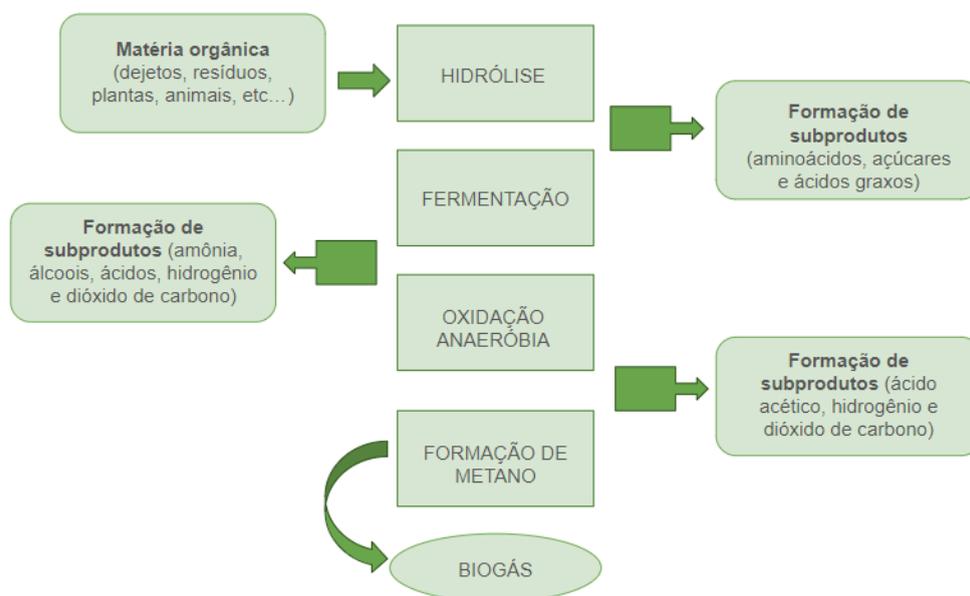
Figura 8. Processo de digestão do material orgânico



Fonte: Chernicharo, 2007

Na Figura 9, é possível observar de forma resumida as etapas envolvidas na produção do biogás a partir de resíduos orgânicos e a formação de subprodutos que podem ser usados posteriormente.

Figura 9. Produção de biogás



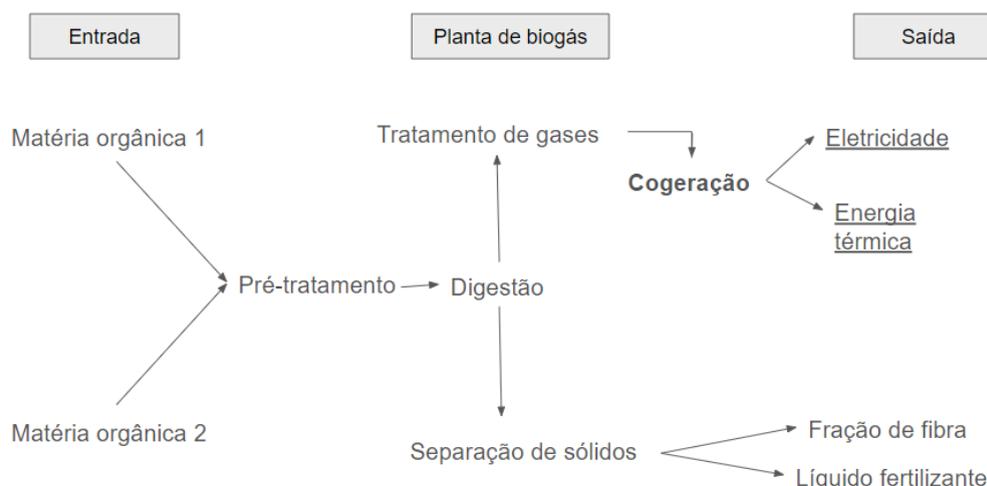
Fonte: Elaboração própria baseada em Chernicharo, 2007

O biogás, por sua vez, é queimado produzindo energia térmica que vai ser utilizada para o aquecimento de água, vapor ou ar que por sua vez vai ser responsável por acionar uma turbina conectada a um gerador elétrico, todos instalados em um mesmo local.

Um sistema de controle e monitoramento adequado deve ser instalado na integração das duas energias térmica e elétrica, para que seja possível obter dados quantitativos desse processo. Para a utilização dessa energia, o sistema deve ser interligado com as redes de distribuição de energia na universidade.

Esse biogás gerado durante a decomposição também pode ser coletado e armazenado para uso posterior no momento de maior demanda dentro ou fora da universidade ou vendido para o órgão responsável pela gestão de energia da universidade. Isso possibilita a produção contínua mesmo sem a necessidade de ser utilizado.

Uma alternativa para aumentar a eficiência da matéria orgânica no processo de cogeração de energia, seria a inclusão de mais um um fluxo de resíduos orgânicos no processo, derivadas de fontes distintas, como mostra a Figura 10.

Figura 10. Codigestão de materiais orgânicos

Fonte: Elaboração própria baseado em Karellas et al., 2010.

A figura 10 ilustra a codigestão, ou seja, a combinação de diferentes fluxos de biomassa pode otimizar a produção de biogás. Nessa mesma figura é possível observar a combinação desses diferentes resíduos que buscam melhorar a eficiência operacional. A composição de cada um desses resíduos é importante no momento de conversão em energia. Segundo um estudo (Angelidaki et al., 2003), o milho e os resíduos de culturas energéticas dedicadas são identificados como as matérias-primas com maior potencial de produção de biogás.

Outra alternativa, seria utilizar um tratamento hidrotérmico (Suarez et al., 2013) antes da digestão anaeróbia. Esse tratamento melhora a biodegradabilidade dos resíduos, pois é um pré-tratamento térmico que envolve a aplicação de calor e pressão para modificar a estrutura física e química dos materiais, como resíduos orgânicos.

No caso deste trabalho, além da utilização de resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário, foi utilizado também podas de árvores da própria universidade. Estudos como o de Santos et al. (2023) indicam que a composição entre a porcentagem de material orgânico e podas pode interferir diretamente na quantidade de metano no biogás, especialmente quando os substratos podem variar em termos de volume e características, o que influencia na quantidade de energia produzida.

O pré tratamento dos resíduos orgânicos deve alcançar um teor de sólidos voláteis entre 4 e 10%. O pré tratamento das podas deve ser a secagem à temperatura ambiente por 10 dias e depois o processo de moagem em um moinho seco para

alcançar um tamanho final de partícula de 25-30 mm e um teor de sólidos voláteis de 3,5 a 4,5% (Santos et al., 2023).

Uma composição variável dos resíduos orgânicos, o uso de tecnologias inadequadas e custo elevado não favorecem a produção de biogás. Por isso, é importante considerar uma codigestão, otimização do processo digestivo e um bom pré tratamento para atingir um alto teor de sólidos voláteis em sua composição, assim, é possível atingir resultados favoráveis em todo o processo.

4.5 O BIOGÁS

A produção do biogás pode depender da composição da matéria orgânica, da eficiência do reator e das condições operacionais, por isso, é preciso entender como obter sólidos voláteis (SV) dos resíduos orgânicos e as melhores condições do biorreator. Uma alternativa seria utilizar condições termofílicas, ou seja, temperatura elevada no reator, para aumentar a degradação dos resíduos e conseqüentemente a quantidade de sólido elevado na mistura, os sólidos voláteis, produzindo mais biogás (Zhang et al., 2022).

Essas condições do reator interferem diretamente na eficiência do biogás que é produzido, já que quanto maior a produção de metano na composição do biogás, maior a quantidade de energia produzida, e isso está diretamente ligado a como essa matéria orgânica se encontra.

Existem alguns tratamentos que podem aumentar a qualidade do biogás produzido, como a remoção de impurezas do vapor de água e do gás sulfídrico (H_2S), para proteger o motor gerador e melhorar a eficiência da combustão. Também é possível ajustar a composição do biogás para aumentar a concentração de metano e reduzir o CO_2 , se necessário.

O biogás quando purificado, pode chegar na composição de biometano que é uma ótima matéria prima para a produção de biocombustíveis. Recentemente, no Brasil, vários projetos que visam o uso de biocombustíveis foram implantados. Em uma estação de efluentes da cidade de São Paulo, o biogás tem sido usado para gerar eletricidade com motores de combustão interna e com uma microturbina a gás de 30 kW (Sabesp, 2016).

Na Alemanha, no ano de 2016, a geração de energia elétrica usando biogás como combustível correspondeu a 74% da geração de energia elétrica proveniente da

biomassa (Daniel-Gromke et al., 2018).

Um outro subproduto com uma ampla aplicação, seria os biofertilizantes que são muito bons para os solos e teriam uma boa aplicação na área agrícola, utilizando as vezes, os próprios resíduos produzidos na região. Isso diminui os custos com fertilizantes utilizando diretamente o digestato como fertilizante. A energia produzida pode também proporcionar uma fonte de renda adicional para agricultores e operadores de plantas de tratamento de resíduos através da venda de eletricidade gerada.

Outros estudos como o de Kapoor et al. (2020), também estão sendo feitos em relação à produção de hidrogênio, outro subproduto desse processo e a amônia que podem ser vendidos ou utilizados de outras formas. Outra inovação ainda no começo de pesquisas é a utilização do biogás em células de combustível, um dispositivo eletroquímico que converte a energia química de um combustível diretamente em eletricidade através de uma reação química com oxigênio ou outro agente oxidante.

O biometano com mais de 90% de CH_4 é equivalente ao gás natural, podendo ser substituído em todas as suas aplicações (Bauer et al., 2013). Já existem casos de usos desses combustíveis na Suíça, Suécia e Alemanha.

A queima do biogás também tem suas desvantagens e suas vantagens frente às outras tecnologias. As vantagens são os pontos já citados sobre a redução de emissão de gases de efeito estufa, aproveitamento de resíduos orgânicos e produção de energia renovável com benefícios econômicos. Já as desvantagens seriam a emissão de poluentes no momento da queima desse gás, altos custos de implementação e uma complexidade operacional no monitoramento constante da produção de energia.

A escolha de utilizar uma usina de cogeração de energia a partir da produção de biogás depende de fatores como a disponibilidade de matéria-prima, a infraestrutura existente, os custos econômicos e os objetivos ambientais, o que pode torná-la mais vantajosa ou desvantajosa frente às outras tecnologias dependendo de sua finalidade e localização.

Para a otimização da produção de biogás, é preciso melhorar os processos de digestão anaeróbia, técnicas de purificação de gás e design dos digestores para aumentar a eficiência da produção de biogás, além de ter uma boa forma de armazenamento. Os sistemas de controle e simulação também ajudam o sistema a ter uma boa sincronização e coordenação entre as fontes para trazer um bom balanceamento entre demanda e produção, buscando a maior eficiência do sistema.

4.6 APLICAÇÕES

Os sistemas de cogeração podem ter diversas aplicações e serem encontradas em diversos setores devido a sua versatilidade e eficiência, como por exemplo, nos setores industriais, em hospitais e edifícios, residências e distritos de aquecimento. Em geral, a cogeração é facilmente aplicada a centrais termoelétricas, onde são instalados diretamente em um gerador de eletricidade autônomo, ou seja, fazem parte da geração distribuída, que é a capacidade do consumidor de obter energia sem retirá-la da rede.

Atualmente existem alguns lugares que se utilizam deste tipo de geração de energia, principalmente em países em que a disponibilidade de energia não é tão ampla como no Brasil, buscando potencializar a fonte de energia primária que existe na região. A cogeração é utilizada em larga escala na Europa, principalmente em países como Alemanha, Finlândia e Dinamarca, pois ela é vista como uma importante ferramenta para alcançar as metas de descarbonização e aumentar a segurança energética. Nos Estados Unidos, esse tipo de energia é usado principalmente em indústrias e universidades, onde o governo americano oferece incentivos para a instalação desse sistema, como créditos fiscais e subsídios.

No Canadá (Wang et al., 2022), existe um estudo que visa atingir metas de descarbonização ao adotar uma abordagem que utilize todas as fontes de energia renovável disponíveis e promova um portfólio diversificado de energia limpa.

A Europa, por ser um continente frio e com poucas opções de energia renovável, usa muito a técnica de pirólise para a produção de energia por falta de espaço para implantação de grandes usinas e queimam os resíduos diretamente no momento da coleta. Esse tipo de incineração, pode gerar muitos poluentes para o meio ambiente e outros compostos ruins para a atmosfera, por não saber qual a composição dos resíduos queimados. Dessa forma, a cogeração está amplamente sendo estudada para a sua substituição na geração de energia a partir dos resíduos sólidos gerados pelas residências e áreas rurais.

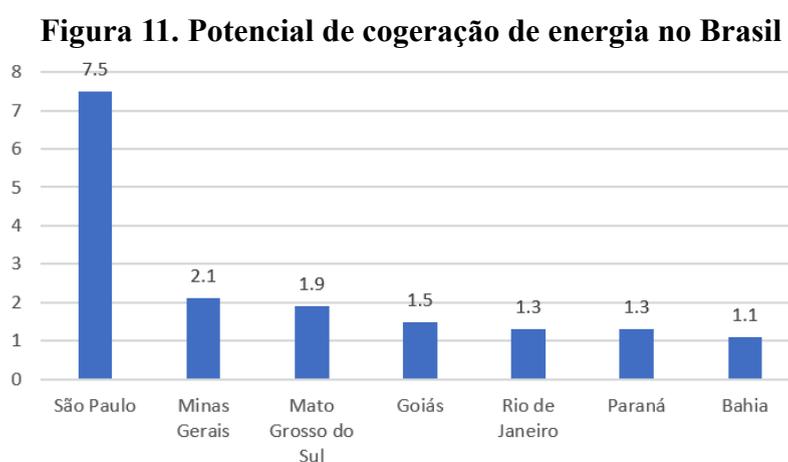
No Brasil esse sistema é muito utilizado no setor do agronegócio com usinas de biogás, fazendas e agroindústrias que podem gerar eletricidade para consumo próprio e vender o excedente para a rede, além de utilizar o calor residual para aquecer estufas, secar grãos e alimentar processos industriais. Nas indústrias, fábricas

de diversos setores, como alimentício, têxtil, químico e de papel e celulose, podem se beneficiar da cogeração para reduzir custos com energia e diminuir o impacto ambiental.

Em aterros sanitários, estações de tratamento de efluentes e outras instalações que geram grandes volumes de biogás, podemos ter a instalação de biodigestores de grande porte, o que faz com que a cogeração possa ser utilizada em larga escala para gerar eletricidade e calor para consumo próprio ou venda para a rede.

Existem também algumas aplicações de usinas no Brasil como, a Usina de Biogás de Goiânia (GO) como uma das maiores usinas de biogás da América Latina, com capacidade de gerar 16 MW de eletricidade e 36 toneladas de vapor por hora, a Usina de Biogás Pirapora (MG) gera 6,2 MW de eletricidade a partir do biogás proveniente de um aterro sanitário e de vinhaça da indústria sucroalcooleira e a Usina de Biogás Catanduva (PR) que gera era 5,4 MW de eletricidade e 12 toneladas de vapor por hora a partir do biogás de um laticínio.

A cogeração em operação comercial no Brasil é de 20,4 GW, em 634 usinas, o que equivale a 1,46 vezes a capacidade instalada da maior hidrelétrica do país, a usina de Itaipu, que contém 14GW, o número representa 10,8% da matriz elétrica brasileira. No ranking por unidades da federação de cogeração por biomassa, o estado de São Paulo lidera a lista com 7,5 GW instalados. Em seguida estão Minas Gerais (2,1 GW instalados); Mato Grosso do Sul (1,9 GW instalados); Goiás (1,5 GW instalados); Rio de Janeiro e Paraná (cada um com 1,3 GW instalados), e Bahia (1,1 GW instalados), como é possível observar na Figura 11 abaixo (DataCogen, 2022).



Fonte: Elaboração Própria, 2024

Desse total produzido, 61% corresponde à produção de energia a partir da biomassa da cana de açúcar. O biogás ocupa a quinta posição, responsável por 2% da fonte de matéria prima, como ilustra a Tabela 1.

Tabela 1. Fonte de energia para a cogeração

Fonte	MW Instalado	Usinas	% MW	Média de MW/usina	GW Instalado
Bagaço de cana	11.941	381	61,1%	31	11,9
Gás Natural	3.152	93	16,1%	7*	3,2
Licor Negro	3.070	19	15,7%	162	3,1
Madeira	846	66	4,3%	13	0,8
Biogás	369	50	1,9%	7	0,4
Outros	193	25	1,0%	8	0,2
Total	19.570	634			19,6

*desconsiderando plantas maiores que 41 MW

Fonte: DataCogen, 2022

Em 2017, a fábrica Bem Brasil, maior fábrica de batatas fritas congeladas do país, fez uma instalação de um sistema de cogeração na unidade Perdizes, no Triângulo (MG) para suprir mais de 60% da demanda energética da fábrica. Estima-se uma produção de 54.000MWh/ano e evita a emissão de 7.200 toneladas de CO₂ por ano na atmosfera (CanalEnergia, 2017).

Nas universidades, é possível encontrar exemplos de aplicações como na Universidade de Stanford (EUA) que possui um sistema de cogeração que gera cerca de 80% da eletricidade e 90% do calor necessários para o campus, a Universidade da Califórnia em Berkeley (EUA) utiliza um sistema de cogeração para aquecer 70% dos prédios do campus e gerar 20% da eletricidade necessária. Já no Reino Unido, a Universidade de Cambridge possui um sistema de cogeração que fornece calor e eletricidade para um terço do campus. Existem também estudos para a implementação de um sistema de cogeração de energia na Universidade Uttara, em Dhaka, Bangladesh e também a utilização de turbinas a vapor da Universidade de San Diego na Califórnia.

Já no Brasil, existe a Universidade de São Paulo (USP) que possui um sistema de cogeração que gera eletricidade para o Hospital Universitário e calor para o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Um outro estudo também está sendo feito com a integração entre a UNESP e UNICAMP para analisar a produção de energia em um sistema compacto de cogeração com diferentes combustíveis.

Isso mostra que essa tecnologia já está sendo implementada em diversas universidades e também reforça o compromisso da universidade com a sustentabilidade e serve como exemplo para a comunidade, além de utilizar seus sistemas de cogeração como ferramentas de ensino e pesquisa, promovendo a educação ambiental e a conscientização sobre a importância da sustentabilidade energética.

4.7 REGULAMENTAÇÕES

Hoje a cogeração de energia no Brasil segue algumas regulamentações definidas pela ANEEL que estabelece diretrizes gerais para a micro e minigeração distribuída (MD/MGD), incluindo a cogeração, define os requisitos para conexão à rede, comercialização da energia excedente e outras obrigações dos geradores, regulamenta a comercialização da energia elétrica de cogeração qualificada, definindo os preços e mecanismos de comercialização para essa modalidade de geração, atualiza as regras simplificando os procedimentos de conexão, comercialização e outros aspectos da operação dos sistemas, consolida os atos regulatórios e aprimora as regras para a conexão e o faturamento de sistemas, visando maior clareza, eficiência e transparência (Gov.br).

Segundo a Resolução Normativa ANEEL N° 1.031, DE 26 DE JULHO DE 2022, o artigo 1º indica a redução das tarifas de uso dos sistemas de transmissão e de distribuição, aplicáveis aos empreendimentos hidrelétricos com potência igual ou inferior a 50.000 (cinquenta mil) kW, e àqueles com base em fontes solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. Esta redução pode chegar a 50% para empreendimentos que injetem até 300 MW nos sistemas de transmissão ou distribuição, com condições específicas para fontes solar, eólica, biomassa e cogeração.

Empreendimentos que se qualificam como cogeração podem obter reduções

de até 100% nas tarifas de uso dos sistemas elétricos, dependendo da data de início de operação e da conformidade com as regulamentações estabelecidas pela ANEEL.

O Art. 12. estabelece os requisitos para o reconhecimento da qualificação de centrais termelétricas cogedoras, permitindo a participação nas políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos. Essa qualificação envolve critérios de eficiência energética, além de um fator de cogeração que varia conforme a potência instalada e a fonte de energia.

Por fim, são apresentados os requisitos para qualificação, solicitação e obrigações da cogeração qualificada, que são, estar regularizado perante a ANEEL e preencher os requisitos mínimos de racionalidade energética. O cogedor qualificado, deve manter atualizado os arquivos com o registro mensal dos montantes energéticos, bem como o demonstrativo da sua apuração, com base na efetiva operação da central termelétrica cogedora.

A ANEEL oferece diversos incentivos para estimular o desenvolvimento da cogeração no Brasil, como tarifas reduzidas para conexão à rede, bônus na comercialização da energia excedente e mecanismos de compensação de créditos de energia. Ela também realiza a qualificação e revisão dos critérios específicos e das obrigações necessárias para a validação dos sistemas e realiza o monitoramento e fiscalização do cumprimento da regulamentação da cogeração, aplicando sanções em caso de descumprimento das normas. Além disso, a ANEEL também estabelece as diretrizes para a realização de leilões de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração existentes, incluindo a cogeração.

O aumento de incentivos (Willeghems e Buysse, 2019), pode aumentar a rentabilidade das plantas de biogás, pois é um mercado muito instável e volátil para a venda de energia, o que pode incentivar pesquisas e indústrias a começarem seus investimentos nessa área.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VIABILIDADE TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA NA UFSCAR

Para a implementação de um sistema de cogeração de energia em uma localidade, é necessário fazer diversos estudos e implementações para que sua adequação seja possível. Inicialmente, é preciso entender se existe uma demanda energética a ser suprida. Depois disso, é importante avaliar as opções tecnológicas existentes, pois existem diversas tecnologias diferentes disponíveis para a cogeração de energia, cada uma com suas vantagens e desvantagens. É importante avaliar as opções e escolher a tecnologia mais adequada às necessidades da universidade.

Além disso, é importante considerar os custos e benefícios dessa implementação, pois envolve custos de investimento, operação e manutenção e é importante realizar essa análise de custos e benefícios para determinar se a cogeração é uma opção economicamente viável para a universidade.

Outro ponto importante, é a análise da localização, espaço disponível para a implementação de um sistema completo e recursos energéticos disponíveis para a geração de energia. É preciso identificar um local que seja adequado para a instalação do sistema de cogeração de energia, considerando o tamanho, peso, ruídos e emissões, além de ser um local seguro dentro de uma universidade que tem diversos alunos.

Para se ter uma integração energética junto à rede de energia já existente, é necessário verificar a viabilidade de conectar o sistema às redes de energia elétrica, gás, água e vapor da universidade, através de conexões de rede e também avaliar a capacidade da rede existente de absorver a energia adicional, identificando se há necessidade de um reforço na infraestrutura.

Com a integração desses sistemas, é preciso avaliar também a compatibilidade do sistema de cogeração com os sistemas de aquecimento, refrigeração e geração de vapor já existentes. Avaliar os impactos ambientais da instalação e operação do sistema, como emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes, ruídos e vibrações, também é importante para entender como o sistema vai funcionar e propor medidas de mitigação ou tratamento de resíduos.

Com essas análises iniciais, é preciso seguir para o desenvolvimento de um projeto detalhado que vai incluir as especificações técnicas do sistema de cogeração, a integração com o sistema elétrico da universidade, o plano de operação e manutenção e o plano de gestão de combustíveis.

Para seguir com a construção desse sistema, é preciso buscar cumprir todas regulamentações e normas, entender quais licenciamentos e aprovações são necessários para a instalação e operação do sistema de cogeração, verificando as leis e normas federais e estaduais que regulamentam a cogeração de energia, incluindo requisitos de licenciamento, emissões e eficiência energética. É preciso seguir também as normas de segurança para a instalação e operação do sistema de cogeração, garantindo a proteção de pessoas, bens e do meio ambiente.

Entrando no estudo de caso em questão, para a implementação desse sistema na UFSCar, devido a sua vasta área do campus, é possível fazer essa instalação próximo ao restaurante universitário. O ideal seria a construção de uma sala onde seriam localizados os equipamentos para a digestão dos resíduos orgânicos provenientes da própria universidade.

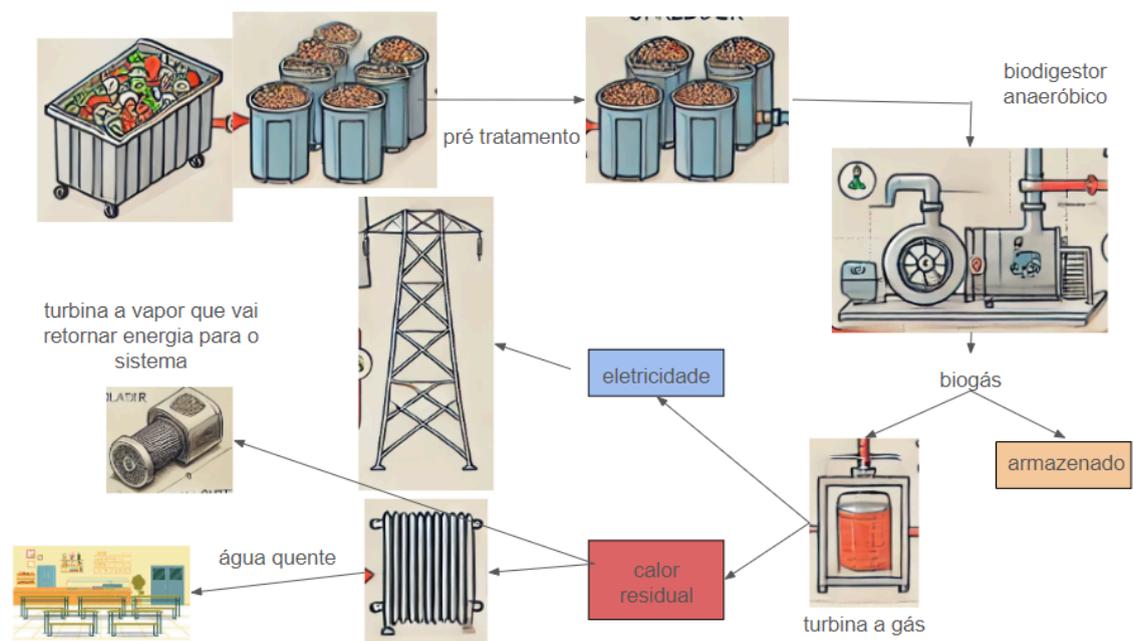
Para que esses resíduos cheguem até o sistema de cogeração, seria preciso implantar uma rota diária, para que os resíduos sejam despejados de maneira correta no local de produção de energia.

A partir das tecnologias analisadas, a instalação deve ser feita com o uso de um reator para a digestão dos resíduos orgânicos, um motor de combustão interna ou uma turbina a gás que vão ser responsáveis por gerar eletricidade a partir da combustão do biogás. Com o calor gerado, seria possível utilizar a energia térmica para o próprio sistema, gerando a energia elétrica no momento de movimento da turbina a vapor.

Outros sistemas também devem ser incluídos no sistema principal, como um sistema de recuperação de calor através de uma caldeira que recupera calor dos gases de escape das turbinas para produzir vapor e trocadores de calor que transferem o calor recuperado em processos industriais ou aquecimento.

Na Figura 12 é possível visualizar uma proposta para a instalação desses equipamentos em uma unidade de cogeração de energia na UFSCar.

Figura 12. Proposta de instalação de unidade de cogeração na UFSCar



Fonte: Elaboração própria, 2024

Para auxiliar o sistema, é possível ter também bombas e ventiladores para ajudar na circulação de água e ar e sistemas de controle e monitoramento, muito importante para operar, monitorar e otimizar o sistema de cogeração. E por fim é preciso ter uma forma de armazenamento de combustível para armazenar o biogás não utilizado, como tanques ou sistemas de armazenamento.

Na Universidade de Princeton (Barter et al., 2015), foi utilizada uma turbina a gás capaz de produzir 15 MW, complementada por um sistema solar de 4,5 MW. A planta de cogeração foi projetada para operar de forma eficiente e confiável, mesmo durante situações de emergência, como a tempestade Sandy, onde a universidade manteve-se operando enquanto grande parte do estado ficou sem energia devido a essa segunda fonte de energia instalada.

O sistema opera em sincronia com a rede local, gerando energia quando é mais econômico e vendendo excedentes para a rede, criando novas fontes de receita. Também foi feita uma integração de serviços auxiliares para ajuste de tensão e frequência, fornecendo serviços adicionais à rede maior. Para sua infraestrutura foi usada uma distribuição de energia subterrânea e testes regulares de componentes críticos.

Na Universidade de San Diego State University, foi implementada uma nova turbina a gás para uma cogeração maior de energia e calor (Luz-Silvera et al., 2002). A Universidade de Gênova (Bianco et al., 2015) também fez um estudo sobre a

viabilidade técnica e econômica de uma usina de cogeração de energia e usou uma turbina a gás em sua instalação baseada na sua eficiência e na capacidade de fornecer tanto eletricidade quanto calor residual para o processamento de alimentos.

Esses exemplos mostram como as universidades estão adotando a cogeração para melhorar a eficiência energética, reduzindo custos e minimizando o impacto ambiental, ao mesmo tempo em que garantem a continuidade das operações durante emergências. Para detalhes adicionais, as referências incluem estudos de caso e análises técnicas específicas.

5.2 VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade econômica para a instalação de uma usina de cogeração de energia depende de diversos fatores, como demanda por energia existente no local de instalação, tipo de combustível a ser utilizado, o custo e a disponibilidade do combustível escolhido, podendo ser gás natural, biogás, biomassa, ou outra fonte, pois impactam significativamente na viabilidade, tecnologia a ser escolhida, investimento inicial, custos de manutenção preventiva e corretiva, incentivos fiscais e legislação.

Para um investimento inicial, segundo a ABiogás (2019), estima-se um gasto variado que pode estar entre R\$1 milhão e R\$100 milhões ou mais, dependendo do porte da usina e da tecnologia empregada. Como já existe o local para a instalação dos equipamentos e a matéria prima para a geração do biogás, de acordo com ABiogás (2019) o valor médio para a instalação de uma usina de biogás no Brasil é de R\$14 milhões por MW instalado (D'Aquino et al., 2021).

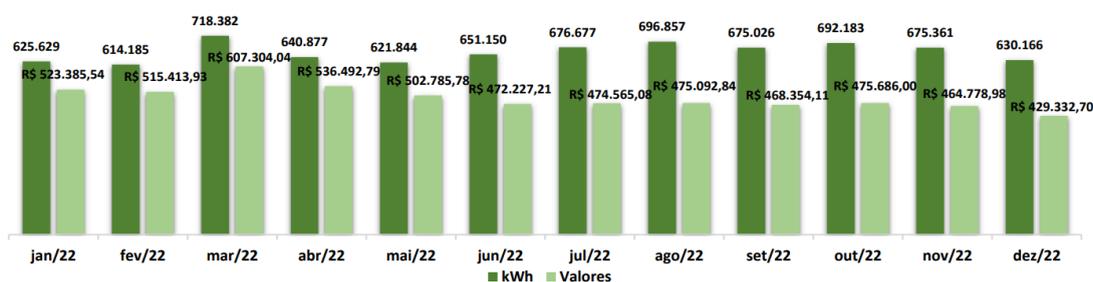
Para essa instalação é preciso considerar os componentes necessários para a usina, como um digestor anaeróbio para a produção do gás a partir dos resíduos orgânicos, um sistema de captação e pré-tratamento de biogás, um motor gerador que vai gerar energia a partir do biogás, um sistema de controle e monitoramento onde vai ser possível analisar os dados quantitativos do sistema e outros serviços como obras civis e conexões necessárias com o sistema elétrico que já existe hoje.

Além do gasto inicial para a instalação, existem também os custos de manutenção que tem um valor anual em média de 1% a 3% do investimento inicial (ABiogás, 2019). Os custos operacionais também devem ser considerados, pois são os gastos necessários para manter as operações diárias de uma empresa ou instalação em funcionamento. Eles incluem todas as despesas relacionadas à produção e fornecimento

de bens e serviços, excluindo os custos de capital e de manutenção específica.

No caso do trabalho, para entender o tempo de retorno financeiro necessário para esse investimento, é preciso analisar a demanda energética atual que a universidade apresenta. No ano de 2022, o campus São Carlos consumiu 7.918.336.800 Wh (7,91 GWh) a um custo total de R\$ 5.945.419,00, segundo a Figura 13. Importante registrar que foram gerados cerca de 1 GigaWh pelas micro-usinas instaladas no campus, segundo dados dos relatórios do ProDIn n°. 11.512 e ProDIn n° 11.985

Figura 13. Consumo (kWh) e Custo (R\$) de energia em 2022 Campus São Carlos



Fonte: PU, 2023.

A quantidade de energia gerada pela queima de biogás em um sistema de cogeração de energia depende de diversos fatores, como composição do biogás que apresenta o metano (CH_4) como principal componente, com alto poder calorífico (cerca de 50 MJ/m^3), o dióxido de carbono (CO_2) que não gera energia, mas pode reduzir a eficiência da combustão, outros gases como subprodutos que também podem influenciar o poder calorífico e as emissões da queima.

O sistema a ser construído também interfere diretamente na quantidade de energia que pode ser produzida e a eficiência do sistema. Entre os equipamentos que podem ser utilizados, tem-se o motor a combustão interna que tem uma eficiência de 25% a 35%, turbinas a gás com uma eficiência maior de 30% a 40% e o Sistema Otto que apresenta uma eficiência de 33%. As células de combustíveis, apesar de serem bem mais caras e ainda estarem em processo de desenvolvimento, apresentam a maior eficiência entre 40% a 60% (Wang, 2008).

Além disso, a composição dos resíduos orgânicos também influencia significativamente a geração de energia, sendo fortemente afetada pela sazonalidade, pelo país e pela região. Isso se deve ao fato de que a variedade e a quantidade de alimentos consumidos variam conforme essas condições, determinando a composição

dos resíduos. Essas variações podem resultar em uma maior ou menor produção de metano, impactando diretamente a quantidade de energia gerada.

Fazendo a análise dos sólidos voláteis (SV) do material orgânico, ou seja, fazendo a análise apenas da fração do material orgânico presente em resíduos que pode ser volatilizada a altas temperaturas, acontece uma conversão muito maior para o biogás. Além disso, a quantidade de sólidos voláteis em um substrato é um indicador crucial do potencial de produção de biogás. Substratos com maior teor de SV tendem a produzir mais biogás, pois possuem mais material orgânico disponível para decomposição.

Uma alta proporção de SV indica que uma maior parte do material pode ser convertida em metano e dióxido de carbono pelos microrganismos metanogênicos. A redução dos sólidos voláteis ao longo do processo de digestão é utilizada para avaliar a eficiência da degradação dos resíduos orgânicos. Uma maior redução de SV sugere uma digestão mais eficiente e completa.

Saber a composição do material orgânico usado no processo é muito importante, pois é isso que indica a quantidade de sólidos voláteis no processo de digestão anaeróbia. Para isso, antes de iniciar a digestão, os substratos são avaliados quanto ao seu conteúdo de SV para determinar sua viabilidade e potencial de biogás. Isso é particularmente útil na escolha de resíduos agrícolas, industriais e municipais, principalmente para o processo de codigestão.

Segundo Santos et al. (2023), foi possível entender que quanto maior a combinação de substratos ricos em sólidos voláteis, maior é a produção de metano e consequentemente de biogás, pois a conversão se torna maior no momento que existem mais sólidos disponíveis para a biodigestão. A grande diversidade de substratos também acaba ajudando no equilíbrio de nutrientes e na eficiência do processo, além de uma maior estabilidade operacional, evitando a formação de inibidores e melhorando a atividade microbiana.

Segundo esse mesmo estudo, a quantidade de metano presente no biogás pode ser maior que 60%, resultado baseado no estudo de West-erholm et al. (2020) que faz uma análises químicas para entender a quantidade de metano presente na composição do biogás. O procedimento utilizado para determinar essa quantidade foi a coleta de amostras de biogás no digestor anaeróbico em condições controladas, seguido por uma análise cromatográfica, técnica para separar e analisar compostos voláteis, depois foi feito uma calibração do equipamento usando padrões conhecidos de gases para garantir

a precisão das medições e por fim é possível calcular a fração molar de metano no biogás.

Segundo a Tabela 2 abaixo, é possível entender como ocorre essa relação entre a quantidade de SV e a quantidade de biogás produzido, assim como as proporções de resíduos orgânicos usados em cada experimento e a porcentagem de metano presente no biogás utilizando como tecnologia o motor a combustão com ciclo Otto que apresenta uma eficiência de 33% para o sistema.

Tabela 2. Quantidade de SV em relação a produção de biogás

Experimento	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6	Fase 7	Fase 8
Substrato	SO	SO	SO+PO	SO+PO	SO+PO	SO+PO	SO+PO	SO+PO
% substrato orgânico (SO)	100%	100%	70%	60%	70%	60%	60%	60%
% poda orgânica (PO)	-	-	30%	40%	30%	40%	40%	40%
Produção acumulada de Biogás (L)	72	171	159	83	135	362	143	219
Massa de substrato fresh na etapa (kg)	9,63	3,84	3,58	2,40	2,39	3,84	4,32	4,80
Massa de substrato volátil na etapa (kg)	0,404	0,403	0,530	0,235	0,354	0,415	0,251	0,422
% VS removido	4,2	10,5	14,8	9,8	14,8	10,8	5,8	8,8
Taxa média de geração de biogás (m³/kg SV)	0,178	0,424	0,300	0,353	0,381	0,873	0,571	0,518
Percentual de Metano no Biogás (%)	58%	62%	73%	61%	67%	59%	59%	65%
Produção Acumulada de metano Volume (L)	42	106	116	51	90	214	84	142

Fonte: Elaboração própria baseado em Santos et al., 2023.

Considerando uma porcentagem entre 4 a 11% de material volátil nos resíduos orgânicos coletados, como mostram os dados do estudo Santos et al. (2023), é possível chegar a uma alta produção de biogás. No exemplo deste estudo, considerando a fase 6 como a fase de maior conversão de SV em biogás, é possível produzir 362 l de biogás, a partir de 3,84 kg de substrato, possuindo 10,8% de SV. Como a composição de biogás apresenta 58% de metano, foi possível obter um volume de 213,6 l deste gás, fazendo uma relação proporcional com os dados apresentados.

$$\text{Total de SV} = 3,84 \text{ kg} * 10,8\%$$

$$\text{Total de SV} = 0,41 \text{ kg}$$

No caso da UFSCar, considerando as mesmas proporções para conversão, com uma coleta mensal de 2,5 toneladas de resíduos orgânicos do restaurante universitário e considerando uma eficiência de material volátil de 10,8% nas melhores condições, essa quantidade de material resultaria em uma produção de 235.678 L de biogás. Desses, aproximadamente 140.000 L seriam de metano, considerando que ele representa 60% da composição do biogás.

Sendo o poder calorífico do biogás igual a 22.600 kJ/m³ e 35.800 kJ/m³ para o metano, a energia produzida nesse contexto é:

$$\text{Energia (kJ)} = \text{Volume de Biogás (m}^3\text{)} \times \text{PCI (kJ/m}^3\text{)}$$

$$\text{Energia (kJ)} = 235,7 \text{ m}^3 \times 22.600 = 5.326.342,8 \text{ kJ}$$

$$\text{Energia (kWh)} = 1.479,54 \text{ kWh}$$

Nesse caso, como o tempo analisado é de 1 mês para essa produção, tem-se 2 kW de potência produzida.

$$\text{Potência (kW)} = 5.326.342,8 \text{ kJ} / 30 * 24 * 3600$$

$$\text{Potência (kW)} = 2,055 \text{ kW}$$

Com esse resultado, 235,7 m³ de biogás produzido pode gerar 1.479 kWh de energia por mês, ou seja, 17.748 kWh/ano, o que representa 0,2% de energia elétrica que é necessária para suprir a demanda da universidade, 7.918.336.800 Wh, o que resulta em uma economia de R\$13.080,00 no ano.

$$\% \text{ da demanda} = 17.748 \text{ kWh} / 7.918.336,8 \text{ kWh}$$

$$\% \text{ da demanda} = 0,22\%$$

$$\text{Economia} = 0,22\% * \text{R\$ } 5.945.419,00$$

$$\text{Economia} = \text{R\$ } 13.080,00$$

Agora utilizando a proporção indicada pelo trabalho Santos et al. (2023) de uma composição de 60% de material orgânico e 40% de poda para uma maior eficiência, sendo 2,5 t/mês de resíduos orgânicos e 1,7 t/mês de poda, é possível ter um total de massa para ser digerida de 4,2 toneladas por mês.

Com isso, a produção total de biogás no sistema é de 395.937 L, o que resulta em 8.948.187 kJ de energia, equivalente a 2.485,6 kWh por mês, um valor mais significativo para a geração de energia.

$$\text{Energia (kJ)} = \text{Volume de Biogás (m}^3\text{)} \times \text{PCI (kJ/m}^3\text{)}$$

$$\text{Energia (kJ)} = 395,9 \text{ m}^3 \times 22.600 = 8.948.187 \text{ kJ}$$

$$\text{Energia (kJ)} = 2.485,6 \text{ kWh}$$

$$\text{Potência (kW)} = 8.948.187 \text{ kJ} / 30 * 24 * 3600$$

$$\text{Potência (kW)} = 3,45 \text{ kW}$$

Esse valor representa 29.827,2 kWh por ano de energia produzida, ou seja, 0,37% do potencial da UFSCar, tendo uma economia de R\$21.998.

Nesse caso, para se ter uma produção de 1% do consumo energético da UFSCar, ou seja, 79.183,368 kWh, sem considerar perdas ou interferências, é necessário 1.131,2 m³ de biogás gerado, o que representa uma coleta de mais ou menos 12 t/mês de material orgânico, o que pode ser suprido caso a coleta não seja feita apenas no Campus UFSCar São Carlos, mas também em outros Campi como Lagoa do Sino, Sorocaba e Araras.

$$\text{Energia (kJ)} = \text{Volume de Biogás (m}^3\text{)} \times \text{PCI (kJ/m}^3\text{)}$$

$$\text{Energia (kJ)} = 1.131,2 \text{ m}^3 \times 22.600 = 25.566.250 \text{ kJ}$$

$$\text{Energia (kWh)} = 7.101,7 \text{ kWh} * 12$$

$$\text{Energia (kWh)/ano} = 85.220,4 \text{ kWh}$$

Vale ressaltar que esse impacto econômico pode ser muito maior em países onde o custo de energia é muito alto e a quantidade de fontes de energia limpa é muito menor. Por exemplo, segundo um estudo realizado na Itália (Brizi et al., 2014), o uso do biogás ou gás natural na cogeração de energia, tem um impacto muito positivo na economia, já que num momento de oscilação de demanda ou aumento do valor do combustível, ela pode ser usada como uma alternativa tanto para utilização própria, como para a venda, já que os custos vão estar muito mais elevado.

Pensando em retorno financeiro, é preciso analisar o tempo que o projeto levaria para se pagar, ou seja, o tempo para recuperar o investimento inicial e esse tempo pode variar de 3 a 10 anos, ou mais. Considerando um investimento inicial de R\$50 mil para 3,5 kW de potência instalada, baseando-se no estudo da ABiogás que indica que o valor de instalação para cada MW produzido é de R\$14milhões. Além disso, é preciso considerar o gasto de manutenção, ou seja, 3% do investimento inicial, também estimado pelo estudo da ABiogás, o que resulta em um gasto de R\$1,5 mil ao mês. Considerando o retorno líquido de R\$22 mil no ano, calculado acima, ou R\$1.833,00 no mês, é possível que o retorno financeiro seja obtido depois de 150 meses, ou seja, 12 anos.

Retorno Líquido Mensal=Retorno Financeiro Mensal–Gastos Mensais

Retorno Líquido Mensal=1.833-1500=333

Tempo de Retorno= Investimento Inicial/Retorno Líquido Mensal

Tempo de Retorno= 50.000/333

Tempo de Retorno= 150 meses

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cogeração pode ser considerada econômica somente se as diferentes formas de energia produzidas tiverem um valor superior aos custos de investimento e operação incorridos na instalação de cogeração. Devido à necessidade de uma visão de médio prazo, a cogeração é um investimento de capital relativamente caro, a volatilidade e a incerteza nos mercados de energia, tarifas ou preços podem desencorajar investidores potenciais. A economia da cogeração é sensível ao nível dos preços da energia e à diferença entre o preço do combustível usado pelo motor principal e o valor da

eletricidade e do calor que é gerado.

Um estudo importante (Brizi et al., 2014) também foi feito comparando a eficiência do biogás e do gás natural em uma usina de cogeração de energia, e pelos dados, foi possível analisar que o biogás consegue trazer mais recursos e retorno financeiro pela sua maior produção de energia do que o gás natural, o que torna essa fonte de energia mais vantajosa dentro dos cenários existentes.

O parque industrial brasileiro tem alto potencial para utilização de sistemas de cogeração. Existem, atualmente, opções tecnológicas consolidadas no mercado e com diferentes soluções de aplicação para diversos processos industriais, inclusive para aplicação em pequena escala (microCHP), que oferecem economias da ordem de 20 a 50% em eletricidade e combustível. A economia final total vai depender das especificidades do projeto implementado.

O PotencializEE, é uma iniciativa de cooperação técnica Brasil-Alemanha que oferece suporte baseado no que há de mais moderno no mercado mundial, qualidade, credibilidade e segurança para sua empresa. Eles oferecem apoio técnico e econômico para implementação de projetos de eficiência energética em pequenas e médias indústrias do estado de São Paulo. A equipe conta com especialistas em eficiência energética industrial que são capazes de identificar as alternativas tecnológicas mais adequadas para a instalação em questão e indicam as tecnologias mais eficientes no mercado brasileiro.

O monitoramento do consumo de energia é importante para avaliar o desempenho do sistema de cogeração e identificar oportunidades de melhoria. Isso também ajuda a universidade avaliar periodicamente os custos e benefícios do sistema de cogeração para garantir que ele esteja atendendo às expectativas. O sistema de cogeração deve ser atualizado periodicamente para incorporar novas tecnologias e atender às necessidades da universidade.

Existem alguns estudos também que mostram alternativas de como é possível fazer melhorias do processo para obter melhores resultados. Algumas opções são fazer recirculação do sistema, incluir a utilização de nanopartículas no processo, uma técnica cara, mas que pode aumentar muito a eficiência do processo, utilizar estímulo elétrico dentro do reator de minivolts para melhorar os valores de geração de energia e várias outras técnicas que visam melhorar o funcionamento do reator para obter melhores resultados.

5.4 UFSCAR: RESULTADOS ESPERADOS

Considerando a realidade da UFSCar, é possível entender que esse é um sistema caro que necessita de muitos recursos, investimentos, manutenção e trabalho constante, para estar sempre atualizado com as legislações, leis e diretrizes. Além da instalação, esse acompanhamento também deve ser feito constantemente por técnicos e especialistas, para avaliação de rendimento, demanda e recursos disponíveis.

O aumento e avanço das tecnologias pode tornar os sistemas e equipamentos mais acessíveis devido a sua diminuição dos custos e disponibilidade de recursos. As futuras pesquisas devem apresentar melhores resultados de como fazer uma boa integração entre as redes de energia, um desafio grande até hoje, já que cada técnica apresenta suas limitações e vantagens diferentes. Um estudo mais abrangente incluindo modelagem e simulação também pode ser feito para que medidas de controle consigam identificar quando uma fonte de energia acaba e precisa de outra fonte para suprir a demanda.

O biogás usado em motores ou turbinas no sistema de cogeração de energia para produzir eletricidade e calor, também pode produzir hidrogênio, metanol e outros produtos químicos, como amônia, biocombustíveis a partir do tratamento de metano até perto de sua purificação e biofertilizantes, o que pode aumentar a receita da instalação e o retorno dos investimentos realizados, além de ajudar a desenvolver outros projetos.

Estudos de caso, como o Centro de Energia Sustentável em Bangalore, Índia, e o Parque de Energia Renovável de Güssing, Áustria, são apresentados no texto e mostram a aplicação prática e os benefícios da integração de várias tecnologias de energia renovável.

No caso da UFSCar, esse sistema também pode ser replicado com uma boa organização e investimentos. Conseguindo os recursos necessários para ser instalado e tendo uma boa logística da coleta de resíduos alimentares não só do Campus São Carlos, mas também de outros Campi, juntamente com a poda, é possível chegar a uma produção de mais de 7.101,7kWh, ou seja, 1% da demanda atual, que apesar de ter uma pequena representatividade no total de energia gasto, é um início para futuros investimentos e avanços dessa tecnologia.

Além disso, a energia térmica gerada também pode ter seu destino bem atribuído para aquecimento da água utilizada dentro do restaurante universitário, seja para esterilizar bandejas ou qualquer uso internamente, ou até mesmo destinada para o

hospital universitário próximo da região para lavagem e esterilização de roupas de cama ou qualquer outro instrumento. Outro destino seria direcionar o calor para o próprio sistema que tem sua energia aproveitada pelos equipamentos ou para o pré tratamento da biomassa utilizada ou até mesmo para a produção de outros combustíveis

6- CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados, é possível concluir que a cogeração de energia é uma prática frequentemente estudada devido a seus diversos benefícios ambientais, sociais e econômicos para diversas regiões do mundo e também como uma forma alternativa de fonte de energia sustentável e limpa.

Foi possível entender também que cada tecnologia aplicada está ligada ao local e às condições que vão ser utilizadas no sistema de cogeração, já que cada uma delas tem suas vantagens e limitações e que o ponto principal de todas elas é ter um bom monitoramento e controle do processo. Com esse controle é possível fornecer as melhores condições para o sistema, aumentando sua eficiência e conversão de energia.

Dentre os diversos desafios que essa tecnologia apresenta, uma opção foi estudar também a possibilidade de uma codigestão de resíduos orgânicos para que a fonte de energia não dependa apenas de uma única fonte orgânica, mas de várias, que podem ajudar na sua eficiência e para suprir suas demandas em momentos de alta necessidade de energia ou em momentos de baixa produção de resíduos alimentares.

Como o resultado apresentado pelos dados disponíveis não foi muito representativo frente a grande necessidade de energia que existe na universidade, é possível concluir que esse sistema sozinho não vai mudar a realidade existente hoje, porém, esse sistema juntamente com novas tecnologias que estão sendo estudadas e desenvolvidas e com outras fontes de energia limpa como a energia fotovoltaica que está iniciando suas instalações no Campus, é possível transformar a cogeração numa alternativa representativa na matriz energética da UFSCar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGDADEE, Amam Hossain et al. A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production. **Energy and Built Environment**, 2023.

PRABHAKAR, Vinay et al. Potential of biogas production from dung generated at dairy farms and Gaushalas in India. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v. 49, n. 7, p. 63-72, 2023.

ANGELIDAKI, I. and Ellegaard, L. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. **Status and Future Trends**, 2002

FARGHALI, Mohamed et al. Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy: a review. **Environmental chemistry letters**, v. 20, n. 5, p. 2853-2927, 2022.

INEE. Disponível em: <https://www.inee.org.br/>. Acesso em: 28 de jun. de 2024.

Programa PotencializeEE, 2023. Disponível em: <https://www.programa-potencializee.com.br/>. Acesso em: 4 de mai. de 2024.

DESAI, Jal et al Potential Impact of Flexible CHP on the Future Electric Grid in California. **Energy and Transportation Science Division**, 2020

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**, 2023.

MegaWhat.Energy. Disponível em <https://megawhat.energy/glossario>. Acesso em: 2 de ago. de 2024.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; MARTINS, Andre Luiz Silva. Introduction to cogeneration; Introducao a cogeraçao. 1997.

Mundo Educação. Disponível em <https://https://mundoeducacao.uol.com.br/>. Acesso em: 29 de jul. de 2024.

ROHRER, Anton. Comparação de geração combinada de calor e energia. **International Journal of Global Energy Issues**, v. 8, n. 4, p. 319-328, 1996.

Boletim DataCogen, 2019. Disponível em <https://www.cogen.com.br>. Acesso em: 18 de jul. de 2024.

CHEN, Chaoji; HU, Liangbing. Nanocellulose toward advanced energy storage devices: structure and electrochemistry. **Accounts of chemical research**, v. 51, n. 12, p. 3154-3165, 2018.

CELADOR, A. Campos; ODRIOZOLA, M.; SALA, J. M. Implications of the modelling of stratified hot water storage tanks in the simulation of CHP plants. **Energy conversion and management**, v. 52, n. 8-9, p. 3018-3026, 2011.

FRAGAKI, Aikaterini; MARKVART, Tom. Stand-alone PV system design: results using a new sizing approach. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 162-167, 2008.

STRECKIENĖ, Giedrė et al. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market. **Applied energy**, v. 86, n. 11, p. 2308-2316, 2009.

VIEGAS, Renan Alves et al. PIRÓLISE DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: UMA REVISÃO. 2015, p.15.

CHERNICHARO, C. A. L. Anaerobic Reactors. IWA Publishing, 2007

KARELLAS, Boukis I, Kontopoulos G. Development of an investment decision toll for biogas production from agricultural waste. **Renewable Sustainable Energy Rev** 2010.

SUAREZ, Eneko et al. Energy recovery from food waste and garden and park waste: Anaerobic co-digestion versus hydrothermal treatment and anaerobic co-digestion. **Chemosphere**, 2022.

ZHANG Siying et al. Multivariate insights into enhanced biogas production in thermophilic dry anaerobic co-digestion of food waste with kitchen waste or garden waste: Process properties, microbial communities and metagenomic analyses. **Bioresource Technology**, 2022.

Sabesp, 2016. Disponível em <http://www.revistadae.com.br/>. Acesso em 5 de ago. de 2024

DANIEL-GROMKE, Jaqueline et al. Biogas production and changes in soil carbon input - A regional analysis. **Chemie Ingenieur Technik**, 2018

KAPOOR R, Ghosh P, Tyagi B, Vijay VK, Vijay V, Thakur IS, et al. Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. **J Clean Prod**, 2020.

BAUER F., HULTEBERG C., PERSSON T., TAMM D., 2013. Biogas upgrading – Review of commercial.

WANG, Yang et al. A review of low and zero carbon fuel technologies: Achieving ship carbon reduction targets. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, p. 102762, 2022.

Boletim DataCogen, 2022. Disponível em <https://www.cogen.com.br>. Acesso em: 22 de jul. de 2024.

Canal Energia, 2017. Disponível em <https://www.canalenergia.com.br/>. Acesso em: 29 de jul. de 2024.

RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.031, DE 26 DE JULHO DE 2022 (ren20221031). Disponível em <https://www2.aneel.gov.br/>. Acesso em 6 de ago. de 2024.

WILLEGHEMS G, BUYSSE J. Improving the profitability of anaerobic digestion: is the public support framework compatible with participation in the day-ahead electricity market? **Renew Energy**, 2019.

BARTER Paul et al. Case study: Microgrid at Princeton University, 2015. Disponível em <https://www.csemag.com/articles/case-study-microgrid-at-princeton-university/>. Acesso em: 14 de jun. de 2024

LUZ-SILVEIRA J. et al. Thermoeconomic analysis of a cogeneration system of a university campus. **Applied Thermal Engineering**, 2002.

BIANCO, Vincenzo et al. Feasibility study of a cogeneration plant: the case of a processing

facility of the beverage sector. In: **ASMEATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment**. 2015. p. 17-20.

D'AQUINO, Camila A.; SANTOS, Samantha C.; SAUER, Ildo L. Biogas as an alternative source of decentralized bioelectricity for large waste producers: An assessment framework at the University of São Paulo. **Energy**, v. 239, p. 122326, 2022.

WESTRHOLM M, et al. Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology. **Bioresour Technol**, 2020.

BRIZI, Federico et al. Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 193-211, 2014.