

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET

Departamento de Engenharia de Química - DEQ

Trabalho de Graduação

**Avaliação Preliminar do Potencial de Implantação de Sistemas Híbridos de
Energia Sustentável na UFSCar: Integração entre Biogás e Energia Fotovoltaica**

Julia dos Santos

São Carlos, 2025

JULIA DOS SANTOS

**Potencial de Implantação de Sistemas Híbridos de Energia Sustentável na
UFSCar: Integração entre Biogás e Energia Fotovoltaica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes

São Carlos, 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha avó de consideração, Carmen Mendes Carrera, que nos deixou em fevereiro/2025.

AGRADECIMENTO

Agradeço, grandemente, à minha mãe e ao meu pai, Maria e Eronaldo, por sempre me oferecerem o melhor que puderam, com imenso amor, carinho e dedicação. Desde sempre, priorizaram minha educação e bem-estar, serei eternamente grata.

Ao meu padrasto Carlos, engenheiro químico que me apresentou a profissão e nunca mediu esforços para me ajudar em todos os momentos.

À minha família, que mesmo sem ter vivenciado a experiência universitária, nunca deixou de me apoiar, acreditar em mim e comemorar cada conquista como se fosse deles também, porque, de fato, é.

À minha amiga Débora, que está comigo desde o início dessa caminhada, em 2019: obrigada por dividir comigo tantos momentos importantes, por sua presença constante e por tudo o que ainda viveremos juntas. Ao Lucas, que entrou na minha vida em 2021 pela Enactus e desde então se tornou parte da minha história.

À Clara e à Larissa, obrigada por partilharem comigo não só a casa, mas também as conversas, as histórias e as risadas que tornaram a rotina mais leve e significativa.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte da minha trajetória, deixo aqui meu sincero agradecimento.

Por fim, agradeço a Profa. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes por me orientar nesse momento final da graduação.

RESUMO

Considerando a intensificação dos impactos decorrentes das mudanças climáticas e a consequente demanda por soluções energéticas sustentáveis, torna-se imperativo que instituições públicas, em especial as universidades, adotem práticas voltadas à mitigação de seus impactos ambientais. As universidades públicas, devido à sua extensa infraestrutura, elevado consumo energético e potencial de influência acadêmica e social, apresentam-se como ambientes estratégicos para a implementação de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, o presente Trabalho de Graduação tem como objetivo analisar preliminarmente, por meio de uma revisão bibliográfica, a implantação de um sistema híbrido de geração de energia no campus São Carlos da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), integrando energia solar fotovoltaica e biogás proveniente do aproveitamento de resíduos orgânicos do restaurante universitário (RU) e podas de plantas. A metodologia adotada consistiu na pesquisa e análise de literatura científica nacional e internacional, envolvendo estudos sobre ambas as tecnologias de forma isolada, bem como suas aplicações em sistemas híbridos. Os dados obtidos foram confrontados com a realidade energética do campus, possibilitando a identificação de variáveis críticas e a proposição de estratégias para otimização da geração de energia. Os resultados apontam o potencial da integração dessas fontes renováveis como uma alternativa viável e sustentável para o contexto universitário, contribuindo para a redução da dependência de fontes não renováveis e promovendo a eficiência energética institucional.

Palavras chaves: sistema híbrido de energia, energia fotovoltaica, biogás, universidade.

ABSTRACT

Considering the intensification of the impacts caused by climate change and the consequent demand for sustainable energy solutions, it becomes imperative for public institutions, particularly universities, to adopt practices aimed at mitigating their environmental impacts. Public universities, due to their extensive infrastructure, high energy consumption, and academic and social influence, are strategic environments for the implementation of renewable energy generation systems. In this context, the present Undergraduate Thesis aims to preliminarily analyze, through a literature review, the implementation of a hybrid energy generation system on the São Carlos campus of the Federal University of São Carlos (UFSCar), integrating photovoltaic solar energy and biogas produced from the utilization of organic waste from the university restaurant (RU) and plant prunings. The methodology adopted consisted of the research and analysis of national and international scientific literature, covering studies on both technologies individually, as well as their applications in hybrid systems. The data obtained were compared with the current energy scenario of the campus, enabling the identification of critical variables and the proposal of strategies to optimize energy generation. The results highlight the potential of integrating these renewable sources as a viable and sustainable alternative for the university context, contributing to the reduction of dependence on non-renewable sources and promoting institutional energy efficiency.

Key words: hybrid energy systems, photovoltaic energy, biogas, university.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1 Fontes Renováveis.....	9
2.2 Energia Fotovoltaica.....	10
2.3 Biogás.....	14
2.4 Sistemas híbridos.....	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1. Apresentação de estudos de caso relacionados a sistemas híbridos de energia.....	27
4.1.1 Sistema híbrido fotovoltaico e de biogás para um sistema elétrico estável (Nassereddine et al., 2024).....	27
4.1.2 Otimização de um sistema híbrido de Biogás e Fotovoltaico para o abastecimento sustentável de energia em áreas rurais (Roldán-Porta et al., 2021).....	31
4.1.3 Análise do Impacto da Geração Fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás (Castro et al., 2020).....	34
4.1.4 Potencial de Produção de Biogás através da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos do Restaurante Universitário da UFSC (Proença, 2022).....	35
4.2. Panorama UFSCar.....	37
4.3. Geração de Energia.....	40
4.3.1. Usina Fotovoltaica.....	40
4.3.2 Biogás.....	42
4.3.3 Análise dos cenários apresentados.....	44
4.3.4 Sistema Híbrido: Integração de Energia Fotovoltaica e Biogás.....	46
4.4. Alternativas para aumentar a geração de energia no contexto da UFSCar.....	46
4.4.1 Usinas Fotovoltaicas.....	46
4.4.2 Biogás.....	50
4.4.3 Sistema Híbrido: Integração do Biogás com Energia Fotovoltaica.....	52
5. CONCLUSÃO.....	53
6. REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA), mundialmente, mais da metade da geração de energia elétrica ainda provém de fontes não renováveis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural. Esses combustíveis fósseis, formados ao longo de milhões de anos a partir da decomposição de matéria orgânica, são atualmente responsáveis por mais de 60% da eletricidade gerada no planeta. Apesar da alta densidade energética e da ampla disponibilidade observada nas últimas décadas, essas fontes apresentam duas limitações críticas: a escassez inevitável, decorrente de sua natureza finita, e os impactos ambientais resultantes de sua extração e combustão. A queima de combustíveis fósseis constitui a principal fonte antropogênica de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e outros gases de efeito estufa, diretamente associados ao aquecimento global e às mudanças climáticas aceleradas. Essas mudanças vêm se manifestando por meio de eventos extremos cada vez mais frequentes, como ondas de calor, secas prolongadas, elevação do nível do mar e inundações severas, afetando diretamente a segurança hídrica, alimentar e energética de diversas regiões.

As transformações recentes no setor energético refletem a necessidade urgente de enfrentar as mudanças climáticas, em alinhamento com os compromissos internacionais assumidos desde o Acordo de Paris (Castro et al., 2024). A dependência histórica de combustíveis fósseis, embora tenha garantido crescimento econômico nas últimas décadas, tornou-se insustentável diante de seus efeitos ambientais, sociais e geopolíticos. Além de responder por grande parte das emissões de gases de efeito estufa, esse modelo concentra-se em recursos finitos, sujeitos a volatilidade de preços e a riscos de abastecimento que comprometem a segurança energética de diversos países.

Nesse cenário, a transição para fontes renováveis não se configura apenas como alternativa desejável, mas como uma exigência estrutural para garantir resiliência econômica, estabilidade no fornecimento e mitigação dos impactos ambientais. Ainda assim, esse processo enfrenta desafios importantes: a adaptação das cadeias produtivas e da infraestrutura energética já consolidada. Esses obstáculos evidenciam que a transição energética, embora urgente, demanda planejamento estratégico e inovação tecnológica capazes de superar as limitações do modelo tradicional (Castro et al., 2024).

Nesse sentido, os sistemas híbridos de geração de energia despontam como alternativas promissoras. Ao integrar diferentes fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica e o biogás, esses sistemas proporcionam maior estabilidade no fornecimento, melhor aproveitamento de recursos locais e redução das emissões poluentes associadas à geração convencional.

A viabilidade da implantação desses sistemas híbridos torna-se ainda mais evidente quando considerada em instituições públicas de ensino e pesquisa, como a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A universidade possui uma infraestrutura ampla e diversificada, localizada em um território extenso e com alta incidência solar ao longo do ano. Além disso, a rotina acadêmica, administrativa e de serviços gera consideráveis volumes de resíduos orgânicos, provenientes principalmente de refeitórios, laboratórios e áreas verdes. Apenas o Restaurante Universitário (RU) da UFSCar, por exemplo, serviu cerca de 850.723 refeições no ano de 2024 (SPDI, 2024), gerando uma alta quantidade de resíduos.

Apesar do evidente potencial dos sistemas híbridos, ainda existem lacunas significativas na literatura e na prática quanto à sua aplicação em ambientes institucionais. A viabilidade técnico-econômica de combinações como PV/biogás/bateria já foi demonstrada em comunidades rurais, como no interior de Gana, onde apresentaram desempenho superior em termos de custo e emissões em comparação a alternativas convencionais (Appiah; Kwaku; Kwadwo, 2022). De forma semelhante, em aplicações industriais no Brasil, como em uma indústria de laticínios no Nordeste, sistemas híbridos fotovoltaico-biogás mostraram-se energeticamente e economicamente viáveis, gerando aproximadamente 453,26 kWh/dia com fotovoltaica e 612 kWh/dia com biogás, com retorno do investimento estimado em até dois anos (Pertile, 2020). No entanto, ainda são escassos os estudos que abordem especificamente a implementação desses sistemas em universidades brasileiras. O campus da UFPE constitui uma das raras exceções, com estimativa de produção diária de 166 m³ de biogás e cerca de 360 kWh/dia de energia gerada a partir de resíduos alimentares (Lima et al., 2024). Mesmo assim, não há informações consolidadas sobre a logística de coleta e triagem desses resíduos, tampouco avaliações detalhadas do potencial de substituição energética no cotidiano institucional, evidenciando a necessidade de estudos mais aprofundados.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação preliminar do potencial de utilização conjunta das fontes de energia fotovoltaica e biogás no campus São Carlos da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Buscou identificar, com base em

revisão bibliográfica e em dados institucionais secundários, as características essenciais dessas tecnologias, suas possibilidades de aplicação no contexto universitário e os fatores que influenciam seu desempenho quando integradas em sistemas híbridos. Como meta orientadora, o estudo propôs estimar se a combinação dessas fontes poderia contribuir para atingir cerca de 50% da demanda anual de energia elétrica da universidade, reduzindo de forma equivalente sua dependência da rede pública. Além disso, foram explorados cenários iniciais de geração energética e discutidas oportunidades, limitações e desafios técnicos relacionados à expansão do uso de fontes renováveis na instituição, contribuindo para o desenvolvimento de futuras análises mais aprofundadas de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fontes Renováveis

As fontes de energia renovável são aquelas que utilizam recursos naturais capazes de se regenerar continuamente, sendo, portanto, praticamente inesgotáveis. Além de reduzir a dependência de matérias-primas não renováveis, essas fontes contribuem significativamente para a diminuição dos impactos ambientais. Entre as principais energias renováveis destacam-se a solar, eólica, hidráulica, do mar, geotérmica e a biomassa. A substituição dos combustíveis fósseis por essas alternativas é viável e vantajosa, pois além de sua disponibilidade praticamente ilimitada, apresentam baixo impacto ambiental, sem comprometer o balanço térmico ou a composição atmosférica do planeta (Nascimento; Alves, 2023).

Em contextos institucionais, como universidades, hospitais e órgãos públicos, a adoção dessas fontes energéticas assume um papel estratégico ainda mais relevante. Essas organizações possuem alta demanda elétrica e geram quantidades significativas de resíduos orgânicos, oferecendo condições ideais para a implementação de sistemas renováveis que combinem geração limpa e gestão de resíduos. Nesse cenário, destacam-se particularmente a energia solar fotovoltaica e o biogás, que, além de complementaridade operacional, proporcionam oportunidades de pesquisa aplicada, educação ambiental e demonstração prática de sustentabilidade.

A energia solar, que no Brasil atingiu mais de 52 GW de capacidade instalada em 2025, tem se consolidado como uma das tecnologias mais promissoras para o abastecimento de instituições devido à abundância da radiação solar no território nacional e à redução dos custos de implantação nos últimos anos (PV MAGAZINE, 2025). Além de reduzir os gastos com energia elétrica, a instalação de sistemas fotovoltaicos em universidades, hospitais e órgãos públicos contribui para o cumprimento de metas institucionais de sustentabilidade, além de servir como plataforma para pesquisas aplicadas, educação ambiental e promoção de inovação tecnológica (Silva et al., 2024). Em paralelo, o biogás, produzido a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, apresenta-se como alternativa eficiente para instituições que geram grandes quantidades de resíduos alimentares, dejetos ou resíduos de podas e jardinagem, possibilitando a produção de energia elétrica e térmica de forma contínua. Essa fonte, ao mesmo tempo em que supre a demanda energética, atua como ferramenta de gestão ambiental, reduzindo emissões de metano e diminuindo a pressão sobre aterros sanitários (Machado et al., 2023).

No Brasil, o desenvolvimento dessas tecnologias vem ganhando relevância no ambiente acadêmico e institucional. Revisões recentes sobre a expansão da energia solar no país destacam a importância das instituições de ensino e pesquisa como protagonistas na disseminação dessa tecnologia, tanto pelo caráter educativo quanto pelo potencial de inovação em modelos de negócio e eficiência energética. Da mesma forma, estudos sobre biogás evidenciam que universidades e centros de pesquisa são atores-chave no avanço tecnológico e na viabilização de sistemas de digestão anaeróbia, especialmente quando associados a programas de sustentabilidade e de gestão de resíduos sólidos. Nesse contexto, a implementação de sistemas renováveis em instituições não apenas supre demandas energéticas de forma limpa e econômica, mas também atua como vitrine para a sociedade, reforçando a importância da transição energética e da construção de uma matriz mais sustentável e resiliente.

2.2 Energia Fotovoltaica

A energia proveniente do Sol pode ser convertida diretamente em eletricidade por meio do chamado efeito fotovoltaico, um fenômeno físico que permite transformar a luz solar em energia elétrica de forma limpa. Os sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos capazes de captar a radiação solar e, a partir dela, gerar corrente elétrica contínua. Essa eletricidade pode ser utilizada imediatamente por equipamentos elétricos conectados à rede

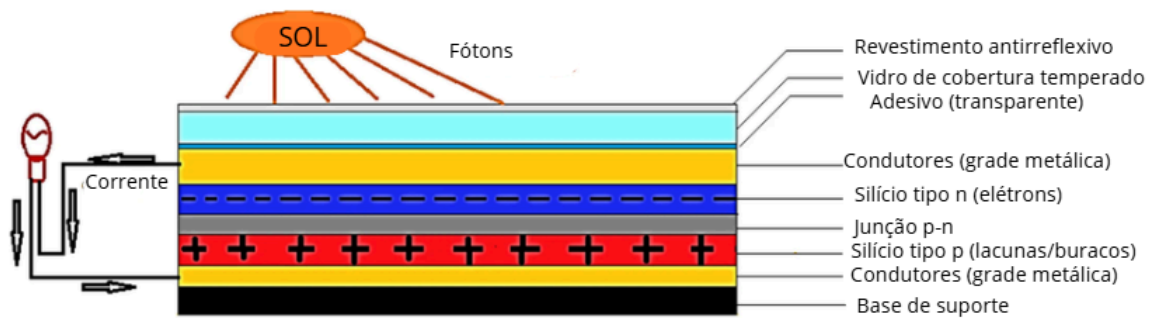
ou armazenada em baterias para uso posterior, graças à atuação de controladores e inversores que fazem o gerenciamento e a conversão da energia gerada (Villalva, 2012).

As células fotovoltaicas representam elementos fundamentais dos módulos solares, sendo responsáveis pela conversão direta da radiação proveniente do Sol em energia elétrica. Esse fenômeno físico ocorre quando fótons da luz incidente interagem com um material semicondutor, fornecendo energia suficiente para excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, resultando na formação de pares elétron-lacuna e, conseqüentemente, na geração de corrente elétrica (Machín *et al.*, 2024; Sharma, 2025).

De modo geral, as células fotovoltaicas são produzidas a partir de silício cristalino, material amplamente utilizado devido à sua abundância na crosta terrestre, estabilidade química e propriedades eletrônicas adequadas à conversão fotovoltaica. O princípio de funcionamento dessas células baseia-se na criação de uma junção p-n, formada pela dopagem do semicondutor com impurezas de diferentes valências, fósforo para o tipo-n, que fornece elétrons livres, e boro para o tipo-p, que gera lacunas. Essa diferença de dopagem resulta na formação de um campo elétrico interno permanente na interface entre as duas regiões, o qual atua na separação e direcionamento dos portadores de carga, evitando a recombinação e possibilitando a geração de uma diferença de potencial elétrico (Sharma, 2025; Al-Ali; Olabi; Mahmoud, 2024).

Quando a luz solar incide sobre a célula, fótons cujo valor energético é igual ou superior à largura da banda proibida do material (aproximadamente 1,1 eV para o silício) são absorvidos, promovendo a transição de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Essa transição cria pares elétron-lacuna, que, por ação do campo elétrico da junção p-n, são rapidamente separados: os elétrons migrando para o lado tipo-n e as lacunas para o lado tipo-p, evitando recombinação imediata e estabelecendo uma diferença de potencial (Machín *et al.*, 2024). Dispondo-se um circuito externo entre as camadas, os elétrons fluem do lado n para o lado p, gerando corrente elétrica contínua como ilustrado na figura 1. O comportamento elétrico dessa célula pode ser representado por um modelo de diodo excitado por corrente dependente da luz, em que parâmetros como resistência série, resistência paralela, corrente de saturação e fator de idealidade do diodo exercem influência sobre a curva corrente-tensão da célula (Sharma, 2025).

Figura 1: Célula Fotovoltaica e a geração de corrente elétrica



Fonte: Adaptado de Sharma, 2025

A eficiência dessa conversão é condicionada por diversos fatores operacionais, tais como a intensidade da radiação solar incidente, a temperatura de operação dos módulos (cujo aumento resulta em queda da tensão de circuito aberto e, por conseguinte, da eficiência), o ângulo de incidência da luz sobre a célula e a eficiência quântica do material semiconductor utilizado (Machín et al., 2024). Em resposta às limitações das células convencionais de silício, nos últimos anos emergiram tecnologias avançadas, como células de filme-fino baseadas em CdTe (telureto de cádmio) e CIGS (seleneto de cobre, índio e gálio), bem como células de perovskita, que já demonstram altas eficiências em laboratório com custos potenciais menores (Shah, 2023; Al-Ali; Olabi; Mahmoud, 2024). Tais inovações visam elevar a eficiência de conversão, reduzir custos de produção e ampliar a aplicação de sistemas fotovoltaicos como fonte sustentável e acessível de eletricidade.

Os sistemas fotovoltaicos (FV) podem ser classificados segundo sua conexão com a rede elétrica, grau de autonomia e forma de operação. Essa classificação é essencial para compreender o comportamento, a aplicabilidade e a viabilidade técnica e econômica de cada tipo de sistema. As três categorias principais são: sistemas conectados à rede (on-grid), sistemas isolados (off-grid) e sistemas híbridos, que integram a energia solar a outras fontes de geração. Ressalta-se que os sistemas híbridos podem operar tanto conectados quanto desconectados da rede elétrica, dependendo do projeto e das necessidades energéticas da instalação.

Os sistemas conectados à rede, também chamados de sistemas grid-tie ou on-grid, são aqueles que operam interligados ao sistema elétrico convencional. Nesse tipo de configuração, a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é utilizada preferencialmente no

consumo local, enquanto o excedente é injetado na rede por meio de um inversor sincronizado com os parâmetros da concessionária. O sistema de compensação de energia elétrica, regulamentado por políticas públicas como a Resolução Normativa nº 1.059/2023 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), permite que o excedente de energia injetado na rede seja convertido em créditos, compensando o consumo em períodos noturnos ou nublados. De acordo com Luque e Hegedus (2011), esses sistemas são os mais utilizados em áreas urbanas devido à sua simplicidade, menor custo inicial por não exigirem banco de baterias e boa viabilidade econômica em contextos onde a tarifa de energia elétrica é elevada.

Apesar de sua popularidade, os sistemas on-grid apresentam limitações operacionais. Um dos principais problemas é a sua inoperância em situações de queda da rede elétrica, mesmo que haja irradiação solar disponível. Isso ocorre por razões de segurança, de forma a evitar o chamado "efeito ilha", que poderia colocar em risco os trabalhadores de manutenção da rede (Green et al., 2024). Além disso, esses sistemas dependem de regulamentações locais específicas e requerem componentes de proteção e controle, como disjuntores, chave seccionadora e sistemas anti-ilhamento, que garantem a conformidade com as normas técnicas e de segurança.

Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos isolados da rede, ou off-grid, são projetados para operar de forma completamente autônoma, suprindo a demanda energética de locais sem acesso à infraestrutura elétrica convencional. São sistemas amplamente utilizados em áreas remotas, como zonas rurais, comunidades indígenas, ilhas e regiões de floresta, especialmente na região Amazônica brasileira. Para garantir a continuidade do fornecimento energético, mesmo em períodos sem insolação, esses sistemas incorporam bancos de baterias, geralmente de chumbo-ácido ou íon-lítio, além de controladores de carga e inversores específicos para operação autônoma (Nyamathulla; Dhanamjayulu, 2024).

O dimensionamento desses sistemas requer uma análise detalhada do perfil de carga, considerando a variação diária e sazonal do consumo e da disponibilidade solar. A presença de um sistema de armazenamento eficiente é fundamental para o sucesso dos sistemas off-grid, sendo que o custo e a vida útil das baterias são os principais fatores limitantes dessa tecnologia. Além disso, a manutenção periódica do banco de baterias, especialmente em regiões de difícil acesso, pode impactar a viabilidade do projeto. No entanto, a possibilidade de levar eletricidade a populações tradicionalmente excluídas da matriz energética é uma das

grandes contribuições desse tipo de sistema, conforme destacado nos resultados do programa Luz para Todos (MMA, 2020).

A nível global, a matriz energética vem passando por mudanças profundas, impulsionadas pela necessidade de diversificação das fontes e pela busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica tem se destacado por sua grande disponibilidade, baixo impacto ambiental e pela constante redução nos custos de implantação e manutenção, o que a torna uma das principais apostas para o futuro da energia mundial (IEA, 2023).

No contexto brasileiro, esse crescimento tem sido ainda mais expressivo. A elevada incidência solar em boa parte do território nacional, combinada com políticas públicas de incentivo e programas de financiamento, tem impulsionado a adoção da tecnologia fotovoltaica em diferentes escalas. Dados recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) indicam que o Brasil superou a marca de 40 gigawatts de capacidade instalada em 2024, posicionando-se entre os principais mercados emergentes na área de geração distribuída e centralizada.

2.3 Biogás

O biogás é um combustível renovável na forma gasosa, produzido pela digestão anaeróbia (DA) de resíduos orgânicos e biomassa, como dejetos animais, restos de alimentos, resíduos agroindustriais, lodos de estações de tratamento e materiais lignocelulósicos. Nesse processo, consórcios microbianos atuam na ausência de oxigênio, transformando a matéria orgânica principalmente em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de gases como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e amônia (NH_3) (Gadirli et al., 2024).

A concentração de metano, o componente energético do biogás, pode variar entre 50% e 70%, enquanto o CO_2 geralmente compõe de 30% a 50% da mistura. (Appels et al., 2008).

A elevada concentração de metano (CH_4) no biogás é essencial para sua qualidade energética, uma vez que o metano é o principal componente responsável pelo maior valor calorífico do gás. O poder calorífico inferior (PCI) do biogás, que geralmente varia entre 16 e 28 MJ/m^3 , depende diretamente do percentual de metano presente na mistura gasosa. Esse valor permite

que o biogás seja utilizado de forma eficiente em processos de combustão para a geração de energia térmica, como em caldeiras industriais, aquecedores e fornos, bem como em motores de combustão interna e micro turbinas para geração de energia elétrica (IEA, 2023).

Além do uso direto, o biogás pode passar por processos de purificação para remoção do dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), vapor d'água e outras impurezas que podem comprometer seu uso em equipamentos sensíveis ou reduzir seu valor energético.

A remoção do CO_2 , em particular, aumenta a concentração relativa de metano, transformando o biogás em biometano, um gás com propriedades semelhantes às do gás natural convencional, tanto em poder calorífico quanto em composição. O biometano pode ser utilizado como combustível veicular (GNV - Gás Natural Veicular) ou ser injetado diretamente na rede pública de distribuição de gás, integrando-se à matriz energética com menor impacto ambiental (Persson et al., 2019).

A purificação do biogás para produção de biometano abre novas possibilidades para a utilização desse recurso, incluindo o uso em veículos, onde substitui combustíveis fósseis e contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a injeção de biometano na rede de gás natural permite uma distribuição mais ampla e flexível, facilitando o acesso a fontes renováveis de energia sem a necessidade de grandes mudanças na infraestrutura existente (IEA Bioenergy, 2019).

Do ponto de vista bioquímico, a formação do biogás por digestão anaeróbia é um processo com etapas que depende da interação sinérgica entre diferentes comunidades microbianas que atuam em sequência metabólica. Esse processo ocorre naturalmente em ambientes sem oxigênio e pode ser reproduzido de forma controlada em biodigestores. As quatro etapas principais da digestão anaeróbia são: hidrólise, responsável pela quebra de macromoléculas complexas; acidogênese, que converte os produtos hidrolisados em ácidos graxos voláteis, álcoois e gases; acetogênese, que gera principalmente acetato, H_2 e CO_2 ; e metanogênese, etapa final em que arqueias transformam os substratos intermediários em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (Ardolino et al., 2021).

A primeira fase, denominada hidrólise, é considerada a etapa limitante da digestão anaeróbia, pois envolve a degradação enzimática de macromoléculas complexas em compostos mais simples e solúveis. Nesse estágio, bactérias hidrolíticas secretam enzimas extracelulares, como celulasas, proteases e lipases, que convertem carboidratos complexos

(celulose e amido) em monossacarídeos, lipídios em ácidos graxos de cadeia longa e proteínas em aminoácidos. Esses produtos solúveis formam a base para as reações subsequentes, sendo essenciais para o desenvolvimento das populações microbianas das fases seguintes (Neri et al., 2023).

Na sequência, ocorre a acidogênese, etapa caracterizada pela fermentação dos compostos hidrolisados por bactérias acidogênicas. Nessa fase, os monossacarídeos, aminoácidos e ácidos graxos são convertidos em ácidos orgânicos voláteis (AGVs), como ácido acético, butírico e propiônico, além de álcoois, H_2 , CO_2 e NH_3 (Neri et al., 2023).

A etapa seguinte, a acetogênese, envolve a oxidação anaeróbia dos produtos formados na acidogênese. Nesse estágio, bactérias acetogênicas obrigatórias convertem os ácidos graxos voláteis e álcoois em acetato, H_2 e CO_2 , que servirão de substrato direto para a produção de metano na fase final. A acetogênese é metabolicamente delicada, pois depende da remoção constante de hidrogênio pelas arqueias metanogênicas para que as reações termodinamicamente desfavoráveis possam ocorrer. Essa interdependência entre as populações acetogênicas e metanogênicas é crucial para a estabilidade e o rendimento da digestão anaeróbia (Neri et al., 2023).

Por fim, a metanogênese é a etapa responsável pela formação do metano (CH_4), realizada por arqueias metanogênicas que utilizam os produtos intermediários, principalmente acetato, H_2 e CO_2 para gerar o biogás. Existem duas principais rotas metabólicas nesse estágio: a metanogênese acetoclástica, em que o acetato é dividido em CH_4 e CO_2 , e a metanogênese hidrogenotrófica, na qual o CO_2 é reduzido por H_2 para formar CH_4 (Neri et al., 2023).

A eficiência da digestão anaeróbia depende fortemente das condições operacionais aplicadas ao sistema, visto que os microrganismos responsáveis por cada etapa apresentam diferentes sensibilidades a fatores ambientais. Entre os principais parâmetros de controle destacam-se o pH, a temperatura, a relação carbono/nitrogênio (C/N) e o tempo de retenção hidráulica (TRH), que em conjunto determinam a estabilidade do processo e o rendimento na produção de biogás.

O pH é um dos fatores mais críticos, pois regula a atividade enzimática e o equilíbrio entre os grupos microbianos em cada fase da digestão. Valores entre 6,5 e 7,5 são considerados ideais para manter a estabilidade do sistema, uma vez que desvios para valores

mais baixos tendem a favorecer a acidogênese em detrimento da metanogênese, resultando no acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) e consequente inibição das bactérias metanogênicas (Wang et al., 2019). A manutenção do pH está diretamente associada à capacidade tampão do meio, influenciada pela alcalinidade e pela concentração de amônia livre.

A temperatura é outro parâmetro determinante para o sucesso da digestão anaeróbia, influenciando tanto a taxa metabólica dos microrganismos quanto a solubilidade dos substratos. O processo pode ocorrer em três faixas principais: psicrófila (15–25 °C), mesofílica (30–40 °C) e termofílica (50–60 °C). Em condições mesofílicas, há maior estabilidade microbiana e resistência a variações de carga orgânica, enquanto o regime termofílico proporciona maior velocidade de reação, mas requer maior controle operacional devido à sensibilidade das comunidades microbianas (TIAN et al., 2018). Assim, a escolha da faixa térmica deve equilibrar produtividade e estabilidade, considerando o tipo de substrato e as condições de operação do biodigestor.

A relação C/N exerce papel essencial na nutrição microbiana e no equilíbrio do processo. Relações muito altas ($C/N > 35$) indicam excesso de carbono e deficiência de nitrogênio, limitando o crescimento bacteriano, por outro lado, relações muito baixas ($C/N < 15$) levam ao acúmulo de amônia, que pode ser tóxica para as arqueias metanogênicas. Estudos sugerem que uma faixa ideal de C/N entre 20 e 30 favorece a produção de metano e reduz o risco de inibição, especialmente quando os substratos de origem agroindustrial ou alimentar apresentam grande variação na composição (Sawatdeenarunat et al., 2015).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) define o período em que o substrato permanece no reator e, portanto, o tempo disponível para a degradação da matéria orgânica. TRHs curtos podem resultar em lavagem de biomassa e em digestão incompleta, enquanto tempos excessivamente longos diminuem a eficiência volumétrica do reator. Em digestores contínuos, a otimização do TRH deve considerar a carga orgânica volumétrica (COV), o tipo de substrato e a temperatura operacional, uma vez que tempos adequados favorecem a estabilização do processo e o aumento do rendimento de biogás (Ghaedi et al., 2024).

De forma integrada, as variáveis operacionais atuam de maneira sinérgica, e o sucesso da digestão anaeróbia depende do controle simultâneo desses fatores. A manutenção de condições ideais de pH, temperatura, C/N e TRH garante um ambiente propício ao equilíbrio

entre as populações microbianas, evitando falhas no processo e maximizando a conversão de matéria orgânica em metano. Ajustes finos desses parâmetros, associados a monitoramento contínuo, são fundamentais para alcançar alta eficiência energética e estabilidade operacional em sistemas de digestão anaeróbia.

A produção de biogás depende diretamente da natureza e da composição do substrato utilizado, pois isso influencia a eficiência da digestão anaeróbia, a produção de metano e a estabilidade do processo. No quadro 1, temos os principais tipos de substratos que incluem resíduos agrícolas e lignocelulósicos, resíduos animais e resíduos urbanos e industriais, sendo comum a utilização de co-digestão para otimizar o processo.

Quadro 1: Tipos de resíduos utilizados na produção de biogás

Categoria de resíduo	Exemplos	Vantagens	Principais limitações
Resíduos agrícolas e lignocelulósicos	Palha, bagaço de cana, casca de arroz, resíduos vegetais	Abundância; baixo custo; alto teor de carbono	Baixa biodegradabilidade; elevada relação C/N; necessidade de pré-tratamento
Resíduos de origem animal	Esterco bovino, suíno, aves e piscicultura	Alta biodegradabilidade; produção estável; digestato fertilizante	Risco de patógenos; odores; possível inibição por amônia
Resíduos agroindustriais	Etanol, laticínios, matadouros, frigoríficos	Alto potencial metanogênico	Elevada carga orgânica; risco de acidificação
Resíduos urbanos e de saneamento	Restos de alimentos, lodo de ETE, resíduos alimentícios	Produção rápida de biogás; ampla disponibilidade	Heterogeneidade; presença de contaminantes
Codigestão anaeróbia	Combinação de diferentes resíduos	Maior rendimento e estabilidade do processo	Necessidade de compatibilidade entre substratos

Fonte: Elaboração própria com base em Sawatdeenarunat et al. (2015), Arsova (2010), Mata-Alvarez et al. (2014), Raposo et al. (2011), Tian et al. (2018), Wang et al. (2019), Sangubotla et al. (2025) e Singh et al. (2023).

2.4 Sistemas híbridos

Define-se sistema híbrido como sendo aquele que utiliza mais de uma fonte primária de energia, dependendo da disponibilidade dos recursos, para gerar e distribuir energia elétrica de forma otimizada e com custos mínimos, dada a capacidade de uma fonte suprir a falta temporária de outra, permitindo assim que o mesmo opere com o mínimo de interrupções (Barbosa, 2006).

Os sistemas híbridos de energia surgem como uma solução promissora para atender à crescente demanda por fontes renováveis, garantindo simultaneamente estabilidade, segurança energética e sustentabilidade ambiental. Estes sistemas combinam duas ou mais fontes de energia, geralmente renováveis, como solar fotovoltaica, eólica e biomassa, com fontes de armazenamento ou apoio, como baterias ou geradores a diesel, permitindo uma operação mais confiável e contínua, mesmo em condições de variabilidade da fonte principal. A principal vantagem dos sistemas híbridos é sua capacidade de compensar a intermitência de fontes renováveis interligando tecnologias com perfis complementares de geração, o que se traduz em maior eficiência energética e redução da dependência de combustíveis fósseis.

O interesse por esses sistemas tem crescido especialmente em regiões isoladas ou remotas, onde a expansão da rede elétrica convencional é economicamente inviável. Nesses casos, a integração de tecnologias como painéis fotovoltaicos e sistemas de biogás ou turbinas eólicas possibilita o abastecimento contínuo com significativa redução de custos operacionais a longo prazo. Além disso, os sistemas híbridos são cada vez mais utilizados em áreas urbanas e industriais como forma de otimizar a matriz energética local, diversificar fontes e diminuir a pegada de carbono, atendendo aos compromissos de transição energética e descarbonização (Luna-Rubio et al., 2012).

No que diz respeito ao planejamento e dimensionamento desses sistemas, é essencial considerar uma análise integrada que avalie o recurso energético disponível (irradiação solar, velocidade do vento, disponibilidade de biomassa), o perfil de consumo, os custos de instalação e operação, bem como a viabilidade econômica ao longo da vida útil do sistema. Modelos computacionais e algoritmos de otimização multicritério vêm sendo amplamente empregados para definir a configuração ideal de cada sistema híbrido, com o objetivo de alcançar o menor custo nivelado de eletricidade, garantir confiabilidade e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Um dos arranjos mais estudados é a combinação de sistemas fotovoltaicos com biodigestores a biogás e banco de baterias. A integração de energia fotovoltaica (PV) e biogás em sistemas híbridos representa uma estratégia promissora para garantir fornecimento energético contínuo, confiável e sustentável, aproveitando as características complementares de cada fonte. A geração fotovoltaica depende diretamente da irradiação solar, apresentando variabilidade diária e sazonal, com produção reduzida à noite ou em dias nublados. Por outro lado, a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos (resíduos agrícolas, dejetos animais e resíduos urbanos) ocorre de forma relativamente constante, podendo ser ajustada para suprir demanda elétrica fora do período de insolação (Bagdadee et al., 2024; Nassereddine et al., 2024).

Essa complementaridade permite que os picos de geração fotovoltaica coincidam com o consumo diurno, enquanto o biogás pode ser utilizado para gerar eletricidade à noite ou em períodos de baixa irradiância, garantindo estabilidade na oferta de energia e reduzindo a necessidade de armazenamento em baterias de grande capacidade, que aumentam o custo do sistema. Além disso, sistemas híbridos podem ser configurados para cogeração, aproveitando o calor residual do biogás para aquecimento de processos industriais, estufas agrícolas ou aquecimento de digestores, aumentando a eficiência energética global (Bagdadee et al., 2024).

Outro ponto importante é a redução de emissões de gases de efeito estufa. A PV gera eletricidade limpa diretamente da radiação solar, enquanto o biogás substitui combustíveis fósseis e permite o reaproveitamento de resíduos orgânicos que, se descartados inadequadamente, liberariam metano para a atmosfera. Assim, a integração dessas fontes contribui para a economia circular, o aproveitamento de resíduos e a mitigação de impactos ambientais (Nassereddine et al., 2024).

Outro elemento-chave nos sistemas híbridos modernos é o uso de tecnologias de controle e automação. O gerenciamento inteligente da energia, com base em sensores e algoritmos de previsão da geração e demanda, permite maior autonomia e otimização do fluxo energético entre as diferentes fontes e os sistemas de armazenamento. A utilização de inversores híbridos, sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e medidores inteligentes também contribui para o controle em tempo real, a redução de perdas e o aumento da resiliência da microrede (Guerrero et al., 2011).

O avanço dos sistemas híbridos de geração de energia, como a integração de energia fotovoltaica (PV) e biogás, está diretamente relacionado ao desenvolvimento de políticas públicas, marcos regulatórios e mecanismos de incentivo econômico que favoreçam sua implementação. No Brasil, programas federais e estaduais têm criado condições favoráveis para a expansão desses sistemas, especialmente em regiões isoladas ou com baixa confiabilidade de fornecimento da rede elétrica convencional. Um exemplo é o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL, que financia projetos de geração distribuída e tecnologias híbridas, permitindo testes em escala real e desenvolvimento de soluções adaptadas às condições locais (MME, 2022).

Além disso, iniciativas estaduais, como linhas de crédito específicas e incentivos fiscais, vêm estimulando pequenos e médios empreendedores, cooperativas e comunidades rurais a adotarem sistemas híbridos. Esses incentivos incluem redução de impostos sobre equipamentos renováveis, tarifas diferenciadas para micro e minigeração distribuída e programas de capacitação técnica para operação e manutenção de microrredes híbridas.

Do ponto de vista estratégico, a expansão de sistemas híbridos é vista como essencial para a universalização do acesso à energia, sobretudo em regiões remotas da Amazônia, Nordeste e áreas rurais do país, onde a conexão à rede elétrica é limitada ou economicamente inviável. Ao mesmo tempo, esses sistemas contribuem para o cumprimento das metas climáticas nacionais, alinhando-se às obrigações do Brasil no Acordo de Paris, promovendo redução de emissões de gases de efeito estufa e aumentando a participação de fontes renováveis na matriz energética (MME, 2022).

Nesse contexto de fortalecimento das políticas públicas, incentivos econômicos e estratégias nacionais voltadas à ampliação das fontes renováveis e à descentralização da geração de energia, as instituições de ensino superior assumem papel estratégico como agentes demonstradores e indutores da transição energética. As universidades, além de grandes consumidoras de energia, configuram-se como ambientes propícios à implementação de projetos-piloto, validação tecnológica e formação de recursos humanos qualificados, contribuindo diretamente para a difusão de soluções energéticas sustentáveis. Inserida nesse cenário, a Universidade de São Paulo (USP) tem intensificado seus esforços na transição energética, ampliando significativamente sua geração própria de energia solar fotovoltaica e adotando estratégias de gestão mais eficientes para reduzir custos e impactos ambientais em seus campi. Inserida no programa USP Sustentável, a iniciativa é coordenada por grupos de

trabalho que atuam tanto na produção de energia renovável quanto na migração para o mercado livre de energia, o que permite à universidade negociar fontes de energia limpa e reduzir custos operacionais. A USP atualmente possui diversos sistemas fotovoltaicos instalados que totalizam cerca de 1,15 MW de potência, com geração anual estimada entre 1.600 e 1.800 MWh, energia suficiente para atender de 530 a 600 residências e representar uma economia anual em sua conta elétrica de até R\$600.000,00. Os projetos não só promovem redução de emissões de carbono e maior autonomia energética, como também funcionam como laboratórios vivos para pesquisas acadêmicas, inclusive em materiais e tecnologias emergentes como módulos bifaciais e integração com produção agrícola (agri-PV). Paralelamente, a adoção do mercado livre pode gerar economias de 20 % a 25 % sobre custos com eletricidade, com retorno financeiro estimado em menos de um ano para os investimentos realizados. No plano institucional, a iniciativa reflete o compromisso da USP com a sustentabilidade, inovação e transferência de soluções sociais, ambientais e econômicas para a sociedade, reforçando seu papel ativo na promoção de uma transição energética mais responsável e sustentável no Brasil (Jornal da USP, 2025).

A experiência da Universidade de São Paulo evidencia como a combinação entre geração própria de energia renovável, estratégias de gestão energética e inserção no mercado livre pode resultar em ganhos econômicos, ambientais e acadêmicos relevantes no contexto universitário. No entanto, esse movimento não se restringe à USP, sendo observado também em outras instituições federais de ensino superior que vêm adotando abordagens complementares e inovadoras para a transição energética

A UFMG tem buscado sistematicamente a eficiência energética e a adoção de fontes renováveis, por meio de ações estruturadas como o Projeto Oásis de Pesquisa e Desenvolvimento Institucional e a criação da Divisão de Eficiência Energética (DEFÉ), responsáveis pelo controle de consumo, elaboração de modelos de demanda e proposição de fontes alternativas de energia, alinhadas a diretrizes regulamentares de gestão energética pública. Para ampliar a sustentabilidade da geração, a universidade investiu na geração distribuída de energia, destacando-se a instalação de usinas solares fotovoltaicas com cerca de 500 kWp (representando aproximadamente 1,5 % do consumo institucional), financiadas com recursos do Ministério da Educação, e incluindo unidades no Laboratório Tesla e na Biblioteca José Baeta Viana. A estratégia também contempla a implantação de microturbinas de cogeração de 130 kW no Centro de Treinamento Esportivo, em substituição à caldeira a

gás existente, que aproveitam calor residual para aumentar a eficiência energética, além da instalação de sistemas de armazenamento de energia (SAEB) e a perspectiva de evolução para microrredes de energia capazes de operar de forma isolada da rede convencional. Paralelamente, a UFMG planeja migrar parte de seu consumo para o mercado livre de energia, buscando reduzir custos em até 35 % e promover autonomia energética, bem como modernizar a infraestrutura interna por meio de eficiência como a substituição da iluminação por LEDs, que já gerou até 40 % de economia em determinado segmento do campus. Essas ações refletem o compromisso institucional com a transição energética sustentável, combinando eficiência, geração própria de energia renovável e inovação tecnológica para reduzir impactos ambientais, custos operacionais e fortalecer a gestão energética universitária. (UFMG, 2025)

Apesar do avanço observado nas políticas públicas, nos mecanismos de incentivo econômico e nas experiências institucionais relatadas, a implementação de sistemas híbridos de geração de energia no contexto universitário brasileiro ainda se caracteriza por um estágio inicial. As iniciativas identificadas concentram-se majoritariamente na geração fotovoltaica isolada e em ações de eficiência energética, enquanto a integração efetiva entre múltiplas fontes renováveis, permanece restrita a projetos-piloto, estudos experimentais ou aplicações pontuais.

No ambiente universitário, embora existam experiências relevantes, como as observadas na USP e na UFMG, nota-se que grande parte dos dados disponíveis encontra-se dispersa em relatórios institucionais e notícias internas. Essa fragmentação limita análises comparativas mais robustas, a avaliação do desempenho energético e econômico dos sistemas híbridos e a extrapolação de resultados para outras instituições de ensino superior. Ademais, informações essenciais, como fatores de capacidade, taxas de disponibilidade, custos de operação e manutenção, indicadores de confiabilidade e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, são frequentemente pouco detalhadas na literatura nacional.

Essa relativa escassez de dados consolidados evidencia uma lacuna importante entre o potencial técnico dos sistemas híbridos e sua efetiva disseminação no setor educacional. Embora as universidades apresentem condições favoráveis para atuarem como plataformas demonstrativas, combinando demanda energética significativa, produção de resíduos orgânicos e capacidade técnico-científica, a ausência de bases de dados públicas, indicadores

padronizados e avaliações integradas dificulta a formulação de políticas específicas e a replicabilidade dos modelos adotados.

Dessa forma, o cenário nacional aponta para a necessidade de ampliar não apenas a implantação de sistemas híbridos em campi universitários, mas também a sistematização e divulgação de dados técnicos, econômicos e ambientais associados a essas experiências.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma pesquisa bibliográfica sistemática, complementada pelo levantamento e análise de dados institucionais referentes ao consumo energético e à geração de resíduos no campus São Carlos da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A revisão bibliográfica teve como objetivo fundamentar tecnicamente os princípios da energia solar fotovoltaica, da digestão anaeróbia para produção de biogás e dos sistemas híbridos que integram ambas as fontes.

A busca bibliográfica foi realizada em bases científicas reconhecidas, priorizando artigos publicados no período de 2010 a 2024. Os descritores utilizados incluíram: *biogas production*, *photovoltaic systems*, *hybrid renewable energy*, *anaerobic digestion*, *biogas-solar hybrid* e *renewable energy systems in universities*, bem como suas traduções para o português. Como critérios de inclusão, foram selecionados estudos que apresentassem dados técnicos e parâmetros operacionais, análises de eficiência, estudos de caso em instituições de ensino superior ou avaliações de viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos.

A análise da literatura foi conduzida de forma descritiva e comparativa, estruturada em três eixos principais: (i) caracterização técnica dos sistemas de geração fotovoltaica; (ii) caracterização técnica da geração de biogás por digestão anaeróbia; e (iii) avaliação de sistemas híbridos fotovoltaico-biogás aplicados em contextos institucionais. Entre os trabalhos selecionados, destacam-se o modelo teórico desenvolvido pela University Presidency (Bangladesh) em parceria com a Universidade Hohai (China), o estudo libanês-emiratense voltado à operação de usinas híbridas em climas áridos e a pesquisa aplicada na Comunidade Valenciana (Espanha), focada na geração de metano a partir de resíduos agropecuários. Essas referências forneceram parâmetros de desempenho, potenciais energéticos, metodologias de estimativa e cenários de dimensionamento utilizados como base comparativa para o presente trabalho.

Paralelamente, foram coletados dados institucionais da UFSCar a partir de documentos oficiais, com destaque para os relatórios da Secretaria Geral de Planejamento e Desenvolvimento Institucionais (SPDI). Essas informações subsidiaram uma análise técnica preliminar que envolveu: (i) a estimativa do potencial de geração de biogás com base nos teores de sólidos voláteis (SV) reportados na literatura; (ii) a conversão energética do biogás utilizando o poder calorífico inferior (PCI); (iii) a estimativa do potencial fotovoltaico a partir das áreas disponíveis de telhados (Rocha, 2024); e (iv) a comparação dos potenciais estimados com o consumo energético anual do campus.

Adicionalmente, foram utilizados dados simulados de pré-dimensionamento de uma usina fotovoltaica, obtidos por Rocha (2024) por meio do software PVsyst™ Photovoltaic Software, os quais serviram como referência para a avaliação do potencial de expansão da geração fotovoltaica no campus. Para a caracterização do processo de produção de biogás, recorreu-se ao estudo de Carvalho (2024), que forneceu informações sobre a disponibilidade de resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário e seu respectivo potencial de geração energética.

Com base na integração dos dados provenientes da literatura e dos estudos institucionais, foram elaboradas propostas de alternativas para o incremento da geração de energia na UFSCar. No que se refere à energia fotovoltaica, adotou-se como referência a área de telhado do Departamento de Engenharia Química (DEQ), considerada nas simulações de Rocha (2024), aplicando-se princípios de proporcionalidade para inferir o aumento potencial de geração em função da ampliação das áreas com sistemas fotovoltaicos instalados.

A abordagem metodológica incluiu ainda a construção de um fluxo lógico, de caráter descritivo, composto pelas seguintes etapas: definição do problema, revisão sistemática da literatura, seleção e classificação dos estudos, análise comparativa dos dados técnicos, levantamento de dados institucionais, processamento e interpretação dos dados energéticos e, por fim, elaboração de cenários e discussão dos resultados. Ressalta-se que não foi realizada modelagem computacional detalhada nem dimensionamento definitivo dos sistemas; entretanto, foram aplicadas metodologias de estimativa técnica preliminar, compatíveis com o caráter exploratório do estudo e adequadas ao objetivo de avaliar a viabilidade inicial da adoção de um sistema híbrido de geração de energia na UFSCar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Apresentação de estudos de caso relacionados a sistemas híbridos de energia

4.1.1 Sistema híbrido fotovoltaico e de biogás para um sistema elétrico estável (Nassereddine et al., 2024).

No estudo em questão é proposto um sistema híbrido de geração de energia que integra painéis solares fotovoltaicos com a utilização de biogás, tendo o sistema fotovoltaico como a fonte primária de energia.

A estimativa da potência gerada pelos painéis solares é realizada por meio de técnicas avançadas de aprendizado de máquina, que possibilitam uma previsão precisa da produção energética. Essa previsão é então confrontada com a demanda estimada de carga elétrica. Na eventualidade de insuficiência do sistema fotovoltaico em suprir a demanda energética requerida, a ativação do sistema de biogás é recomendada, garantindo assim o fornecimento contínuo e confiável de energia.

Adicionalmente, a metodologia adotada permite a previsão da demanda diária de resíduos orgânicos, elemento essencial para a manutenção da confiabilidade da rede elétrica. A operação em regime de alta capacidade durante o período invernal foi avaliada por meio de uma solução proposta para o cálculo da capacidade de produção de biogás e da quantidade de resíduos necessários. Para isso, o estudo desenvolve equações matemáticas específicas que contemplam as exigências diárias de biomassa do sistema, complementadas pela implementação de um sistema automatizado de controle para monitoramento e gerenciamento das operações. A aplicação conjunta das equações propostas e da metodologia baseada em fluxogramas de controle possibilita uma quantificação precisa do metano produzido, otimizando a eficiência do sistema. A Equação 1 detalha a quantidade de metano gerada.

$$BM = [KgT . Ma . (\alpha . Feed\alpha + b . c . Feed\beta) + (Ffr . d . e . Kgkg)] \quad (\text{Equação 1})$$

Em que BM é a quantidade de metano gerada, em m³, KgT corresponde ao peso do esterco em toneladas, Ffr é a porcentagem de voláteis baseado no tipo de resíduo alimentar (valores tabelados), Kgkg é a quantidade de resíduo injetado no digestor, em kg, *Feed* α e *Feed* β são

os fatores de carboidrato e proteína de acordo com o esterco utilizado. As constantes α , b , c , d , e , são valores tabelados, referentes a composição bioquímica média dos substratos.

A partir do valor de BM através da Equação 1 é possível calcular a quantidade de energia elétrica gerada a partir do método BTU (British Thermal Unit) apresentado na Equação 2.

$$GE = BM . f . g . i \quad \text{(Equação 2)}$$

Sendo GE a energia elétrica gerada em kWh, f é o fator de conversão de BTU para kWh, g é baseado no fato de que 1m^3 de biogás, com concentração de metano de 60%, equivale a 21.188 BTU e i representa a eficiência do sistema de conversão elétrica que pode variar entre 29% e 45%, dependendo do equipamento utilizado.

Na eventualidade de a energia estimada a partir do sistema fotovoltaico não ser suficiente para atender à demanda elétrica, torna-se imprescindível acionar o sistema de biogás como fonte complementar. Para isso, é necessário determinar a quantidade adequada de resíduos orgânicos, com base nas tipologias disponíveis. Posteriormente, procede-se à análise comparativa entre os dados previstos e os valores operacionais obtidos, com o objetivo de verificar o desempenho do sistema e elaborar um relatório técnico correspondente. Os dados atualizados podem ser integrados ao sistema automatizado inteligente, permitindo ajustes contínuos e a otimização futura da performance.

Considerando-se as eventuais limitações na capacidade de geração do sistema de biogás, poderá haver a necessidade de recorrer a fontes externas de energia. Em situações emergenciais, como falhas simultâneas nos sistemas fotovoltaico e de biogás, a estrutura conta com geradores a diesel como solução de respaldo.

A aplicação do modelo acima foi conduzida em um sistema de geração elétrica de grande porte, dimensionado para 100 kW de capacidade instalada. A configuração do sistema contempla 182 módulos fotovoltaicos, cada um com potência unitária de 550 W. O regime operacional da unidade industrial segue um ciclo intermitente de 8 horas de funcionamento seguidas por 8 horas de inatividade, o que implica na necessidade de suprimento energético durante o período noturno, quando a geração fotovoltaica não está disponível.

Para a realização das simulações, foram empregadas as bibliotecas pandas, numpy e sklearn, em ambiente de desenvolvimento baseado na plataforma Google Colab (Python 3). No contexto da modelagem, foi assumido que o gerador a biogás possui capacidade de suprimento superior à demanda instantânea da planta, garantindo cobertura plena sempre que requisitado.

Os dados de consumo energético foram obtidos a partir de medições realizadas durante o mês de janeiro de 2024. Esses registros, integrados às previsões geradas pelo algoritmo de aprendizado de máquina, permitiram avaliar com precisão os momentos em que o sistema fotovoltaico seria insuficiente, indicando, assim, a necessidade de ativação do sistema de biogás como fonte complementar.

A potência gerada pelo sistema fotovoltaico foi constantemente comparada à demanda energética da planta industrial. Quando a geração solar prevista se mostrou suficiente para atender à carga da instalação, ou seja, igual ou superior à demanda estimada, não foi necessário acionar o sistema de biogás. No entanto, nos momentos em que a produção fotovoltaica foi inferior à demanda, o modelo proposto avaliou se havia biomassa disponível, em tipo e quantidade adequados, para compensar o déficit energético. Quando essa condição foi atendida, o sistema de biogás foi ativado de forma sincronizada com o sistema FV, garantindo o fornecimento contínuo de energia. Nos casos em que a biomassa disponível não foi suficiente, o sistema previa o acionamento coordenado de um gerador a diesel, operando em conjunto com as outras fontes para assegurar o suprimento energético. Ressalta-se que a integração do gerador a diesel é feita de maneira estratégica, buscando minimizar o consumo de combustíveis fósseis.

A aplicação prática dessa metodologia, com base em dados coletados em intervalos de quatro segundos ao longo do mês de janeiro, demonstrou resultados expressivos. Em aproximadamente 6.840 ocorrências, foi necessário o uso combinado das fontes fotovoltaica e de biogás para atender à demanda. Em contrapartida, o sistema fotovoltaico, isoladamente, foi capaz de suprir a carga da planta em cerca de 5.650 situações distintas. Importante destacar que, ao longo de todo o período analisado, não foi necessário acionar o gerador a diesel, evidenciando a eficiência do sistema híbrido proposto na gestão da demanda energética com fontes renováveis.

Os resultados obtidos a partir das equações desenvolvidas, demonstram o volume de metano gerado, em metros cúbicos, ao longo de um período de duas semanas durante o mês de janeiro, com base em dados representativos de produção.

Adicionalmente, foi possível estimar, de maneira precisa, a quantidade diária de resíduos orgânicos necessária para atender à demanda energética, considerando diferentes tipos e composições de biomassa. Essa estimativa fornece ao operador informações fundamentais para planejar o uso adequado dos resíduos disponíveis, garantindo a geração do volume de metano necessário para o funcionamento eficiente do sistema.

A metodologia adotada mostrou-se eficaz na determinação da quantidade de biomassa requerida, independentemente do tipo específico de resíduo utilizado. Com base nesses dados, foi possível dimensionar e ajustar o fornecimento de matéria-prima de forma estratégica, assegurando a estabilidade e o desempenho contínuo da rede elétrica alimentada por fontes renováveis.

Por fim, ocorreu a realização de um estudo de caso em que o sistema foi capaz de prever com precisão a necessidade de aproximadamente 865 m³ de biogás para complementar os 413 kWh de energia elétrica que excediam a capacidade de fornecimento do sistema fotovoltaico. A partir da coleta contínua de dados, são gerados relatórios que indicam os volumes reais de metano produzidos. Nos primeiros 15 dias de janeiro, por exemplo, foram utilizadas 3,4 toneladas de esterco bovino, resultando na geração de 143,83 m³ de metano, valor inferior ao estimado, com uma defasagem de 11,664 m³.

Para compensar essa diferença, o sistema ajustou automaticamente a quantidade de biomassa, elevando-a em 0,255 toneladas, conforme os cálculos estabelecidos pela metodologia proposta. Em contextos práticos, recomenda-se adotar uma margem de erro máxima de -10%. Conforme essa orientação, a aplicação dessa margem à estimativa referente ao dia 1º de janeiro resultaria no aumento da quantidade de biomassa para 4,175 toneladas, correspondendo a uma produção efetiva de 173 metros cúbicos de metano. Assim, o erro seria recalculado para -6,9%. O sistema mantém-se em processo contínuo de aperfeiçoamento, efetuando ajustes graduais até que a margem de erro estabelecida de -10% seja alcançada, garantindo maior precisão e eficiência operacional.

4.1.2 Otimização de um sistema híbrido de Biogás e Fotovoltaico para o abastecimento sustentável de energia em áreas rurais (Roldán-Porta et al., 2021).

Neste trabalho foi identificado, a partir de uma revisão da literatura, a necessidade de mais informações sobre o abastecimento de energia em municípios rurais da Espanha. Diante disso, o estudo propõe analisar o biogás como elemento gerador de eletricidade em combinação com uma usina fotovoltaica para atender a um pequeno município rural na Comunidade Valenciana. Para a elaboração da análise, considerou-se como base a demanda elétrica registrada no ano de 2021. A utilidade da instalação de uma planta de produção de biogás, bem como sua capacidade instalada, foi justificada a partir das necessidades energéticas observadas. Também se avaliou a viabilidade de integrar uma usina fotovoltaica à estrutura proposta, com o intuito de favorecer o autoconsumo e reduzir a dependência energética em relação à rede elétrica convencional.

A economia do município em questão é predominantemente sustentada pelas atividades agropecuárias. Devido à elevada concentração de propriedades rurais, torna-se imprescindível adotar estratégias eficazes para o manejo dos resíduos orgânicos provenientes da criação animal. Nesse contexto, a instalação de uma usina de biogás configura-se como uma solução viável e estratégica para assegurar o tratamento ambientalmente adequado desses rejeitos.

Neste estudo, optou-se pela utilização de um processo mesofílico de digestão anaeróbica, o qual requer a manutenção da temperatura do digestor entre 25 °C e 45 °C, sendo 35 °C o valor médio ideal para o bom desempenho do sistema.

A média diária de resíduos disponíveis foi de 27,07 toneladas. Com base em um tempo de retenção de 30 dias e assumindo uma densidade próxima de 1000 kg/Nm³, estimou-se que o volume útil necessário para o reator fosse de 812 m³. Para atender a essa demanda, adotou-se um reator cilíndrico com 14,38 metros de diâmetro e 5 metros de altura útil (total de 6 metros), vedado com uma membrana dupla composta por poliéster e PVC, configurando um gasômetro com capacidade de armazenamento de 400 m³. Dessa forma, a produção diária de metano foi de aproximadamente 867 Nm³/dia.

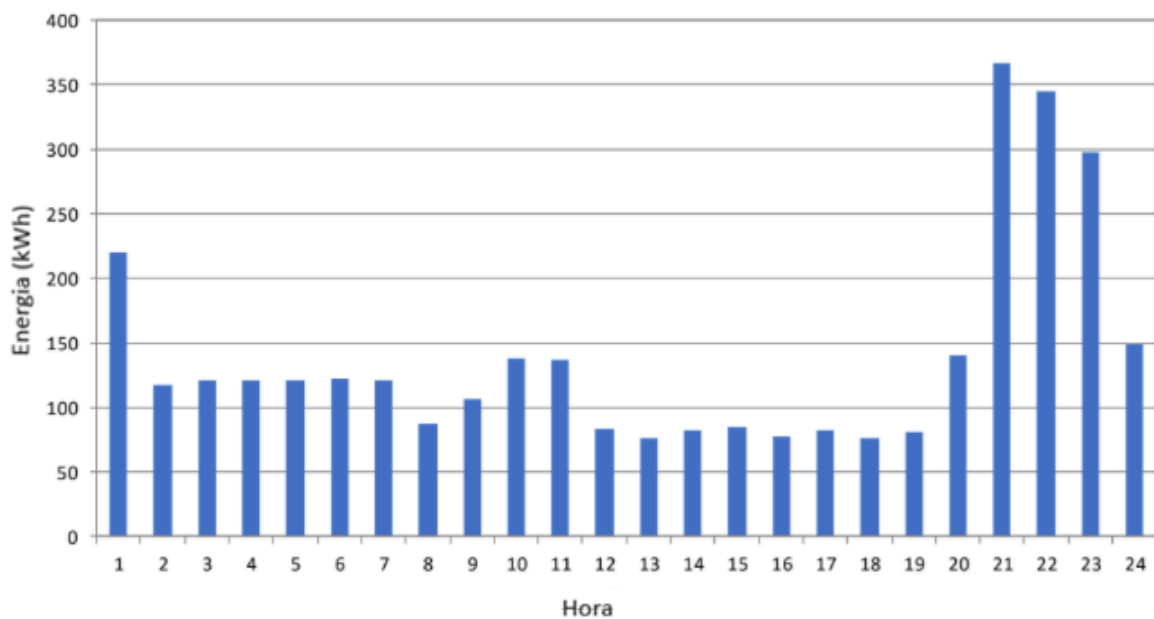
A outra fonte que integrou o sistema híbrido foi a fotovoltaica. A estimativa da geração energética de uma unidade fotovoltaica pode ser realizada com elevado grau de precisão a partir de variáveis ambientais, como a temperatura do ar e a irradiância solar. Para o cálculo da potência elétrica máxima, utilizou-se um modelo matemático consolidado que

contemplou variações nas condições de irradiância e temperatura ambiente. Esse modelo considerou grandezas como a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito, devidamente ajustadas conforme as condições operacionais específicas do local. A resposta térmica dos painéis solares também foi incorporada por meio de coeficientes que quantificaram o impacto da temperatura sobre o desempenho elétrico dos módulos.

A partir desse conjunto de variáveis, tornou-se viável prever, com confiabilidade, o comportamento da produção energética ao longo do tempo, inclusive sob diferentes condições climáticas e operacionais. Essa metodologia forneceu subsídios técnicos essenciais para a avaliação do desempenho da planta solar e mostrou-se particularmente relevante para a operação de sistemas híbridos integrados, como o que se propôs neste trabalho.

Uma variável essencial para o desenvolvimento do sistema foi a análise do perfil de demanda energética, representado na Figura 2.

Figura 2: Perfil de demanda energética considerado no estudo



Fonte: Adaptado de Roldán-Porta et al., 2021.

Para cada configuração possível envolvendo a potência do gerador elétrico da unidade de biomassa (BM) e a potência nominal da instalação fotovoltaica (PV), tornou-se essencial otimizar a gestão da energia gerada pela planta de BM. Tal otimização visava minimizar o custo diário de energia, ao mesmo tempo em que assegurava o cumprimento das restrições

operacionais do sistema de biomassa, que incluíam: a manutenção de uma produção constante de biogás, o consumo integral do gás gerado e a conservação do volume residual de biogás ao final do dia igual ao valor inicial, garantindo a estabilidade do processo.

A metodologia proposta foi projetada para ser aplicada ao longo de um ciclo anual, tomando como referência uma curva típica de demanda elétrica do município analisado, a qual refletia fielmente os padrões locais de consumo. A avaliação do desempenho do sistema foi realizada com base na operação em dois cenários climáticos distintos, um dia ensolarado e um dia nublado, ponderando-se os resultados conforme a proporção de dias nublados ao longo do ano (estimada em 23,8%), com base em dados históricos de irradiância da região.

Como o dimensionamento da planta de biogás dependia diretamente da quantidade de resíduos disponíveis no município, a instalação foi projetada com capacidade suficiente para processar integralmente o volume gerado localmente. Com isso, considerou-se que a produção de biogás, em regime permanente, se manteria constante. Por outro lado, o consumo desse biogás variaria de acordo com a potência do gerador elétrico a ser instalado

A potência nominal da usina fotovoltaica representou outra variável relevante no processo de otimização. Embora exista a possibilidade de instalação de sistemas com potências elevadas, essa decisão foi limitada tanto pela disponibilidade de área para os painéis quanto pelo capital necessário para sua implementação.

Como desdobramento da aplicação do modelo desenvolvido, propôs-se a incorporação, nos algoritmos de gestão do sistema híbrido, de previsões de demanda energética e irradiância solar, bem como o uso de preços dinâmicos de energia elétrica para compra e venda na rede. Essa integração possibilitou a adaptação em tempo real da operação do sistema, aumentando sua eficiência e capacidade de resposta.

A operação da planta de biogás em conjunto com a rede elétrica, sem a presença de painéis fotovoltaicos, proporcionou uma redução nos custos que atingiu seu ponto máximo quando a potência do gerador elétrico é de 140 kW. Já no caso da instalação exclusiva de sistemas fotovoltaicos, observou-se um aumento expressivo nos benefícios nas faixas iniciais de potência instalada. Entretanto, esse ganho tornou-se gradualmente menos significativo e, a partir de 150 kW, os retornos passaram a ser decorrentes apenas da venda da energia excedente à rede, o que diminuiu a atratividade econômica.

A análise do ponto de vista financeiro, indicou que a melhor configuração do sistema híbrido foi alcançada com 140 kW de potência para o gerador a biogás e 80 kW para a usina fotovoltaica. Nessa combinação, obteve-se uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 6,13% ao longo de 12 anos, além de permitir uma redução de 20% na tarifa de energia para os membros da comunidade, em relação aos custos praticados quando não há uso de fontes renováveis.

4.1.3 Análise do Impacto da Geração Fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás (Castro et al., 2020)

O artigo apresentou uma análise abrangente do impacto da geração de energia fotovoltaica instalada na Universidade Federal de Goiás (UFG), contemplando aspectos técnicos, energéticos, econômicos, e de monitoramento em tempo real. O estudo partiu da necessidade crescente de instituições públicas reduzirem seus gastos com energia elétrica e adotarem soluções sustentáveis, especialmente em regiões de elevada irradiação solar, como o estado de Goiás. Para atender a essa demanda, a UFG implantou um conjunto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Esses sistemas foram compostos por módulos posicionados com orientação e inclinação otimizadas, inversores dimensionados de acordo com a potência instalada e dispositivos de proteção que asseguraram o funcionamento seguro e eficiente da infraestrutura.

Ao todo, foram instalados 2.478 módulos fotovoltaicos distribuídos na cobertura de quatro edifícios da instituição, totalizando 819,8 kWp conectados aos painéis de distribuição de baixa tensão da UFG. Cada módulo possui potência nominal de 330 Wp e foi interligado por meio de combinações em série e paralelo, de modo a atender às exigências de tensão e corrente dos inversores de 30 kW utilizados no sistema. Considerando que cada módulo apresenta aproximadamente 1,94 m², a instalação resulta em uma densidade de potência de 170,7 W/m². Com essa configuração, estimou-se uma geração média anual de 1.212,91 MWh, consolidando o potencial energético das quatro miniusinas fotovoltaicas.

Além disso, o estudo também enfatizou o sistema de monitoramento CCK-Gerente e sua interface web, o WEBCCCK. Esse sistema possibilitou o acompanhamento em tempo real de grandezas elétricas como tensão, potência, energia e distorções harmônicas das unidades de geração solar da universidade, por meio de gráficos e relatórios acessíveis tanto em rede interna quanto externa.

Diante do monitoramento instalado, o artigo apresentou análises de diferentes grandezas: tensão entre fases (kV), potência ativa (kW), energia ativa (kWh), distorção harmônica de tensão (%) e distorção harmônica de corrente (%). Esses indicadores foram avaliados com base nos padrões normativos e no comportamento esperado para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Os resultados mostraram que os níveis de tensão permaneceram dentro dos limites regulamentares, sem apresentar desvios significativos em relação ao comportamento descrito na literatura. As distorções harmônicas também se mantiveram em níveis aceitáveis, indicando que a inserção do sistema fotovoltaico não gerou impactos adversos na qualidade da energia elétrica distribuída no campus.

4.1.4 Potencial de Produção de Biogás através da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos do Restaurante Universitário da UFSC (Proença, 2022).

O estudo analisado teve como foco principal avaliar o potencial de produção de biogás a partir dos resíduos alimentares gerados no Restaurante Universitário (RU), considerados aqui como a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos produzida diariamente no campus. O trabalho partiu de uma caracterização detalhada desses resíduos, buscando compreender como suas propriedades físico-químicas influenciam o desempenho da digestão anaeróbia (DA) e a viabilidade de aproveitamento energético.

A primeira etapa consistiu na quantificação da geração diária e mensal de resíduos. Com base nos dados fornecidos pela direção do RU, verificou-se que são servidas, em média, 8.339 refeições por dia, resultando em cerca de 125,25 kg de resíduos alimentares diários. Considerando-se 22 dias de funcionamento mensal, isso corresponde a 2.755,5 kg de RSO/mês. A análise do teor de sólidos voláteis (SV), fração biodegradável efetivamente convertida em biogás, demonstrou que aproximadamente 291,5 g de SV estão presentes em cada quilograma de resíduo, totalizando 803,2 kg de SV/mês. Essa proporção indica elevada biodegradabilidade, reforçando o potencial energético dos resíduos gerados pelo restaurante.

A caracterização físico-química mostrou que o resíduo apresenta altos valores de umidade e SV, além de valores de demanda química de oxigênio (DQO) compatíveis com os observados em outros estudos de digestão anaeróbia de resíduos alimentares. A predominância de compostos orgânicos facilmente degradáveis, como carboidratos, lipídios e proteínas, confirma que esse tipo de resíduo possui grande aptidão para processos

biometanogênicos. O teor de SV obtido neste estudo (79,8%) foi ligeiramente inferior ao encontrado em trabalhos similares, o que pode ser explicado pela variação no cardápio e no período de coleta, fatores que influenciam diretamente a composição do substrato.

Para verificar de forma prática o potencial de produção de biogás, o estudo realizou ensaios laboratoriais de DA, iniciando com testes preliminares utilizando glicose, acetato e duplicatas de RSO. Esses testes permitiram comparar o comportamento de substratos de referência com o resíduo real. Os resultados mostraram que os resíduos sólidos orgânicos (RSO) apresentaram o maior volume acumulado de biogás entre os substratos avaliados, alcançando 677 mL no ensaio considerado representativo, evidenciando sua elevada capacidade metanogênica.

No ensaio principal, conduzido durante cerca de 14 dias, quatro reatores contendo exclusivamente RSO foram monitorados com medições diárias. A produção acumulada variou entre 769 mL e 881 mL, com média de $830,5 \pm 56,5$ mL de biogás, valor superior aos obtidos em estudos anteriores utilizando metodologias semelhantes. A análise da composição do biogás revelou teores de metano compatíveis com padrões reportados na literatura, e a produção específica atingiu 405,9 mL de CH_4 por grama de SV, indicando excelente desempenho do processo metanogênico.

Com base nesses resultados, foi possível estimar o potencial teórico mensal de biogás para o RU. Considerando a produção específica média de 405,9 litros de biogás por quilograma de SV, os 803,2 kg de SV/mês correspondem a uma produção aproximada de 326,02 m³ de biogás por mês, sem qualquer etapa adicional de pré-tratamento. Esse volume evidencia a viabilidade do uso dos resíduos alimentares do RU como fonte complementar de energia térmica, com potencial inclusive para substituir parcialmente o GLP utilizado nas cozinhas do RU.

De modo geral, o estudo demonstra que os resíduos orgânicos do RU apresentam características favoráveis para a digestão anaeróbia, combinando alta biodegradabilidade, composição rica em matéria orgânica facilmente degradável e desempenho satisfatório nos ensaios experimentais. Assim, o estudo conclui que o aproveitamento energético desses resíduos é técnica e ambientalmente viável, contribuindo simultaneamente para a redução do volume de resíduos orgânicos, melhoria da gestão de resíduos sólidos urbanos e expansão de alternativas renováveis de energia no contexto universitário.

4.2. Panorama UFSCar

Para implementar um sistema híbrido de energia é necessária a coexistência de diversos fatores: a compatibilidade de fontes energéticas, a infraestrutura disponível no local de interesse, as condições ambientais e climáticas, assim como os recursos disponíveis para o sistema.

O primeiro requisito a ser considerado é que as fontes de energia precisam ser complementares. Por exemplo, a geração a partir de usinas fotovoltaicas tem seu maior pico durante o dia enquanto os raios solares ainda estão incidindo sobre as placas, em contrapartida, a geração de energia a partir do biogás pode ser utilizada em qualquer momento do dia (Ahmad *et al.* 2024). Outra combinação possível é a energia solar e energia eólica, a depender da localidade, o período com maiores ventanias geralmente são em horários em que os raios solares já estão fracos e portanto é uma alternativa para a geração de energia de maneira complementar. Essa complementaridade é fundamental para a confiabilidade do fornecimento de energia.

Outro aspecto técnico fundamental é o correto dimensionamento do sistema com base na análise detalhada do perfil de consumo energético. Isso inclui avaliar a carga média diária, os horários de pico, a sazonalidade do uso e a criticidade da continuidade no fornecimento de energia. A partir dessa análise, define-se a capacidade de geração necessária para cada fonte, bem como a necessidade de armazenamento por meio de baterias (AJIBOYE *et al.*, 2023). Os sistemas de armazenamento desempenham um papel estratégico na estabilidade da rede, pois permitem guardar o excedente gerado em momentos de baixa demanda e utilizá-lo quando o consumo ultrapassa a geração instantânea.

A implementação de um sistema híbrido também exige a compatibilidade dos equipamentos utilizados. Inversores híbridos, controladores de carga e sistemas de monitoramento devem ser tecnologicamente compatíveis com as fontes escolhidas. Além disso, é necessário integrar sistemas de automação e proteção que assegurem a qualidade da energia fornecida, evitando problemas como flutuações de tensão, sobrecargas e desconexões indesejadas. Para isso, é comum utilizar unidades de controle chamadas de EMS (Energy Management System), que automatizam decisões como ligar ou desligar fontes específicas, armazenar energia ou injetar excedente na rede, quando permitido.

As condições ambientais tem forte influência na viabilidade do sistema. A intensidade da radiação solar, a constância e velocidade do vento, disponibilidade de resíduos orgânicos para o biogás ou até mesmo a proximidade com cursos d'água para microgeração hidráulica são fatores decisivos para a escolha da combinação do sistema híbrido.

A operação e manutenção também devem ser levadas em consideração (Khan *et al.*, 2025). As usinas fotovoltaicas necessitam de pouca manutenção, com exceção da limpeza dos módulos e verificação de cabos e conexões. Já sistemas que utilizam motores térmicos como os que operam a biogás ou diesel, é necessário a manutenção regular e controle da qualidade do combustível utilizado.

Considerando que o local do estudo em questão é a UFSCar, campus São Carlos, deve-se ponderar os pontos citados acima para a escolha do sistema híbrido. Em 2024, segundo Secretaria Geral de Planejamento e Desenvolvimento Institucionais, sabe-se que, na universidade, há uma área construída de 200.462 m², responsável por atender 12.360 alunos de graduação e mais 10.878 alunos de pós-graduação (SPDI, 2024). No quadro 2, é ilustrada a demanda por eletricidade da UFSCar ao longo dos anos, desconsiderando os anos de 2020 e 2021 visto que era o período pandêmico e não havia pleno funcionamento do local.

Quadro 2: Demanda energética (kWh) da UFSCar no período de 2017 a 2023

Mês	2017	2018	2019	2022	2023
Jan	880.750	809.987	819.227	625.629	694.050
Fev	1.036.690	1.036.690	1.112.618	614.185	701.860
Mar	1.029.480	1.029.480	972.826	718.382	831.680
Abr	1.105.590	1.105.590	968.629	640.877	665.340
Mai	1.068.710	1.068.710	992.270	621.844	700.080
Jun	1.010.590	1.010.590	842.076	651.150	669.920
Jul	1.055.180	1.055.180	845.885	676.677	707.090
Ago	890.370	890.370	789.057	696.857	739.450
Set	1.066.950	1.066.950	919.111	675.026	750.040
Out	1.056.700	1.056.700	1.064.602	692.183	861.070
Nov	1.127.580	1.127.580	1.134.217	675.361	835.640
Dez	1.171.712	1.171.712	896.580	630.166	789.060
Total	12.500.302	12.429.539	11.357.098	7.918.337	8.945.280

Fonte: Prefeitura Universitária, 2024

O custo com energia elétrica é elevado, segundo o Projeto de Desenvolvimento Institucional 11.985 em 2022, o valor alcançou R\$5.945.419,00. Portanto, desde 2017, a administração realiza projetos com o intuito de reduzir e otimizar a conta de energia elétrica. Um desses projetos foi a instalação de usinas fotovoltaicas, na Unidade Saúde Escola (USE) e no prédio de aulas teóricas 4 (AT4).

Para além disso, observando os recursos disponíveis no local de estudo, nota-se um montante de resíduos orgânicos gerados diariamente no restaurante universitário (RU) que pode ser uma oportunidade do ponto de vista energético e ambiental.

Com os fatos expostos no presente trabalho, optou-se por focar então em um sistema híbrido com a integração da energia fotovoltaica e biogás.

4.3. Geração de Energia

4.3.1. Usina Fotovoltaica

As usinas instaladas na UFSCar foram responsáveis pela geração de 1 GWh, ou seja, 12,24% do consumo total no ano de 2022 (SPDI, 2023). É importante destacar que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico on-grid é consumida diretamente (Rocha, 2024).

Essa geração é relativamente baixa em comparação à demanda total da unidade consumidora, portanto o foco está na redução do custo da conta de energia. Este valor da conta de energia da UFSCar é influenciado não apenas pela quantidade de energia efetivamente consumida, mas também pela demanda contratada junto à concessionária. Isso ocorre porque, ao firmar esse contrato, a distribuidora garante à universidade a disponibilidade da potência contratada em todos os períodos do dia, tanto nos horários de ponta (18:00 às 20:59) quanto fora de ponta (21:00 às 17:59). Assim, mesmo que o consumo real fique abaixo do limite estabelecido no contrato, o valor a ser pago permanecerá o mesmo. Portanto, o custo total da fatura é composto pela soma do valor correspondente à demanda contratada e ao volume de energia efetivamente utilizado.

Vale ressaltar que a geração a partir da energia solar é maior durante o horário fora de ponta, que é justamente o período em que há incidência de raios solares nos módulos.

Segundo Rocha (2024), a partir do pré-dimensionamento realizado no software PVsyst™ *Photovoltaic Software*, a instalação de painéis solares nos telhados de todos os departamentos do Centro de Ciências Exatas (CCET) permitiria uma geração anual estimada de 2.374,68 MWh, valor correspondente a 26,54% do consumo total de energia da UFSCar no ano de 2023. A distribuição dessa geração potencial por departamento do CCET pode ser observada no Quadro 3, que apresenta a contribuição energética prevista para cada unidade.

Quadro 3: Energia gerada por simulação para os departamentos do CCET.

Departamentos CCET	Estimativa de energia gerada anualmente kWh/ano	Representatividade consumo UFSCar (2023)
DEQ	142.031	1,59%
DEP	189.374	2,12%
DEE e DEMec	94.687	1,06%
DF	368.565	4,12%
DM	368.565	4,12%
DECiv	151.321	1,69%
DEMa	189.374	2,12%
DEs	94.687	1,06%
DQ	388.038	4,34%
DC	388.038	4,34%

Fonte: Rocha (2024).

A Universidade Federal de Goiás, com a instalação de 4 usinas fotovoltaicas (em 4 prédios da instituição) compostas por 2478 painéis solares na cobertura. Ao todo, o sistema tinha uma capacidade média de geração de energia estimada de 1.212,91 MWh/ano (Castro et al., 2020). Quando comparado com o cenário projetado para a UFSCar, é uma geração 49% menor. Desse modo, é notável o grande potencial da comunidade UFSCar, já que o cenário considera apenas um centro da faculdade e uma maneira de instalação, que são os telhados. Ressalta-se, entretanto, que a capacidade técnica e estrutural dos telhados da não foi avaliada, o que significa que o potencial estimado se baseia apenas em área disponível, e não em verificações de viabilidade física das coberturas. Ainda assim, é possível ampliar significativamente a geração na universidade por meio da instalação de módulos fotovoltaicos em áreas abertas ao nível do solo, que não apresentam as limitações estruturais típicas de telhados.

4.3.2 Biogás

Atualmente não há uma usina de biogás na localidade de estudo, então deve-se considerar os custos de instalação assim como todas as variáveis fundamentais para esse processo.

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 (Carvalho, 2024).

A produção de energia por meio da queima de biogás em sistemas de cogeração está diretamente relacionada a uma série de variáveis, sendo a composição do próprio biogás uma das mais relevantes. O metano (CH_4), principal componente desse gás, é o responsável pela geração de energia, graças ao seu elevado poder calorífico, em torno de 50 MJ/m^3 . Por outro lado, a presença de dióxido de carbono (CO_2) não contribui para a produção energética e pode ainda prejudicar o rendimento da combustão. Outros gases presentes em menor quantidade, que surgem como subprodutos do processo de biodigestão, também influenciam tanto a eficiência energética quanto às emissões resultantes da queima.

Os resultados a partir da aplicação dos parâmetros propostos por Santos et al. (2023) demonstram o potencial de produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos gerados na UFSCar. O estudo de referência indica que resíduos orgânicos apresentam entre 4% e 11% de sólidos voláteis (SV), o que favorece uma conversão eficiente durante a digestão anaeróbia. No experimento utilizado como base comparativa, a fase identificada como a mais eficiente na conversão de SV em biogás possui 10,8% de SV. Nessa condição, 3,84 kg de substrato resultaram na produção de 362 L de biogás, dos quais 58% correspondem a metano, totalizando 213,6 L. A massa de sólidos voláteis disponível no experimento foi de 0,41 kg (Equação 3), o que permite estabelecer uma relação direta entre quantidade de SV e volume de biogás produzido.

$$\text{Total de SV} = \text{Massa de substrato} \times 10,8\% \quad (\text{Equação 3})$$

O estudo de Carvalho (2024), ao aplicar essas proporções ao cenário da UFSCar, considerando a coleta mensal de 2,5 toneladas de resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário e assumindo a mesma eficiência de conversão (10,8% de SV), estima-se a produção mensal de 235,678 m³ de biogás. Desse total, aproximadamente 140,000 m³ correspondem ao metano, considerando uma composição média de 60%. Utilizando o poder calorífico inferior (PCI) do biogás (22.600 kJ/m³), a energia gerada seria de 5.326.342,8 kJ, equivalente a 1.479,54 kWh por mês. Em termos de potência, esse valor representa cerca de 2,05 kW contínuos ao longo do período. Anualmente, essa produção totaliza 17.748 kWh, correspondendo a 0,22% do consumo anual de energia elétrica da UFSCar (7.918.336,8 kWh), o que resultaria em uma economia aproximada de R\$ 13.080,00 por ano.

Quando adotada a proporção de 60% de resíduos orgânicos e 40% de resíduos de poda, proporção identificada como mais eficiente por Santos et al. (2023), o volume total de substrato mensal aumenta para 4,2 toneladas. Nessa condição otimizada, a produção estimada de biogás alcança 395,937 m³ por mês, resultando em 8.948.187 kJ ou 2.485,6 kWh de energia. A potência correspondente é de aproximadamente 3,45 kW, e a energia anual produzida atinge 29.827,2 kWh, equivalente a 0,37% da demanda elétrica institucional, proporcionando economia anual estimada em R\$ 21.998,00.

Com base nos valores calculados, estima-se que para atender 1% da demanda elétrica anual da UFSCar (7,92 GWh), seriam necessários cerca de 1.131,2 m³ de biogás por mês, o que exige aproximadamente 12 toneladas mensais de material orgânico.

Segundo o estudo de caso apresentado por Nassereddine (2024), com o objetivo de prever a quantidade de biomassa necessária para compensar a produção de energia elétrica em um sistema híbrido integrando o biogás e a energia fotovoltaica no inverno, momento em que a incidência de raios solares é bem menor. Observa-se que a partir de 3,4 toneladas de esterco de gado foi possível gerar 143,83 m³ de metano em 15 dias. Em termos de comparação com o cenário no presente estudo na UFSCar, considerando 4,2 toneladas, ou seja, 800 kg a mais de biomassa e considerando que 60% do biogás é composto por metano, obteve-se 237,54 m³ de metano em um mês. Para que a comparação entre os dois cenários fosse realizada de forma justa, o valor estimado para a UFSCar foi ajustado ao mesmo período considerado no estudo de referência (15 dias). Dessa forma, o volume mensal calculado foi dividido pela metade, resultando em 118,77 m³ de metano em 15 dias. Quando

esse valor é comparado diretamente ao encontrado no estudo de Nassereddine, 143,83 m³, observa-se que a produção estimada na UFSCar foi aproximadamente 17% menor, mesmo utilizando uma quantidade maior de biomassa, sugerindo diferenças nas características da biomassa.

O estudo aplicado em um pequeno município rural na Comunidade Valenciana na Espanha, com disponibilidade de 27,07 toneladas por dia de dejetos de animais (frango, coelho, porco, bezerro) resultou em uma produção de 867Nm³ de metano (Roldán-Porta et al., 2023). Em condições usuais, ou seja, com uma temperatura média de 35°C e 1 atm, essa produção de metano equivale a 977,85 m³. O cenário de disponibilidade da UFSCar é muito inferior, aproximadamente 1% da quantidade disponível na Comunidade Valenciana.

É importante destacar que, na prática, é extremamente difícil alcançar um nível de conversão de biomassa em biogás próximo ao de 100%. Diversos fatores operacionais interferem diretamente no rendimento real de metano, como flutuações de temperatura ambiente, variações no pH, sobrecarga orgânica, presença de inibidores na mistura e falhas na homogeneização do substrato. Além disso, as perdas naturais ao longo do processo e a eficiência real do biodigestor, que raramente atinge os 100% de conversão teórica, reduzem significativamente a produção efetiva de biogás.

Outro ponto crítico é que os valores teóricos geralmente desconsideram a degradação incompleta dos sólidos voláteis ao longo do processo, bem como o tempo necessário para adaptação da microbiota metanogênica, que pode levar semanas. Dessa forma, é essencial tratar com cautela estimativas baseadas em modelos ideais, pois elas podem induzir a uma superestimação da viabilidade energética do projeto.

4.3.3 Análise dos cenários apresentados

A comparação entre os diferentes cenários analisados revela contrastes significativos no potencial de produção de biogás e metano a partir da biomassa disponível na UFSCar e em outros contextos estudados na literatura. No primeiro cenário, baseado nos dados de Carvalho (2024), a utilização exclusiva dos 2,5 toneladas mensais de resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário resulta na produção estimada de 235,678 m³ de biogás por mês, gerando 17.748 kWh/ano, o equivalente a apenas 0,22% da demanda elétrica anual da universidade. Ainda que esse resultado demonstre viabilidade técnica, evidencia também que a disponibilidade restrita de substrato limita severamente o impacto energético do sistema.

O segundo cenário, fundamentado na proporção de 60% de resíduos orgânicos e 40% de resíduos de poda proposta por Santos et al. (2023), amplia a oferta de biomassa para 4,2 toneladas mensais. Esse aumento resulta em 395.937 m³ de biogás por mês e uma produção anual de 29.827,2 kWh, representando 0,37% da demanda da UFSCar. Embora o ganho absoluto seja de aproximadamente 68% em relação ao primeiro cenário, ele ainda permanece insuficiente para atender uma parcela relevante da demanda energética institucional. Além disso, o acréscimo de resíduos de poda demanda uma logística adicional ao processo de coleta, o que pode representar um desafio operacional para a universidade.

Para atingir 1% da demanda anual de energia, os cálculos mostram que seriam necessários cerca de 1.131,2 m³ de biogás mensais, o que exige cerca de 12 toneladas de substrato por mês, três vezes mais do que o volume disponível atualmente no campus São Carlos. Esse resultado evidencia que, mesmo com a mistura de resíduos, o campus isoladamente não possui escala suficiente para sustentar um sistema de biodigestão com impacto energético significativo, demandando integração com outros campi ou fontes externas de biomassa.

Quando comparados a estudos realizados em outros contextos, as limitações de disponibilidade de biomassa na UFSCar tornam-se ainda mais evidentes. O estudo de Nassereddine (2024), por exemplo, demonstra que 3,4 toneladas de esterco bovino são capazes de gerar 143,83 m³ de metano em apenas 15 dias, valor substancialmente superior ao obtido no presente estudo para resíduos alimentares. Mesmo ao ajustar a comparação para o período de um mês, a biomassa disponível na UFSCar gera apenas 118,77 m³ de metano, valor 17% inferior ao observado com esterco bovino. Essa diferença é esperada, uma vez que o esterco apresenta características mais favoráveis à digestão anaeróbia, como maior concentração de sólidos voláteis e menor variabilidade na composição.

O contraste torna-se ainda mais expressivo quando analisado o cenário apresentado por Roldán-Porta et al. (2023), no qual a disponibilidade de 27,07 toneladas diárias de dejetos animais gera 867 Nm³ de metano por dia, equivalentes a aproximadamente 978 m³ em condições normais de temperatura e pressão. A disponibilidade de biomassa nesse estudo é cerca de 200 vezes maior que a da UFSCar, justificando o elevado potencial de produção de metano. Esse exemplo reforça que a escala do sistema é um determinante do sucesso de projetos de biodigestão com fins energéticos.

Por fim, é importante destacar que todos os cenários apresentados partem de estimativas teóricas que assumem condições ideais de operação. Na prática, alcançar eficiências próximas da conversão total dos sólidos voláteis é tecnicamente improvável. Fatores como variações de temperatura, oscilações de pH, sobrecarga orgânica, presença de compostos inibidores, além de falhas na homogeneização do substrato, tendem a reduzir consideravelmente a produção real de biogás. Também devem ser consideradas as perdas inerentes ao sistema, como vazamentos, eficiência de queima ou conversão e limitação tecnológica dos biodigestores. Assim, estimativas baseadas em modelos simplificados podem superestimar a viabilidade energética do projeto, devendo ser interpretadas com cautela.

4.3.4 Sistema Híbrido: Integração de Energia Fotovoltaica e Biogás

O modelo proposto neste trabalho é composto por usinas fotovoltaicas por toda a universidade e também a criação e instalação de uma usina de biogás.

Considerando a instalação das usinas FV (fotovoltaicas) apenas nos departamentos do CCET e uma usina de biogás próxima ao RU, o potencial de geração totaliza 2.404.507,2 kWh/ano, o que representa 30,40% da demanda requisitada em 2022, praticamente $\frac{1}{3}$ do necessário para suprir toda a demanda.

Nesse cenário, não foi possível atingir a meta estabelecida de reduzir a dependência da rede elétrica em 50%, no entanto a análise deve considerar a economia na conta de luz que essa geração de energia vai proporcionar. De acordo com Projeto de Desenvolvimento Institucional 11.985 em 2022, o custo com energia elétrica foi de R\$5.945.419,00, portanto a produção de 30,40% da energia necessária para o abastecimento total proporciona uma economia de R\$1.807.407,376.

Apesar de ser uma quantia considerável, é necessário analisar quais são as alternativas para incrementar esses valores e alcançar a geração de 50% da demanda energética do campus.

4.4. Alternativas para aumentar a geração de energia no contexto da UFSCar

4.4.1 Usinas Fotovoltaicas

A quantidade de energia gerada a partir da energia solar é expressiva no contexto do campus São Carlos. O aumento do número de painéis fotovoltaicos na universidade reflete uma expansão significativa da participação de energia renovável no campus. Contudo, é

importante destacar que o investimento inicial para a instalação desses sistemas é elevado. De acordo com a análise de Rocha (2024), a implementação de um módulo de 370 Wp demanda um custo aproximado de R\$982.000,00, o que implica que a ampliação das usinas fotovoltaicas resultará em um aumento proporcional do investimento inicial necessário.

Há alternativas para mitigar esses custos, como a participação de editais da ANEEL, que com projetos anteriores já provaram ser muito efetivos em relação a diminuição do desembolso inicial da instalação e esse custo também vai ser diluído ao longo da vida útil do sistema, pois terá descontos na conta de energia.

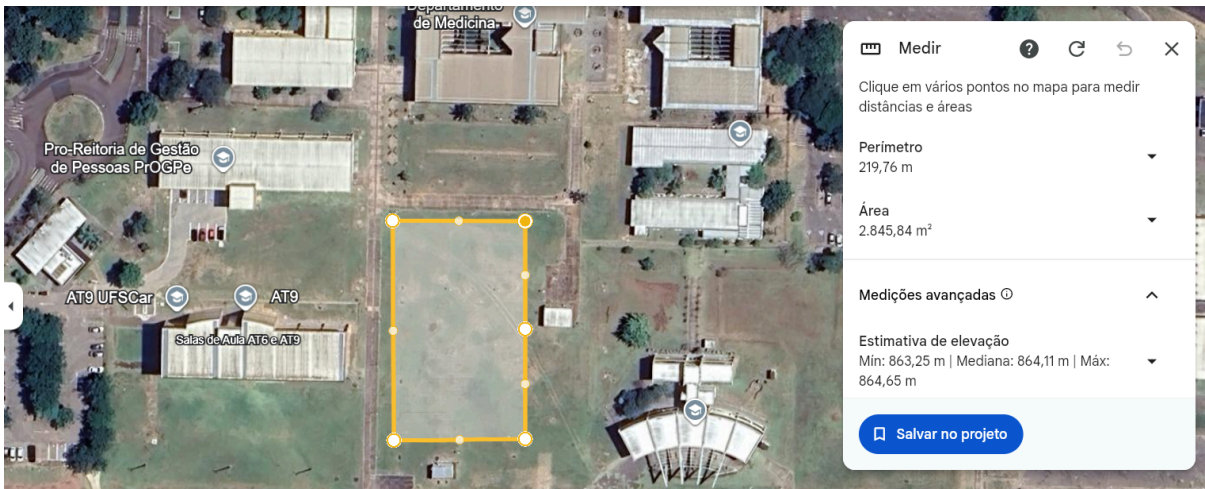
Além disso, deve-se pensar em outras alternativas de locais para a instalação dessas usinas e não somente os telhados dos departamentos do CCET. Há a possibilidade da instalação em terrenos próximos ao solo como ilustrados nas Figuras 4 e 5, que representam áreas de gramados livres próximos ao Departamento de Matemática, seria necessária a adequação da inclinação dos painéis, mas a implementação de usinas no solo poderia ampliar significativamente a quantidade de energia gerada e consequentemente a economia na conta de luz.

Figura 4: Gramado livre com suas medidas



Fonte: Extraído do *Google Earth*TM (2025)

Figura 5: Gramado livre com suas medidas



Fonte: Extraído do *Google Earth™* (2025)

Realizando uma análise preliminar com base nos dados de Rocha (2024), observa-se que os painéis instalados no telhado do Departamento de Engenharia Química (DEQ), cuja área de cobertura é de 506 m², apresentam um potencial de geração anual de 142.031 kWh. Quando se compara essa referência com as áreas disponíveis nas Figuras 5 e 6, verifica-se que a área da Figura 5 é aproximadamente 13 vezes maior que a do DEQ, enquanto a área da Figura 6 corresponde a cerca de 5 vezes o mesmo tamanho. Considerando a proporcionalidade entre área disponível e potencial de geração, essas duas regiões poderiam agregar cerca de 1.846.403 kWh/ano e 710.155 kWh/ano, respectivamente, totalizando um incremento de 2.556.558 kWh/ano.

Ao somar esse acréscimo ao potencial de geração do sistema híbrido proposto (2.404.507,2 kWh/ano), obtém-se um total de 4.961.065 kWh anuais. Esse valor representa aproximadamente 62,7% da demanda total de energia elétrica do campus de São Carlos da UFSCar, superando, portanto, a meta estimada de redução de 50% da dependência da rede pública. Esses resultados evidenciam o expressivo potencial de ampliação da participação de energias renováveis na matriz energética institucional.

No entanto, é importante ressaltar que tais estimativas assumem condições ideais de instalação e desempenho. Para confirmar a viabilidade técnica dessas áreas, seria indispensável realizar estudos detalhados do solo e da topografia, análises estruturais, além da avaliação de sombreamentos, acessos, declividade, drenagem e possíveis restrições

ambientais. Somente após essas etapas seria possível confirmar a aplicabilidade prática dos sistemas fotovoltaicos em solo nessas regiões e validar os ganhos energéticos projetados. Adicionalmente, deve-se considerar o planejamento institucional de uso dessas áreas, uma vez que sua eventual destinação futura para novas construções ou outras finalidades pode limitar ou inviabilizar a implantação permanente dos sistemas propostos.

Além da instalação de painéis próximos ao solo, a implementação de toldos nos estacionamentos permitiria a instalação de mini usinas ao redor da universidade, considerando que quase todos os prédios possuem área de estacionamento para veículos, dessa forma seria possível maximizar o poder de geração de energia fotovoltaica no campus São Carlos.

Sob uma perspectiva diferente do aumento de usinas ao longo do terreno da universidade, deve-se pensar sobre o desenvolvimento técnico deste sistema. A substituição de módulos fotovoltaicos convencionais por tecnologias mais eficientes, como painéis monocristalinos, bifaciais e com células PERC, tem evidenciado ganhos expressivos na geração de energia elétrica. Os módulos monocristalinos, caracterizados por uma estrutura de silício de alta pureza e cristal único, apresentam eficiências comerciais médias entre 17% e 22%, superando os painéis policristalinos, cujas eficiências situam-se entre 15% e 17% (Itek Energy, 2024). Tal desempenho superior proporciona um maior aproveitamento energético por área instalada, o que é especialmente vantajoso em locais com restrições de espaço.

Os painéis bifaciais possuem a capacidade de captar radiação solar em ambas as faces, beneficiando-se também da luz refletida pelo solo, conhecida como albedo. Essa característica possibilita um incremento na produção energética na faixa de 10% a 30%, variando conforme o tipo de solo, a altura da instalação e a refletividade do ambiente (REDDIT, 2024). Por sua vez, a tecnologia PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) incorpora uma camada passivadora na parte posterior da célula, reduzindo perdas por recombinação eletrônica e aumentando a eficiência em aproximadamente 1% a 1,5% em relação às células convencionais (Pyron Solar, 2024).

Além das melhorias nos módulos, a implementação de sistemas de rastreamento solar, conhecidos como trackers, contribui significativamente para ampliar a incidência direta da radiação solar sobre os painéis. Os rastreadores de eixo único acompanham o movimento solar no plano horizontal (leste-oeste), enquanto os de dois eixos ajustam também a

inclinação vertical, sendo indicados para regiões com maior variação sazonal da irradiância. A utilização desses sistemas pode elevar a geração energética em torno de 20% a 25% no caso do rastreamento de um eixo, e até 30% quando se emprega rastreamento de dois eixos, variando conforme as condições climáticas e geográficas da instalação (Reuters, 2024).

Dessa forma, a integração dessas estratégias não apenas potencializa a produção energética das usinas fotovoltaicas, como também contribui para a redução do custo de eletricidade, promovendo maior eficiência técnica e viabilidade econômica aos projetos.

4.4.2 Biogás

Para o biogás a geração de energia é muito pequena, quase que insignificante perto da demanda total, isso porque a quantidade disponível de resíduos é muito baixa.

Para esse caso é possível pensar em soluções logísticas para a coleta de resíduos em outros campus da UFSCar (em Sorocaba ou Lagoa do Sino), o que é complexo visto que a distância entre as cidades é de 217 km e 285 km respectivamente, e possivelmente as despesas logísticas superariam as vantagens obtidas.

Outra possibilidade de solução logística, seria a parceria com a USP Campus São Carlos, ou até mesmo, restaurantes, hospitais e comércios da cidade para aumentar a quantidade de insumo na geração.

Outro ponto a ser considerado é a opção de trocar a combinação de substratos da biodigestão. A biodigestão anaeróbia de esterco, quando combinada com resíduos agrícolas e resíduos alimentares em proporções que variam entre 40% e 50% com base nos sólidos voláteis (VS), tem apresentado incrementos expressivos na produção de metano (Adekunle et al., 2016). Contudo, essa estratégia requer soluções logísticas inovadoras, considerando a ausência de esterco animal disponível no campus universitário.

Uma alternativa possível seria utilizar o esterco proveniente do Parque Ecológico de São Carlos, situado adjacente à universidade, o que facilitaria a logística do processo. Apesar de se tratar de uma opção promissora, torna-se necessário realizar uma análise detalhada dos resíduos provenientes de cada espécie animal presente no zoológico para entender sua composição e estimar o potencial de geração de metano.

Em complemento as possibilidades acima citadas, sob a ótica técnica do processo, para aumentar a produção de biogás de forma eficiente e sustentável, é necessário implementar um conjunto de estratégias integradas que envolvem tanto a seleção criteriosa do substrato quanto a otimização das variáveis operacionais do processo de digestão anaeróbia. A escolha de resíduos orgânicos ricos em matéria orgânica biodegradável, especialmente aqueles com uma relação carbono/nitrogênio (C/N) ideal entre 20 e 30, é uma etapa fundamental para favorecer o crescimento e a atividade dos microrganismos metanogênicos, que são os principais responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano (Nassereddine et al., 2024). Essa proporção adequada evita o acúmulo de compostos tóxicos, como o amônio, e assegura um ambiente microbiológico mais estável e produtivo.

Além da seleção dos insumos, a aplicação de pré-tratamentos sobre os substratos têm se mostrado uma abordagem altamente eficaz para aumentar a biodisponibilidade dos componentes orgânicos. Os pré-tratamentos físicos, como a trituração e a moagem, promovem a desagregação da matriz lignocelulósica e aumentam a área superficial de contato, facilitando a ação dos microrganismos anaeróbios sobre o material. Por sua vez, os pré-tratamentos térmicos, realizados em temperaturas moderadas (entre 50 °C e 90 °C), contribuem para a desnaturação de proteínas, a quebra de ligações intercelulares e a solubilização parcial da matéria orgânica, o que resulta em maior acessibilidade aos compostos fermentáveis. Já os pré-tratamentos químicos, como a alcalinização com hidróxido de sódio (NaOH), promovem a desestruturação de componentes como a lignina e a hemicelulose, liberando açúcares que são prontamente convertidos em biogás (Obileke *et al.*, 2024).

Guéri et al. (2021), baseou o seu estudo em como melhorar a produção de metano nos processos de digestão anaeróbia aplicando pré tratamentos para resíduos lignocelulósicos, como podas de plantas. A partir das literaturas analisadas constatou-se que a melhor alternativa é a hidrólise alcalina que tem ganhado destaque como pré-tratamento aplicável em escala industrial, principalmente por poder ser realizada em temperatura e pressão ambiente, o que reduz custos operacionais. O mecanismo de ação da hidrólise alcalina envolve a desestruturação dos grupos funcionais da lignina, hemicelulose e celulose, tornando o material mais poroso e acessível à microbiota. Isso favorece a solubilização de compostos biodegradáveis, melhorando a digestão anaeróbia e permitindo aumentos expressivos na

produção de metano. Estudos relatam ganhos de até 27% na produção de CH₄ após esse tipo de pré-tratamento.

Combinados, esses métodos de pré-tratamento aumentam significativamente a eficiência do processo digestivo, reduzindo o tempo de retenção hidráulica necessário e ampliando os rendimentos volumétricos de metano. Cabe destacar que a adoção dessas técnicas deve considerar aspectos técnicos e econômicos, como o custo dos reagentes, o consumo energético e a necessidade de manejo de efluentes, garantindo que os ganhos em produtividade não comprometam a viabilidade do sistema. Portanto, o sucesso na intensificação da produção de biogás depende diretamente de uma abordagem multidisciplinar, que integre conhecimentos de microbiologia, engenharia de processos e gestão de resíduos orgânicos, sempre alinhada com os princípios da sustentabilidade ambiental.

4.4.3 Sistema Híbrido: Integração do Biogás com Energia Fotovoltaica

De acordo com a revisão da literatura, verificou-se que a efetividade de um sistema híbrido que integra biogás e energia fotovoltaica está diretamente relacionada ao sistema de controle implementado. Enquanto a energia solar fotovoltaica depende da radiação solar e apresenta variações diárias e sazonais, a produção de biogás depende da disponibilidade e qualidade do substrato orgânico, além do funcionamento dos processos biológicos internos, que possuem dinâmicas próprias e tempos de resposta mais lentos.

Essa diversidade exige sistemas de controle avançados capazes de monitorar continuamente a geração e o consumo, prever variações e ajustar a operação de forma dinâmica. O uso de algoritmos inteligentes, como controle preditivo baseado em modelos, técnicas de otimização multiobjetivo e aprendizado de máquina, tem se mostrado eficaz para coordenar os diferentes fluxos energéticos, garantindo que a energia gerada por cada fonte seja utilizada da forma mais eficiente possível, minimizando perdas e maximizando a confiabilidade do sistema.

Outro desafio relevante refere-se ao equilíbrio entre oferta e demanda energética. A variabilidade conjunta requer mecanismos inteligentes de armazenamento, que podem incluir baterias, tanques para biogás, sistemas de armazenamento térmico e soluções de gestão da demanda.

Além disso, é fundamental considerar o planejamento institucional para uso das áreas livres indicadas na seção anterior para expansão da geração fotovoltaica, pois sua eventual

destinação futura para novas construções pode impactar diretamente a viabilidade da implantação permanente dos sistemas propostos. Assim, os resultados obtidos devem ser entendidos como uma análise preliminar e exploratória, fornecendo subsídios técnicos iniciais para a tomada de decisão e para estudos futuros mais detalhados, contribuindo para o avanço do planejamento energético sustentável no âmbito universitário.

Por fim, este estudo demonstra que, em termos de aporte energético, o biogás apresenta participação praticamente nula frente ao potencial da geração fotovoltaica no campus, não alcançando sequer 1% da demanda anual da UFSCar. Diante disso, recomenda-se direcionar os próximos passos para um arranjo híbrido em que a fonte fotovoltaica assuma o papel primário de suprimento, sendo dimensionada para maximizar o autoconsumo nas horas de maior irradiação e reduzir a dependência da rede elétrica. O biogás, por sua vez, deve atuar apenas como fonte complementar, contribuindo para a estabilização do sistema em períodos noturnos, de baixa insolação ou em situações de pico de demanda.

No entanto, a implementação de um sistema híbrido só deve ser considerada após uma análise detalhada de viabilidade econômica, visto que atualmente não existe uma usina de biogás na UFSCar. Portanto, os custos de implantação precisam ser cuidadosamente avaliados e comparados aos benefícios potenciais que sua instalação poderia proporcionar.

5. CONCLUSÃO

Diante da crescente necessidade de transição para fontes energéticas mais sustentáveis, este trabalho evidenciou a relevância da implantação de um sistema híbrido de geração de energia no campus São Carlos da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), integrando energia solar fotovoltaica e biogás. A partir de uma revisão bibliográfica ampla e de uma análise preliminar das condições reais do campus, foi possível compreender não apenas o potencial individual dessas fontes renováveis, mas também as sinergias possíveis quando combinadas em um arranjo híbrido.

Os estudos de caso analisados demonstram que a complementaridade entre a energia fotovoltaica, dependente da variação diária e sazonal da radiação solar, e a energia proveniente do biogás, capaz de geração contínua a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, configura uma estratégia robusta para garantir maior segurança energética, reduzir custos com eletricidade e mitigar impactos ambientais.

Ao confrontar a literatura com o cenário energético da UFSCar, identificaram-se oportunidades reais de aproveitamento dos resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário e das podas vegetais do campus, embora a disponibilidade atual de biomassa seja insuficiente para gerar impactos energéticos expressivos. A análise demonstrou que, mesmo em cenários otimizados, a produção de biogás no campus São Carlos representa menos de 1% da demanda energética anual. Esse resultado evidencia a necessidade de estratégias complementares, como a ampliação dos tipos de substratos, incluindo, por exemplo, esterco animal, parcerias institucionais para aumento de insumos e pré-tratamentos, como a hidrólise alcalina com NaOH, que pode elevar a produção de metano em até 27%. Além de aprofundar os estudos sobre alternativas existentes, é fundamental realizar, paralelamente, uma análise de viabilidade econômica para verificar se o investimento se justifica diante dos benefícios obtidos.

Em contrapartida, o potencial fotovoltaico do campus se mostrou bastante promissor, ainda que os valores estimados apresentem incertezas devido às aproximações adotadas nos cálculos. A avaliação preliminar das áreas disponíveis indica que a instalação de painéis nos telhados dos departamentos do CCET e em regiões extensas de gramado pode elevar a produção total para 4,96 GWh por ano. Caso esses valores se confirmem em estudos mais aprofundados, seria possível suprir aproximadamente 62,7% da demanda energética do campus, ultrapassando, a meta do presente estudo de reduzir em 50% a dependência da rede pública. Os resultados preliminares apontam que a energia solar tende a se consolidar como o eixo principal da transição energética da universidade, enquanto o biogás assume função complementar, especialmente em períodos de baixa irradiância.

Contudo, é imprescindível reconhecer que tais projeções se baseiam em condições ideais de instalação e operação. A implementação das soluções discutidas demanda estudos técnicos detalhados envolvendo análises estruturais, levantamento topográfico, avaliações de sombreamento, estudo de solo, licenciamento ambiental e análises econômicas que considerem custo-benefício, tempo de retorno do investimento e manutenção de longo prazo. Esses levantamentos complementares são fundamentais para validar a aplicabilidade prática dos cenários.

Apesar das limitações e desafios identificados, conclui-se que a implantação de um sistema híbrido de geração de energia na UFSCar é tecnicamente viável, ambientalmente desejável e estrategicamente promissora. A combinação entre energia fotovoltaica e biogás

tem potencial para posicionar a universidade como referência nacional em gestão energética sustentável no setor público, contribuindo diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e fortalecendo sua atuação em sustentabilidade, inovação, ensino, pesquisa e extensão.

Assim, os resultados deste estudo indicam que a adoção de um sistema híbrido não apenas reduz custos e emissões, mas também reafirma o compromisso institucional da UFSCar com a eficiência energética e a construção de um futuro ambientalmente responsável.

6. REFERÊNCIAS

FERRAZ JR., José Maria. Série “Energia”: A energia hidrelétrica remonta aos tempos da antiguidade e, no Brasil, continua sendo a mais utilizada. *Jornal da USP*, São Paulo, 18 mar. 2022. Disponível em:

<https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-a-energia-hidreletrica-remonta-aos-tempos-da-antiguidade-e-no-brasil-continua-sendo-a-mais-utilizada/>. Acesso em: 26 maio. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Fact sheet: Hidreletricidade e mudanças climáticas*. Rio de Janeiro: EPE, dezembro 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-852/topico-736/FACT%20SHEET%20HIDRELETRICIDADE%20E%20MUDAN%C3%87AS%20CLIM%C3%81TICAS.pdf>. Acesso em: 26 maio. 2025.

VILLALVA, Marcelo Gomes. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

Green, M. A., et al. (2024). *PV module technology and reliability: overview and future prospects*. *Progress in Photovoltaics*, 32(5), 447–468. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.3751>

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

YANG, W. S. et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, v. 356, n. 6345, p. 1376–1379, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Renewables 2023: analysis and forecast to 2028*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 26 maio 2025.

ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; WARD, A. J. Anaerobic Digestion: Microbiology and Technology. In: Lens, P.N.L. et al. (eds). *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. Springer, 2011.

APPELS, L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, p. 755–781, 2008.

PERSSON, T., et al. “Upgrading of biogas to biomethane – Review of commercial technologies.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, 109395, 2019.

ANGELIDAKI, I.; KARAKASHEV, D.; BATSTONE, D. J.; MAO, W.; ZHANG, H.; ASTALS, S. “Biochemical methane potential (BMP) testing of biomass and waste: Determinants, methods, and importance.” *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 108, no. 1, pp. 3–8, 2011.

IEA Bioenergy. *The Role of Anaerobic Digestion and Biogas in the Circular Economy*. Task 37, 2019. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/the-role-of-anaerobic-digestion-and-biogas-in-the-circular-economy/>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2021.

ARSOVA, Ljupka. Anaerobic digestion of food waste: current status, problems and an alternative product. 2010. Monografia (M.S. Degree) – Department of Earth and Environmental Engineering, Fu Foundation of Engineering and Applied Science, Columbia University, May 2010.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; MACÉ, S. Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 31, p. 99–111, 2011.

MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 412–427, 2014.

RAPOSO, F. et al. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: Evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 87, p. 1228–1236, 2011.

BARBOSA, C. F. O. (2006). Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica. Dissertação de Mestrado, Belém: UFPA.

GUERRERO, J. M. et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 158–172, 2011.

LUNA-RUBIO, R. et al. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*, v. 86, n. 4, p. 1077–1088, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Atlas da Eficiência Energética do Brasil. Brasília: MME, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ADEKUNLE, K. F. et al. A review of biogas production from animal manure, co-digestion and digestion optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, p. 180–198, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. *A UFSCar – Campus São Carlos*. São Carlos, SP: UFSCar, 2025. Disponível em: <https://www.ufscar.br/a-ufscar/campus-sao-carlos>. Acesso em: 03 jul. 2025.

CASTRO, Marcelo Stehling de; BELCHIOR, Fernando Nunes; OLIVEIRA, Gustavo Dias de; SANTOS, Josephy Dias; PIRES, Sandrerley Ramos. *Análise do Impacto da Geração Fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás*. *Brazilian Applied Science Review*, Goiânia, v. 4, n. 5, 2020.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico*. 2017. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/Produ%C3%A7%C3%A3oBiog%C3%A1sRes%C3%ADduos.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2025.

ITEK ENERGY. *Monocrystalline vs polycrystalline solar panels*. 2024. Disponível em: <https://www.itekenergy.com/solar-panels/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels>. Acesso em: 02 jul. 2025.

PYRON SOLAR. *Solar panels: monocrystalline vs polycrystalline*. 2024. Disponível em: <https://pyronsolar.com/solar-panels/monocrystalline-vs-polycrystalline>. Acesso em: 02 jul. 2025.

REDDIT. *Bifacial solar panels efficiency discussion*. r/solar energy. 2024. Disponível em: <https://www.reddit.com/r/solarenergy/comments/y2bq6n>. Acesso em: 02 jul. 2025.

REUTERS. *US solar tracker dominance offers learnings for other markets*. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/us-solar-tracker-dominance-offers-learnings-other-markets-2024-08-08>. Acesso em: 02 jul. 2025.

WIKIPEDIA. *Monocrystalline silicon*. 2024a. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_silicon. Acesso em: 02 jul. 2025.

WIKIPEDIA. *Solar cell*. 2024b. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell. Acesso em: 02 jul. 2025.

WIKIPEDIA. *Photovoltaic system*. 2024c. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system. Acesso em: 02 jul. 2025.

OBILEKE, KeChrist; MAKAKA, Golden; TANGWE, Stephen; MUKUMBA, Patrick. *Improvement of biogas yields in an anaerobic digestion process via optimization technique*. Environment, Development and Sustainability, 2024. DOI: 10.1007/s10668-024-04540-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04540-6>. Acesso em: 02 jul. 2025.

NYAMATHULLA, Shaik; DHANAMJAYULU, C. *A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations*. Journal of Energy Storage, v. 61, p. 117–279, 2024.

AHMAD, Shameem; HASAN, Sheikh Md. Nahid; HOSSAIN, Md. Sajid; UDDIN, Raihan; AHMED, Tofael; MUSTAYEN, A. G. M. B.; HAZARI, Md. Rifat; HASSAN, Mahamudul; PARVEZ, Md. Shahariar; SAHA, Arghya. *A Review of Hybrid Renewable and Sustainable Power Supply System: Unit Sizing, Optimization, Control, and Management*. *Energies*, Basel, v. 17, n. 23, p. 6027, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6027>. Acesso em: 03 jul. 2025.

AJIBOYE, Olalekan Kunle; OCHIEGBU, Chimere Victor; OFOSU, Eric Antwi; GYAMFI, Samuel. *A review of hybrid renewable energies optimisation: design, methodologies, and criteria*. *International Journal of Sustainable Energy*, [S.l.], v. 42, n. 1, p. 648–684, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786451.2023.2227294>. Acesso em: 03 jul. 2025.

KHAN, Aqib; BRESSEL, Mathieu; DAVIGNY, Arnaud; ABBES, Dhaker; OULD BOUAMAMA, Belkacem. *Comprehensive Review of Hybrid Energy Systems: Challenges, Applications, and Optimization Strategies*. *Energies*, Basel, v. 18, n. 10, p. 2612, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/10/2612>. Acesso em: 03 jul. 2025

ROLDÁN-PORTA, Carlos; ROLDÁN-BLAY, Carlos; DASÍ-CRESPO, Daniel; ESCRIVÁ-ESCRIVÁ, Guillermo. *Optimising a biogas and photovoltaic hybrid system for sustainable power supply in rural areas*. 2023.

CASTRO, Fernando Ferreira de; OLIVEIRA, Ana Beatriz Ferreira de; GIAMBIAGI, Fábio. *Transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos: aspectos geoeconômicos*. Brasília: Ipea, 2024. (Texto para Discussão, n. 3051). Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/306798/1/190909708X.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

PERTILE, Luciano Calegari Burghi. *Sistema híbrido solar-biogás de geração de eletricidade para uma indústria de laticínios: aspectos energéticos, econômicos e ambientais*. 2020. Trabalho de Graduação (Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), [Campus/local], 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/2141c35e-da8c-4337-a01b-5a97e249b211>. Acesso em: 8 set. 2025.

APPIAH, F.; KWAKU, A.; KWADWO, A. Techno-economic feasibility of solar/biogas/battery hybrid power system for rural electrification in Ghana. *Cogent Engineering*, v. 9, n. 1, 2034376, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2034376>. Acesso em: 8 set. 2025.

LIMA, J. L. et al. Biogas Production from Food Waste in University Campuses: Case Study of the Federal University of Pernambuco, Brazil. *Sustainability*, v. 16, n. 23, p. 10238, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su162310238>. Acesso em: 8 set. 2025.

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais. *Revista Univap*, v. 22, n. 40, 2017.

SILVA, Patrícia F.; BONATTO, Benedito Donizeti; VALÉRIO, Victor E. M.; VALERIO, Victor Eduardo de Mello; MIRANDA, Rafael C.; COSTA, Vinicius B. F. Model and feasibility analysis: Photovoltaic generation systems installed at Brazilian public universities for energy sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 62, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138824000481>. Acesso em: 8 set. 2025.

DAVID, Thamyres Machado; SOUZA, Teófilo Miguel de; RIZOL, Paloma Maria Silva Rocha. Photovoltaic systems: a review with analysis of the energy transition in Brazilian culture, 2018–2023. *Energy Informatics*, v. 7, n. 1, p. 1–26, 2024. Disponível em: <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-024-00316-4>. Acesso em: 8 set. 2025.

MACHÍN, A. et al. Advancements in Photovoltaic Cell Materials: Silicon-based, Organic and Perovskite Solar Cells. *BMC Chemistry*, v. 18, p. 34, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10934213/>. Acesso em: 19 out. 2025

SHARMA, P. Comprehensive study on photovoltaic cell's generation and performance. *Energy Science & Engineering*, v. 2, p. 292, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40243-024-00292-5>. Acesso em: 19 out. 2025.

AL-ALI, Saeed; OLABI, Abdul Ghani; MAHMOUD, Montaser. A review of solar photovoltaic technologies: developments, challenges, and future perspectives. *Energy Conversion and Management* : v. 27, 2025. Disponível em

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525001898>. Acesso em: 19 out. 2025.

SHAH, N. A Review of Third Generation Solar Cells. Processes, v. 11, n. 6, 1852, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/6/1852>. Acesso em: 19 out. 2025

GADIRLI, G. et al. Fundamentals, Operation and Global Prospects for the Development of Biogas Plants — A Review. Energies, v. 17, n. 3, p. 568, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/3/568>. Acesso em: 19 out. 2025

ARDOLINO, F.; CARDAMONE, G. F.; PARRILLO, F.; ARENA, U. Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 139, p. 110677, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120308728>. Acesso em: 25 out. 2025

NERI, A.; BERNARDI, B.; ZIMBALATTI, G.; BENALIA, S. An Overview of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Food Waste for Biomethane Production. Energies, v. 16, n. 19, p. 6851, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/6851>. Acesso em: 25 out. 2025.

WANG, S. et al. Influence of temperature on biogas production efficiency. Water, v. 11, n. 1, p. 133, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/133>. Acesso em: 25 out. 2025.

TIAN, G. et al. The effect of temperature on the microbial communities of peak biogas production in batch biogas reactors. Renewable Energy, v. 123, p. 15–25, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118301290>. Acesso em: 25 out. 2025.

SAWATDEENARUNAT, C.; Surendra, K. C.; Takara, D.; Oechsner, H.; Khanal, S. K. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, v. 178, p. 178-186, fev. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414013625>. Acesso em: 25 out. 2025.

GHAEDI, M. et al. Evaluation of the efficiency of dry anaerobic digester in biogas production. *Journal of Environmental Management*, v. 114, p. 114941, 2024. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11494102/>

SANGUBOTLA, R.; et al. Emerging materials and pretreatment strategies in anaerobic digestion for biogas production: A review on recent advances, limitations, and future. *Bioresource Technology*, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669025014852>

SINGH, B. J.; et al. A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Science of the Total Environment*, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723020182>

DARMEY, J.; et al. A review of pretreatment strategies for anaerobic digestion: Unlocking the Biogas Generation Potential of Wastes in Ghana. *MDPI Sustainability*, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2813-0391/3/3/24>

GOMES, Ana; BORGES, Amadeu; PERES, José A.; LUCAS, Marco S. Bioenergy production from agro-industrial wastewater using advanced oxidation processes as pre-treatment. *Catalysts*, v. 13, n. 8, art. 1186, 2023.

PROENÇA, Alexandre José. Potencial de produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos. 2022. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) — Universidade do Estado do Pará (UEPA), Belém, 2022.

GUERI, Matheus Vitor Diniz; SCHIRMER, Waldir Nagel; TORRES, Luan Matheus Gonçalves; FURTADO, Andreia Cristina. Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão. *Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia*, v. 7, n. 3, 2021

BAGDADEE, A.H.; Maitraya, A.M.; Islam, A.; Siddique, Md. N.E.A. A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production.

PROENÇA, Alexandre Júlio. Potencial de produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos do Restaurante Universitário da UFSC. Florianópolis, 2022

SAWATDEENARUNAT, Chayanon; SURENDRA, K. C.; TAKARA, Devin; OECHSNER, Hans; KHANAL, Samir Kumar. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, v. 178, p. 178-186, 2015.

USP investe na transição energética para um futuro mais sustentável. *Jornal da USP*, São Paulo, 19 de maio de 2025. Disponível em: <https://jornal.usp.br/institucional/usp-investe-na-transicao-energetica-para-um-futuro-mais-sustentavel/>. Acesso em: 15 dez. 2025

Gestão Energética. UFMG Sustentabilidade, 2025. Disponível em: <https://www.ufmg.br/sustentabilidade/gestao/energetica/>. Acesso em: 15 dez. 2025