

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE ALVES LANGE

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SINTÉTICO A PARTIR DO BIOGÁS:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS NO SETOR AGROPECUÁRIO DE TOLEDO-PR

CURITIBA

2025

ALEXANDRE ALVES LANGE

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SINTÉTICO A PARTIR DO BIOGÁS:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS NO SETOR AGROPECUÁRIO DE TOLEDO-PR

Artigo apresentado ao curso de Pós-Graduação
MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais
Renováveis, Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná, como requisito
parcial à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

CURITIBA

2025

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SINTÉTICO A PARTIR DO BIOGÁS: OPORTUNIDADES E DESAFIOS NO SETOR AGROPECUÁRIO DE TOLEDO-PR

ALEXANDRE ALVES LANGE

RESUMO

O município de Toledo (PR), por apresentar um dos maiores rebanhos suínos do Brasil, enfrenta sérios problemas ambientais devido à quantidade de dejetos produzidos. Além disso, esse impacto implica negativamente no desenvolvimento da região. Por outro lado, apresenta um grande potencial para a produção de biocombustíveis. Nesse artigo se apresenta um estudo de caso que visa identificar o potencial de produção de gás de síntese (Syngas) para a produção de combustível sintético a partir do biogás proveniente da suinocultura no município de Toledo-PR. Evidencia-se que a região Sul do país proporciona um enorme potencial de produção de biogás a partir da suinocultura. Estima-se para essa região uma produção de biogás em torno de 2,9 bilhões de Nm^3 por ano. Sabendo-se que em Toledo será implantada uma usina de biogás com capacidade de produção de $750 \text{ Nm}^3/\text{h}$ é possível produzir, utilizando a tecnologia da empresa Caphenia, cerca de 375 kg/h de biocombustível. Considerando o potencial de produção de biometano no município, utilizando a mesma tecnologia, é possível produzir mais de 20.000 t/a de biocombustível, que a partir do Processo Fischer-Tropisch, pode ser transformado, por exemplo em querosene de aviação. Diante dessa realidade, considera-se viável e de grande relevância a implantação de biodigestores para o tratamento biológico dos dejetos suínos, associados à novas tecnologias que promovam alternativas sustentáveis para a produção de biocombustíveis, como o caso da tecnologia da Caphenia.

Palavras-chave: sustentabilidade; tecnologias verdes; resíduos orgânicos; syncrude.

PRODUCTION OF SYNTHETIC FUEL FROM BIOGAS: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN THE TOLEDO-PR AGRICULTURAL SECTOR

ALEXANDRE ALVES LANGE

ABSTRACT

The municipality of Toledo (PR), which has one of the largest pig herds in Brazil, faces serious environmental problems due to the amount of waste produced. Furthermore, this impact has a negative impact on the development of the region. On the other hand, it has great potential for biofuel production. This article presents a case study that aims to identify the potential for producing synthesis gas (Syngas) to produce synthetic fuel from biogas from pig farming in the municipality of Toledo-PR. The southern region of the country offers enormous potential for producing biogas from pig farming. Biogas production in this region is estimated at around 2.9 billion Nm³ per year. Knowing that a biogas plant with a production capacity of 750 Nm³/h will be set up in Toledo, it is possible to produce around 375 kg/h of biofuel using Caphenia's technology. Considering the potential for biomethane production in the municipality, using the same technology, it is possible to produce more than 20,000 t/a of fuel, which, using the Fischer-Tropisch Process, can be transformed into aviation kerosene, for example. Given this reality, the implementation of biodigesters for the biological treatment of pig manure, associated with new technologies that promote other sustainable alternatives to produce biofuels, is considered feasible and of great relevance, as is the case with the Fischer-Tropisch technology.

Keywords: sustainability; green technologies; biowaste; syncrude.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	05
2	DESENVOLVIMENTO.....	07
2.1	TOLEDO-PR.....	07
2.2	DESENVOLVIMENTO DA SUINOCULTURA NO MUNICÍPIO DE TOLEDO-PR.....	08
2.3	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA REGIÃO SUL DO BRASIL.....	09
2.4	PROGRAMA “INTERNATIONAL HYDROGEN RAMP-UP PROGRAMME (H2Upppd).....	11
2.5	BIOGÁS.....	12
2.6	PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	13
2.7	CAPHENIA.....	14
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
3.1	TRANSFORMAÇÃO DO BIOGÁS EM BIOCOMBUSTÍVEL (Syngas).....	15
3.2	BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO DA CAPHENIA.....	17
4	CONCLUSÃO.....	18
	REFERÊNCIAS.....	19

1 INTRODUÇÃO

A partir das negociações resultantes do Protocolo de Kyoto, firmado em 1997, que preveem a redução de emissão de gases de efeito estufa, como o, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrogênio, hidrofluorcarbonos, perfluorocarbonos e hexafluor de enxofre, intensificou-se a busca pela redução da emissão desses gases a nível mundial. Na sequência do Protocolo de Kyoto, foi firmado o Acordo de Paris em 2015. Tal celebração veio para corroborar com o desenvolvimento de ações de proteção ambiental, bem como minimizar os impactos negativos e as mudanças climáticas provocados pela produção e consumo de combustíveis fósseis. Desde então a discussão sobre as temáticas que envolvem as mudanças climáticas, sustentabilidade e utilização de combustíveis de origem renováveis tem se intensificado (Scovazzi; Lima, 2021).

O Brasil demonstra um grande potencial para a produção de combustíveis de origem de fontes renováveis, como o biogás, produzido a partir da matéria-orgânica. Freitas *et al.* (2019) caracterizam tal gás como um combustível que apresenta todas as propriedades técnicas e econômicas que podem ser amplamente exploradas no mercado brasileiro. O biogás é uma mistura de gases provenientes, por exemplo, da decomposição de dejetos suínos, e é composto por cerca de 40 – 75% de CH_4 , 25 – 55% de CO_2 , até 10% de vapor de água (H_2O), bem como nitrogênio molecular (N_2), oxigênio (O_2), amoníaco (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (Watter, 2015). Em média o biogás contém 60% de metano (Cassini; Vozoller; Pinto, 2003).

O Decreto nº 11.003 de 2022 institui estratégias de incentivo ao uso sustentável do biogás (Brasil, 2022). A utilização desse recurso renovável corresponde às expectativas de processos e acordos de descarbonização global (CIBiogás, 2022). Portanto, tal biocombustível, proveniente da agropecuária brasileira, é visto como uma nova fonte de energia renovável na matriz energética brasileira.

A pecuária brasileira possui grande representatividade no PIB do país. Segundo dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2019) esse setor teve um crescimento considerável em 2019, atingindo 23,7% de aumento. Esse acréscimo é atribuído não só pelo consumo e demanda interna, como também pelas exportações de carne. Conforme o Ministério de Agricultura e Pecuária

(MAPA) a suinocultura no Brasil tem se destacado nas últimas décadas em decorrência do aumento da demanda por carne suína, tanto no mercado interno bem como no externo (Brasil, 2019). Dessa forma o Brasil passa a integrar o grupo de países com maior produção e exportação de carne suína no contexto global, sendo o aumento de exportações brasileiras acrescido em 16% (EMBRAPA, 2020).

Dados do Censo Agropecuário realizado em 2017, apontam que o rebanho nacional de suínos era constituído na época desse levantamento por 40 milhões de animais, presentes em 1,4 milhão de propriedades produtoras (IBGE, 2017). Vale ressaltar que de acordo com o MAPA, a produção da referida carne é estimada para crescer num percentual de 26,8% até 2029/2030 (Brasil, 2020). Juntamente com o aumento da produção e demanda por alimentos, que acontece de forma proporcional ao crescimento da população mundial, surgem fenômenos que contribuem para uma maior geração de resíduos (Kunz; Miele; Steinmetz, 2009; Tápparo *et al.*, 2020; Tápparo, 2021). Com a produção de suínos também se tem a produção de dejetos. Estima-se que são gerados cerca de 75 milhões de m³/ano de dejetos suínos no Brasil (Moretti; Bertoncini; Abreu-Junior, 2021).

Os dados apresentados nesse estudo mostram a importância do crescimento das atividades no agronegócio, especificamente no setor da suinocultura. Segundo a visão da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás) e da Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás), haverá não somente um impacto positivo na economia e no impulso ao mercado, como também efeitos negativos diretos e significativos sobre o meio ambiente, em razão da geração de resíduos e efluentes. Os resíduos orgânicos provenientes da suinocultura estão intimamente ligados com a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Moretti; Bertoncini; Abreu-Junior, 2021).

Esse artigo apresenta um estudo de caso sobre a viabilidade da implantação de uma usina de biogás na comunidade do Rocio, com capacidade de 750 m³/h, visando a produção de Syngas como combustível sintético, utilizando a tecnologia da empresa Caphenia.

O objetivo geral foi avaliar o potencial de produção de Syngas a partir do biogás gerado pela suinocultura no município de Toledo-PR. Especificamente, o

estudo buscou caracterizar o município em relação à suinocultura e aos dejetos gerados, descrever o processo de produção e purificação do biogás, apresentar o processo da Caphenia para conversão de biogás em Syngas, e discutir os benefícios e desafios da implantação dessa tecnologia.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 TOLEDO-PR

O município de Toledo localiza-se na Mesorregião Oeste do Estado do Paraná, Brasil, sendo essa composta de 21 municípios (IPARDES, 2017). Tal região encontra-se no terceiro planalto paranaense, totalizando 23.128 km² (Ribeiro; Petry; Limberger, 2018). Toledo possui de acordo com levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2022 uma área territorial de 1.198,049 km² com uma população de 150.470 pessoas (IBGE, 2024). Conforme Ribeiro, Petry e Limberger (2018) o município possui relevo ligeiramente ondulado, sendo considerado quase plano no centro e a altitude é de 547 m acima do nível do mar, com latitude sul 24°45' e longitude oeste 53°42'. Para Farias (2015) a atividade agrícola é predominante na economia possuindo o maior Produto Interno Bruto (PIB) Agropecuário do Paraná, sendo que o agronegócio devolve cerca de R\$ 15 milhões por ano em Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) além de contribuir de forma relevante o desenvolvimento de outras áreas.

Dentre as atividades no setor agropecuário merece destaque no município a produção de suínos. Dados da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (Paraná, 2017) apontam que a produção concentrada na região de Toledo na época do levantamento (2015) era de 46,5% do valor bruto da produção de regiões produtoras do Estado. O efetivo do rebanho de suínos no município de Toledo é de 909.879 cabeças (IBGE, 2024).

Todo esse potencial, esbarra nos impactos que a produção de dejetos ocasiona ao meio ambiente, e em consequência disso, ganham espaço tanto a nível global como nacional discussões e desenvolvimento de projetos/programas que visem minimizar os prejuízos provenientes da suinocultura. A nível internacional, podem ser

citados o Programa “International Hydrogen Ramp-Up Programme (H2Upppd)” e o processo da empresa Caphenia, que serão brevemente comentados e detalhados nas próximas seções.

A seguir apresenta-se uma breve descrição do município de Toledo-PR com ênfase na produção de suínos, bem como seu respectivo potencial de produção de biogás.

2.2 DESENVOLVIMENTO DA SUINOCULTURA NO MUNICÍPIO DE TOLEDO-PR

Considerando-se as diversas regiões brasileiras, fica evidente nos dados do IBGE (2017) o destaque da região Sul do Brasil, que possuía nesse levantamento um rebanho de 19 milhões de suínos, dos quais 91% são destinados à engorda, totalizando 17,3 milhões. Além disso, 8,5% são matrizes fêmeas, o que equivale a 1,6 milhão, e 0,5% são matrizes machos, somando 94 mil animais.

A região Sul é um dos maiores produtores e exportadores de carne suína do mundo, ocupando a quarta colocação (Brasil, 2020). Os Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul se destacam no cenário nacional como os maiores produtores e exportadores de carne suína (Engelage *et al.*, 2015). Dentre os municípios da região Sul do país, se destaca o município de Toledo, posicionado no ranking entre os seis municípios com maior índice de desenvolvimento humano por conta do agronegócio (SEBRAE/ABCS, 2016). Além disso, Toledo possui o maior rebanho de suínos do país. Esse fato torna a produção intensiva no município gradativamente mais limitada devido à grande quantidade de dejetos produzidos que podem causar sérios impactos ambientais nas sub-bacias hidrográficas da região. Uma das alternativas para mitigar esse passivo ambiental é o tratamento biológico em biodigestores aliado à produção de biogás para o aproveitamento energético (Baú, 2020; Bley, 2015).

A biodigestão anaeróbia além de diminuir o potencial poluente e a carga orgânica, oferece um sistema de tratamento mais compacto em comparação às lagoas aeróbias, isento de odores e capaz de recuperar biogás, que pode ser utilizado para diversos fins energéticos (térmico, elétrico e como combustível para veículos). Além disso, o digestato resultante do processo anaeróbio pode ser considerado um

biofertilizante (dependendo de sua composição química) e, quando aplicado na agricultura, melhora a qualidade e a fertilidade do solo (UNIDO/CIBiogás/ABiogás, 2020).

Os resíduos orgânicos provenientes da suinocultura estão intimamente ligados com a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Moretti; Bertoncini; Abreu-Junior, 2021). Vale ressaltar que o manejo inadequado desses resíduos causa desequilíbrio ambiental e promovem, dentre outros fenômenos, a contaminação do lençol freático e do solo por substâncias tóxicas, poluição olfativa e transmissão de doenças. O tratamento biológico desses dejetos em biodigestores é uma alternativa para minimizar tais impactos ambientais negativos. Além disso, os biodigestores promovem a estabilização da matéria orgânica e produzem biogás, transformando dessa forma passivos ambientais em receita (Skaggs *et al.*, 2018). A seguir será abordado sobre o potencial de produção de biogás na região Sul do Brasil, bem como em Toledo, no Paraná.

2.3 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Considerando a realidade aqui apresentada, cita-se a seguir dados do relatório de “Potencial de Produção de biogás do Sul do Brasil” (UNIDO/CIBiogás/ABiogás, 2020) que é o resultado do Mapeamento de Substratos e sua Conversão Energética para essa região, demonstrando assim a potencialidade do setor de biogás e seus benefícios energéticos.

Os resíduos gerados pela pecuária (aves, bovinos e suínos) e pela agroindústria (abatedouros, cervejarias, laticínios, processamento de mandioca e usinas sucroalcooleiras) nos estados da região Sul do Brasil têm um potencial de produção de biogás estimado em 2,9 bilhões de metros cúbico normal (Nm^3) por ano. Essa unidade de medida expressa o volume de gases em condições padrão de temperatura e pressão, que são conhecidas como condições normais.

Deste total, 47% provêm dos resíduos da pecuária, com a suinocultura destacando-se como o setor com o maior potencial de geração de biogás no sul do Brasil. Tal região tem potencial para produzir 890,9 milhões Nm^3 /ano de biogás. Com essa produção é possível gerar 1,8 mil GWh/ano de energia elétrica, o que

corresponde ao abastecimento de 700 mil residências ou ainda o suficiente para atender a 6% da demanda rural do país (UNIDO/CIBiogás/ ABiogás, 2020).

Como o município de Toledo tem a maior concentração de suínos, apresenta consequentemente o maior potencial para a produção de biogás da região Sul do Brasil. Anualmente, a cidade pode gerar 26,4 milhões de m³/ano de biometano, o que corresponde a 27,5 milhões de litros de gasolina comum por ano (UNIDO/CIBiogás/ ABiogás, 2020). Na figura 1, se identifica a quantidade de plantas de biogás representativas do setor agropecuário e que estão em operação no Brasil. Nas regiões em vermelho se concentra a maior quantidade de plantas de biogás em operação, enquanto as regiões em verde apresenta a menor concentração.

FIGURA 1 - PANORAMA DO BIOGÁS 2022



FONTE: CIBiogás (2024).

Tais plantas têm como substrato resíduos de atividades agropecuárias, como a suinocultura. A região em vermelho, principalmente localizada na porção oeste do Sul do país, é onde se localiza a maior quantidade de usinas. De acordo com o Panorama do Biogás (CIBiogás, 2024) são mais de 625 plantas de biogás com capacidade de produção de mais de 275 milhões Nm³/ano de biogás.

Conforme os dados apresentados anteriormente, fica nítido o potencial de novas oportunidades para a cadeia produtiva do biogás e combustíveis sintéticos no Brasil. A digestão anaeróbia se destaca como uma aliada no tratamento de resíduos e na agregação de valor ao mercado. Vários programas podem beneficiar a transição energética brasileira, dentre eles, um programa de financiamento alemão, que será apresentado no tópico a seguir.

2.4 PROGRAMA “INTERNATIONAL HYDROGEN RAMP-UP PROGRAMME (H2Upppd)

O Programa de financiamento do Ministério Federal Alemão de Economia e Proteção Climática (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz – BMWK), sob a responsabilidade da Agência Técnica de Cooperação Alemã (Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH – GIZ), acompanha o projeto “International Hydrogen Ramp-Up Programme (H2Upppd). O Programa H2Uppp, que se iniciou em 2020 e tem previsão de encerramento no ano de 2024, está ativo em vários países, dentre eles: México, Argentina, Nigéria, Colômbia, Marrocos, África do Sul, Chile e Brasil. O objetivo do Programa é identificar, preparar e apoiar o desenvolvimento do mercado de produção de hidrogênio verde (H2V) e combustíveis derivados da tecnologia Power-to-X (PtX) nos países participantes que estão em processo de industrialização e de desenvolvimento, bem como contribuir com a descarbonização principalmente das indústrias metalúrgicas, químicas e de aviação (Deutschland, 2023).

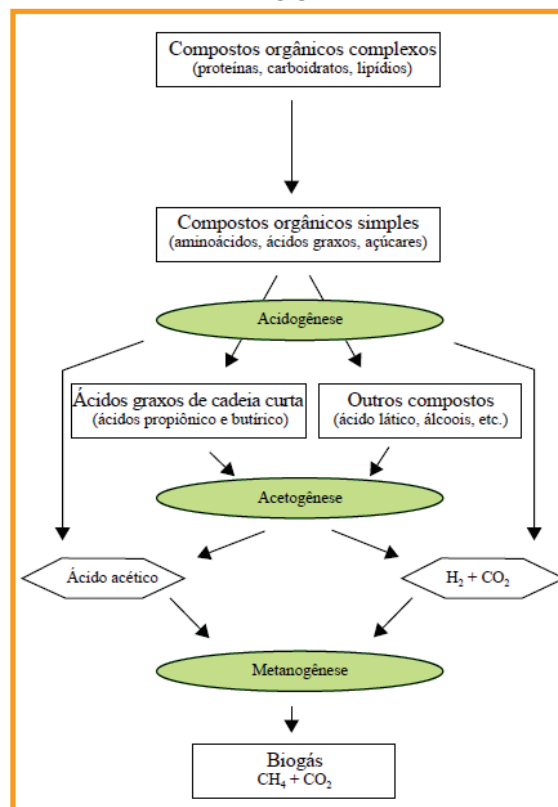
O Programa H2Uppp pode impulsionar a transição energética no Brasil. Na região Sul, como já referido anteriormente nesse estudo, os resíduos orgânicos provenientes da suinocultura estão associados a emissão GEE e consequentemente trazem impactos que podem ser menores quando tratados de forma biológica em biodigestores. Com a implantação do Programa, os desafios ambientais do manejo de dejetos suínos no sul do Brasil podem ser transformados em oportunidades sustentáveis por meio do uso de tecnologias de hidrogênio verde (H2V) e Power-to-X (PtX). O biogás gerado a partir dos resíduos pode ser convertido em hidrogênio verde, promovendo a descarbonização e a economia circular. Além disso, o Programa

fomenta o desenvolvimento econômico regional com acesso a tecnologias avançadas, treinamento e parcerias internacionais, fortalecendo a sustentabilidade e a competitividade agrícola. Assim, o sul do Brasil pode se tornar um modelo de inovação em energia renovável e práticas ambientais. As duas seções a seguir apontam o processo de produção e purificação do biogás.

2.5 BIOGÁS

Existe um processo biológico que envolve a produção de biogás. Esse processo é realizado basicamente por grupos de bactérias anaeróbias que se interagem de forma sintrópica. Em uma usina de biogás as bactérias decompõem a matéria orgânica e produzem biogás. A produção de biogás ocorre em quatro fases distintas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Böttcher, 2013). Na figura 2 é apresentado um fluxograma das quatro fases do processo de produção do biogás a partir da decomposição anaeróbia.

FIGURA 2 - DEMONSTRAÇÃO DAS QUATRO FASES DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS



FONTE: FNR (2010).

Na fase de hidrólise, as bactérias facultativas, através de enzimas, transformam macromoléculas como proteínas, carboidratos e lipídeos em aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Na fase seguinte, na acidogênese, as macromoléculas transformadas pelas bactérias hidrolíticas, são processadas por outro grupo de bactérias que produzem dentre outros compostos, álcoois e ácidos orgânicos de cadeia curta como o propiônico, butírico e láctico. Na acetogênese, os produtos da fase anterior, são transformados em ácido acético, hidrogênio e gás carbônico, que são compostos precursores da fase metanogênese, na qual ocorre a produção do biogás. Na última fase, as bactérias metanogênicas, arqueas, que são estritamente anaeróbias, produzem o biogás a partir de duas rotas, a partir da conversão do ácido acético e da combinação do H_2 e CO_2 em metano (CH_4) (FNR, 2010).

2.6 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é composto por uma mistura de gases. Para que ele seja inserido à rede de gás, é necessário a utilização de processos que beneficiarão o biogás de forma qualitativa (ABC, 2023). Com a remoção do CO_2 o biogás tem seu poder calorífico aumentado, podendo chegar a $35,8 \text{ MJ/m}^3$ (Franco *et al.*, 2021). O biometano (CH_4) proveniente do biogás purificado, é considerado um gás natural renovável (RGN) e apresenta as mesmas características do gás natural (GN), que pode ser tanto injetado na rede ou usado como combustível veicular (ANP, 2022).

Partes do biogás, como enxofre (H_2S), amônia (NH_3) e vapor d'água (H_2O), podem comprometer o sistema de produção de energia e devem ser removidos do biogás. Quando se trata da purificação e de inserção CH_4 na rede de gás, além dos elementos supracitados, deve haver a remoção do CO_2 . Dessa forma o biogás apresenta uma alta concentração de metano, o que pode ser denominado como biometano (FNR, 2014). O CO_2 removido do biogás pode ser combinado com o H_2 em um processo denominado de biometanização (Rittmann; Seifert; Krajete, 2014). Outra aplicação do CO_2 removido do biogás é apresentada pela empresa Caphenia. Tal processo e resultados serão exibidos a seguir.

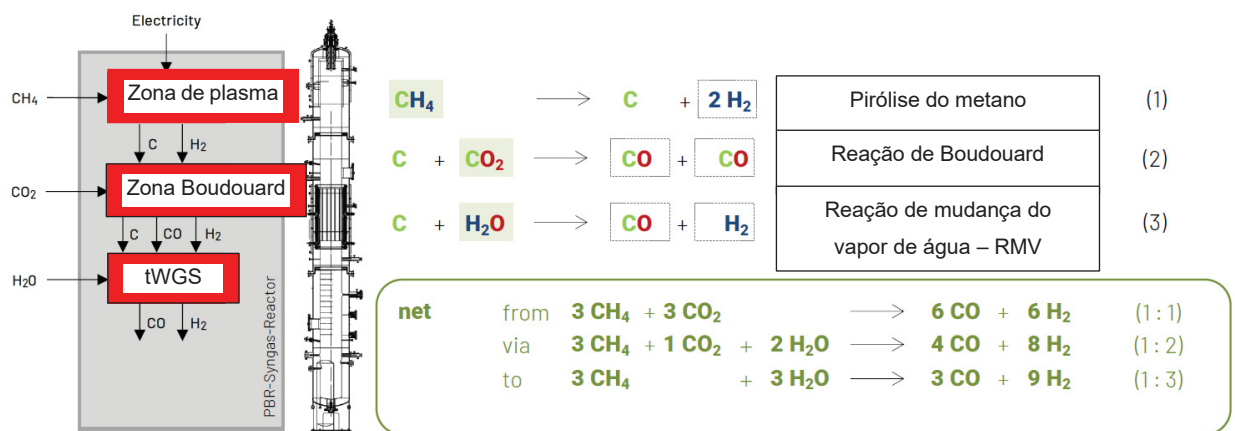
2.7 CAPHENIA

A Caphenia é uma empresa especializada em tecnologias sustentáveis. Um de seus processos, patenteado, apresenta foco na transformação metano e outros gases, presente no biogás, como o CO_2 e H_2 , em gases de síntese que podem ser transformados posteriormente em combustíveis sintéticos, como o syncrude. Utilizando o processo inovador Plasma-Boudouard-Reactor, a empresa converte CH_4 e CO_2 em combustíveis líquidos, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Kigle; Regett, 2019). Esse processo combina as tecnologias Power-to-Liquid (PtL) e Gas-to-Liquid (GtL), juntas denominadas em Power&Gas-to-Liquid (PGtL). A tecnologia PtL transforma energia elétrica renovável em combustíveis líquidos, enquanto a tecnologia PGtL, converte gases em combustíveis líquidos. Alguns dos produtos da tecnologia do reator de plasma da Caphenia (Plasma-Boudouard-Reactor), associada ao processo Fischer-Tropisch – que através de um conjunto de reações químicas, converte gás de síntese (mistura de monóxido de carbono e H_2) em hidrocarbonetos líquidos – são querosene de aviação e outros produtos químicos (Schneiders *et al.*, 2023). Com a tecnologia Caphenia é possível que tais empreendimentos, como usinas produtoras de biogás, a partir do processo de purificação do biogás, produzam seu próprio combustível sintético. A seguir será demonstrado de forma resumida o processo da Caphenia.

A Tecnologia Caphenia se baseia em três fases. Primeiramente o biogás precisa ser purificado para a obtenção do CH_4 . O reator de Plasma-Bourdoaurd é o coração do processo. Nesse reator, que opera em temperaturas extremas ($2.000\text{ }^\circ\text{C}$), ocorre a dissociação do CH_4 em moléculas de carbono (C) e H_2 , ou seja, nesse reator ocorre a pirólise do CH_4 , que é convertido em carbono sólido (C) e H_2 . Na Zona Boudoaurd, denominada desta forma devido à reação química de Boudoaurd, aproveita-se a energia térmica da primeira etapa (cerca de $1.000\text{ }^\circ\text{C}$). Nessa Zona, onde o CO_2 separado do biogás é inserido, ocorre a reação do C com o CO_2 formando mais monóxido de carbono (CO). A base para a formação do gás de síntese é a associação das moléculas de CO e H_2 . Na terceira etapa, no reator “het. water gas shift” – hetWGS (em português, reação de mudança do vapor de água – RMV), ocorre a reação do CO com vapor d’água (H_2O) para produzir mais H_2 e CO_2 . Nessa etapa

visa-se maximizar a eficiência e sustentabilidade do processo como um todo, garantindo desta forma as exigências para a produção do gás de síntese. Após a realização das três fases têm-se o Syngas. A tecnologia da Caphenia associado a um reator Fischer-Tropsch transforma a matéria-prima, o Syngas, em um produto líquido que pode ser o querosene de aviação (Combustível Sustentável de Aviação – SAF), diesel ou nafta (Kigle; Regett, 2019). A figura 3 ilustra o reator da Caphenia e apresenta os três processos para a produção do gás de síntese.

FIGURA 3 - DEMONSTRAÇÃO DO PROCESSO CAPHENIA COM A UTILIZAÇÃO DE TRÊS PROCESSOS EM UM ÚNICO REATOR



FONTE: Kigle e Regett (2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TRANSFORMAÇÃO DO BIOGÁS EM BIOCOMBUSTÍVEL (Syngas)

Para a cidade de Toledo-PR, na comunidade do Rocio, está prevista a implantação de um projeto de saneamento rural para a produção de bioenergia. Este projeto integra um grupo de produtores rurais e através de redes coletoras, visa transportar os dejetos da atividade pecuária para uma central de produção de biogás e gás carbono. O projeto, com orçamento estimado em R\$ 80 milhões, visa tratar quase 1.000 m³ de substrato ao dia, sendo quase 870 m³ proveniente da suinocultura, e cerca de 122 m³ de resíduos oriundos da atividade agroindustrial, e gerar cerca de

750 Nm³/h de biogás. O biogás será purificado, e transformado em biometano (Canal Energia, 2024).

Ambos os projetos, do Rocio e da empresa Caphenia, contribuem para a redução de emissões de gases de efeito estufa e promovem a sustentabilidade. A diferença é que o projeto Rocio utiliza biodigestores para a produção de biogás, enquanto a empresa Caphenia, a partir do seu reator de plasma, transforma o biometano do biogás em gás de síntese, e posteriormente em combustíveis sintéticos líquidos, principalmente o querosene de aviação. No caso do projeto Rocio, o CO₂ produzido, e que poderia ser emitido para a atmosfera, pode ser transformado juntamente com o biometano em Syngas.

O produto do processo Caphenia é o Syngas. Todas as moléculas utilizadas no processo (CH₄, CO₂ e H₂), bem como suas quantidades, são 100% selecionadas e dosadas de acordo com a produção desejada. Para a produção de combustível, como diesel e querosene de aviação (SAF), a partir do Syngas é necessário adicionar à tecnologia Caphenia um outro tipo de processo, o Fischer-Tropisch (FT). Após o processo FT podem ser obtidos diesel, querosene, nafta, dentre outros. Nesse caso se obtém na maior fração o SAF. A produção de nafta se dá em pequena escala.

Com o auxílio da empresa Caphenia, quando solicitada a apresentar um estudo resumido do potencial de produção de biocombustível para o projeto Rocio, foi determinado o potencial de conversão do biogás em Syngas, que poderá ser posteriormente transformado nas refinarias em biocombustíveis líquidos. Ressalta-se que por se tratar de um processo patenteado, a empresa Caphenia se limitou a fornecer somente os resultados de produção de gás de síntese. As informações oferecidas foram cuidadosamente selecionadas e fornecidas, de acordo com a política de confidencialidade de dados da empresa. Os resultados apresentados para o estudo de caso de Toledo-PR podem ser comparados com dados disponíveis no próprio site da empresa e que seguem exibidos a seguir.

Para o Projeto Rocio em Toledo, considerando 60% de CH₄ contido no biogás (Döhler et al., 2013), é possível produzir 375 kg/h de combustível a partir dos 750 m³/h de biogás. Considerando transformar o potencial de 26,4 milhões Nm³/ano de biometano, que pode ser originado a partir do biogás proveniente da suinocultura do município de Toledo, é possível produzir com o processo Caphenia mais de 20.000 t/a

de combustível sintético. Esta quantidade é 40 vezes maior que a capacidade de produção da planta piloto instalada em Frankfurt, na Alemanha.

A empresa Caphenia está implantando uma planta piloto no parque de Frankfurt-Höchst, a GERMANY I. Esta unidade terá capacidade para a produção anual de 500 toneladas de combustíveis sintéticos, dentre eles o SAF. Segundo estimativas da empresa serão necessárias cerca de 553 toneladas de biogás por ano, cerca de 1,5 t/d – considerando 60% de teor de metano presente no biogás. O reator Caphenia poderá gerar 150 Kg de gás de síntese por hora (Caphenia, 2025).

3.2 BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO DA CAPHENIA

Visto a complexidade do tema, que abrange desde impactos ambientais negativos à produção de energias renováveis, como a transformação do biogás em até mesmo querosene de aviação, o município de Toledo-PR tem um grande potencial inovador a seu favor. Com a implantação de biodigestores como forma opcional de tratamento biológico dos dejetos suínos provenientes das atividades pecuárias na região, pode ser obtido o biogás. Utilizando-se da tecnologia Caphenia e da implantação de biodigestores, o município pode desempenhar um papel significativo no tratamento do biogás e na produção de biocombustíveis na região Sul do Brasil. Dessa forma, o que antes era negativo passa a ser positivo, como os impactos ambientais, sociais e econômicos.

A tecnologia Caphenia pode transformar biogás em combustíveis sintéticos de alto valor, como metanol e querosene de aviação (SAF), ou até mesmo em insumos para a produção agrícola e hidrogênio verde (H₂V). Reutilizando o CO₂ que seria emitido novamente para a atmosfera, a tecnologia Caphenia contribui com a economia circular, ou seja, reduz a emissão de GEE e dá um destino econômico e sustentável aos dejetos suínos, já que a alta produção desses resíduos é um fator limitante para a produção agropecuária na região. Todavia, a implementação dessas tecnologias, principalmente a curto prazo, poderá enfrentar desafios, especialmente em municípios menores como Toledo-PR. Dentre esses desafios, estão inclusos os custos iniciais, a infraestrutura e a aceitação social.

4 CONCLUSÃO

Pelo fato do Brasil ser um grande produtor de proteína animal, a matéria-orgânica proveniente das atividades agropecuárias o enquadra num país promissor para o desenvolvimento de combustíveis renováveis, como o biogás. A região que mais se destaca nessa cadeia produtiva é a Sul, tendo o município de Toledo, no Estado do Paraná, o maior rebanho de suínos do país.

Um grande aliado para resolver o problema ambiental que compromete a produção de suínos no município de Toledo, é a utilização de novas tecnologias capaz de transformar matéria-orgânica em biocombustíveis, uma delas é o tratamento biológico em biodigestores. O tratamento desses dejetos, além de contribuir com a despoluição da bacia e sub-bacias hidrográficas do entorno, produz biogás e estabiliza a matéria-orgânica. O biogás pode ser convertido em energia e a matéria-orgânica utilizada como substituto do adubo químico, transformando dessa forma, passivo ambiental em ativos econômicos.

Com o tratamento biológico dos resíduos da suinocultura, utilizando a tecnologia da empresa Caphenia, é possível mitigar os impactos ambientais negativos e transformá-los em receita. Dessa forma, se impulsiona o desenvolvimento econômico e sustentável da região.

A tecnologia da empresa Caphenia se mostra como uma alternativa para a produção de biocombustíveis em Toledo e região. Com a transformação dos dejetos suínos em biogás em biodigestores, e posteriormente em gás de síntese, é possível que as atividades agropecuárias se tornem ambiental e economicamente viáveis e sustentáveis do ponto de vista de produção energética.

Diante dessa realidade, considera-se viável e de grande relevância a implantação de biodigestores para o tratamento biológico dos dejetos suínos, associados à novas tecnologias que promovam alternativas sustentáveis para a produção de biocombustíveis. Com a implantação e combinação dos dois projetos, um que transforma resíduos orgânicos em biogás e outro que do biogás produz biocombustível, no caso o querosene de aviação, pode-se prever que logo será possível voar em companhias aéreas, entre Brasil e Alemanha, utilizando um combustível totalmente sustentável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Resolução ANP Nº 906 DE 18/11/2022**: dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasília, DF: DOU, 2022. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=438796> Acesso em: 15 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SÚINOS; SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - ABCS/SEBRAE. **Mapeamento da suinocultura brasileira**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: https://abcs.org.br/wp-content/uploads/2020/06/01_Mapeamento_COMPLETO_bloq.pdf. Acesso em: 08 jul. 2024.

BAÚ, B. G. **Desenvolvimento sustentável**: análise dos impactos da usina termelétrica de biogás em Entre rios do Oeste. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio) - Universidade Estadual do Oeste Paraná – Unioeste, Toledo, 2020. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5224> Acesso em: 15 mar. 2024.

BLEY JUNIOR, C. **Biogás**: a energia invisível. 2. ed. São Paulo: CIBiogás, 2015.

BÖTTCHER, J. **Management von Biogas-Projekten Faustzahlen**: Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte. Heidelberg: Springer, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária - MAPA. **Projeções do Agronegócio, Brasil 2018/19 a 2028/29: projeções de longo prazo**. Brasília DF, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2018-2019-2028-2029/@download/file/projecoes-2019_versao_final_3.pdf Acesso em: 10 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária - MAPA. **Projeções do Agronegócio, Brasil 2019/20 a 2029/30**: projeções de longo prazo. Brasília DF, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio_2019_20-a-2029_30.pdf Acesso em: 10 abr. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D11003.htm Acesso em: 20 maio 2024.

CANAL ENERGIA. **Toledo receberá a primeira usina a biogás**. 2024. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53270307/toledo-recebera-primeira-usina-a-biogas> Acesso em: 10 jun. 2024.

CAPHENIA. **Nossa tecnologia**. 2025. Disponível em: <https://caphenia.tech/unsere-technologie/> Acesso em: 10 jan. 2025.

CASSINI, S. T.; VOZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES; RIMA, 2023.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. **PIB do agronegócio encerra 2019 com alta de 3,81%**. Piracicaba, 2019. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pibagro-cepea-pib-do-agronegocio-encerra-2019-com-alta-de-3-81.aspx> Acesso em: 10 set. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – CIBiogás. **Biogás Panorama do Biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022**. Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/06/BRAZILIAN-BIOGAS-OVERVIEW-2021.pdf> Acesso em: 22 abr. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – CIBiogás. **Panorama do biogás – 2022**. Foz do Iguaçu: Biogásmat, 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNDZiYTYyNGQtYzliYS00NTMyLTk1Y2EtOWZmZjE4OTgwY2VkliwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9> Acesso em: 12 set. 2024.

CIBiogás; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO – Abiogás - UNIDO/CIBiogás/Abiogás. **Potencial de produção de biogás**: mapeamento de substratos e sua conversão energética no sul do Brasil: relatório. Brasília: MCTI, 2020. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil). Disponível em: https://www.tecpar.br/sites/tecpar/arquivos_restritos/files/documento/2023-06/potencial_de_biogas_brasil_relatorio.pdf Acesso em: 01 set. 2024.

DEUTSCHLAND. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz - BMWK. **International Hydrogen Ramp-Up Programme (H2Uppp)**. Berlim, 2023. Disponível em: <https://www.giz.de/de/downloads/giz-2023-de-BMWK-H2uppp-imageflyer-RampUp.pdf> Acesso em 11 set. 2024.

DÖHLER, H.; ECKEL, H.; FRÖBA, N.; GREBE, S.; GRUBE, J.; HARTMANN, S.; WULF, S. **Faustzahlen Biogas**. 3. ed. Darmstadt: KTBL, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Suínos e Aves**: estatísticas - desempenho da produção, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas> Acesso em: 10 jul. 2024.

ENGELAGE, E.; ZANIN, A.; MAZZIONI, S; MOURA, G. D. Análise de Custos na Suinocultura: Suinocultores X Empresas Integradoras. *In: Congresso Brasileiro de Custos*, XXII., 2015. **Anais [...]**, Foz do Iguaçu: ABCustos, 2015. P. 1-16. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/download/3925/3926> Acesso em: 07 jul. 2024.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE – FNR. **Guia Prático do biogás**: geração e utilização, Tradução de Marcos de Miranda Zattar. 1. ed. Gülzow: FNR, 2010, Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf> Acesso em: 20 set. 2024.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE – FNR. **Leitfaden Biogasaufbereitung Und-einspeisung**. 5. ed. FNR, 2014. Disponível em: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/leitfaden_biogaseinspeisung-druck-web.pdf Acesso em: 01 out. 2024.

FARIAS, F. Soja brasil. **Canal Rural**, 2015. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/projeto-soja-brasil/maior-pib-agro-do-parana-toledo-recebeu-forum-sojabrasil/> Acesso em: 10 set. 2024.

FRANCO, A. C. *et al.* Benefits and barriers for the production and use of biomethane. **Energy Sources, Part A**: recovery, utilization, and environmental effects, p. 1-17, 7 dez. 2021. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.2009940>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2021.2009940> Acesso em: 13 out. 2024.

FREITAS, F. F.; SOUZA, S. S.; FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; ALESSIO, F. J.; SOUZA, S. N. M.; VENTURINI, O. J.; ANDO JUNIOR, O. H. The Brazilian market of distributed biogas generation: overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 101, p. 146-157, mar. 2019. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v101y2019icp146-157.html> Acesso em: 10 maio 2024.

KIGLE, S.; REGETT, A. **Abschlussbericht zum Projekt**: CO2-Bilanz des CAPHENIA Prozesses - Ökologische Bewertung des CAPHENIA Prozesses im Vergleich zu Power-to-Liquid Verfahrensrouten. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft-FfE, 2019. Disponível em: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/abschlussbericht-zum-projekt-co%E2%82%82-bilanz-des-caphenia-prozesses-veroeffentlicht/> Acesso em: 20 abr. 2024.

KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMETZ, R. L. R. Advanced swine manure treatment and utilization Brazil. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 100, n. 22, p. 5485-5489, nov. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.039> Acesso em: 15 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/resultados-censo-agro-2017.html> Acesso em: 10 jul. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **IBGE Cidades**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/toledo/pesquisa/18/0> Acesso em: 10 set. 2024.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – IPARDES. **Banco de Dados**. 2017. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/imp/index.php> Acesso em: 20 abr. 2020.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU-JUNIOR, C. H. Characterization of raw swine waste and effluents treated anaerobically: parameters for Brazilian environmental regulation construction aiming agricultural use. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S.l.], v. 23, p. 165-176, sep. 2021. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10163-020-01115-1>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL UNIDO; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - PARANÁ. SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO – SEAB. Departamento de Economia Rural. **Suinocultura Paranaense**. Curitiba, 2017. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/qas/5578/informe_suinos_maio_17.pdf Acesso em: 10 set. 2024.

RIBEIRO, B. M.; PETRY, F. A.; LIMBERGER, A. R. Análise Temporal de dados NDVI para o município de Toledo PR, obtidos de imagens Landsat. **Revista cultivando o saber**, Cascavel, v. 11, n. 2, p. 40-50. abr./jun. 2018. Disponível em: <https://cultivandosaber.fag.edu.br/index.php/cultivando/article/view/859> Acesso em: 10 set. 2024.

RITTMANN, S. K. M. R.; SEIFERT, A. H.; KRAJETE, A. Biomethanisierung - ein Prozess zur Ermöglichung der Energiewende?. **Biospektrum**, [S.l.], v. 20, p. 816-817, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12268-014-0521-3> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12268-014-0521-3#citeas> Acesso em: 01 out. 2024.

SCHNEIDERS, T. STADLER, I.; DOMINGUES, M.; GONZALEZ, M. O. A.; FERNANDES, J. T.; MURTA, A. L. S. **Economia do hidrogênio e os significados dos termos Pt-X**: volume 5. Brasília, DF: LaSUS FAU, 2023. Disponível em: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/06/Livro-05-Col-1_final_JTF-1.pdf Acesso em: 25 jan. 2025.

TÁPPARO, D. C. **Waste-to-energy**: produção de biogás a partir dos resíduos da suinocultura. 2021. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade

Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5757> Acesso em: 15 abr. 2024.

TÁPPARO, D. C.; ROGOVSKI, P.; CADAMURO, R.D.; SOUZA, D. S. M.; BONATTO, C.; CAMARGO, A. F.; SCAPINI, T.; STEFANSKI, F.; AMARAL, A.; KUNZ, A.; HERNANDEZ, M.; TREICHEL, H.; RODRÍGUEZ-LAZARO, D.; FONGARO, G. Nutritional, Energy and Sanitary Aspects of Swine Manure and Carcass Co-digestion. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [S.l.], v. 8, Apr. 2020. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00333> Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbioe.2020.00333/full> Acesso em: 25 maio 2024.

SCOVAZZI, T; LIMA, L. C. Do protocolo de Kyoto ao acordo de Paris. **Revista da Faculdade de Direito da UFMG**, Belo Horizonte, n. 78, p. 469-476, jan./jun. 2021. Disponível em: <https://revista.direito.ufmg.br/index.php/revista/issue/view/148> Acesso em: 01 set. 2024.

SKAGGS, R. L.; COLEMAN, A. M.; SEIPLE, T. E.; MILBRANDT, A. R. Waste-to-Energy biofuel production potential for selected feedstocks in the conterminous United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 82, n. 3, p. 2640-2651, feb. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313631?via%3Dihub> Acesso em: 10 maio 2024.

WATTER, H. **Regenerative Energiesysteme**: Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme. 4. ed. [S.l.]: Springer Vieweg, 2015.