

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA
MESTRADO EM BIOTECNOLOGIA**

SABRINA VIEIRA

**BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE COGUMELOS
TIPO CHAMPIGNON DE PARIS (*Agaricus bisporus*)**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2021

SABRINA VIEIRA

**BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE COGUMELOS
TIPO CHAMPIGNON DE PARIS (*Agaricus bisporus*)**

**Anaerobic biodigestion of Champignon de Paris mushroom production waste
(*Agaricus bisporus*)**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof^a. Dr^a. Luciana Porto de Souza Vandenberghe.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney.

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



SABRINA VIEIRA

**BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE COGUMELOS TIPO
CHAMPIGNON DE PARIS (*Agaricus bisporus*)**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Biotecnologia.

Data de aprovação: 08 de Abril de 2021

Prof.a Luciana Porto De Souza Vandenberghe, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Alessandra Cristine Novak Sydney, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Breno Carneiro Pinheiro, Doutorado - Centro Internacional de Energias Renováveis - Cibiogas

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus pelo dom da vida e por iluminar meu caminho, pois creio que sem fé eu nada seria. Agradeço aos meus pais pela criação e ensinamentos, apesar de todas as dificuldades. Especialmente minha mãe Andréia por ser a primeira pessoa a me encorajar a seguir sempre em frente, com suas palavras e exemplo. Agradeço a Rafael por todo o apoio e amor incondicional. A Everton pelas conversas, orações e carinho. A Josiani, por sempre me ajudar no que fosse necessário.

Agradeço à professora Luciana Porto de Souza Vandenberghe e professor Eduardo Bittencourt Sydney, por acreditarem em mim para o desenvolvimento do estudo, por todas as oportunidades, encorajamento, ensinamentos e paciência. Agradeço às professoras Simone Bowles, Alessandra Cristine Novak Sydney, Sabrina Ávila Rodrigues e ao professor Matheus Pereira Postigo, por disponibilizarem os laboratórios tornando possível a realização dessa pesquisa. Agradeço à professora Maria Helene Giovanetti Canteri pela amizade e incentivo nos caminhos acadêmicos.

Às amigas de longa data Ana Paula e Liriane, por estarem sempre ao meu lado e não me deixar cair. À amiga que o mestrado me trouxe, Maria Luísa, pelos conselhos, forças e encorajamento. Agradeço Heder, Breno e Lorene pela amizade e grande auxílio que me deram ao longo dessa pesquisa. Aos companheiros de laboratório e colegas do mestrado em Biotecnologia, pelo auxílio, conversas e momentos de convívio, especialmente no Laboratório de Fermentações.

À UTFPR em geral e ao corpo docente do PPGBIOTEC, por todos os recursos e conhecimento disponibilizados a mim.

Diante do momento incomum e das dificuldades pelas quais especialmente a ciência e conhecimento passam, sou grata por conseguir finalizar esse trabalho. Agradeço aos pesquisadores que vieram antes de mim e pelos que virão, e desejo que sejam a luz em meio a toda escuridão que possa surgir.

Enfim, agradeço imensamente a todos aqueles que fizeram parte da minha caminhada até aqui, e contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

*“O conhecimento pertence à humanidade
e é a tocha que ilumina o mundo.
A ciência é a alma da prosperidade das nações
e a fonte de todo progresso”
(Louis Pasteur)*

RESUMO

VIEIRA, Sabrina. **Biodigestão anaeróbica do resíduo da produção de cogumelos tipo champignon de Paris (*Agaricus bisporus*)**, 2021, 82 f. Dissertação- Mestrado em Biotecnologia- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

O crescimento populacional e econômico está diretamente ligado ao aumento da demanda por alimentos e energia, e geração de resíduos. A digestão anaeróbia é um processo que possibilita o tratamento de resíduos e produção de biogás, que pode ser aplicado para geração de energia elétrica. O consumo de cogumelos apresenta-se em crescimento no Brasil e é uma atividade econômica em expansão. Cogumelos do tipo champignon de Paris (*Agaricus bisporus*) são os mais consumidos no Brasil e no mundo. Sua produção é feita por fermentação no estado sólido utilizando materiais lignocelulósicos, e o rendimento do processo varia entre 20-25%, o que significa que um grande volume de resíduo sólido é gerado ao final do processo. Este resíduo é ainda rico em matéria orgânica e geralmente sofre compostagem para então ser aplicado (ou comercializado) como adubo. A produção de cogumelos champignon exige um intenso controle de temperatura e refrigeração do produto final até sua comercialização, resultando em gasto energético considerável. Esse trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade de realização da biodigestão anaeróbica do substrato exaurido da produção de cogumelos do tipo champignon de Paris (*Agaricus bisporus*) como forma de produzir energia elétrica a partir do biogás, reduzindo os custos da produção. O substrato exaurido foi doado por um produtor de cogumelos da região dos Campos Gerais (Paraná). Realizou-se a caracterização físico-química do resíduo por determinação de sólidos totais, sólidos voláteis, carbono, nitrogênio e compostos lignocelulósicos. A determinação do Potencial Bioquímico de Metano (PBM) foi realizada conforme a metodologia da norma alemã VDI4630, chegando-se ao valor de 157,38 L_{CH₄}/kg_{svt} e um teor de CH₄ de 51,44% no biogás. A viabilidade econômica da instalação de uma planta de produção de biogás a partir desse resíduo, visando economia de energia elétrica e comercialização do digestato, a qual foi avaliada por meio de dois estudos de caso envolvendo uma propriedade situada na cidade de Castro/PR e outra em Arraial D'Ajuda/BA. Os estudos de caso foram realizados utilizando a ferramenta BiogásInvest, a qual mostrou que a transformação do resíduo de cogumelos em energia é viável em uma das propriedades, porém na outra depende da comercialização de digestato como biofertilizante. Pode-se constatar que o aproveitamento de resíduo da produção de *Agaricus bisporus* para biogás é eficiente, e possui potencial a ser explorado para promover a economia circular na cadeia produtiva de cogumelos.

Palavras-chave: Energia renovável. Resíduo de Cogumelos. BiogásInvest. Biogás Digestato.

ABSTRACT

VIEIRA, Sabrina. **Anaerobic biodigestion of Champignon de Paris mushroom production waste (*Agaricus bisporus*)**, 2021. 82 p. Work of Qualification- Master's Degree in Biotechnology- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

Population and economic growth is directly linked to the increased demand for food and energy, and the generation of waste. Anaerobic digestion is a process that makes it possible to treat waste and produce biogas, which can be applied to generate electricity. Mushroom consumption is on the rise in Brazil and is an expanding economic activity. Paris champignon mushrooms (*Agaricus bisporus*) are the most consumed in Brazil and worldwide. Its production is made by fermentation in the solid state using lignocellulosic materials, and the process yield varies between 20-25%, which means that a large volume of solid waste is generated at the end of the process. This residue is still rich in organic matter and generally undergoes composting so that it can be applied (or marketed) as fertilizer. The production of champignon mushrooms requires intense temperature control and refrigeration of the final product until commercialization, resulting in considerable energy expenditure. This work aimed to study the feasibility of carrying out the anaerobic biodigestion of the spent substrate for the production of mushrooms of the Paris champignon type (*Agaricus bisporus*) as a way of producing electric energy from biogas, reducing production costs. The depleted substrate was donated by a mushroom producer in the Campos Gerais region (Paraná). The physical-chemical characterization of the residue was carried out by determining total solids, volatile solids, carbon, nitrogen and lignocellulosic compounds. The determination of the biochemical methane potential (BMP) was carried out according to the methodology of the German standard VDI4630, reaching a value of 157.38 L_{CH₄}/kg_{svt} and a CH₄ content of 51.44% in biogas. The economic feasibility of installing a biogas production plant from this waste, aiming at saving electricity and digestate commercialization, which was evaluated through two case studies involving a property located in the city of Castro/PR and another in Arraial D'Ajuda/BA. The case studies were carried out using the BiogásInvest tool, which showed that the transformation of the mushroom residue into energy is feasible in one of the properties, however in the other it depends on the commercialization of digestate as a biofertilizer. It can be seen that the use of waste from the production of *Agaricus bisporus* for biogas is efficient, and has the potential to be explored to promote the circular economy in the mushroom production chain.

Keywords: Renewable energy. Spent Mushroom Substrate. BiogásInvest. Biogas. Digestate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Participação de energias renováveis na matriz energética	16
Figura 2-Participação das fontes de energia na capacidade elétrica nacional instalada	17
Figura 3-Estrutura lignocelulósica antes e após o pré- tratamento para fermentação	20
Figura 4-Produção de cogumelo Champignon de Paris	22
Figura 5-Esquema de um BLC.	29
Figura 6-Esquema de um UASB	30
Figura 7-Esquema de um CSTR com agitador central	30
Figura 8-Fluxograma geral das etapas experimentais nesse estudo	33
Figura 9- Figura esquemática do sistema de biodigestão (1: Frasco com amostra; 2: Tubo eudiômetro; 3: Tubo de conexão; 4: Mangueira de silicone; 5: Frasco Mariotte com solução barreira; 6: Válvula para saída de gás).	35
Figura 10-Sistema de biodigestão	36
Figura 11-Potencial Bioquímico de Biogás: Produção acumulada por tempo	44
Figura 12- Curva cumulativa de produção de biogás e curva gerada pelo modelo cinético de Gompertz Modificado	50
Figura 13- Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade da Bahia.....	53
Figura 14-Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade da Bahia- com venda do biofertilizante.....	53
Figura 15-Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade do Paraná	54
Figura 16-Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade do Paraná- com venda do biofertilizante.....	55
Figura 17- <i>Magic Dirt</i> TM , digestato aproveitado para uso em plantas.....	57
Figura 18-Site para acesso da ferramenta BiogásInvest.....	70
Figura 19-Tela inicial para registro	70
Figura 20-Tela para login no sistema	70
Figura 21-Começar um novo projeto	71
Figura 22-Coleta e manejo de substratos e resíduos	71
Figura 23-Modelos pré-definidos pelo sistema para subfontes	72
Figura 24-Adicionar subfonte personalizada	73
Figura 25-Inserir volume de resíduo gerado.....	73
Figura 26-Segunda etapa: seleção de biodigestor	74
Figura 27-Escolher modelo do biodigestor	75
Figura 28-Adicionar biodigestor personalizado	76
Figura 29-Terceira etapa: usos do biogás	77
Figura 30-Opções disponíveis para usos do biogás.....	77
Figura 31-Escolha de motor gerador para energia elétrica	78
Figura 32-Monetização dos produtos pós digestão anaeróbia	78
Figura 33-Adicionar escolha para energia elétrica, venda ou autoconsumo	79

Figura 34-Adicionar operação de venda para biofertilizante gerado	79
Figura 35-Relatório gerado ao fim da elaboração do projeto na ferramenta	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Produção anual brasileira de cogumelos por espécie	22
Tabela 2-Total de artigos com títulos “biogás” AND “mushroom” em base de dados científicos distribuído em anos (total 17 artigos de pesquisa)	23
Tabela 3-Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019	31
Tabela 4- Composição físico-química do substrato exaurido da produção de cogumelos (%) neste estudo e da literatura científica	41
Tabela 5- Valores de entrada para Potencial Bioquímico de Biogás	43
Tabela 6- Condições de biodigestão anaeróbia do substrato exaurido da produção de cogumelos (%) e rendimento neste estudo e na literatura científica	45
Tabela 7- Parâmetros calculados para aplicação do modelo de Gompertz modificado	49
Tabela 8- Valores de produção, resíduo e consumo de energia nas propriedades estudadas.....	51
Tabela 9- Dados de entrada a partir dos resultados da digestão anaeróbia de resíduo de cogumelos	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Condições experimentais	35
Quadro 2- Etapas da Ferramenta BiogásInvest	39
Quadro 3- Dados obtidos na ferramenta BiogásInvest para a propriedade de Arraial D'Ajuda/BA	52
Quadro 4- Dados obtidos na ferramenta BiogásInvest para a propriedade de Castro/PR.....	54

LISTA DE SIGLAS

AGV	Ácidos graxos voláteis
ANPC	Associação Nacional dos Produtores de Cogumelos
APHA	<i>American Public Health Association</i> / Associação Americana de Saúde Pública
BLC	Biodigestor lagoa coberta
CTICH	Centro Tecnológico de Investigación del Champiñón de La Rioja
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária no Brasil
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i> /Reator com tanque agitado continuamente
COT	Carbono orgânico total
kWh	Quilowatt- hora
MW	Megawatt
NTK	Nitrogênio total Kjeldhal
PEAD	Polietileno de alta densidade
PVC	Policloreto de vinila
SDA	Secretaria de Defesa Agropecuária
SMS	<i>Spent mushroom substrate</i> / Substrato de cogumelo gasto
ST	Sólidos totais
SVT	Sólidos voláteis totais
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> /Reator anaeróbio de fluxo ascendente
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> / Associação dos Engenheiros Alemães

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIBIOGAS- ER	Centro Internacional de Energias Renováveis
CORDIS	<i>Community Research and Development Information Service/Serviço de Informações de Pesquisa e Desenvolvimento da Comunidade</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations/</i> Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
ONU	Organização das Nações Unidas
PROBIOGÁS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 ECONOMIA CIRCULAR	15
2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	16
2.1 O BIOGÁS	18
2.1.1 Energia de biomassa lignocelulósica	19
2.1.2 Resíduos da produção de cogumelos.....	21
2.1.3 Digestão Anaeróbia.....	24
2.1.4 Potencial Bioquímico de Metano.....	28
2.1.5 Tipos de Biodigestores.....	28
2.1.6 Produtos da Biodigestão Anaeróbica - Aplicações.....	31
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 LOCAL	33
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	33
3.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS	34
3.4 MONITORAMENTO DE VOLUME E QUALIDADE DO GÁS	36
3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	37
3.6 ESTUDO DE CASO	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	41
4.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS	43
4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	48
4.1 ESTUDO DE CASO	50
5 CONCLUSÃO	58
6 REFERÊNCIAS	59
ANEXO A - Ferramenta BiogásInvest.....	69

1 INTRODUÇÃO

Segundo relatório de estimativa da Organização das Nações Unidas (ONU, 2019), a população mundial aumentará em 2 bilhões de pessoas nos próximos trinta anos. O crescimento populacional e econômico está diretamente ligado ao aumento da demanda por alimentos e energia. Devido às excelentes propriedades nutricionais de cogumelos, vem sendo observado um aumento significativo do seu consumo e produção no Brasil. O cultivo de cogumelos é uma atividade que possui alta demanda de energia elétrica devido ao controle de temperatura nas salas de cultivo e refrigeração do produto, o qual gera uma grande quantidade de resíduos e cujo rendimento do processo é de aproximadamente 20-25%.

A média de produção mundial de cogumelos comestíveis é de mais de 8 milhões de toneladas (FAO, 2018), e estima-se que a cada 1kg de cogumelo sejam gerados 5kg de substrato exaurido (SCHIMPF; SCHUTZ, 2016). Esse resíduo possui potencial para ser utilizado como matéria-prima para a biodigestão anaeróbica por conter matéria orgânica disponível tanto na forma de compostos lignocelulósicos quanto na forma de células fúngicas. A produção de biogás, um gás com alto teor de energia que pode ser transformado em energia elétrica, com a cogeração do digestato, que possui propriedades fertilizantes, parece ser uma estratégia potencial de valorização dos resíduos da produção. Desde o ano de 1983, estudos investigam o substrato de cogumelo pós-colheita para transformação em energia, porém apenas recentemente o tema voltou a ser objeto de pesquisas, especialmente na Europa e Ásia. O crescimento da fungicultura no Brasil exige o desenvolvimento de alternativas para a destinação do substrato pós-colheita de cogumelos que ainda possuem baixo valor agregado, necessitando de aplicação em opções sustentáveis (COLLELA *et al.*, 2019).

A valorização do resíduo gerado na produção de cogumelos é uma estratégia de importância não só econômica, mas ambiental, promovendo o tratamento de resíduos e diminuindo o gasto energético atual em energias não renováveis. Tornar esta produção mais sustentável significa atender ações que atendem os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), tais como consumo e produção responsáveis, ação contra as mudanças climáticas e energia limpa e acessível.

Com a avaliação do potencial de produção de biogás a partir de resíduo da produção de cogumelos tipo champignon de Paris (*Agaricus bisporus*), realização de caracterização físico-química do resíduo de cogumelos, posterior digestão anaeróbia em escala de laboratório, quantificação do teor de metano no biogás produzido e estudo de caso em duas propriedades reais utilizando a ferramenta BiogásInvest, esse trabalho propõe contribuir para a sustentabilidade e circularidade na cadeia produtiva de cogumelos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

O modelo tradicional linear de produção e serviços baseia-se na conversão de produtos a partir da extração de matérias primas, e ao final da vida útil sua deposição em aterros, trazendo impactos ambientais como a exploração exagerada de recursos naturais e poluição do ar, solo e água. Como alternativa, a economia circular traz um modelo econômico voltado para o uso eficiente de recursos, em que produtos e processos são redesenhados para maximizar o valor de matérias primas e minimização na formação de resíduos (MORSELETTO, 2020). É uma proposta de ciclo fechado de produção, a fim de dissociar o crescimento econômico da exploração dos recursos, e sim utilizá-los de forma consciente (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Três ações principais impulsionam a execução da economia circular: reduzir, reutilizar e reciclar (ROY, 2021). Dentro desse conceito muitos resíduos gerados nos processos produtivos possuem potencial de aproveitamento na geração de novos produtos. Os resíduos da agroindústria, por exemplo, permitem a obtenção de novos produtos para a indústria química, farmacêutica e alimentícia, produção de novos biomateriais e geração de energia a partir da biomassa (FREITAS *et al.*, 2021).

Um dos exemplos mais conhecidos de economia circular no Brasil é a cadeia produtiva da cana de açúcar, que apresenta seus produtos principais (açúcar, bioetanol), mas que também destina os resíduos como bagaço, palha, vinhaça para outras atividades, como produção de biocombustíveis (LONGATI; BATISTA; CRUZ, 2020).

Para o desenvolvimento da economia circular, a energia de biomassa atua como uma forma de disposição racional do resíduo gerado no processo, contribuindo na diversificação da matriz energética com a inserção de energias renováveis e agregando valor às cadeias produtivas.

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

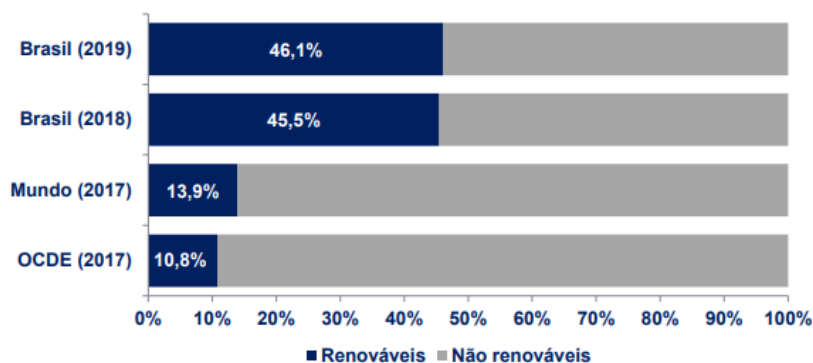
Segundo a Empresa de Pesquisa em Energia (EPE, 2016), matriz energética é uma representação da quantidade de recursos energéticos, renováveis ou não, oferecidos por um país ou por uma região.

Desde sua descoberta, o Brasil utilizava a lenha como fonte energética, sendo que com o ciclo do café iniciou-se o uso de carvão vegetal no país. A chegada da Revolução Industrial trouxe consigo o início do uso de petróleo, o que permanece até os dias atuais. O uso desse combustível fóssil é uma prática da retirada de recursos naturais no planeta, além de ser também um produto não renovável. A emissão de gases nocivos na atmosfera é tema de diversos estudos, e de preocupação mundial para as gerações futuras.

Porém, a partir da década de 70, quando houve a chamada “Crise do Petróleo”, os países compradores desse combustível fóssil começaram a preocupar-se com formas alternativas para obtenção de energia. O uso de combustíveis renováveis apresenta-se como uma alternativa sustentável ao meio ambiente com menor impacto ambiental, e garantem maior segurança energética para o país.

A matriz energética mundial ainda indica maior utilização de fontes não-renováveis de energia, enquanto a matriz energética brasileira apresenta números maiores para fontes renováveis, pois a maior parte da energia gerada no país provém de hidrelétricas. Dados do Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, BRASIL, 2020) mostram o crescimento da participação de energias renováveis em anos recentes na matriz energética do Brasil (Figura 1).

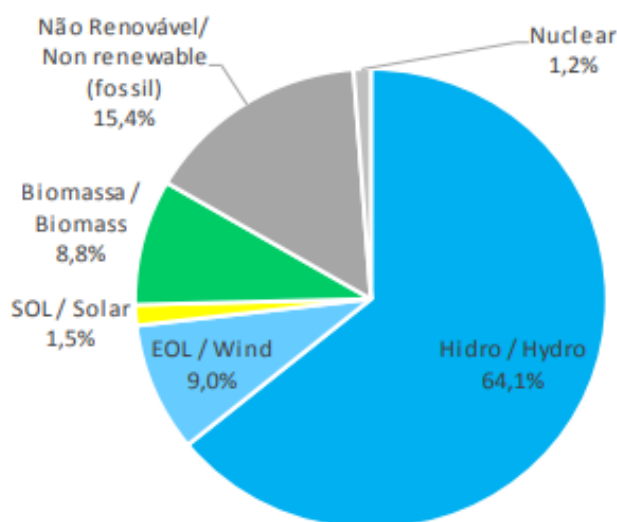
Figura 1-Participação de energias renováveis na matriz energética



Fonte: EPE; Agência Internacional de Energia (2020).

Dentre as energias renováveis brasileiras apresentam-se a hidráulica, proveniente das hidrelétricas a partir da força das águas; a eólica, obtida por meio de ventos; a solar, gerada por radiação do Sol captada por painéis fotovoltaicos; a de biomassa, principalmente do bioetanol obtido da cana de açúcar, e biogás, proveniente de resíduos orgânicos florestais, domésticos, agropecuários e industriais. A figura 2 apresenta a participação das energias segundo Balanço Nacional Energético- Ano Base 2019, realizado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Figura 2-Participação das fontes de energia na capacidade elétrica nacional instalada



Fonte: Fonte: EPE; Agência Internacional de Energia (2020).

Nas energias de biomassa encontra-se o biogás, uma mistura gasosa composta principalmente de metano (50%-75% em volume) e dióxido de carbono (25%-50% em volume), podendo conter ainda pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros traços de gases (KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, 2019a). A sua composição é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção de usinas (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). É uma fonte de energia que pode ser usada para aquecimento de instalações residenciais e industriais, para produção de eletricidade com co-geradores. Também pode ser aplicado como combustível veicular se estiver comprimido ou liquefeito para gerar eletricidade com eficiência de até 42%, e calor produtivo com eficiência térmica de até 50%, com conteúdo

energético de aproximadamente 10 kWh, correspondendo a 1L de gasolina(HO; NGO; GUO, 2014).

A produção de biogás tem sido cada vez mais significativa no cenário energético nacional, tendo como principais insumos os resíduos agroindustriais, animais e urbanos (ANEEL, 2020). Sua participação na oferta interna de energia ainda é baixa (0,1%), porém apresentando crescimento acelerado, de 23% ao ano nos últimos cinco anos (EPE, 2020). Além da geração de energia renovável, a produção de biogás contribui para a gestão de resíduos, redução da emissão de gases de efeito estufa e redução da eutrofização (KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, 2019b).

O Brasil conta com leis de incentivo para o uso de combustíveis de fonte renovável, dentre as quais o RenovaBio (2016), uma Política Nacional de Biocombustíveis, que tem como um de seus objetivos a expansão da representatividade dos biocombustíveis na matriz energética. Segundo panorama de 2019 (CIBiogás, 2020), o Paraná ocupa a segunda posição no ranking nacional de plantas de biogás em operação, com 110 plantas (21%), sendo precedido pelo estado de Minas Gerais, com 196 plantas (38%).

2.1 O BIOGÁS

O biogás é gerado a partir da degradação da matéria orgânica, pela ação de micro-organismos, em biodigestores. A matéria orgânica é chamada de substrato e pode ser oriunda de resíduos industriais, agropecuários e domésticos. Os biodigestores funcionam como câmaras com condições controladas para a ação eficiente dos micro-organismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia (ou biodigestão). Após esse processo, é gerado o biogás e o digestato. O biogás é a fração gasosa, que passa por purificação e pode ser aplicada na forma de energia elétrica, térmica e veicular, e o digestato, que é a fração de lodo estabilizado, pode ser aplicado como biofertilizante nos campos.

2.1.1 Energia de biomassa lignocelulósica

Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia (EMBRAPA, 2016). Na produção de biogás as fontes mais importantes são os resíduos da agricultura, aterros de resíduos orgânicos, resíduos sólidos urbanos, esgoto sanitário e dejetos animais(EDWIGES, 2017).

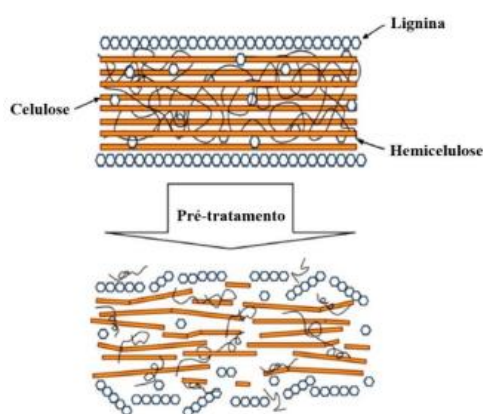
A experiência brasileira com biomassa na produção de biocombustíveis iniciou em 1975, quando foi lançado o Pró-Álcool, um programa voltado à substituição da gasolina pelo álcool, em função da crise do petróleo(MORAIS, 2019). No âmbito da produção de biogás, dentre os materiais potenciais para uso como fonte de matéria orgânica está a biomassa lignocelulósica. Segundo dados do CIBILOGAS (2020), o Brasil possui 548 plantas de biogás, 426 destas tendo como fonte de substrato resíduos agropecuários.

Devido à sua estrutura recalcitrante, a biomassa lignocelulósica não pode ser convertida diretamente em açúcares fermentescíveis, e para que ocorra a liberação de açúcares, é necessária uma etapa de pré-tratamento (RAJENDRAN *et al.*, 2018). A estrutura lignocelulósica presente na parede vegetal é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. A celulose, um homopolímero linear e cristalino de cerca de 10.000 unidades de glicose, unidas por ligações glicosídicas β , 1 \rightarrow 4, além das ligações de hidrogênio e força de van der Waals, embaladas em microfibrilas, na qual as cadeias tendem a se organizar em paralelo e formar uma estrutura cristalina. A hemicelulose, um heteropolímero composto por D-xilose, D-arabinose, D-glicose, D-galactose, e D-manose, possui estrutura linear e ramificada com unidades repetidas do mesmo açúcar (homopolímero) ou por uma mistura de diferentes açúcares (heteropolímero). A hemicelulose difere da estrutura da celulose na composição química, tamanho da cadeia (aproximadamente 50–300 unidades de açúcar), presença de ramificação nas moléculas da cadeia principal, sendo amorfa e menos resistente a produtos químicos. A lignina tem função de fornecer rigidez e coesão ao material da parede celular, para conferir impermeabilidade à água para os vasos do xilema e para formar uma barreira físico-química contra o ataque microbiano, estando intimamente ligada à celulose e hemicelulose. Três álcoois fenilpropionícos são geralmente encontrados como

monômeros de lignina, que incluem os álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico (AHMAD *et al.*, 2018; KUMARI; SINGH, 2018).

O pré-tratamento tem como objetivo remover a lignina e a hemicelulose e reduzir da cristalinidade da celulose, facilitando assim a acessibilidade aos açúcares fermentescíveis, e ação dos micro-organismos no processo de produção de biogás (BEHERA *et al.*, 2014). A Figura 3 representa a estrutura lignocelulósica antes e após a ação do pré-tratamento para aproveitamento dos seus componentes via biodigestão.

Figura 3-Estrutura lignocelulósica antes e após o pré- tratamento para fermentação



Fonte: CAMPOS (2017)

Os pré-tratamentos dividem-se em químicos, físicos, biológicos e mistos:

- (i) Pré-tratamentos químicos: atuam principalmente na remoção da lignina ou hemicelulose presente na biomassa, com modo de ação dependente do produto químico usado e das condições operacionais. Classificam-se principalmente em ácidos, alcalinos, oxidativos e os que utilizam solventes orgânicos (ABRAHAM *et al.*, 2020);
- (ii) Pré-tratamentos físicos: reduzem o tamanho da partícula e aumentam a área de superfície de materiais lignocelulósicos. Dentre estes estão a moagem, a irradiação (micro-ondas e ultrassom), a extrusão, a pirólise, o congelamento, o tratamento hidrotérmico e a explosão a vapor (KUMARI; SINGH, 2018). Alguns desses métodos não são eficazes sozinhos, sendo usados em combinação com alguns outros pré-tratamentos. O método selecionado depende do teor de umidade da matéria-prima (ZHENG *et al.*, 2014);

- (iii) Pré-tratamentos biológicos: fazem uso de micro-organismos cujo metabolismo pode acelerar a produção de biogás. São realizados com o uso principalmente de fungos produtores de enzimas celulolíticas, que agem na estrutura complexa lignocelulósica, ou com a adição de enzimas específicas no processo, como proteases, lacases, peroxidases (AHMAD *et al.*, 2018).

Cada pré-tratamento apresenta suas vantagens e desvantagens, como presença de substâncias inibidoras, geração de resíduos tóxicos, alta demanda financeira, altas temperaturas, maiores tempos para ação. A escolha deve envolver aspectos que relacionem viabilidade técnico-econômica e sustentabilidade, além de uma análise da composição da estrutura lignocelulósica da biomassa (VIEIRA *et al.*, 2020).

2.1.2 Resíduos da produção de cogumelos

Agaricus bisporus, popularmente conhecido como champignon de Paris, é o cogumelo comestível mais produzido mundialmente, correspondendo a cerca de 15% da produção mundial (RAMOS *et al.*, 2019). Por ser um decompositor secundário, ele se desenvolve em ambiente parcialmente decomposto produzido geralmente a partir de uma mistura de palha de trigo (40-50%), esterco de cavalo (20-25%), esterco de aves (10-15%) e gesso (5-10%) caracterizando fonte de carbono, carbono e nitrogênio, nitrogênio e cálcio, respectivamente (GOBBI *et al.*, 2018; TEN HAVE *et al.*, 2003). Vários tipos de compostos foram desenvolvidos para o cultivo e a escolha dos ingredientes para a produção do tipo a ser utilizado ocorre de acordo com sua disponibilidade na região (ROSA, 2007). Sua cultura leva aproximadamente cerca de dois meses e a preparação do substrato é dividida em duas fases principais (BANASIK *et al.*, 2017; PANDIN *et al.*, 2018). Na primeira fase ocorre uma compostagem, com os objetivos de fragilizar a palha e outras matérias primas, diminuir a relação C/N e formar açúcares solúveis; na segunda fase ocorre a pasteurização, para redução de amônia a níveis não tóxicos ao fungo, e conferir seletividade biológica do substrato (COLMENARES-CRUZ; SÁNCHEZ; VALLE-MORA, 2017). Após esse preparo, há a inoculação do *Agaricus bisporus*, e a colonização do substrato em uma unidade de produção. Após a colonização

completa do substrato é adicionada uma camada superficial de turfa, momento em que as condições ambientais (temperatura, umidade, CO₂ e ventilação) são alteradas para estimular a frutificação dos cogumelos (MCGEE, 2018).

Figura 4-Produção de cogumelo Champignon de Paris



Fonte: Cogumelos Loman (2021).

No cenário brasileiro, os principais produtores de cogumelos comestíveis estão nos estados de São Paulo (Mogi das Cruzes, Pinhalzinho, Ibiúna, Sorocaba, Salto, Cabreúva, Juquitiba e Valinhos) e no Paraná (Castro, Tijucas do Sul e Curitiba) (ANPC, 2020). A Tabela 1 apresenta as espécies mais cultivadas e uma estimativa da produção em toneladas ao ano, na qual se pode constatar que o Champignon de Paris é a espécie mais produzida.

Tabela 1-Produção anual brasileira de cogumelos por espécie	
Espécies de cogumelos cultivadas no Brasil	Produção Estimada (toneladas/ano)
<i>Agaricus bisporus</i> (champignon de Paris)	8.000
<i>Pleorotus</i> spp.	2.000
<i>Lentinula edodes</i> (Shiitake)	1.500
<i>Agaricus blazei</i> Murrill	500
Outros	50

Fonte: ANPC, 2020.

Estima-se que em condições otimizadas que a cada 1kg de cogumelo produzido, cerca de 5kg de substrato residual são gerados (SCHIMPF; SCHUTZ, 2016). Para o cultivo são utilizados vários materiais que promovem um ambiente rico em nutrientes para o desenvolvimento do fungo. Geralmente, materiais ricos em

lignocelulose são escolhidos como substrato para o cultivo de cogumelos (DAS *et al.*, 2014).

Os resíduos da produção de cogumelos podem ser utilizados como fertilizante (VAHID AFAGH *et al.*, 2019), agente de biorremediação na remoção de metais pesados em águas (CORRAL-BOBADILLA *et al.*, 2019), degradação de hidrocarbonetos aromáticos no solo (CARRASCO *et al.*, 2020; GARCÍA- DELGADO *et al.*, 2015), fertilizante orgânico (COLLELA *et al.*, 2019) e na produção de biogás (LI *et al.*, 2019; XIAO *et al.*, 2017). Embora já tenha sido indicado o potencial de produção de biogás a partir de resíduos da produção de cogumelos, com estudo publicado em 1983 (BISARIA; MADAN; MUKHOPADHYAY, 1983), na literatura não existem estudos brasileiros sobre o tema. A Tabela 2 apresenta o resultado de buscas sobre cogumelos e biogás na base de dados científicos *Web of Science*, evidenciando-se que recentemente essa temática tem sido mais desenvolvida ao redor do mundo.

Tabela 2-Total de artigos com títulos “biogas” AND “mushroom” em base de dados científicos distribuído em anos (total 17 artigos de pesquisa)

Ano de publicação	Número de artigos
2021	2
2020	1
2019	5
2018	3
2017	1
2014	1
2004	1
2000	1
1990	1
1983	1

Fonte: Web Of Science (2021).

Segundo dados do *Community Research and Development Information Service* (CORDIS, 2021), em agosto de 2018 teve início o desenvolvimento do projeto *SmartMushroom*, envolvendo um consórcio de empresas e centros de pesquisa da Alemanha, Espanha e Sérvia. O objetivo do projeto é usar o chamado SMS (substrato gasto de cogumelo, do inglês *spent mushroom substrate*) na produção de biogás, e aproveitar a energia nos secadores para transformar uma

parte do SMS em biofertilizante pelletizado das próprias unidades produtoras de cogumelos. É uma aplicação em economia circular, propiciando menor custo de gestão de resíduos para produtores de cogumelos e melhoria do benefício econômico devido ao fertilizante orgânico, pois esse será posteriormente vendido. A planta piloto *SmartMushroom* está operando para melhorar a produção de biogás, visando aumentar os rendimentos obtidos (atualmente 122 m³/t SMS fresco), obtendo 150 m³ de biogás por tonelada de SMS fresco tratado (CTICH, 2021).

Estudos recentes ressaltam que resíduos das culturas alimentícias, tais como palha de arroz, milho, entre outros, são usados como substratos para os fungos. A colheita é realizada e o substrato exaurido vai para a produção de biogás. O digestato pode ser aproveitado na produção de cogumelos, ou na fertilização de campos, fechando assim o ciclo sustentável (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019).

2.1.3 Digestão Anaeróbia

Em 1776, Alessandro Volta descobriu a presença de metano nos pântanos. Ulysse Gayon, em 1883, realizou a primeira fermentação anaeróbia, produzindo 100 litros de gás por metro cúbico de uma mistura de esterco e água (NOGUEIRA, 1986 *apud* PECORA, 2006). Os primeiros países a utilizar o biogás como fonte de energia foram China e Índia (KARLSSON, *et al*, 2014).

A digestão anaeróbica é um processo biológico para conversão de substrato orgânico em biogás, por ação de micro-organismos na ausência de oxigênio. Gera combustível renovável e contribui para reduzir a emissão de gases de efeito estufa (KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, 2019b). Divide-se em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

- (i) Hidrólise: é a primeira etapa da digestão anaeróbia, na qual, por ação de enzimas extracelulares secretadas por bactérias hidrolíticas, as moléculas de carboidratos, proteínas e lipídios são quebradas em açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. É uma etapa limitante do processo, pois fornece os nutrientes necessários para garantia das etapas subsequentes. Há a quebra de ligações covalentes, e micro-organismos anaeróbios facultativos consomem oxigênio dissolvido,

fornecendo o crescimento favorável para micro-organismos estritamente anaeróbios (SCAPINI *et al.*, 2019).

(ii) Acidogênese: bactérias fermentativas usam os hidrolisados para converter substratos em ácidos graxos voláteis, como ácido acético, propiônico e butírico. É um processo que envolve várias bactérias fermentativas, como do gênero *Acetobacter*, por meio da β - oxidação, no qual o ácido graxo combina-se com a coenzima A, sendo oxidado gradualmente. Dois átomos de carbono quebrados na β - oxidação são liberados como acetato. *Clostridium botulinum* realiza a degradação de aminoácidos, por reação de Stickland, quando duas moléculas de aminoácidos são absorvidas (uma como doadora e a outra aceptora de H), simultaneamente, para produzir ácido acético, amônia e CO₂(DENG; LIU; WANG, 2020).

(iii) Acetogênese: há degradação de compostos intermediários formados na etapa anterior, por um processo de sintrofia, que depende da relação entre produção e consumo de hidrogênio, por micro-organismos acetogênicos, que realizam transferência entre arqueas metanogênicas e bactérias homoacetogênicas. Cada composto intermediário formado pela acidogênese possui mecanismo de bioconversão com a finalidade de obter substratos diretos para a produção de metano. É gerado ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio, precursores do biogás (FNR, 2013; CHERNICHARO, 2007; SCAPINI *et al.*, 2019).

(iv) Metanogênese: é a última etapa, na qual as Arqueas metanogênicas consomem acetato, hidrogênio e parte do dióxido de carbono para produzir metano. Três vias bioquímicas são usadas para isso: via acetotrófica, com conversão de acetato a metano; via hidrogenotrófica, quando hidrogênio e dióxido de carbono são convertidos a metano; e metilotrófica, a via menos comum, em que a produção de metano ocorre por redução do grupo metil de compostos metilados. As arqueas metanogênicas acetoclásticas são as prevalentes na digestão anaeróbia, sendo responsáveis por cerca de 70% da produção de metano, e os dois gêneros mais encontrados

são *Methanosarcina* e *Metanosaeta*. Os gêneros de hidrogenotróficas frequentemente isolados em reatores anaeróbios são *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter* (CHERNICHARO, 2007; SCAPINI *et al.*, 2019).

Para que ocorra uma biodigestão eficiente, é necessária atenção a alguns fatores que, se controlados, beneficiam o processo, mas se não forem assegurados, podem causar inibição. São eles:

- (i) Oxigênio: especialmente as arqueas metanogênicas são micro-organismos que necessitam de ausência de oxigênio para sobreviverem. Como há a ação de outros micro-organismos em fases anteriores, desde que a entrada de oxigênio não seja excessiva, essas bactérias o consomem antes que ele prejudique o desenvolvimento das arqueas metanogênicas (CHERNICHARO, 2007; FNR, 2013).
- (ii) Temperatura: a variação brusca de temperatura pode provocar a desestabilização do reator e morte de micro-organismos. As arqueas metanogênicas são divididas em mesofílicas (20 a 40 °C) e termofílicas (50 a 60 °C), e geralmente são aplicados processos mesófilos (35 a 37 °C), devido ao menor consumo de energia e maior estabilidade do sistema. Processos termofílicos têm uma produção de biogás mais rápida, sendo o oxigênio menos solúvel nessa faixa de temperatura e com condições anaeróbicas ideais alcançadas mais rapidamente. Porém, para manutenção de altas temperaturas há maior gasto de energia, principalmente em regiões frias, e o processo é mais sensível às variações ambientais, como interrupções na alimentação, temperatura e carga (FNR, 2013; SINGH *et al.*, 2017).
- (iii) pH: os micro-organismos envolvidos nos diversos estágios de decomposição necessitam de diferentes valores de pH para o seu desenvolvimento ótimo. No caso das bactérias hidrolíticas e acidogênicas, o pH ideal é de 5,2 a 6,3. Essas bactérias, porém, não dependem estritamente dessa faixa e são capazes de transformar o substrato mesmo na presença de valores de pH levemente elevados, sendo a sua atividade ligeiramente diminuída. Entretanto, bactérias

acetogênicas e as arqueas metanogênicas, dependem inteiramente de um pH próximo ao neutro, entre 6,5 e 8. Portanto, processos de fermentação realizados em apenas um biodigestor devem respeitar essa faixa de pH (DENG; LIU; WANG, 2020; FNR, 2013).

- (iv) Nutrientes: para o crescimento de micro-organismos, macroelementos (nitrogênio e fósforo) e microelementos (substância micromineral) são essenciais. Os micro-organismos podem parar seu crescimento se um substrato essencial for completamente consumido; portanto, a adição contínua de carboidrato, gordura e proteína é importante para o funcionamento normal do processo. Elementos traços como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio também são importantes para o crescimento celular. O tipo de substrato determina a taxa de degradação e, portanto, a influência dos substratos deve ser considerada na digestão anaeróbia e no controle do processo. A relação C/N afeta diretamente a produção de biogás, e esta dependerá de cada tipo de substrato, sendo também um fator inibitório potencial se estiver em desequilíbrio (CHERNICHARO, 2007; DENG; LIU; WANG, 2020).
- (v) Agitação: a agitação tem por objetivo evitar o acúmulo de sólidos no fundo do biodigestor, distribuir uniformemente o substrato, para promover a correta disponibilidade de nutrientes e micro-organismos, e liberar o biogás contido na pasta fermentada (SINGH; SZAMOSI; SIMÉN FALVI, 2020).
- (vi) Inibidores: falhas de digestão anaeróbia ocorrem devido à presença de substâncias tóxicas no biodigestor, como componentes de substratos ou mesmo subprodutos metabolizados por micro-organismos. As substâncias inibidoras mais comuns são nitrogênio amoniacal (NH_3 e NH_4^+), sulfetos, sais, metais pesados e contaminantes como antibióticos, desinfetantes, herbicidas. Se houver excesso de hidrogênio, há inibição da atividade de micro-organismos acetogênicos; se a presença de ácidos orgânicos for excessiva, a degradação é bloqueada ou a relação sintrófica entre as bactérias acidogênicas e metanogênicas é desequilibrada. Então, os ácidos

orgânicos irão se acumular, e há acidificação do sistema (FNR, 2013; SINGH *et al.*, 2017).

2.1.4 Potencial Bioquímico de Metano

Antes de aplicar um substrato específico para digestão anaeróbica em larga escala é importante identificar sua biodegradabilidade e o comportamento cinético do processo. O Potencial Bioquímico de Metano (PBM) é um teste em escala de laboratório para determinar a máxima produção de CH₄ a partir do substrato de interesse (ANGELIDAKI *et al.*, 2009). O princípio do teste consiste em misturar um substrato orgânico com um inóculo anaeróbio sob condições experimentais definidas. A metodologia mais conhecida para esse teste é a VDI 4630 (2016), uma norma alemã que descreve o procedimento de digestão anaeróbia citando os cuidados com amostra, e frisando a importância de condições ideais de processo para maximizar a produção de gás, com lodo (inóculo) estritamente anaeróbio e adaptado na temperatura da incubação (CLEVES; OROBIO; LOZADA; FRANCO, 2016).

Considerando que a produção de biogás é baseada na biodegradabilidade da fração volátil da matéria orgânica (SVT - sólidos voláteis totais), a metodologia propõe que a relação entre a massa de SVT do lodo adicionado como inóculo e da amostra não deve ser superior a 0,5, para que não ocorra acidificação no processo por excesso de carga orgânica. O volume acumulado de gás é corrigido conforme as condições normais de temperatura e pressão, e o PBM é calculado pela razão entre o volume de gás produzido normalizado e a quantidade de sólidos voláteis adicionados.

2.1.5 Tipos de Biodigestores

Embora a formação de biogás possa ocorrer naturalmente em pântanos, rios, entre outros, por ação das arqueas metanogênicas, o biodigestor é um equipamento no qual são fornecidas as condições ideais para acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica. A literatura apresenta um teor de 4 a 6% de SVT e de até 10% de ST como ideais para o processo de biodigestão anaeróbia

(KARLSSON *et al.*, 2014; BRASIL, 2015). A escolha do biodigestor para o processo dependerá do tipo de substrato a ser tratado, nível de investimento disponível e condições ambientais do local onde o mesmo será instalado. Os biodigestores mais utilizados no Brasil para a produção de biogás são BLC (biodigestor lagoa coberta), UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*– reator anaeróbio de fluxo ascendente) e CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*- reator com tanque agitado continuamente) (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

O BLC (Figura 5) é um tanque impermeabilizado escavado no solo, de operação simples, sem controle de temperatura e agitação, e coberto usualmente com policloreto de vinila (PVC), e polietileno de alta densidade (PEAD) para retenção do gás produzido. Traz como desvantagem o acúmulo de substrato na parte inferior, dificultando a ação dos micro-organismos, além da variação de temperatura especialmente em locais mais frios (FNR, 2013; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

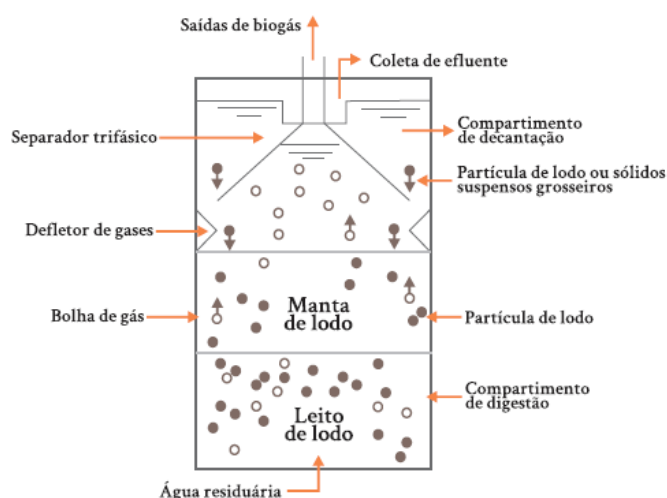
Figura 5-Esquema de um BLC.



Fonte: KUNZ; STEINMETZ; AMARAL (2019)

O biodigestor tipo UASB (Figura 6) é o mais difundido especialmente no tratamento de efluentes, sendo usado para biomassa com baixo teor de sólidos, tendo como característica o fluxo ascendente do afluente por uma manta de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico. Possui alta capacidade de retenção de biomassa, o que permite trabalhar com baixo tempo de permanência do substrato em seu interior (4 a 72 horas) (FNR, 2013). Segundo Chernicharo (2007), esse biodigestor tem sistema compacto, com baixos requisitos de terreno, custos de construção e operação, bem como baixa produção de lodo.

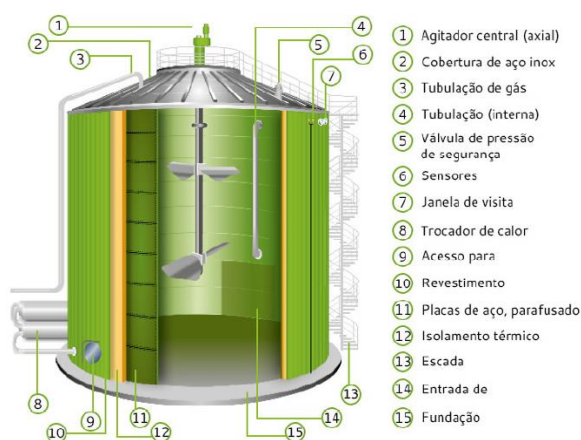
Figura 6-Eschema de um UASB



Fonte: KUNZ; STEINMETZ; AMARAL (2019)

O biodigestor CSTR (Figura 7) é utilizado para substratos com maiores teores de sólidos, e possui sistema de controle de aquecimento e agitação. Suporta elevadas cargas orgânicas, e mantém a homogeneização devido à presença de sistema de agitação. É o biodigestor mais utilizado em plantas de biogás, especialmente para mistura de substratos (codigestão). O tempo mínimo de permanência do substrato em seu interior geralmente é entre 15 e 20 dias, podendo variar em função do tipo de substrato a ser digerido. A agitação melhora o contato entre os micro-organismos e a matéria orgânica, e o controle de temperatura colaboram com a estabilização do reator e manutenção da população microbiana (BRASIL, 2015).

Figura 7-Eschema de um CSTR com agitador central



Fonte: PROBIOGÁS (2015)

2.1.6 Produtos da Biodigestão Anaeróbica - Aplicações

Após a digestão anaeróbia, os produtos obtidos são biogás e digestato. O biogás pode passar por processo de purificação, com remoção de H₂O, H₂S, O₂, CO₂, NH₃ e outros gases traços, e segue para aplicações em energia térmica, elétrica e veicular (DENG; LIU; WANG, 2020; CIBIOGAS, 2020). A Tabela 3 apresenta dados da aplicação energética nacional do biogás, com base no ano de 2019.

Tabela 3-Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019

Principal aplicação energética do biogás	Quantidade de plantas		Volume de biogás (Nm³/ano)	
Energia elétrica	439	84%	1.168.138.811	86%
Energia térmica	70	14%	132.094.572	10%
GNR/Biometano	6	1%	37.739.175	3%
Energia mecânica	6	1%	7.526.112	1%
Total	521		1.345.498.670	

Fonte: CIBIOGAS (2020).

O digestato pode ser sólido ou líquido, e é um produto de alto valor agrônômico por conter alta concentração de N e P, substâncias essenciais ao solo. Sua aplicação como biofertilizante traz menor salinização e maior fixação no solo em comparação aos fertilizantes químicos (CIBIOGÁS, 2018).

Devido à composição variada do biogás, para seu uso especialmente em motores, é necessária a etapa de purificação, para aumentar a concentração de CH₄. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou a Resolução Normativa nº 482/2012, que possibilita a todo consumidor de energia elétrica a produção de maneira renovável de sua própria energia e conexão à rede de distribuição. A resolução permite a implantação de projetos de micro e minigeração distribuída, com potência instalada entre 75 kW e 5 MW, a partir de fontes renováveis, como o biogás. A energia gerada pode ser utilizada imediatamente ou injetada na rede de distribuição para consumo posterior.

O biometano é especificado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo) a partir das resoluções nº 8/2015 e nº 685/2017, que o definem como “biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás”. Além da versatilidade de sua aplicação, o biometano pode ser estocado na forma comprimida ou liquefeita, além de ser permitida a sua inserção na rede de gás natural.

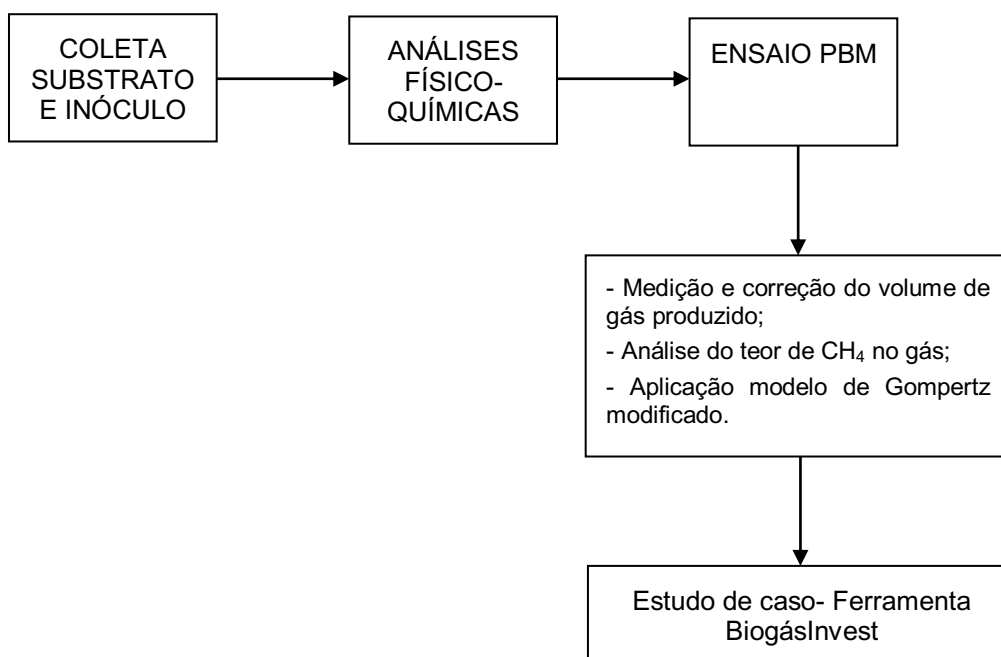
3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL

Os experimentos de digestão anaeróbia foram realizados no Laboratório de Fermentações e as análises de caracterização no Laboratório de Química- A, vinculados ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, localizados na UTFPR- Campus Ponta Grossa.

A Figura 8 traz um fluxograma geral das etapas realizadas nesse estudo, e na sequência estas serão descritas.

Figura 8-Fluxograma geral das etapas experimentais nesse estudo



Fonte: Autoria própria.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

O substrato, resíduo da produção de cogumelos, foi cedido por produtor de cogumelos comestíveis da região. Como inóculo, foi utilizado lodo cedido pela estação de tratamento de esgoto do município. Assim que coletado foi armazenado sob refrigeração e, 5 dias antes da realização do experimento, foi submetido a uma

fase de aclimatação visando manter a atividade bacteriana adaptada e ativa no momento da incubação (VDI 4630, 2016).

Antes da digestão anaeróbia realizou-se análise de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), em triplicata, para o substrato e inóculo, conforme procedimento padrão *Standard Methods* (APHA, 2012). O pH da mistura substrato/inóculo foi medido antes e após cada digestão, em pHmetro digital Even PHS-3E. Para o substrato realizou-se análises de componentes lignocelulósicos (lignina, hemicelulose e celulose), de acordo com metodologia da EMBRAPA (2010), análises de nitrogênio por Kjeldahl, carbono orgânico (oxidação química a quente).

Para minimizar os efeitos de uma possível degradação ao longo do tempo e melhorar a precisão analítica, a amostra do resíduo de cogumelos foi seca a 60 °C por 6h, triturada e refrigerada a 4 °C até a sua utilização. Foram utilizadas a forma natural e pré-tratada. A fim de testar o efeito do pré-tratamento do resíduo na produção de biogás, foi aplicado um tratamento utilizando imidazol, um solvente verde que tem sido empregado para deslignificação. O pré-tratamento foi realizado com 5g de biomassa seca na proporção de 1:9 biomassa:imidazol (p/p), e autoclavado em temperatura de 120 °C, por 1 hora. Após o pré-tratamento, 135 mL de lodo foram adicionados à biomassa e misturados por 1 hora a 90°C (Valladares-Diestra *et al.*, 2020). Como havia interesse em utilizar todos os componentes da amostra, optou-se por não realizar separação de frações e o resíduo pré-tratado foi adicionado ao inóculo na mesma proporção que as demais condições experimentais (considerando substrato/inóculo < 0,5).

3.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS

O ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás foi realizado seguindo a metodologia padrão VDI 4630 (2016), sob condições de 6% de ST no frasco de fermentação e relação entre a massa de SVT do inóculo/substrato não superior a 0,5, para que não houvesse acidificação por excesso de carga orgânica. Realizou-se a biodigestão em diferentes condições, apresentadas no Quadro 1.

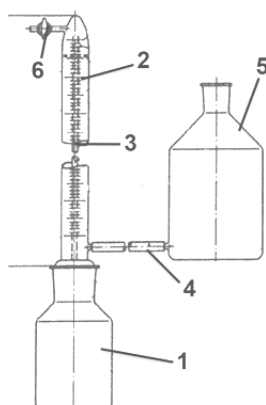
Quadro 1- Condições experimentais

Resíduo de cogumelos+lodo
Resíduo de cogumelos pré-tratado+lodo
Celulose microcristalina (mcc-102)+lodo
Lodo

Fonte: Autoria própria.

O Potencial Bioquímico de Biogás foi posteriormente calculado pela razão entre o volume de gás produzido e o teor de sólidos voláteis adicionados na fermentação, e o Potencial Bioquímico de Metano a partir da quantificação de metano no biogás gerado. O experimento foi conduzido em faixa de temperatura mesofílica (36°C) em banho-maria, e o sistema de biodigestão (Figura 9 e 10) composto por reatores de vidro com volume útil de 250 mL(1), tubos eudiômetros com volume de 500 mL (2) e frascos de nível tipo Mariotte (5) de 1 L; a ligação entre o eudiômetro e o frasco de vidro foi feita com mangueiras de silicone (4). Um tubo interno ao eudiômetro (3) conectou o reator para que o volume de gás produzido pudesse ser medido. Foi utilizada solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfato de sódio decahidratado ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) e alaranjado de metila como barreira para reduzir a dissolução de componentes do biogás. O volume de líquido deslocado a partir da pressão gerada pelo biogás era coletado em recipiente de vidro conectado ao tubo eudiômetro.

Figura 9- Figura esquemática do sistema de biodigestão (1: Frasco com amostra; 2: Tubo eudiômetro; 3: Tubo de conexão; 4: Mangueira de silicone; 5: Frasco Mariotte com solução barreira; 6: Válvula para saída de gás).



Fonte: Adaptado de VINDIS et al. (2010) e EDWIGES (2017)

Figura 10-Sistema de biodigestão



Fonte: Autoria própria.

O volume de gás produzido foi medido diariamente, assim como realizada agitação manual dos frascos onde ocorreu a fermentação, a fim de evitar o acúmulo de gás no fundo do recipiente. As condições de temperatura do processo também foram medidas diariamente, e o experimento foi conduzido até não ser mais observada formação de biogás.

3.4 MONITORAMENTO DE VOLUME E QUALIDADE DO GÁS

O volume de biogás acumulado em cada experimento foi normalizado para as CNTP, conforme a norma VDI 4630 (2016), sendo aplicada a Equação 1:

$$V_N = V \cdot (p - p_w) \cdot (T_0) / (p_0 \cdot T) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V_N : volume de biogás normalizado às condições normais de temperatura e pressão - CNTP (mL, L ou m^3);

V : volume de biogás produzido (mL, L ou m^3);

p : pressão do biogás no momento da leitura (hPa);

p_w : pressão de vapor da água em função da temperatura do gás (hPa);

T_0 : temperatura nas condições normalizadas, 273 K;

p_0 : pressão nas condições normalizadas, 1013 hPa;

T: temperatura do biogás (K).

Utilizou-se como referência a temperatura diária ambiente, pressão corrigida pela altitude e variação de temperatura (conforme dados do Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná- SIMEPAR).

Semanalmente foram retiradas amostras de gás produzido, coletadas com agulha em seringas de plástico e, imediatamente, transvazadas a tubos de Vacutainers® de 10 mL. Posteriormente, as amostras foram analisadas em cromatógrafo de gás (490 Micro GC System, Agilent), equipado com duas colunas (Molsieve 5 Å, para H₂, e PoraPLOT U, para CO₂ e CH₄). Os tempos de retenção de pico para CO₂ e CH₄ foram 0,4 e 0,45 min, respectivamente. O limite de detecção foi de 2 ppm (coluna Ms5 Å), e temperatura da coluna de 60°C. O tempo de cada execução foi de 1min e com fase móvel de argônio com pureza de 99,99%.

3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA

A produção de biogás foi modelada utilizando regressão com modelo não linear. Foi realizada uma simulação, aplicando o modelo cinético de Gompertz modificado, conforme a Equação 2:

$$Y(t) = P \times \exp \left[- \exp \left(\frac{Y_{max} \times e \times (\lambda - t)}{P} + 1 \right) \right] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Y (t): produção cumulativa de biogás no tempo (t) (mLN_{biogás}/gSV_{adic});

t: tempo da digestão anaeróbia (dias)

P: rendimento máximo possível de biogás (mLN_{biogás}/gSV_{adic});

Y_{max}: taxa de produção máxima de biogás (mLN_{biogás}/gSV_{adic}dia);

λ: tempo da fase lag (dias).

Os valores de P, R_{max} e Y foram calculados usando ajuste não linear, baseado no método dos mínimos quadrados utilizando a ferramenta Solver do

Microsoft Excel. Para determinar a correlação entre os valores experimentais e preditos pelo modelo, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2).

3.6 ESTUDO DE CASO

Para a fase de aplicação dos dados obtidos em estudo de caso foi utilizada a ferramenta online BiogásInvest, desenvolvida na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa (UTFPR-PG) no âmbito do projeto GEF Biogás Brasil, (liderado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e implementado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) em parceria com a UTFPR-PG, Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI), Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) e outras entidades dos setores público e privado. É uma ferramenta digital gratuita que permite a realização de uma análise customizada sobre a viabilidade de novos projetos de biogás. Os dados de referência para o estudo foram repassados por dois diferentes produtores de cogumelo champignon de Paris, um cuja propriedade está localizada em Castro- PR e o outro em Arraial D’Ajuda- BA.

Todos os passos descritos para o acesso da ferramenta estão esquematizados no Quadro 2 e ilustrados no Anexo I. Primeiramente foi acessado o endereço eletrônico: <https://BiogásInvest-tqqhk7juga.rj.a.run.app/BiogásInvest/login>. Na primeira tela selecionou-se a opção “criar uma conta” e foram preenchidos os dados cadastrais nome completo, telefone, e-mail e senha.

Quadro 2- Etapas da Ferramenta BiogásInvest

Etapas	Passos
Coleta e manejo de substratos e resíduos	Dados do substrato; Fontes pré-definidas e personalizado.
Seleção de biodigestor	Tecnologia sugerida ou personalizado;
Opções de usos do biogás	Produção disponível para uso; Biogás, eletricidade biogás, eletricidade biometano, térmico, biofertilizante e personalizado
Monetização	Saldo gerado para as aplicações de biogás
Relatório Final	Relatório do projeto, com gráficos que mostram o fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL) do projeto, taxa interna de retorno (TIR), ano de tempo de retorno de investimento, CAPEX total, OPEX total.

Fonte: Autoria própria.

Após a criação de conta então foi realizado o login, e selecionada a opção “comece um projeto novo”. Essa opção abriu a tela em que foi possível nomear o projeto, e escolher seu tempo de execução, que foi estipulado em 5 anos; ainda nessa tela existe a etapa chamada “coleta e manejo de substratos e resíduos”, que apresenta algumas opções de fontes pré-definidas e uma personalizada, onde foi adicionada a subfonte “resíduo de cogumelos”, que não constava dentre as disponíveis. Na tela de subfonte personalizada é solicitado o nome da fonte, unidade de medida, fator de conversão da unidade de referência para m^3 de substrato/resíduos por dia (m^3 de substrato ou resíduo/unidade de referência) /dia), fator de produção de biogás por m^3 de dejetos (Nm^3 de biogás/ m^3 de substrato ou resíduo), fator percentual de metano no biogás, fator percentual de gás carbônico no biogás, fator de produção de biofertilizante por m^3 de substrato ou resíduo (m^3 de biofertilizante/ m^3 de substrato ou resíduo), percentual de sólidos totais do substrato ou resíduo (%).

Após preenchimento dos dados, ao clicar na opção “personalizado” foi solicitado informar a quantidade de resíduos produzidos ao dia (em m^3). Foi verificado que a ferramenta mostra a quantidade de resíduos gerados e o biogás gerado em Nm^3 /dia. Clicando em “próximo passo” iniciou-se a segunda etapa do projeto, a seleção de biodigestor. A própria ferramenta apresenta “tecnologia sugerida”, porém é possível escolher dentre as outras opções disponíveis ou ainda inserir um biodigestor com características personalizadas. Após a escolha do

biodigestor que atenda às necessidades do projeto, é possível saber a capacidade instalada e a capacidade utilizada, assim como a capacidade instalada e não utilizada.

Na etapa seguinte são mostradas as opções para uso do biogás gerado, sendo apresentada a produção disponível para uso e as aplicações em: biogás, eletricidade biogás, eletricidade biometano, térmico, biofertilizante e personalizado. Como o foco desse estudo foi aplicação do biogás em energia elétrica, selecionou-se essa opção e abriram opções para escolher qual o motor gerador que melhor atenderia a necessidade, conforme consumo e horas de uso. Na próxima tela de “monetização” é mostrado o saldo gerado para as aplicações de biogás, energia elétrica, biometano, CO₂, térmico, biofertilizante e biofertilizante processado. Na opção de energia selecionada anteriormente foi adicionada uma operação de auto consumo, auto consumo local, preenchido o nome da operação, e selecionada a utilização de todos os kWh disponíveis, sendo necessário o preenchimento da tarifa de energia pelo kWh. Também foi testado o projeto com a venda de biofertilizante e sem a venda, para analisar seu impacto no projeto. Para a opção de venda é necessário “adicionar operação a biofertilizante”, selecionar a categoria de operação venda, selecionar o tipo de operação venda, inserir o nome, definir a quantidade destinada por dia, e o valor de venda. Foi estipulado o valor inicial de venda de R\$3,00/L para o biofertilizante, baseado em dados informados por um dos produtores de cogumelos. Depois das operações finalizadas foi possível verificar o valor anual gerado para cada uma das opções selecionadas.

Como etapa final foi gerado um relatório do projeto, com gráficos que mostram o fluxo de caixa, análise de sensibilidade, análise de cenários, fluxo do projeto, e tabela de dados onde se tem: inflação média anual projetada, taxa mínima de atratividade (TMA), valor presente líquido (VPL) do projeto, taxa interna de retorno (TIR), ano de tempo de retorno de investimento, CAPEX total, CAPEX (R\$) por Nm³ de Biogás, OPEX total e OPEX (R\$) por Nm³ de Biogás.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

A composição físico-química do resíduo da produção de cogumelos varia conforme as características do substrato utilizado. O resíduo da produção de *Agaricus bisporus* foi caracterizado e os resultados do presente estudo são apresentados na Tabela 4, juntamente com os obtidos na literatura em estudos relacionados.

Tabela 4- Composição físico-química do substrato exaurido da produção de cogumelos (%) neste estudo e da literatura científica

Referência	Cogumelo utilizado	ST	SV	COT	N	C/N	LIG	CEL	HEM
Este estudo	<i>Agaricus bisporus</i>	83,53	53,77	11,36	0,74	15,35	34,4 5	12,91	-
Mamimin <i>et al.</i> (2021)	<i>Volvariella volvacea</i>	23,9	18,2	51	0,65	78	44	20,2	16
Zou <i>et al.</i> (2020)	<i>Pleurotus tuoliensis</i>	66,63	27,91	35,52	1,57	22,61	*	*	*
Li <i>et al.</i> (2019)	*	58,28	80,92	56	1,52	36,84	*	*	*
Najafi <i>et al.</i> (2019)	*	19,1	17,7	29	2,4	12,1	*	*	*
Sethumadhavan P. e Arul Mozhi Selvan V., (2018)	<i>Pleurotus florida</i>	24,43	64,63	19,6	1,55	12	*	*	*
Luo <i>et al.</i> (2018)	<i>Pleurotus tuoliensis</i>	96,32	86,39	38,99	1,63	23,71	9,54	22,11	25,75
Xiao <i>et al.</i> (2018)	<i>Pleurotus eryngii</i>	46,35	90,92	41,65	2,21	18,85	*	*	*
Zhu, Han, Zhang e Yang (2015)	<i>Pleurotus ostreatus</i>	91,7	81,4	50,7	1,0	50,7	19	34,5	17
Lin; Ge; Li (2014)	*	96,75	94,72	46,37	0,63	73,95	14,7	41,61	9,96
Mehta <i>et al.</i> (1990)	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	*	*	*	*	*	12	20	18

* : Dado não consta no estudo.

Fonte: Autoria própria.

A composição físico-química dos resíduos de cogumelos é variável conforme a espécie de cogumelo, pois cada uma tem suas características de cultivo e excretam diferentes enzimas, tendo maior ou menor potencial de degradação dos

nutrientes presentes no substrato em que são cultivados. O resíduo de *Pleurotus* sp. tem sido o mais aplicado para a produção de biogás, isso se deve ao fato de que os países onde grande parte dos estudos são realizados (asiáticos) possuem maior consumo e produção desse cogumelo. *Pleurotus* sp. é conhecido como “fungo da podridão branca” e seu cultivo pode ser realizado diretamente na biomassa lignocelulósica por sua alta capacidade de secreção de enzimas oxidativas (lacase, manganês peroxidase e lignina peroxidase) e hidrolíticas (celulases, xilanases e tanases), que atuam na quebra do complexo lignocelulósico (WAN MAHARI *et al.*, 2020).

Já o *A. bisporus* não produz quantidades significativas de enzimas para degradação de lignina (KABEL *et al.*, 2017), o que justifica a maior presença de lignina (34,45%) no substrato exaurido em relação ao cultivo de *Pleurotus* spp.

Hemicelulose não foi encontrada na composição do substrato exaurido, o que indica que foi completamente consumida para o crescimento do cogumelo. O consumo de hemicelulose tem relação com a presença de outros micro-organismos no substrato compostado e pasteurizado utilizado na produção de cogumelo champignon de Paris. Estudos de metagenômica mostram a ação de diferentes micro-organismos envolvidos em cada fase do cultivo de *Agaricus bisporus*. Nas fases iniciais do crescimento há predominância de micro-organismos com perfil celulolítico (*Chaetomium* e *Thermomyces*), e detectada a presença de *Thermomyces* não celulolítico que produz enzima que hidrolisa hemicelulose (CARRASCO *et al.*, 2020; MCGEE, 2018). As celulases estão associadas à colonização do substrato, enquanto lacase está envolvida na formação de esporóforos de cogumelos. Xilanase é a enzima responsável pela hidrólise da hemicelulose em pentose, fornecendo nutriente para o crescimento do micélio de *A. bisporus* (MAMIMIN *et al.*, 2021).

A relação C/N do substrato exaurido apresentou um valor de 15,35, abaixo da razão 20-30 considerada a ideal para digestão anaeróbia (BAWEJA, 2018), que pode acarretar em acúmulo de amônia (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Uma das fases da produção do cogumelo champignon de Paris visa à eliminação de amônia livre no substrato, o que é fator favorável, sendo a amônia livre um interferente da digestão anaeróbia. A co-digestão de substratos é indicada para se atingir uma relação C/N ideal e melhorar estabilidade do processo (LI, Longwei *et al.*, 2020).

4.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS

Após a caracterização do resíduo da produção de cogumelos, foi realizada a biodigestão anaeróbica com os valores de entrada mostrados na Tabela 5.

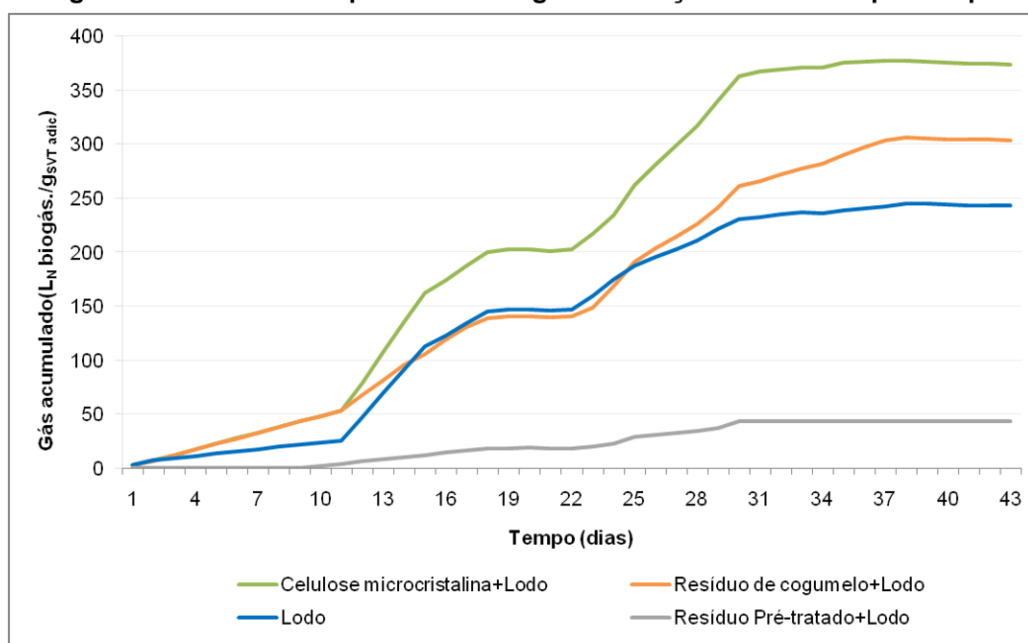
Tabela 5- Valores de entrada para Potencial Bioquímico de Biogás

	ST (%)	SVT (%)	Massa adicionada (g)	Razão SVT substrato/inóculo	pH inicial
Substrato	83,53	53,77	4,72	0,48	7,3
Substrato pré-tratado	83,53	53,77	4,72	0,48	7,3
Celulose microcristalina	96,17	95,34	2,66	0,48	7,3
Inóculo	4,64	2,60	-	-	7,2

Fonte: Autoria própria.

O ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás foi mantido até o momento onde não foi observada produção de gás, aos 43 dias, dentro da faixa (40-45 dias) observada para outros estudos (HUANG *et al.*, 2019; MAMIMIN *et al.*, 2021; ZOU *et al.*, 2020). Foi observada uma estabilização na produção de biogás a partir do 31º dia, exceto para a fermentação cujo substrato foi o resíduo *in natura* (Figura 11).

Figura 11-Potencial Bioquímico de Biogás: Produção acumulada por tempo



Fonte: Autoria própria.

O ensaio somente com o lodo apresentou valores menores ($244,93L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{svt}}$) comparativamente ao ensaio com resíduo+lodo, o que era esperado por subentender-se que o resíduo exaurido da produção de cogumelos possui matéria orgânica que pode ser biotransformada. O experimento com celulose microcristalina é utilizado como padrão devido seu alto conteúdo de carbono, e resultou numa produção de $377,5L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{svt}}$. O ensaio com resíduo pré-tratado teve valores bastante inferiores aos demais ($43,84L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{svt}}$), e embora seja interessante o uso de imidazol como solvente verde para pré-tratamento de compostos lignocelulósicos, estudo realizado com líquidos iônicos a base de imidazol indicam que ele pode ter atividade inibidora de celulases (SRIARIYANUN *et al.*, 2015), e inclusive são propostas pesquisas para encontrar uma celulase tolerante a líquidos iônicos (TANTAYOTAI *et al.*, 2019). Cabe ressaltar que ainda não há outro estudo sobre a aplicação deste solvente verde em pré-tratamento de resíduo exaurido de cogumelos *Agaricus bisporus*.

O ensaio da biodigestão de substrato exaurido da produção de cogumelos apresentou valor de $305,95 L_{\text{N}}\text{Biogás}/\text{Kg}_{\text{SVTadic}}$, com máxima produção aos 38 dias, a partir de quando houve estabilização na produção de biogás. No 31º dia de experimento o biogás produzido chegou a $265,8L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{svt}}$, totalizando 87% do total.

O rendimento de biogás é variável conforme o resíduo de cogumelo utilizado, e também a condição experimental do processo (Tabela 6). Em estudos

onde foi aplicada temperatura termofílica, os rendimentos foram maiores (LI *et al.*, 2019; NAJAFI *et al.*, 2019). A uma taxa de 15% de ST, o resíduo de cogumelo em co-digestão com resíduo de palma aumentou a produção de biogás em duas vezes, indicando que a adequação da relação C/N pela co-digestão foi eficiente (MAMIMIN *et al.*, 2021).

Tabela 6- Condições de biodigestão anaeróbia do substrato exaurido da produção de cogumelos (%) e rendimento neste estudo e na literatura científica

Referência	Cogumelo utilizado	Condições	Rendimento
Este estudo	<i>Agaricus bisporus</i>	T 36°C, 7% ST, pH 7,5, lodo de ETE como inóculo, 43 dias	305,95 L _{biogás} /kg _{SVT} , e 157,38 L _{CH4} /kg _{SVT}
Mamimin <i>et al.</i> (2021)	<i>Volvariella volvacea</i>	Digestão anaeróbia em estado sólido, pH 7,2, T 40°C, 40 dias, ST de 15%, 20%, 25% e 30%, inóculo de planta de biogás	281 mL _{CH4} ·g ⁻¹ _{SVT}
Zou <i>et al.</i> (2020)	<i>Pleurotus tuoliensis</i>	T 35°C, 40 dias, 3%ST, inóculo lodo de digestor anaeróbio	284,83 L _{biogás} /kg _{SVT}
Li <i>et al.</i> (2019)	*	50°C, resíduo de cogumelo+esterco de veado+esterco bovino, inóculo um agente microbiano composto contendo celulolítico, bactérias, metanogênicas, 6%ST,	521,4 mL _{biogás} /kg _{SVT}
Najafi <i>et al.</i> (2019)	*	T 35°C e 55°C, adição de solução enriquecida de bactérias, 10%ST, 21 dias	55°C: 364,8 L/kg _{SVT} ; 35°C: 314,11 L/kg _{SVT}
Sethumadhavan P. e Arul Mozhi Selvan V., (2018)	<i>Pleurotus florida</i>	T 37°C, 60 dias	250 mL _{CH4} /g _{SVT}
Luo <i>et al.</i> (2018)	<i>Pleurotus tuoliensis</i>	T 36 ± 2°C, 49 dias	286,52 mL _{CH4} /g _{SVT}
Xiao <i>et al.</i> (2018)	<i>Pleurotus eryngii</i>	T 55°C, 2%ST, 12 dias	177,69 mL _{CH4} /g _{SVT}
Zhu, Han, Zhang e Yang (2015)	<i>Pleurotus ostreatus</i>	T 37°C, 30 dias, co-digestão de resíduo de cogumelo e palha de milho (75:25)	245 L _{biogás} /kg _{SVT}
Lin; Ge; Li (2014)	*	T 37°C, 62 dias, digestão anaeróbia em estado sólido de resíduo de cogumelos, palha de trigo, apara de quintal e suas misturas foram investigadas em diferentes proporções	Resíduo de cogumelos+aparas de quintal: 194 L _{biogás} /kg _{SVT} ; Resíduo+palha de trigo: 269 L _{biogás} /kg _{SVT}
Mehta <i>et al.</i> (1990)	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	37 ° C, pH inicial de 6,8 a 6,9, ST 8%, esterco bovino como inóculo, 15 dias	85L/kg e 58% de CH ₄

* : Dado não consta no estudo.

Fonte: Autoria própria.

Xiao *et al.*(2018) utilizaram resíduo de cultivo de *Pleurotus eryngii* e relataram que a produção foi maior do quarto ao sexto dia, chegando a 39,31% do total de biogás (328,65 L/kg_{SVT}), em condições termofílicas (55°C). As condições de altas temperaturas são relatadas como fator que acelera o processo de digestão anaeróbia. Huang *et al.*(2019), propondo o tratamento de palha de arroz com *Pleurotus ostreatus* relataram volume de 133 mL_{CH4}/g_{SVT} e início de produção de gás no sexto dia da digestão anaeróbia, atribuindo o sistema líquido (como o realizado no presente estudo) ao invés de fermentação sólida como acelerador do processo por evitar formação de ácidos graxos voláteis (AGV).

Li *et al.*(2020) conduziram estudo a fim de explorar o efeito de pré-tratamento biológico em palha de milho, aplicando mistura de bactérias e fungos, e concluíram que houve aumento da área exposta de celulose e hemicelulose, o que resultou em crescimento na produção de biogás e diminuiu o tempo de fermentação. Em estudo realizado por Feng *et al.* (2013) com substrato exaurido de *Agaricus bisporus* composto de uma mistura de palha de trigo, turfa, cal e esterco de cavalo e frango, por 27 dias, os autores relataram resultados de produção de biogás como não significativos para escalas industriais (64L/kg_{SVT}). A biodigestão do substrato exaurido de *A. bisporus* produziu 76,65% menos metano em comparativo com o substrato controle. No estudo em questão os autores utilizaram como inóculo o lodo de um reator anaeróbio já adaptado às condições metanogênicas, que tratava resíduos domésticos e não relataram seguir metodologia específica para o PBM, além de não especificar a relação C/N, apenas sugerindo que carbono foi consumindo pelo fungo durante o crescimento. Pontos críticos para comparativos de resultados com substrato exaurido de cogumelos foram indicados por Pérez-Chávez *et al.*(2019), como recomendação de padronização de unidades em volumes relatados, descrição de tipo de substrato, quantidade de sólidos voláteis adicionada, e espécies de cogumelos (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019).

Em estudo de tratamento biológico de palha de trigo, Yadav *et al.* (2019) com o fungo *Chaetomium globosporum* (relatado recentemente como produtor de lacases), resultados mostraram aumento de 31% na produção de biogás (em comparação com palha não tratada), e o rendimento foi de 568 mL/g_{SVT}, indicando

que maiores rendimentos variam de acordo com o fungo utilizado e sua capacidade enzimática.

A carga de ST influencia diretamente o processo de digestão anaeróbia, visto que altas taxas de sólidos podem impactar as fases iniciais e gerar um acúmulo de ácidos orgânicos, inibindo a ação dos micro-organismos das fases seguintes. Portanto o ideal é que sejam aplicados baixos teores de ST no sistema (de 2 a 10%), para evitar a inibição do processo. A condução de teste em faixa mesofílica mostrou-se eficiente na produção de biogás, embora estudos comparativos de digestão mesofílica e termofílica indicam que a segunda apresenta melhores resultados, por acelerar reações bioquímicas e encurtar o tempo do processo (XIAO *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2019). Porém, essa alternativa seria menos interessante em escalas maiores, pois demanda quantidade de energia para controle de temperatura, especialmente em locais de clima frio.

Todos os estudos relacionados a resíduo de cogumelos como substrato na produção de biogás relatam que a ausência do acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) é fator determinante para garantir a eficiência do processo de digestão anaeróbia. O pH inicial para a digestão anaeróbia foi de 7,3 e o final 7,5, indicando uma boa estabilidade, e ausência de acúmulo de ácidos graxos voláteis que poderiam causar inibição no processo. Segundo Huang *et al.* (2019), em comparativo com a fermentação em estado sólido, a fermentação úmida viabiliza o resíduo de cogumelos para mono digestão, pois os AGV formados no processo podem ser diluídos no sistema, aumentando a produção de biogás e diminuindo o tempo de digestão.

A literatura não dispõe de informações consolidadas que expliquem todos os fatores que tornam o resíduo de cogumelos adequado à digestão anaeróbia. O que se supõe é que o resíduo é um subproduto da fermentação sólida por fungos, e que então estará pré-digerida (XIAO *et al.*, 2018), e que o fungo residual presente é rico em matéria orgânica, N, P e outros nutrientes auxiliares no crescimento de micro-organismos (MAHARI *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2019). Além disso, a composição variada do resíduo de cogumelos pode impactar a atividade de bactérias da fase inicial da digestão anaeróbia (hidrolíticas) e estas acabam alterando toda a comunidade microbiana (XIAO *et al.*, 2018). Foi encontrada presença de cloretos, nitrato, fosfato, amônio, sódio, sulfato, potássio, magnésio, cálcio e fósforo (GOBBI *et al.*, 2018).

Análise de micro-organismos realizada por Ferraro *et al.* (2018) mostrou que o experimento em que foi adicionado resíduo de cogumelos houve aumento de *Bacteria* (61%) em relação a *Archaea*. Esse resultado foi interpretado como uma adaptação da comunidade microbiana para superar a fase hidrolítica, que é dificultada pela estrutura do resíduo de cogumelos. Foi evidenciada por Xiao *et al.* (2017) em substrato de cogumelos a presença de micro-organismos do filo *Achromobacter*, relatados como poderosos biodegradadores e sinérgicos com micro-organismos celulolíticos na produção de β -glucosidase, *Crenarchaeota*, e *Proteobacteria*, compreendendo espécies hidrolíticas que desempenham papel importante em materiais lignocelulósicos. Também foi identificada a presença de bactérias hidrolíticas que podem secretar diferentes classes de enzimas extracelulares para hidrolisar macromoléculas complexas (*Firmicutes* e *Bacteroidetes*), e *Methanosaetaceae* como metanogênico predominante e que utiliza acetato como fonte substrato para produzir CH_4 (LUO *et al.*, 2018).

Portanto, considerando que fungos são extensamente aplicados como pré-tratamento biológico de materiais lignocelulósicos para a produção de biogás, e sabendo que palha de arroz, trigo e milho são substratos para a produção de *Agaricus bisporus*, pode-se dizer que os seus resíduos são materiais potenciais para digestão anaeróbia. Durante o processo produtivo ocorre quebra de compostos complexos em matéria disponível, e o que não é consumido pelo cogumelo, restos de micélio e os micro-organismos remanescentes da colheita tornam-se fonte de nutrientes para os micro-organismos da digestão anaeróbia. Essa hidrólise prévia causada pelo fungo auxilia a fase de hidrólise da digestão anaeróbia, consequentemente acelerando o processo de produção de biogás.

O biogás produzido com o resíduo de cogumelos *in natura* foi analisado em cromatógrafo gasoso e apresentou teor de metano de 51,44%, sendo assim, o PBB foi de 305,95 $\text{L}_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{svt}}$, e o PBM de 157,38 $\text{LCH}_4/\text{kg}_{\text{svt}}$.

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo de Gompertz modificado foi aplicado para simular a produção de biogás nos diferentes experimentos realizados. Os parâmetros calculados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7- Parâmetros calculados para aplicação do modelo de Gompertz modificado

Experimento	P (mL _N biogás/g _{SVTadic})	Ymax (mL _N biogás/g _{SVTadic})	L (dias)	R ²
Resíduo cogumelo+Lodo	382,7	10,5	6,0	0,989
Resíduo pré-tratado+Lodo	49,4	2,1	10,5	0,978
Celulose microcristalina+Lodo	420,9	16,0	6,6	0,983
Lodo	255,8	12,0	7,2	0,988

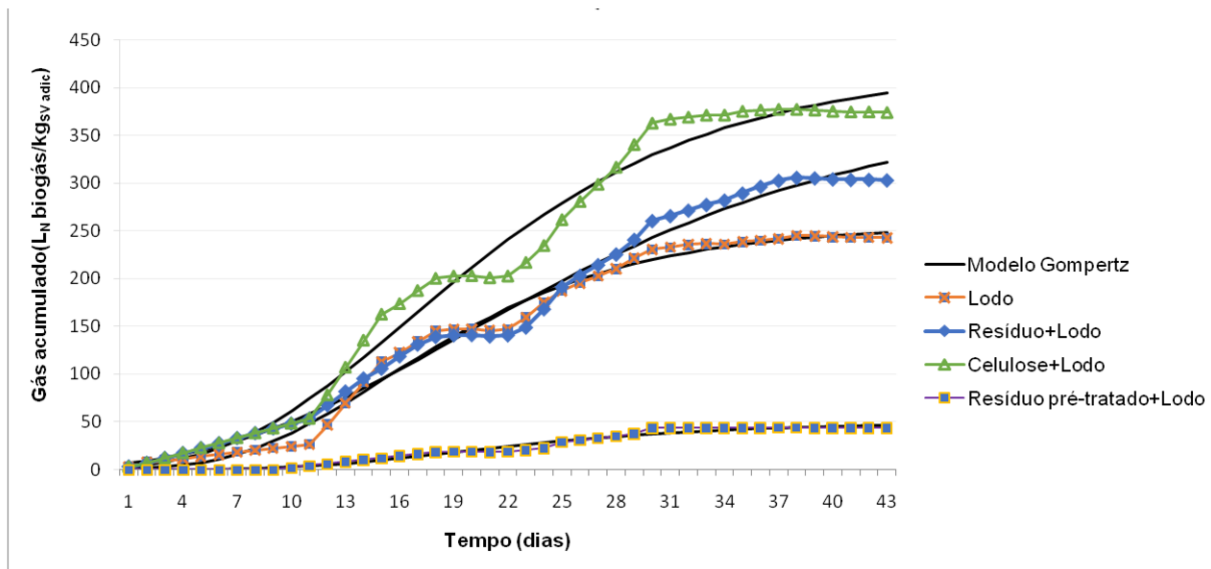
P: rendimento máximo possível de biogás; Ymax: taxa de produção máxima de biogás; L: tempo de fase lag.

Fonte: Autoria própria.

Segundo a literatura, o uso de modelagem matemática é importante para avaliação da cinética do processo de digestão anaeróbia e etapa crítica para o projeto de biodigestores. Estudos de produção de biogás para dejetos animais (ZHU; YANG; XIAOWEI, 2019), resíduos vegetais (LI, Pengfei *et al.*, 2019) e até para substrato exaurido de cogumelos (GAO *et al.*, 2021) fazem uso eficientemente do modelo de Gompertz modificado para avaliação da produção de biogás.

Os resultados obtidos pela aplicação do modelo de Gompertz modificado na curva experimental de produção de biogás (Figura 12) indicam que o modelo se ajustou com um alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,978$), portanto os parâmetros podem demonstrar inicialmente o processo de produção de biogás para os testes realizados nesse estudo.

Figura 12- Curva cumulativa de produção de biogás e curva gerada pelo modelo cinético de Gompertz Modificado



Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que devido às diferentes características dos modelos cinéticos existentes, os valores obtidos não devem ser assumidos como absolutos, mas como parâmetros que auxiliam no entendimento do processo de digestão anaeróbia e nos fatores que influenciam na produção de biogás no substrato estudado (MORAIS, 2019).

4.1 ESTUDO DE CASO

Após conhecer o PBM do resíduo de cogumelos e os valores de produção mensal e consumo de energia fornecidos pelos produtores (Tabela 8), utilizou-se a ferramenta BiogásInvest para analisar a viabilidade de implementação de uma unidade de produção de biogás nas referidas propriedades. A partir de dados de PBM, a plataforma possibilita selecionar o tipo de biodigestor a ser empregado, formas de uso do biogás e do digestato, resultando em uma avaliação econômica que inclui valores de investimento e taxa de retorno para o projeto.

Tabela 8- Valores de produção, resíduo e consumo de energia nas propriedades estudadas

Localização da propriedade	Produção mensal (kg)	Resíduo/kg de cogumelo (kg)	Consumo de energia (kWh/mês)
Castro- PR	18.000	108.000	40.000
Arraial D'Ajuda	1.500	5.500	7.942

Fonte: Autoria própria.

A fase inicial da simulação do projeto, chamada de “Coleta e manejo de substratos e resíduos” exige a inserção de dados relacionados ao PBM e composição de metano no biogás (Tabela 9).

Tabela 9- Dados de entrada a partir dos resultados da digestão anaeróbia de resíduo de cogumelos

Descrição	Valor
Fator de conversão da unidade de referência para m ³ de substrato/resíduos por dia (m ³ de substrato ou resíduo/unidade de referência) /dia)	1
Fator de produção de biogás por m ³ de dejetos (Nm ³ de biogás/m ³ de substrato ou resíduo) *	11,92
Fator percentual de metano (CH ₄) no biogás	51,44
Fator percentual de gás carbônico (CO ₂) no biogás	48,56
Fator de produção de biofertilizante por m ³ de substrato ou resíduo (m ³ de biofertilizante/m ³ de substrato ou resíduo)	1
Percentual de sólidos totais do substrato ou resíduo (%)	2,36

* Calculado considerando o teor de SVT do substrato e o SVT/L nos experimentos.

Fonte: Autoria própria

Os valores de entrada para cada etapa para a propriedade de Arraial D'Ajuda/BA são apresentados no Quadro 3. Após o preenchimento dos dados da biodigestão do resíduo a ser utilizado, a plataforma pede que seja informado o volume desse resíduo que é gerado, valor obtido nesse estudo a partir da premissa de que se em 1L temos 23,6g de substrato, então para a propriedade de Arraial D'Ajuda temos 183,33kg de resíduo/dia correspondem a 7,76m³. De acordo com a necessidade desse estudo, os biodigestores pré-definidos pela ferramenta eram para o processamento de um volume acima do necessário, então um biodigestor lagoa coberta personalizado foi inserido, considerando como tempo de retenção 38 dias (o tempo de produção máxima de biogás para o substrato). Valores de

aquisição e custo de operação e manutenção utilizados foram os pré-definidos pela ferramenta. Um biodigestor com volume total de 380,13m³ atenderia a necessidade de tratamento dos 7,76m³ de resíduos/dia. Essa quantidade de resíduos geraria 50,06 Nm³/dia de biogás.

Quadro 3- Dados obtidos na ferramenta BiogásInvest para a propriedade de Arraial D’Ajuda/BA

Etapa	Resultados
Coleta e manejo de substratos e resíduos	- Resultados da digestão anaeróbia de resíduo de cogumelos; - 7,76m ³ de resíduos/dia;
Seleção de biodigestor	- Lagoa coberta- 380,13m ³ ; - Gerando 50,06 Nm ³ /dia de biogás
Opções de usos do biogás	- Eletricidade- motor 25 Nm ³ /h; - 3h operando; - Gerando 71,04 kWh/dia
Monetização	- R\$ 12.259,51/ano

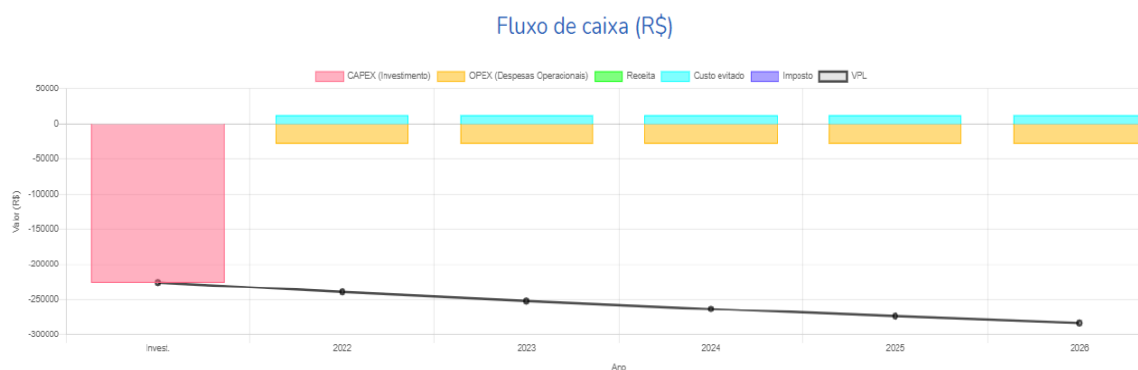
Fonte: Autoria própria.

Nas “Opções de uso de biogás”, selecionando a opção de “Eletricidade Biogás” foi possível escolher o motor gerador que mais se encaixava com a quantidade de biogás gerado. Optou-se por um motor com consumo de 25 Nm³/h, que operaria por 3h, com uma capacidade utilizada de 18,50 Nm³/h. Esse motor era o de menor capacidade dentre as opções disponíveis.

Na fase “Monetização” a categoria escolhida foi “energia elétrica para auto consumo local”, e a partir da quantidade diária gerada e inserção da tarifa de kWh (tarifa rural Companhia de Energia Elétrica da Bahia- COELBA: R\$ 0,4728), a ferramenta mostrou um valor total de R\$ 12.259,51/ano de energia elétrica a partir do biogás.

A ferramenta apresenta um relatório gráfico do projeto, conforme Figura 13.

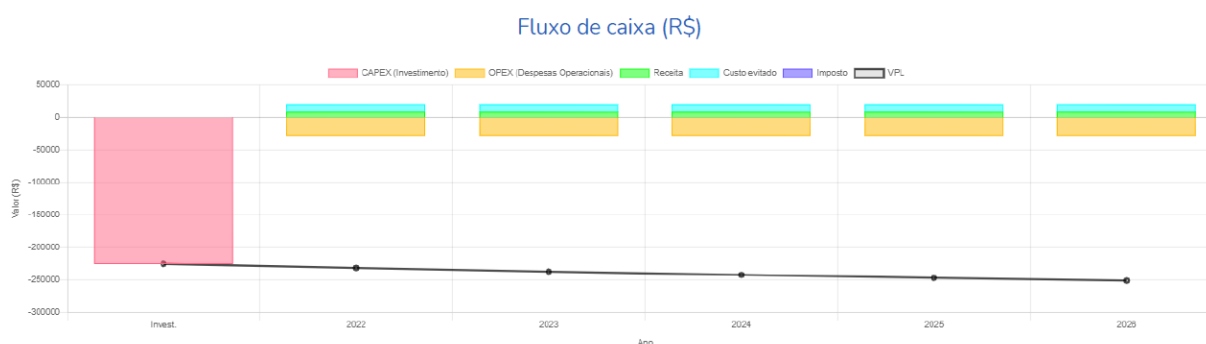
Figura 13- Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade da Bahia



Como resultado, pode-se constatar que os custos de manutenção do biodigestor e do motor não compensariam o custo de energia elétrica evitado. O valor evitado em energia elétrica de R\$ 12.259,51/ano não superaria o CAPEX (custo de investimento) de R\$ 225.000,00 e o OPEX (despesas operacionais) de R\$ 137.500,00. O projeto não teria o tempo de retorno de investimento em 5 anos.

Foi então simulado um cenário de venda do biofertilizante (digestato) e os resultados são mostrados na Figura 14. Assumindo o preço de venda de R\$ 3,00/L, conforme repassado pelos produtores, o projeto continuaria inviável. Considerando a capacidade de produção desta propriedade, é notório que a viabilidade do projeto está totalmente dependente do valor de venda, e, conseqüentemente, à qualidade (teor de nitrogênio, fósforo e potássio- NPK), do digestato.

Figura 14-Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade da Bahia- com venda do biofertilizante



Os valores de entrada para cada etapa para a propriedade de Castro/PR são apresentados no Quadro 4. São gerados 152m³ de resíduos/dia, e embora a ferramenta sugerisse biodigestor tipo lagoa coberta, foram escolhidos 2 CSTRs por

conta da capacidade de tratamento de resíduos. Com um total produzido de biogás de 1.454,62 Nm³/dia, foram escolhidos 2 motores geradores de 32Nm³/h, que operariam por 23h para produzir 2.327,39 kWh/dia, pois seria o necessário para consumir totalmente o biogás gerado. Sendo considerada a tarifa rural (Companhia Paranaense de Energia Elétrica- COPEL) de R\$ 0,6070, seriam poupados R\$ 515.644,89 de eletricidade/ano.

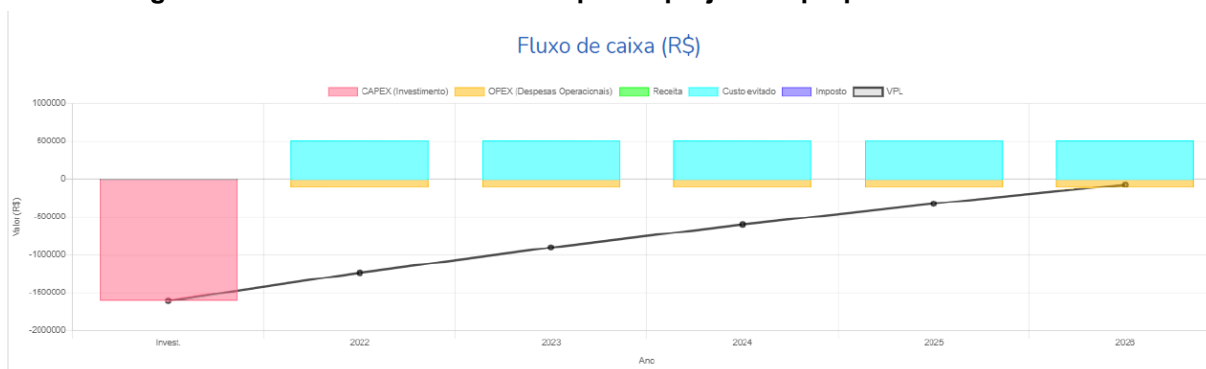
Quadro 4- Dados obtidos na ferramenta BiogásInvest para a propriedade de Castro/PR

ETAPA	RESULTADOS
Coleta e manejo de substratos e resíduos	Resultados da digestão anaeróbia de resíduo de cogumelos; 152m ³ de resíduos/dia;
Seleção de biodigestor	2 CSTRs- 5.654,86m ³ ; Gerando 169,64 Nm ³ /dia de biogás.
Opções de usos do biogás	Eletricidade- 2 motores 32 Nm ³ /h 23h operando; Gerando 2.327,39 kWh/dia.
Monetização	Com tarifa rural COPEL R\$0,607 R\$ 515.644,89 energia elétrica/ano

Fonte: Autoria própria.

Considerando o tempo estipulado nesse estudo o projeto seria inviável, porém, somente com economia de energia elétrica e sem venda de digestato como biofertilizante, o projeto teria retorno de investimento em 6 anos (Figura 15).

Figura 15-Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade do Paraná

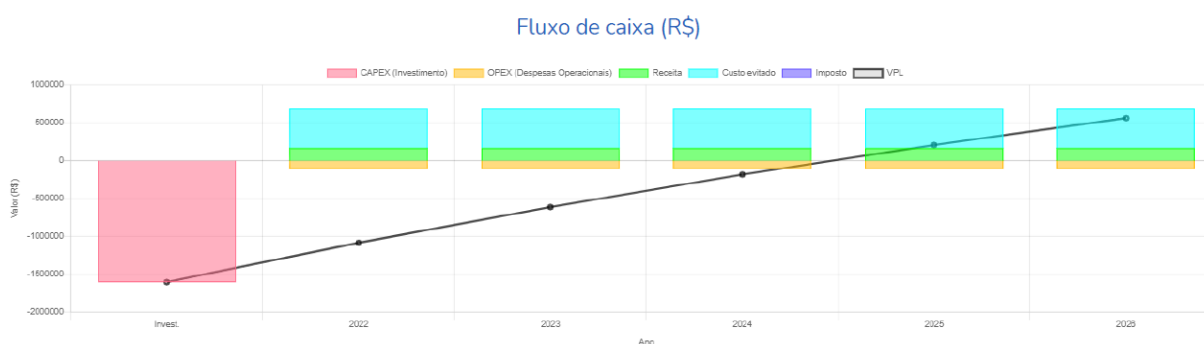


Fonte: BiogásInvest (2021).

Quando adicionada a operação de venda do biofertilizante por R\$3,00/L, o cenário mostrou-se ainda mais viável (Figura 16). Mantendo-se o valor de investimento inicial, com o uma economia de R\$ 515.644,89 de eletricidade/ano e a venda do biofertilizante resultando em receita de R\$ 167.031,30/ano, o tempo de

retorno de investimento do projeto seria de 4 anos. Mais uma vez nota-se que a viabilidade da instalação de unidades produtoras de biogás associadas à biodigestão de substrato de cogumelos exauridos é dependente da comercialização do digestato para um rápido retorno de investimento.

Figura 16-Gráfico de fluxo de caixa para o projeto na propriedade do Paraná- com venda do biofertilizante



Fonte: BiogásInvest (2021).

O digestato é a fração líquida resultante da biodigestão anaeróbica. Ele é rico em nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes, e seus usos finais mais comuns são como biofertilizante e corretivo do solo (PLANA; NOCHE, 2016), apresentando benefícios em relação à disponibilidade de Nitrogênio e rendimento em colheitas (MÖLLER; MÜLLER, 2012). Em estudo recente foi observada que a aplicação de digestato em cultura de gramíneas durante três anos resultou em melhoria das propriedades do solo, reduzindo a acidificação, melhorando as propriedades de sorção e aumentando seu conteúdo de matéria orgânica (GŁOWACKA; SZOSTAK; KLEBANIUK, 2020). Os fatores que influenciam na qualidade do biofertilizante gerado e sua aplicabilidade são: conteúdo de minerais, a relação C/N, e o impacto na saúde do solo, pois age diretamente na transformação de C e ciclagem de nutrientes (LOGAN; VISVANATHAN, 2019). Estudo de potencialidade de digestato como indutor fitoquímico destacou uma boa alternativa aos fertilizantes minerais para a produção de alimentos de alta qualidade (PANUCCIO *et al.*, 2019).

A necessária valorização do digestato como produto tem sido alvo de estudos. Como proposta de tratamento do digestato para redução de volume e concentração de nutrientes, existe a possibilidade de separação sólido-líquido por tecnologias como compostagem, secagem, evaporação, remoção de amônia e separação por membrana. Porém, o custo de instalação e operação da maioria das

técnicas é alto, devido à necessidade de maquinário adequado, alto consumo de energia e consumo de reagentes (PLANA; NOCHE, 2016). São necessários estudos a fim de encontrar alternativas viáveis economicamente para aplicação dessas tecnologias. A *pelletização* de digestato pode melhorar a capacidade de armazenamento do fertilizante, além de aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, permite que os nutrientes sejam facilmente mobilizados ao longo do tempo, representando uma possível fonte de nutrientes minerais também em aplicações de longo prazo, facilitando o armazenamento e transporte, viabilizando a venda para regiões mais distantes (VALENTINUZZI *et al.*, 2020).

Em estudo teórico de Tampio *et al.* (2016) foi avaliada a recuperação de nutrientes do digestato líquido, e apesar do uso de tratamentos que demandam calor, como *evaporação* e *stripping*, o processo consumiria menos de 10% da energia total produzida no sistema de digestão anaeróbia e capaz de concentrar até 67% de nitrogênio. A fase líquida pode ser recirculada na produção de biogás como água de processo, ou tratada posteriormente para obter concentrados ou água pura (BUSTAMANTE *et al.*, 2013; FUCHS, DROSG, 2013). Digestato também pode ser usado no cultivo de microalgas e produção de bioetanol (LOGAN; VISVANATHAN, 2019).

Um produto que já é comercializado nos EUA e utiliza digestato é o *Magic Dirt™* (Figura 16). Ele é formulado com fibra orgânica digerida anaerobicamente e produtos florestais compostados, atuando como substituto da turfa orgânica (AMERICAN BIOGAS COUNCIL, 2015). Segundo consulta no site da loja de departamentos Walmart, o preço de venda do produto é US\$9.96.

Figura 17-Magic Dirt™, digestato aproveitado para uso em plantas



Fonte: <https://www.magic-dirt.com/>(2021).

O projeto *Funguschain* é um novo conceito de biorrefinaria que está sendo instaurado na Europa para valorização de resíduos agrícolas de cogumelos *Agaricus bisporus*. A proposta é a obtenção de aditivos de base biológica de alto valor, bioplastificantes por conversão de lipídios, produção de biopolímeros a partir de polissacarídeos e aproveitamento de substratos remanescentes para compostagem e síntese de gás, fechando o ciclo (RUSU; SCHWARZE; PENEDO, 2020). Com o crescente consumo e conseqüente aumento na demanda de produção de cogumelos, o Brasil necessita de estudos para o aproveitamento dos produtos e subprodutos dessa cadeia produtiva, de modo a promover a economia circular e assegurar a sustentabilidade do processo.

5 CONCLUSÃO

Considerando o ensaio de Potencial Bioquímico de Metano realizado nesse estudo, o resíduo da produção de cogumelos *Agaricus bisporus* possui potencial para produção de biogás de $305,95 \text{ L}_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{svt}}$, teor de metano de 51,44% e PBM de $157,38 \text{ L}_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{svt}}$. O estudo de caso de viabilidade de implantação de uma unidade produtora de biogás em propriedades produtoras de cogumelo do tipo champignon de Paris mostrou-se viável na propriedade localizada no Paraná desde que a energia elétrica seja utilizada para autoconsumo e que o digestato seja comercializado. O preço de venda deste digestato mostrou ser o parâmetro de maior impacto na viabilidade do projeto. Para propriedade localizada na Bahia o projeto não se mostrou viável já que é necessária uma supervalorização na venda do digestato.

Os resíduos de *Agaricus bisporus* são materiais potenciais para digestão anaeróbia. Durante o processo produtivo ocorre quebra de compostos complexos em matéria disponível, e o que não é consumido pelo cogumelo, restos de micélio e os micro-organismos presentes no substrato exaurido tornam-se fonte de nutrientes para os micro-organismos da digestão anaeróbia. Essa hidrólise prévia causada pelo fungo auxilia a fase de hidrólise da digestão anaeróbia, consequentemente acelerando o processo de produção de biogás. Embora atualmente o foco de potencialização da digestão anaeróbia seja voltado para o desempenho da produção de biogás, o digestato traz perspectiva de capacidade para aplicações diversas, caracterizando oportunidade para estudos futuros, além de seu uso contribuir para a consolidação da economia circular e sustentabilidade na cadeia produtiva de cogumelos.

As perspectivas de potencial para uso de energias renováveis estão em crescimento no Brasil e no mundo, e iniciativas governamentais, interesse de aproveitamento de resíduos e de pesquisas aplicadas nesse segmento são de extrema importância para a consolidação de modelos de economia circular, demonstrando a preocupação não somente econômica, mas ambiental para o futuro do planeta. Como trabalhos futuros podem ser realizados experimentos de codigestão, aplicação de diferentes inóculos e estudo de valorização do digestato.

6 REFERÊNCIAS

ABRAHAM, Amith; MATHEW, Anil K; PARK, Hyojung; CHOI, Okkyoung; SINDHU, Raveendran; PARAMESWARAN, Binod; PANDEY, Ashok; PARK, Jung Han; SANG, Byoung-In. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. **BIORESOURCE TECHNOLOGY**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, vol. 301, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>.

AHMAD, Shamshad; PATHAK, Vinayak V.; KOTHARI, Richa; SINGH, Rajeev Pratap. Prospects for pretreatment methods of lignocellulosic waste biomass for biogas enhancement: opportunities and challenges. **Biofuels**, vol. 9, no. 5, p. 575–594, 2018. DOI 10.1080/17597269.2017.1378991. Available at: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1378991>.

ANEEL. (2020). Geração Distribuída. Agência Nacional de Energia Elétrica. Acesso em 29 de Junho de 2020, disponível em http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd_fonte_detalhe.asp?Tipo=2

ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J. L.; GUWY, A. J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, vol. 59, no. 5, p. 927–934, 2009. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. American Public Health Association, Washington, 2012.

BANASIK, Aleksander; KANELLOPOULOS, Argyris; CLAASSEN, G. D.H.; BLOEMHOF-RUWAARD, Jacqueline M.; VAN DER VORST, Jack G.A.J. Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain. **International Journal of Production Economics**, vol. 183, p. 409–420, 2017. DOI 10.1016/j.ijpe.2016.08.012. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.012>.

BAWEJA, Manish. Parametric Evaluation of Bio-Digestion Process-A Review. **American Journal of Energy Engineering**, vol. 6, no. 1, p. 6, 2018. <https://doi.org/10.11648/j.ajee.20180601.12>.

BEHERA, Shuvashish; ARORA, Richa; NANDHAGOPAL, N.; KUMAR, Sachin.

Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 36, p. 91–106, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2014.04.047. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.047>.

BISARIA, R; MADAN, M; MUKHOPADHYAY, S N. PRODUCTION OF BIOGAS FROM RESIDUES FROM MUSHROOM CULTIVATION. **BIOTECHNOLOGY LETTERS**, 2-6 BOUNDARY ROW, LONDON, ENGLAND SE1 8HN, vol. 5, no. 12, p. 811–812, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF01386653>.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizante e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 2014.

BRASIL. **Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis nº 8 de 30 de janeiro de 2015**. Estabelece as especificações do Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais. Diário Oficial da União. Brasília, 02 fev. 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Oliver Jende ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015. 83 p. : il. – (Desenvolvimento do mercado de biogás; 2)

CARRASCO, Jaime; GARCÍA-DELGADO, Carlos; LAVEGA, Rebeca; TELLO, María L.; DE TORO, María; BARBA-VICENTE, Víctor; RODRÍGUEZ-CRUZ, María S.; SÁNCHEZ-MARTÍN, María J.; PÉREZ, Margarita; PRESTON, Gail M. Holistic assessment of the microbiome dynamics in the substrates used for commercial champignon (*Agaricus bisporus*) cultivation. **Microbial Biotechnology**, vol. 13, no. 6, p. 1933–1947, 2020. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13639>.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

CIBIOGÁS (Centro Internacional de Energias Renováveis). **Características e aplicações do biogás e do digestato**. Curso de Biogás: fundamentos e aplicações do CIBiogás. Foz do Iguaçu, 2018.

COLLELA, Carolina Figueiredo; SOARES COSTA, Lívia Martinez Abreu; DE MORAES, Tatiana Silveira Junqueira; ZIED, Diego Cunha; RINKER, Danny Lee;

DIAS, Eustáquio Souza. Potential utilization of spent agaricus bisporus mushroom substrate for seedling production and organic fertilizer in tomato cultivation. **Ciencia e Agrotecnologia**, vol. 43, 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943017119>.

COLMENARES-CRUZ, Stephania; SÁNCHEZ, José E.; VALLE-MORA, Javier. Agaricus bisporus production on substrates pasteurized by self-heating. **AMB Express**, vol. 7, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0438-6>.

CORDIS. **Smart Management of spent mushroom substrate to lead the mushroom sector towards a circular economy**. Disponível em: <<https://cordis.europa.eu/project/id/820352>>.

CORRAL-BOBADILLA, Marina; GONZÁLEZ-MARCOS, Ana; VERGARA-GONZÁLEZ, Eliseo P.; ALBA-ELÍAS, Fernando. Bioremediation of waste water to remove heavy metals using the spent mushroom substrate of Agaricus bisporus. **Water (Switzerland)**, vol. 11, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11030454>.

DENG, Liangwei; LIU, Yi; WANG, Wenguo. Anaerobic Digestion Microorganisms. **Biogas Technology**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 1–29. DOI 10.1007/978-981-15-4940-3_1. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-4940-3_1.

EDWIGES, Thiago. **BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS VEGETAIS PROVENIENTES DE CENTRAL DE ABASTECIMENTO**. 2017. 9–15 f. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017. Available at: http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/3029/2/Thiago_Edwiges2017.pdf.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. **Rio de Janeiro : EPE**, , p. 264, 2020.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR). **Guia Prático de Biogás: Geração e Utilização**. Gülzow, 2013. Disponível em: <<http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-por-finalweb-20131002.pdf>> Acesso em 07 mai. 2019.

FREITAS, Lucas Cantão; BARBOSA, Jhonatas Rodrigues; DA COSTA, Ana Laura Caldas; BEZERRA, Fernanda Wariss Figueiredo; PINTO, Rafael Henrique Holanda; CARVALHO JUNIOR, Raul Nunes de. From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 169, no. August 2020, p. 105466, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>.

GAO, Xionghui; TANG, Xiaoyu; ZHAO, Kunyang; BALAN, Venkatesh; ZHU, Qili. Biogas Production from Anaerobic Co-Digestion of Spent Mushroom Substrate with Different Livestock Manure. **Energies**, vol. 14, no. 3, p. 570, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14030570>.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, vol. 114, p. 11–32, 2016. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.09.007. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

GŁOWACKA, Aleksandra; SZOSTAK, Bogdan; KLEBANIUK, Renata. Effect of biogas digestate and mineral fertilisation on the soil properties and yield and nutritional value of switchgrass forage. **Agronomy**, vol. 10, no. 4, p. 1–22, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040490>.

GOBBI, V.; NICOLETTO, C.; ZANIN, G.; SAMBO, P. Specific humus systems from mushrooms culture. **Applied Soil Ecology**, vol. 123, no. October 2017, p. 709–713, 2018. DOI 10.1016/j.apsoil.2017.10.023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.023>.

HO, Dang P.; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan. A mini review on renewable sources for biofuel. **Bioresour. Technol.**, vol. 169, p. 742–749, 2014. DOI 10.1016/j.biortech.2014.07.022. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.022>.

HUANG, Wenbo; CHUFO WACHEMO, Akiber; YUAN, Hairong; LI, Xiujin. Full utilization of nutrients in rice straw by integrating mushroom cultivation, biogas production, and fertilizer use. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, vol. 12, no. 4, p. 174–183, 2019. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.4658>.

KABEL, Mirjam A.; JURAK, Edita; MÄKELÄ, Miia R.; DE VRIES, Ronald P. Occurrence and function of enzymes for lignocellulose degradation in commercial *Agaricus bisporus* cultivation. **Applied Microbiology and Biotechnology**, vol. 101, no. 11, p. 4363–4369, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8294-5>.

KAINTHOLA, Jyoti; KALAMDHAD, Ajay S.; GOUD, Vaibhav V. A review on enhanced

biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. **Process Biochemistry**, vol. 84, no. May, p. 81–90, 2019a. DOI 10.1016/j.procbio.2019.05.023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.05.023>.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual Básico do Biogás**. 1. ed. Lajeado: UNIVATES, 2014. 70 p.

KUMARI, Dolly; SINGH, Radhika. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 90, no. May 2017, p. 877–891, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2018.03.111. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 209 p. 2019. ISBN 978-85-93823-01-5.

LI, Longwei; XU, Jianling; WANG, Hanxi; LIU, Xuejun; ZHANG, Di. Study of the performance of biogas production by mixed fermentation of cow dung, deer manure, and mushroom fungus. **Energy Science and Engineering**, vol. 8, no. 2, p. 466–475, 2020. <https://doi.org/10.1002/ese3.528>.

LI, Pengfei; LI, Wenzhe; SUN, Mingchao; XU, Xiang; ZHANG, Bo; SUN, Yong. Evaluation of biochemical methane potential and kinetics on the anaerobic digestion of vegetable crop residues. **Energies**, vol. 12, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12010026>.

LOGAN, Mohanakrishnan; VISVANATHAN, Chettiyappan. Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: Current status and future prospects. **Waste Management and Research**, vol. 37, no. 1_suppl, p. 27–39, 2019. <https://doi.org/10.1177/0734242X18816793>.

LONGATI, Andreza Aparecida; BATISTA, Gustavo; CRUZ, Antonio José Gonçalves. Brazilian integrated sugarcane-soybean biorefinery: Trends and opportunities. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, vol. 26, p. 100400, 2020. DOI 10.1016/j.cogsc.2020.100400. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100400>.

LUO, Xiaosha; YUAN, Xufeng; WANG, Shiyu; SUN, Fanrong; HOU, Zhanshan; HU,

Qingxiu; ZHAI, Limei; CUI, Zongjun; ZOU, Yajie. Methane production and characteristics of the microbial community in the co-digestion of spent mushroom substrate with dairy manure. **Bioresource Technology**, vol. 250, no. October 2017, p. 611–620, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.088>.

MAMIMIN, Chonticha; CHANTHONG, Sukonlarat; LEAMDUM, Chonticha; O-THONG, Sompong; PRASERTSAN, Poonsuk. Improvement of empty palm fruit bunches biodegradability and biogas production by integrating the straw mushroom cultivation as a pretreatment in the solid-state anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, vol. 319, no. July 2020, p. 124227, 2021. DOI 10.1016/j.biortech.2020.124227. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124227>.

Matriz Energética Nacional 2030 / Ministério de Minas Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. _ Brasília: MME: EPE, 2007. p. 254: il. Disponível em: <<https://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/matriz-energetica-nacional-2030>> Acesso em: 06 maio 2019.

MCGEE, Conor F. Microbial ecology of the *Agaricus bisporus* mushroom cropping process. **Applied Microbiology and Biotechnology**, vol. 102, no. 3, p. 1075–1083, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8683-9>.

MÖLLER, Kurt; MÜLLER, Torsten. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. **Engineering in Life Sciences**, vol. 12, no. 3, p. 242–257, 2012. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>.

MORAIS, José Mauro de. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos: o que mostra o retrato do Brasil? **Cadernos ODS**, , p. 29, 2019. Available at: http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=34773.

MORSELETTO, Piero. Targets for a circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 153, no. October 2019, p. 104553, 2020. DOI 10.1016/j.resconrec.2019.104553. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.

PANDIN, Caroline; VÉDIE, Régis; ROUSSEAU, Thierry; LE COQ, Dominique; AYMERICH, Stéphane; BRIANDET, Romain. Dynamics of compost microbiota during the cultivation of *Agaricus bisporus* in the presence of *Bacillus velezensis* QST713 as biocontrol agent against *Trichoderma aggressivum*. **Biological Control**, vol. 127, no. August, p. 39–54, 2018. DOI 10.1016/j.biocontrol.2018.08.022. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.08.022>.

PANUCCIO, Maria Rosaria; PAPALIA, Teresa; ATTINÀ, Emilio; GIUFFRÈ, Angelo; MUSCOLO, Adele. Use of digestate as an alternative to mineral fertilizer: effects on growth and crop quality. **Archives of Agronomy and Soil Science**, vol. 65, no. 5, p. 700–711, 2019. DOI 10.1080/03650340.2018.1520980. Available at: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1520980>.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: https://repositorio.usp.br/single.php?_id=001542064. Acesso em: 07 ago. 2019.

PÉREZ-CHÁVEZ, Ana Marion; MAYER, Leopoldo; ALBERTÓ, Edgardo. Mushroom cultivation and biogas production: A sustainable reuse of organic resources. **Energy for Sustainable Development**, vol. 50, p. 50–60, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.03.002>. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082618315990>.

PLANA, P. Vilanova; NOCHE, B. A review of the current digestate distribution models: storage and transport. **Waste Management and The Environment VIII**, vol. 1, no. Wm, p. 345–357, 2016. <https://doi.org/10.2495/wm160311>.

RAJENDRAN, Karthik; DRIELAK, Edward; SUDARSHAN VARMA, V.; MUTHUSAMY, Shanmugaparakash; KUMAR, Gopalakrishnan. Updates on the pretreatment of lignocellulosic feedstocks for bioenergy production—a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, vol. 8, no. 2, p. 471–483, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0269-3>.

RAMOS, Marina; BURGOS, Nuria; BARNARD, Almero; EVANS, Gareth; PREECE, James; GRAZ, Michael; RUTHES, Andrea Caroline; JIMÉNEZ-QUERO, Amparo; MARTÍNEZ-ABAD, Antonio; VILAPLANA, Francisco; NGOC, Long Pham; BROUWER, Abraham; VAN DER BURG, Bart; DEL CARMEN GARRIGÓS, María; JIMÉNEZ, Alfonso. Agaricus bisporus and its by-products as a source of valuable extracts and bioactive compounds. **Food Chemistry**, vol. 292, no. November 2018, p. 176–187, 2019. DOI 10.1016/j.foodchem.2019.04.035. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.035>.

ROY, Mousumi. Circular economy: a new sustainable management paradigm. **Sustainable Development Strategies**, , p. 189–214, 2021.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818920-7.00006-2>.

RUSU, Alexandru Vasile; SCHWARZE, Ann-Kristin; PENEDO, Berta Alvarez. FUNGUSCHAIN EU Project: Extracting Value from the Agricultural Offcuts of Commercial Mushroom Farming. **BULLETIN OF UNIVERSITY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND VETERINARY MEDICINE CLUJ-NAPOCA-FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY**, STR MANASTUR 3-5, CLUJ-NAPOCA, 400372, ROMANIA, vol. 77, no. 1, p. 104–106, 2020. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-fst:2020.0018>.

SCAPINI, T.; *et al.* Enzyme-Mediated Enhanced Biogas Yield. **Biofuel And Biorefinery Technologies**, [S.L.], p. 45-68, 2019. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-10516-7_3

SCHIMPF, Ulrike; SCHUTZ, Ronald. Industrial by-products from white-rot fungi production. Part I: Generation of enzyme preparations and chemical, protein biochemical and molecular biological characterization. **PROCESS BIOCHEMISTRY**, vol. 51, no. 12, p. 2034–2046, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.08.032>.

SINGH, Buta; SZAMOSI, Zoltán; SIMÉNFALVI, Zoltán. Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. **Critical Reviews in Biotechnology**, vol. 40, no. 4, p. 508–521, 2020. DOI 10.1080/07388551.2020.1731413. Available at: <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1731413>.

TANTAYOTAI, Prapakorn; RATTANAPORN, Kittipong; TEPAAMORNDECH, Surapun; CHEENKACHORN, Kraipat; SRIARIYANUN, Malinee. Analysis of an Ionic Liquid and Salt Tolerant Microbial Consortium Which Is Useful for Enhancement of Enzymatic Hydrolysis and Biogas Production. **WASTE AND BIOMASS VALORIZATION**, VAN GODEWIJCKSTRAAT 30, 3311 GZ DORDRECHT, NETHERLANDS, vol. 10, no. 6, p. 1481–1491, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0186-5>.

TEN HAVE, Rimko; WIJNGAARD, Hilde; ARIËS-KRONENBURG, Nicole A.E.; STRAATSMA, Gerben; SCHAAP, Peter J. Lignin degradation by *Agaricus bisporus* accounts for a 30% increase in bioavailable holocellulose during cultivation on compost. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, vol. 51, no. 8, p. 2242–2245, 2003. <https://doi.org/10.1021/jf021131h>.

United Nations. (2019). **World population prospects**. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

VAHID AFAGH, Haideh; SAADATMAND, Sara; RIAHI, Hossein; KHAVARI-NEJAD, Ramazan Ali. Influence of Spent Mushroom Compost (SMC) as an Organic Fertilizer on Nutrient, Growth, Yield, and Essential Oil Composition of German Chamomile (*Matricaria Recutita* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 50, no. 5, p. 538–548, 2019. DOI 10.1080/00103624.2019.1568450. Available at: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1568450>.

VALENTINUZZI, Fabio; CAVANI, Luciano; PORFIDO, Carlo; TERZANO, Roberto; PII, Youry; CESCO, Stefano; MARZADORI, Claudio; MIMMO, Tanja. The fertilising potential of manure-based biogas fermentation residues: pelleted vs. liquid digestate. **Heliyon**, vol. 6, no. 2, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03325>.

VDI. VDI 4630. **Fermentation of organic materials**: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Normas Técnicas da Associação Alemã de Engenheiros. Düsseldorf, 2016.

VIEIRA, Sabrina; BARROS, Murillo Vetroni; SYDNEY, Alessandra Cristine Novak; PIEKARSKI, Cassiano Moro; DE FRANCISCO, Antônio Carlos; VANDENBERGHE, Luciana Porto de Souza; SYDNEY, Eduardo Bittencourt. Sustainability of sugarcane lignocellulosic biomass pretreatment for the production of bioethanol. **Bioresource Technology**, vol. 299, p. 122635, 2020. DOI 10.1016/j.biortech.2019.122635. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122635>.

WAN MAHARI, Wan Adibah; PENG, Wanxi; NAM, Wai Lun; YANG, Han; LEE, Xie Yi; LEE, Yik Kin; LIEW, Rock Kee; MA, Nyuk Ling; MOHAMMAD, Aqilah; SONNE, Christian; VAN LE, Quyet; SHOW, Pau Loke; CHEN, Wei Hsin; LAM, Su Shiung. A review on valorization of oyster mushroom and waste generated in the mushroom cultivation industry. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 400, no. May, p. 123156, 2020. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.123156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123156>.

XIAO, Zheng; LIN, Manhong; FAN, Jinlin; CHEN, Yixuan; ZHAO, Chao; LIU, Bin. Anaerobic digestion of spent mushroom substrate under thermophilic conditions: performance and microbial community analysis. **Applied Microbiology and Biotechnology**, vol. 102, no. 1, p. 499–507, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8578-9>.

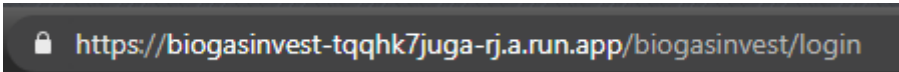
ZHENG, Yi; ZHAO, Jia; XU, Fuqing; LI, Yebo. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science**, vol. 42, no. 1, p. 35–53, 2014. DOI 10.1016/j.pecs.2014.01.001. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>.

ZHU, Hongguang; YANG, Jing; XIAOWEI, Cheng. Application of Modified Gompertz Model to Study on Biogas production from middle temperature co-digestion of pig manure and dead pigs. **E3S Web of Conferences**, vol. 118, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911803022>.

ZOU, Yajie; DU, Fang; HU, Qingxiu; YUAN, Xufeng; DAI, Dari; ZHU, Mengjuan. Integration of *Pleurotus tuoliensis* cultivation and biogas production for utilization of lignocellulosic biomass as well as its benefit evaluation. **Bioresource Technology**, vol. 317, no. July, p. 1–8, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124042>.

ANEXO A - Ferramenta BiogásInvest

Figura 18-Site para acesso da ferramenta BiogásInvest



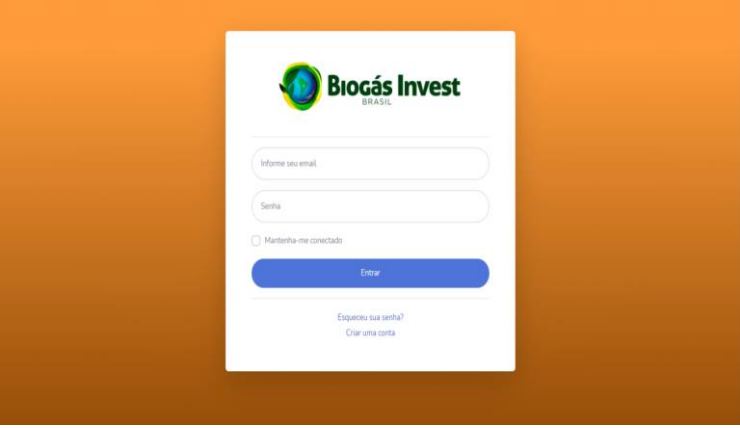
Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 19-Tela inicial para registro



Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 20-Tela para login no sistema



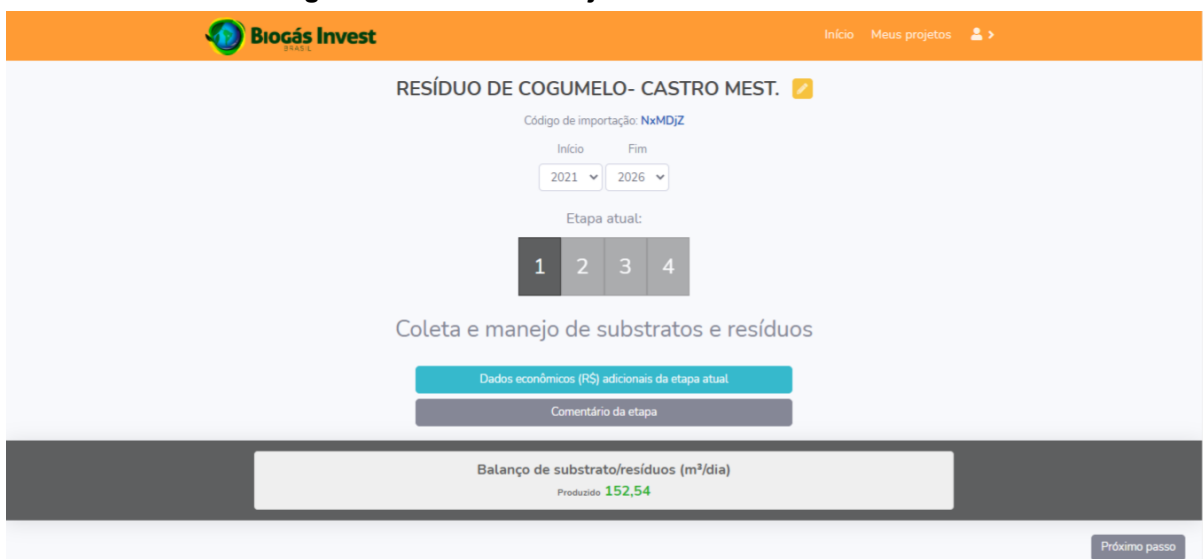
Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 21-Começar um novo projeto



Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 22-Coleta e manejo de substratos e resíduos



Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 23-Modelos pré-definidos pelo sistema para subfontes

Info	[0] Frigorífico	Adicionar subfonte
Info	[0] Amidolaria	Adicionar subfonte
Info	[0] Fecularia	Adicionar subfonte
Info	[0] Laticínios	Adicionar subfonte
Info	[0] Aves	Adicionar subfonte
Info	[0] Suínos	Adicionar subfonte
Info	[0] Bovino	Adicionar subfonte
Info	[0] Personalizado	Adicionar subfonte

[Sumário de potencial](#) [Sumário econômico-financeiro](#) [Fluxo de caixa](#) [Próximo passo](#)

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 24-Adicionar subfonte personalizada

The screenshot shows a modal window titled "Adicionar uma subfonte personalizada" with the following fields and options:

- Nome:** Input field labeled "Nome completo".
- Unidade de medida:** Input field labeled "Informe a Unidade de medida".
- (1) Fator de conversão da unidade de referência para m³ de substrato/resíduos por dia (m³ de substrato ou resíduos/unidade de referência/dia):** Input field labeled "Valor base".
- (2) Fator de produção de biogás por m³ de dejetos (Nm³ de biogás/m³ de substrato ou resíduo):** Input field labeled "Valor base".
- Fator percentual de metano (CH₄) no biogás:** Input field labeled "Valor base".
- Fator percentual de gás carbônico (CO₂) no biogás:** Input field labeled "Valor base".
- Fator de produção de biofertilizante por m³ de substrato ou resíduo (m³ de biofertilizante/m³ de substrato ou resíduo):** Input field labeled "Valor base".
- Percentual de sólidos totais do substrato ou resíduo (%):** Input field labeled "Valor base".

A green "Salvar" button is located at the bottom right of the dialog.

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 25-Inserir volume de resíduo gerado

The screenshot shows the "Resíduo de Cogumelos" form within a larger application window. The form includes:

- Unidade de medida utilizada:** m³
- Informe a quantidade:** Input field with the value 152,54.
- Buttons:** "Dados econômicos adicionais", "Configurações", and "Remover".

At the bottom of the application window, there are navigation buttons: "Sumário de potencial", "Sumário econômico-financeiro", "Fluxo de caixa", and "Próximo passo". The Biogás Invest logo is visible at the bottom left.

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 26-Segunda etapa: seleção de biodigestor

Biogás Invest Início Meus projetos

Resíduo de Cogumelos- 1

Código de importação: NxMDJZ

Início: 2021 | Fim: 2026

Etapa atual:

1 2 3 4

Seleção de biodigestor

Dados econômicos (R\$) adicionais da etapa atual

Comentário da etapa

Balanco de substrato/resíduos (m³/dia)			
Disponível: 152,54	Capacidade instalada: 169,64	Utilizado: 152,54	Capacidade instalada não utilizada: 17,10
Biogás gerado (Nm³/dia): 1.454,62			

Passo anterior | Próximo passo

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 27-Escolher modelo do biodigestor

Passo anterior Próximo passo

Modelos de biodigestor selecionados

Modelo CSTR 3

Volume limite do biodigestor	5.654,86 m ³
Volume útil de uso ⁱ	169,64 m ³ /dia (30 dias)
Eficiência do equipamento ⁱ	80%
Valor de aquisição total	<input checked="" type="checkbox"/> R\$ 1.300.000,00
Custo de operação e manutenção anual	<input checked="" type="checkbox"/> R\$ 110.000,00
Quantidade de modelos	2 <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>
Dejetos em uso	<input checked="" type="checkbox"/> 152,54 m ³ /dia

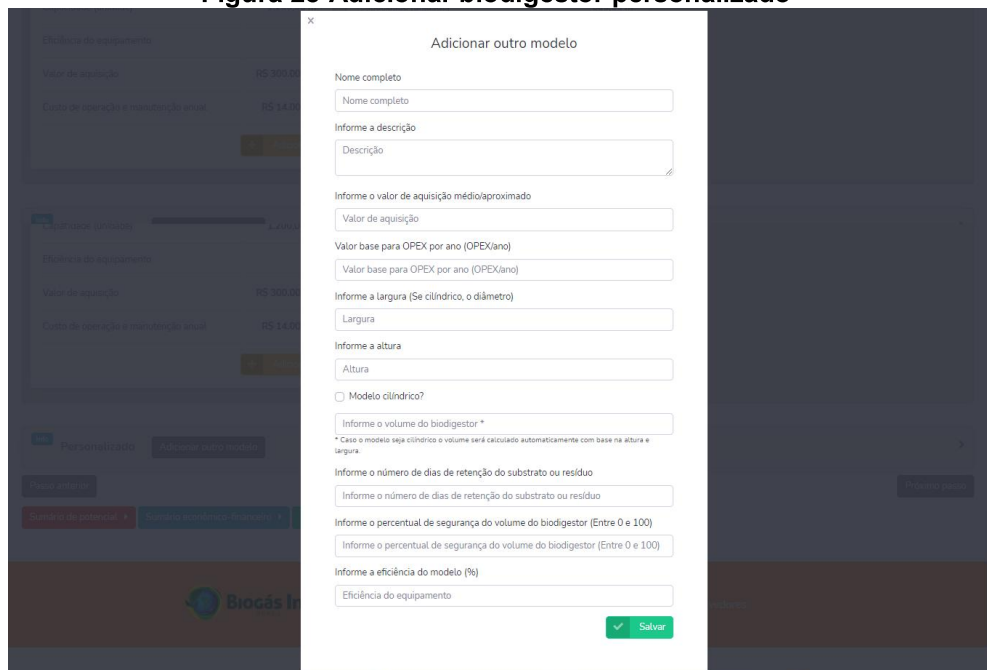
CSTR >

Tecnologia sugerida LAGOA COBERTA COM CONTROLE DE TEMPERATURA E AGITAÇÃO FÍSICA >

Personalizado >

Passo anterior Próximo passo

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 28-Adicionar biodigestor personalizado

Adicionar outro modelo

Nome completo
Nome completo

Informe a descrição
Descrição

Informe o valor de aquisição médio/aproximado
Valor de aquisição

Valor base para OPEX por ano (OPEX/ano)
Valor base para OPEX por ano (OPEX/ano)

Informe a largura (Se cilíndrico, o diâmetro)
Largura

Informe a altura
Altura

Modelo cilíndrico?
Informe o volume do biodigestor*
* Caso o modelo seja cilíndrico o volume será calculado automaticamente com base na altura e largura.

Informe o número de dias de retenção do substrato ou resíduo
Informe o número de dias de retenção do substrato ou resíduo

Informe o percentual de segurança do volume do biodigestor (Entre 0 e 100)
Informe o percentual de segurança do volume do biodigestor (Entre 0 e 100)

Informe a eficiência do modelo (%)
Eficiência do equipamento

✓ Salvar

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 29-Terceira etapa: usos do biogás



RESÍDUO DE COGUMELO- CASTRO MEST.

Código de importação: NxMDJZ

Início: 2021 | Fim: 2026

Etapa atual: 1 2 **3** 4

Opções de uso de biogás

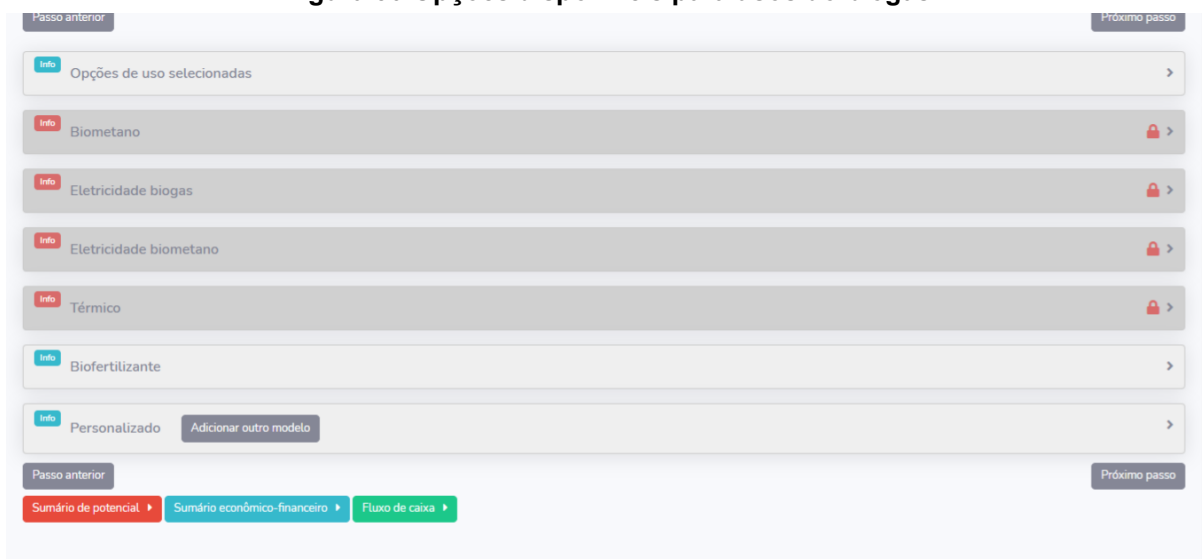
- Dados econômicos (R\$) adicionais da etapa atual
- Comentário da etapa
- Comprar biogás

Produção disponível para uso

Biogás (Nm³/dia)	0,00	Biometano (Nm³/dia)	0,00	Biofertilizante (m³)	152,54
Eletricidade (kWh/dia)	2.327,39	CO2 (Nm³/dia)	0,00	Térmico (GJ/dia)	0,00

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 30-Opções disponíveis para usos do biogás



Passo anterior | Próximo passo

- Opções de uso selecionadas
- Biometano
- Eletricidade biogas
- Eletricidade biometano
- Térmico
- Biofertilizante
- Personalizado | Adicionar outro modelo

Passo anterior | Próximo passo

- Sumário de potencial
- Sumário econômico-financeiro
- Fluxo de caixa

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 31-Escolha de motor gerador para energia elétrica

Digite o nome do modelo que deseja pesquisar

Grupo Motor Gerador de 40KVA

Categoria	Eletricidade biogas
Consumo	64,00 Nm³/h
Fator de conversão 1	1,6000
Horas de uso (dia)	23 horas
Valor de aquisição total	R\$ 300.000,00
Custo de operação e manutenção anual	R\$ 2.000,00
Quantidade	2 + -
Capacidade utilizada	63,24 Nm³/h

Info Dados econômicos adicionais Remover

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 32-Monetização dos produtos pós digestão anaeróbia

Biogás Invest Início Meus projetos +

RESÍDUO DE COGUMELO- CASTRO MEST.

Código de importação: NxMDjZ

Início: 2021 | Fim: 2026

Etapa atual:

1 2 3 4

Monetização

Dados econômicos (R\$) adicionais da etapa atual

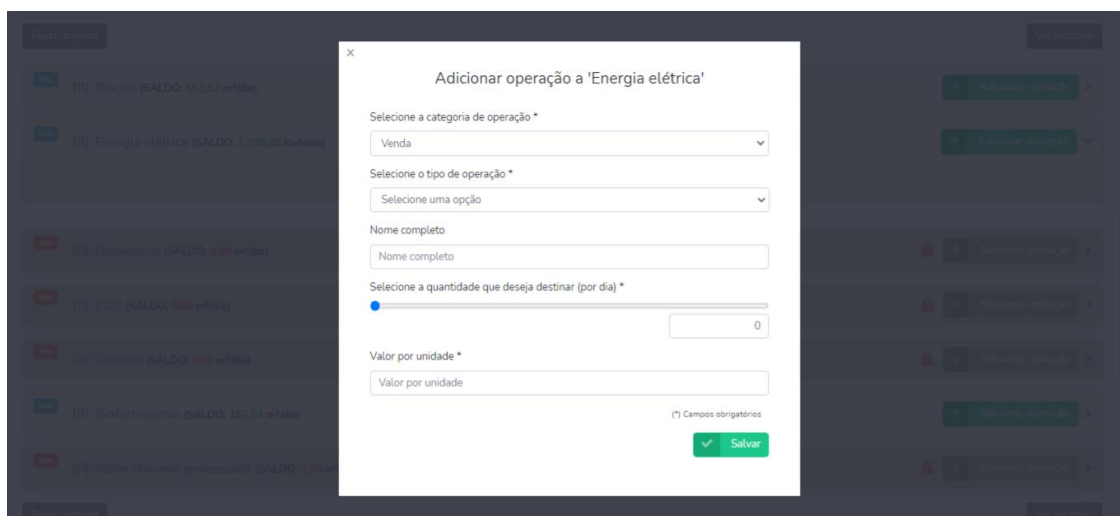
Comentário da etapa

Ver relatório

Valor econômico anual gerado

Biogás (R\$/ano)	0,00	Biometano (R\$/ano)	0,00	Biofertilizante normal/processado (R\$/ano)	55.677,10 / 0,00
Eletricidade (R\$/ano)	515.644,89	CO2 (R\$/ano)	0,00	Térmico (R\$/ano)	0,00

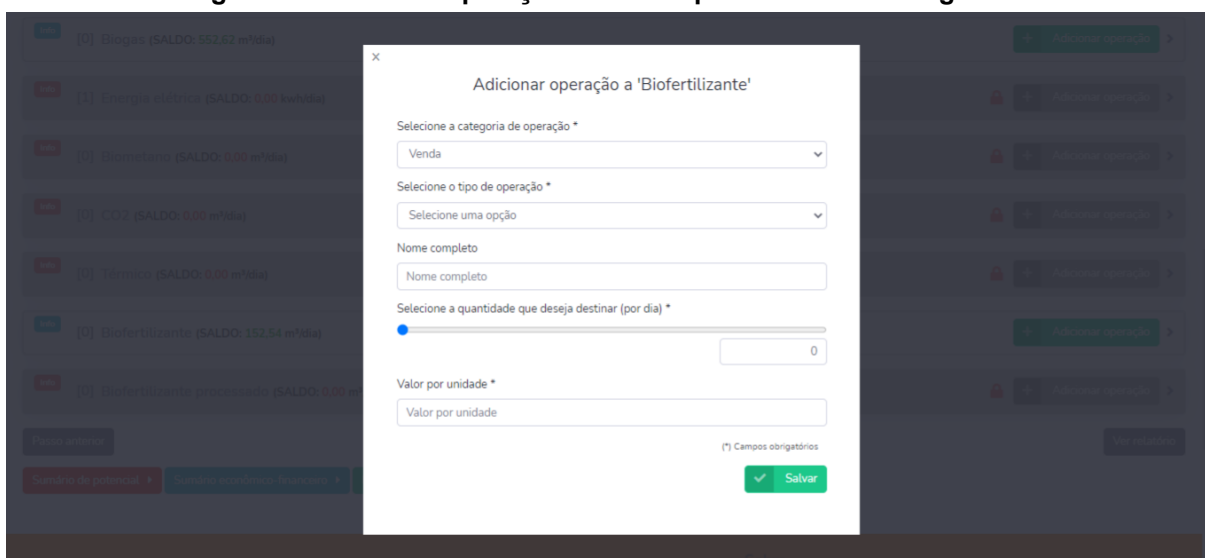
Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 33-Adicionar escolha para energia elétrica, venda ou autoconsumo

The screenshot displays a modal window titled "Adicionar operação a 'Energia elétrica'". The window contains the following fields and controls:

- Selezione a categoria de operação ***: A dropdown menu with "Venda" selected.
- Selezione o tipo de operação ***: A dropdown menu with "Selezione uma opção" selected.
- Nome completo**: A text input field with "Nome completo" as a placeholder.
- Selezione a quantidade que deseja destinar (por dia) ***: A slider control with a blue dot and a numeric input field showing "0".
- Valor por unidade ***: A text input field with "Valor por unidade" as a placeholder.
- Footer**: A note "(*) Campos obrigatórios" and a green "Salvar" button with a checkmark icon.

Fonte: BiogásInvest (2021).

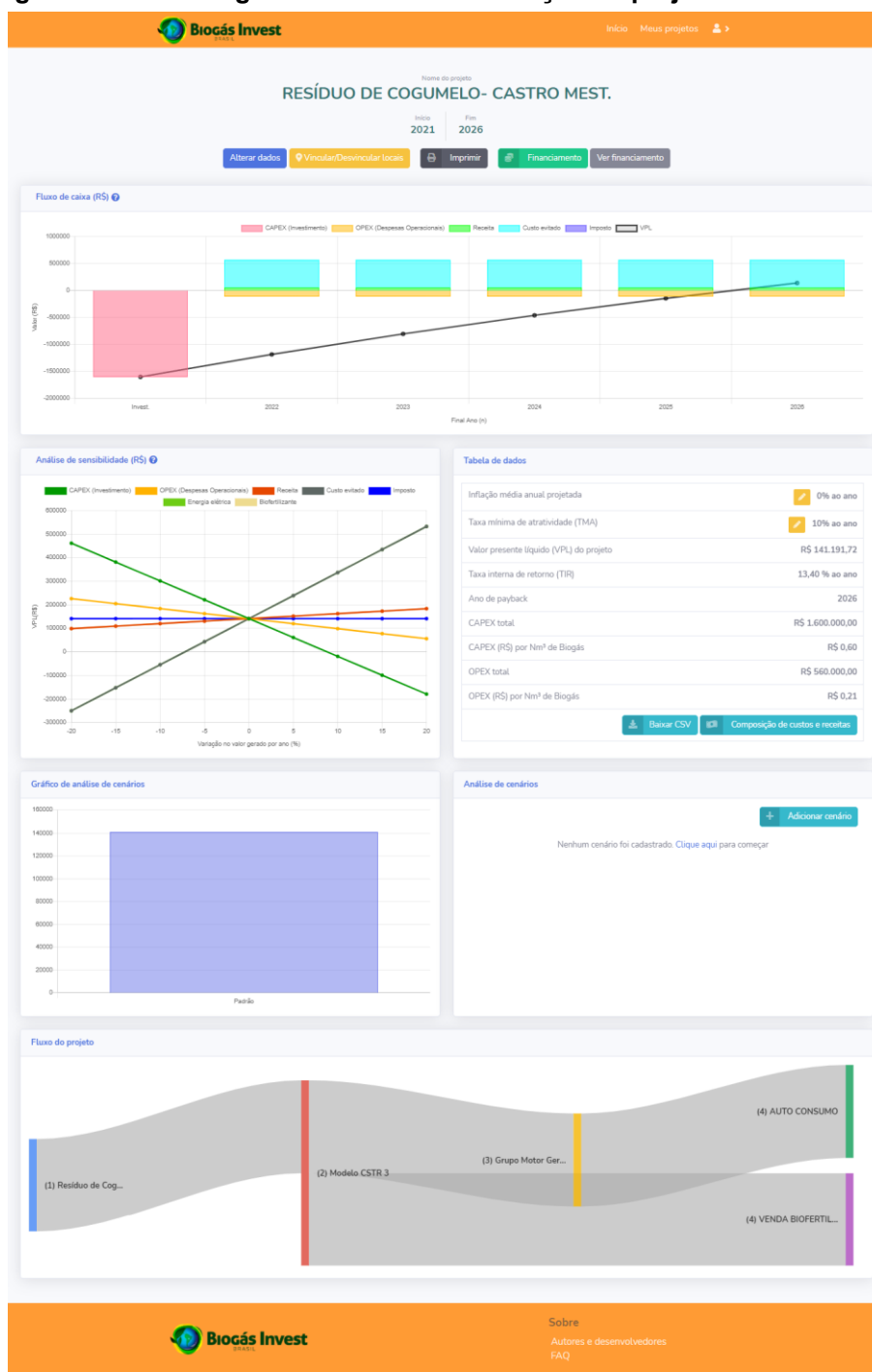
Figura 34-Adicionar operação de venda para biofertilizante gerado

The screenshot displays a modal window titled "Adicionar operação a 'Biofertilizante'". The window contains the following fields and controls:

- Selezione a categoria de operação ***: A dropdown menu with "Venda" selected.
- Selezione o tipo de operação ***: A dropdown menu with "Selezione uma opção" selected.
- Nome completo**: A text input field with "Nome completo" as a placeholder.
- Selezione a quantidade que deseja destinar (por dia) ***: A slider control with a blue dot and a numeric input field showing "0".
- Valor por unidade ***: A text input field with "Valor por unidade" as a placeholder.
- Footer**: A note "(*) Campos obrigatórios" and a green "Salvar" button with a checkmark icon.

Fonte: BiogásInvest (2021).

Figura 35-Relatório gerado ao fim da elaboração do projeto na ferramenta



Fonte: BioGásInvest (2021).