

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO – PRPPG
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**PRODUÇÃO DE BIOETANOL UTILIZANDO BIOMASSA DA BANANICULTURA E
PRODUÇÃO SEQUENCIAL DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
GERADOS**

GABRIEL ROBERGE RIBEIRO

JOINVILLE – SC

2023

GABRIEL ROBERGE RIBEIRO

**PRODUÇÃO DE BIOETANOL UTILIZANDO BIOMASSA DA BANANICULTURA E
PRODUÇÃO SEQUENCIAL DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
GERADOS**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, da Universidade da Região de Joinville - Univille.

Orientadora: Prof^a. Dra. Elisabeth Wisbeck
Coorientador: Prof. Dr. Ozair Souza

JOINVILLE – SC

2023

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

R484p

Ribeiro, Gabriel Roberge

Produção de bioetanol utilizando biomassa da bananicultura e produção sequencial de biogás a partir dos resíduos sólidos gerados/ Gabriel Roberge Ribeiro; orientadora Dra. Elisabeth Wisbeck; coorientador Dr. Ozair Souza. – Joinville: UNIVILLE, 2023.

89 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)

1. Biocombustíveis. 2. Energia da biomassa. 3. Bananeira – Reaproveitamento (sobras, refugos, etc.). 4. Metano. I. Wisbeck, Elisabeth (orient.). II. Souza, Ozair (coorient.). III. Título.

CDD 662.88

Termo de Aprovação

“Produção de Bioetanol Utilizando Biomassa da Bananicultura e Produção Sequencial de Biogás a partir dos Resíduos Sólidos Gerados”

por

Gabriel Roberge Ribeiro

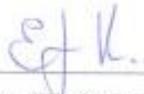
Banca Examinadora:

Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck
Orientadora (UNIVILLE)

Dr. Ricardo Luís Radis Steinmetz
(EMBRAPA)

Profa. Dra. Marcia Luciane Lange Silveira
(UNIVILLE)

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento e Gestão de Processos e Produtos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos.



Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Joinville, 28 de abril de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que está sempre presente em minha vida me guiando, me dando forças e me amparando em todos os momentos da minha vida.

À minha mãe, Maria Goretti da Silva Ribeiro, por toda dedicação que tem por mim em toda a minha vida, apoiando-me nos momentos difíceis com força, exemplo, confiança e amor, incentivando-me a persistir em meus sonhos e ajudando-me a alcançá-los, mesmo quando isso significava renunciar a seus próprios sonhos.

Aos meus amigos pelo amor, pelo apoio e incentivo para a realização dos meus objetivos e por compreender os momentos de ausência nesses anos.

Ao professor, Doutor Ozair Souza, por ter aceitado me orientar e pelo aprendizado repassado e à professora, Doutora Elisabeth Wisbeck que aceitou esse desafio de me orientar nessa reta final e em um momento tão importante nessa trajetória, além de toda ajuda nas análises estatísticas e dias intensos de orientação, além de ter me acolhido de forma tão carinhosa e respeitosa, o meu muito obrigado.

À técnica de laboratório da Univille, Aline Scheller Coan pelo apoio durante o início da etapa experimental deste trabalho, que com muita dedicação e paciência me auxiliou nas análises.

A todos da Embrapa Suínos e Aves Concórdia - SC, que contribuíram na realização de uma etapa primordial deste trabalho e em especial agradeço aos pesquisadores Dr. Airton Kunz e Dr. Ricardo Luis Radis Steinmetz. que foram extremamente solícitos e buscaram auxiliar da melhor forma possível.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina – FAPESC pela bolsa de estudo.

Finalmente agradeço a todos que de uma forma direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Na busca por minimizar a utilização dos combustíveis fósseis e diversificar a matriz energética, a obtenção de biocombustível, produzido a partir de biomassa vegetal, tem sido considerada uma alternativa importante. Na cultura da banana (*Musa sp.*), normalmente o pseudocaule e folhas permanecem no campo. As folhas, geralmente são dispostas no solo como cobertura morta, provocando temporariamente uma deficiência de nitrogênio, que é consumido pelos microrganismos em detrimento das próprias plantas. Já o engaço, cascas e frutos rejeitados são descartados no local de seu processamento, causando também, problemas ambientais. Para cada 1000 kg de banana colhida são gerados, aproximadamente, 3000 kg de pseudocaule, 440 kg de cascas e 100 kg de frutos rejeitados para comercialização. Uma alternativa para a utilização destes resíduos é o aproveitamento na produção de bioetanol de segunda geração (2G). No intuito de contribuir positivamente com o balanço energético do processo, o presente estudo visou a produção de biogás a partir de resíduos sólidos gerados na produção do bioetanol como o bagaço de pseudocaule, as cascas de banana e o resíduo sólido obtido após a separação do caldo fermentado. Para tanto, o bioetanol foi produzido utilizando a proporção em massa úmida de resíduos da bananicultura gerados no campo sendo 10:2:1 de pseudocaule, casca e polpa, respectivamente. Avaliou-se a influência do tipo de inóculo na produção de bioetanol. Os resíduos gerados na produção de bioetanol (bagaço de pseudocaule - R1, as cascas de banana - R2 e o resíduo sólido obtido após a separação do caldo fermentado - R3) foram quantificados, caracterizados e separadamente, utilizados na produção de biogás. O tipo de inóculo não apresentou influência significativa sobre a produção de bioetanol. Em termos de potencial bioquímico de biogás (PBB - $\text{mL}_{\text{Biogás}}/\text{g}_{\text{SV}}$) e de metano (PBM - $\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}$) observou-se que estatisticamente os resíduos R1, R2 e R3 apresentaram o mesmo PBB, entre 449 e 459 $\text{mL}_{\text{Biogás}}/\text{g}_{\text{SV}}$. Já, o PBM para o R1 (201 $\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}$) foi inferior ao obtido nos resíduos R2 e R3 (260 $\text{mL}_{\text{Biogás}}/\text{g}_{\text{SV}}$). Os perfis cinéticos da produção de biogás foram comparados ao modelo não linear de Gompertz com coeficientes de correlação (R^2) superior a 0,99 para os três resíduos. Ainda, fazendo-se uma projeção de produção de bioetanol para 1 m^3 , seriam gerados 23000 kg de resíduos, sendo 11300 kg de R1, 8000 kg de R2 e 3700 kg de R3. Cada um deles, R1, R2 e R3, por sua vez, poderia produzir 40,6, 35,6 e 17,0 m^3/dia de metano e, por consequência, 84,4, 74,0 e 35,4 (kWh/dia) em energia elétrica, respectivamente, podendo refletir de forma positiva na emissão de resíduos sólidos gerados por uma usina de bioetanol.

Palavras-chave: Bioetanol, biogás, metano, resíduos bananicultura

ABSTRACT

Bioethanol production using banana crop waste biomass and sequential biogas production from the generated solid residues.

In the quest to minimize the use of fossil fuels and diversify the energy matrix, obtaining biofuel from plant biomass has been considered an important alternative. In banana cultivation (*Musa sp.*), the pseudostem and leaves are typically left in the field. The leaves are usually spread on the ground as mulch, causing a temporary nitrogen deficiency that is consumed by microorganisms, depriving the plants of essential nutrients. The rejected stalks, peels, and fruits are discarded on-site during processing, leading to environmental problems. For every 1000 kg of harvested bananas, approximately 3000 kg of pseudostems, 440 kg of peels, and 100 kg of rejected fruits are generated. An alternative for utilizing these residues is their conversion into second-generation bioethanol (2G). This study aimed to produce biogas from solid residues generated during bioethanol production, including pseudostem bagasse, banana peels, and the solid residue obtained after fermenting the juice. Bioethanol was produced using a wet mass ratio of 10:2:1 of pseudostem, peel, and pulp residues, respectively. The influence of different inoculums on bioethanol production was evaluated. The residues generated during bioethanol production (pseudostem bagasse - R1, banana peels - R2, and solid residue from fermented juice - R3) were quantified, characterized, and separately used for biogas production. The type of inoculum did not significantly influence bioethanol production. The biochemical methane potential (BMP - $\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{VS}}$) was statistically similar for residues R1, R2, and R3, ranging between 449 and 459 $\text{mL}_{\text{biogas}}/\text{g}_{\text{VS}}$. However, the BMP for R1 (201 $\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}$) was lower than that obtained for R2 and R3 (260 $\text{mL}_{\text{biogas}}/\text{g}_{\text{SV}}$). The kinetic profiles of biogas production were compared to the non-linear Gompertz model with correlation coefficients (R^2) greater than 0.99 for all three residues. Furthermore, projecting bioethanol production to 1 m^3 , approximately 23,000 kg of residues would be generated, including 11,300 kg of R1, 8,000 kg of R2, and 3,700 kg of R3. Each of these residues, R1, R2, and R3, could produce 40.6, 35.6, and 17.0 m^3/day of methane and, consequently, 84.4, 74.0, and 35.4 (kWh/day) of electricity, respectively. This could have a positive impact on reducing the solid waste generated by a bioethanol plant.

Key words: Bioethanol, biogas, methane, banana crop waste

RESUMEN

Producción de bioetanol utilizando biomasa de la bananicultura y producción secuencial de biogás a partir de los residuos sólidos generados.

En la búsqueda por minimizar el uso de combustibles fósiles y diversificar la matriz energética, la obtención de biocombustible a partir de biomasa vegetal se ha considerado una alternativa importante. En el cultivo de banano (*Musa sp.*), típicamente, el pseudotallo y las hojas quedan en el campo. Las hojas suelen colocarse en el suelo como cobertura muerta, lo que provoca temporalmente una deficiencia de nitrógeno que es consumida por microorganismos, privando a las plantas de nutrientes esenciales. Además, los tallos, cáscaras y frutos rechazados se descartan en el lugar durante el procesamiento, lo que genera problemas ambientales. Por cada 1000 kg de plátanos cosechados, se generan aproximadamente 3000 kg de pseudotallos, 440 kg de cáscaras y 100 kg de frutos rechazados. Una alternativa para utilizar estos residuos es su conversión en bioetanol de segunda generación (2G). Este estudio tuvo como objetivo producir biogás a partir de residuos sólidos generados durante la producción de bioetanol, incluyendo el bagazo de pseudotallo, las cáscaras de banano y el residuo sólido obtenido después de fermentar el jugo. Se produjo bioetanol utilizando una proporción de masa húmeda de 10:2:1 de residuos de pseudotallo, cáscaras y pulpa, respectivamente. Se evaluó la influencia de diferentes inóculos en la producción de bioetanol. Los residuos generados durante la producción de bioetanol (bagazo de pseudotallo - R1, cáscaras de banano - R2 y residuo sólido de jugo fermentado - R3) fueron cuantificados, caracterizados y utilizados por separado para la producción de biogás. El tipo de inóculo no influyó significativamente en la producción de bioetanol. El potencial bioquímico de metano (PBM - mL_{CH₄}/g_{VS}) fue estadísticamente similar para los residuos R1, R2 y R3, oscilando entre 449 y 459 mL_{biogás}/g_{VS}. Sin embargo, el PBM para R1 (201 mL_{CH₄}/g_{SV}) fue menor que el obtenido para R2 y R3 (260 mL_{biogás}/g_{SV}). Los perfiles cinéticos de producción de biogás se compararon con el modelo no lineal de Gompertz con coeficientes de correlación (R²) superiores a 0.99 para los tres residuos. Además, al proyectar la producción de bioetanol a 1 m³, se generarían aproximadamente 23,000 kg de residuos, incluidos 11,300 kg de R1, 8,000 kg de R2 y 3,700 kg de R3. Cada uno de estos residuos, R1, R2 y R3, podría producir 40.6, 35.6 y 17.0 m³/día de metano y, en consecuencia, 84.4, 74.0 y 35.4 (kWh/día) de electricidad, respectivamente. Esto podría tener un impacto positivo en la reducción de los residuos sólidos generados por una planta de bioetanol.

Palabras clave: Bioetanol, biogás, metano, residuos de la bananicultura

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de obtenção de bioetanol e subprodutos gerados.	22
Figura 2 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.	26
Figura 3 - Estrutura para teste PBB e/ou PBM.	36
Figura 4 - Curvas típicas acumuladas de produção de biogás/metano.	37
Figura 5 - Fluxograma operacional simplificado empregado na produção de bioetanol de biomassa da bananicultura.....	44
Figura 6 - Cinética do consumo de açúcares redutores (AR) e formação de etanol (P) por <i>Saccharomyces cerevisiae</i> e <i>Pachysolen tannophilus</i> da Fermentação 1 (a) empregando inóculo cultivado em meio de cultivo sintético (glicose, extrato de levedura e sais), Fermentação 2 (b) empregando inóculo cultivado em meio composto por caldo + extrato de levedura + sais (sem adição de glicose), Fermentação 3 (c) empregando inóculo cultivado em meio composto por caldo concentrado puro.	58
Figura 7 - Perfil da produção de biogás (PBB) e metano (PBM) por grama de sólido volátil acumulado para o controle CMC (a), resíduo R1(b) , R2 (c) e R3 (d).....	66
Figura 8 - Perfis de velocidade (dV/dt) de PBB ($mL_{biogás}/g_{SV}$) obtidos para o controle CMC e para os resíduos R1, R2 e R3.....	67
Figura 9 - Perfil da produção experimental e simulada do acúmulo de biogás para os resíduos R1(a) , R2 (b) e R3 (c).....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz energética no Brasil e no mundo em 2021.....	13
Tabela 2 – Matriz elétrica nacional para a geração de energia elétrica no Brasil (2021).....	15
Tabela 3 - Composição dos meios de cultivo M1, M2 e M3 dos inóculos utilizando <i>Saccharomyces cerevisiae</i> e <i>Pachysolen tannophilus</i>	46
Tabela 4 - Composição dos meios de cultivo de manutenção de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> e <i>Pachysolen tannophilus</i>	49
Tabela 5 - Tempo final de fermentação (t_f) e valores médios com desvio padrão das concentrações iniciais (AR_0), finais (AR_f) e ΔAR de açúcares redutores e de etanol (P_0 , P_f e ΔP) e respectivos valores de rendimento em etanol ($Y_{P/AR}$), produtividade (Q_P) e eficiência (E_f) obtidos nas fermentações utilizando inóculos produzidos em diferentes tipos de meio de cultivo. Letras iguais nas mesmas linhas, significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de significância 0,05.	59
Tabela 6 - Rendimento ($Y_{P/AR}$) e produtividade (Q_P) em etanol obtidos por diferentes autores a partir da fermentação de biomassas da bananicultura utilizando diferentes composições do meio de cultivo.....	60
Tabela 7 - Caracterização física e química dos resíduos sólidos R1, R2 e R3. Letras iguais nas mesmas linhas significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de significância 0,05.....	62
Tabela 8 - Composição do biogás após digestão anaeróbia em termos de metano (CH_4), gás carbônico (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) para o controle CMC e para os resíduos R1, R2 e R3.	64
Tabela 9 – Potencial bioquímico de biogás (PBB) e de metano (PBM) para o controle CMC e para os resíduos R1, R2 e R3. Letras iguais nas mesmas linhas significam médias sem diferença significativo pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.	68
Tabela 10 – Comparação dos valores de PBB e PBM a partir de diferentes substratos e inóculo.....	69

Tabela 11 - Parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de Gompertz para fase “lag” (λ), potencial bioquímico máximo de biogás (simulado) (A), velocidade máxima de produção (r_m) e coeficiente de correlação (R^2) para os resíduos R1, R2 e R3. Letras iguais nas mesmas linhas significam médias sem diferença significativo pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.....70

Tabela 12 – Projeção do volume (m^3) e velocidade (m^3/dia) de biogás e de metano gerados e potencial de geração de energia elétrica (EE) a partir dos resíduos R1, R2 e R3 prevendo a produção de $1 m^3$ de bioetanol.73

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1. OBJETIVOS	12
1.1 Objetivo Geral	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Cenário atual da matriz energética	13
2.2 Potencial de geração de energias renováveis no brasil	14
2.3 Energias renováveis	17
2.3.1 Energia de biomassa lignocelulósica	17
2.3.2 Pré-tratamentos de material lignocelulósico	18
2.3.3 Produção de Bioetanol	21
2.3.4 Etapas de produção de bioetanol	21
2.3.5 Microrganismos produtores de bioetanol	24
2.3.6 Produção de Biogás	25
2.3.7 Etapas da digestão anaeróbia	26
2.3.8 Fatores que influenciam na produção de biogás	29
2.3.9 Potencialidade do uso de resíduos agroindustriais na geração de biogás ...	32
2.4 Processos de produção de bioetanol e biogás	33
2.5 Cinética da digestão anaeróbia	34
2.5.1 Guia VDI 4630	34
2.5.2 Norma DIN 38414 – S8	35
2.6 Resíduos da bananicultura	38
2.7 Simulação de processos de produção de biogás	41
3. METODOLOGIA	43
3.1 Processo de produção de bioetanol	43
3.1.1 Preparo do caldo de pseudocaule de bananeira	44
3.1.2 Preparo do caldo de cascas de banana	45
3.1.3 Preparo do caldo da polpa da banana	45
3.1.4 Preparo do caldo concentrado	46
3.1.5 Preparo dos inóculos	46
3.1.6 Preparo da fermentação alcoólica	47
3.1.7 Determinação das concentrações de açúcares redutores e etanol	47

3.1.8	Cálculo do rendimento, produtividade e eficiência do processo	48
3.2	Micro-organismos e manutenção	49
3.3	Quantificação e caracterização dos resíduos sólidos	49
3.3.1	Caracterização dos Resíduos sólidos	50
3.4	Produção de Biogás	54
3.4.1	Substrato	54
3.4.2	Inóculo anaeróbio	54
3.5	Ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás (PBB).....	54
3.5.1	Caracterização do biogás.....	55
3.5.2	Simulação da produção de biogás	56
3.5.3	Determinação do potencial do volume de biogás e CH ₄ e de geração de energia elétrica.....	56
3.7	Análise Estatística.....	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	Fermentações alcoólicas.....	58
4.2	Quantificação e caracterização dos resíduos gerados na produção de bioetanol.....	61
4.3	Potencial bioquímico de biogás-metano (PBB-PBM)	64
4.4	Simulação da produção de biogás	70
4.5	Volume de biogás e metano gerado.....	73
5.	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS.....	80
	APENDICE 1.....	88

INTRODUÇÃO

Na busca por minimizar a utilização dos combustíveis fósseis e diversificar a matriz energética, a obtenção de biocombustível, produzido a partir de biomassa vegetal, tem sido considerada uma alternativa bastante importante. Dentre as biomassas utilizadas destacam-se os resíduos lignocelulósicos, agroindustriais e florestais. Sua grande disponibilidade, baixo custo de aquisição e possibilidade de contribuir com a minimização da poluição ambiental, caso sejam descartados na natureza, têm sido indicadas como algumas das vantagens do seu aproveitamento energético. Dentre os diferentes tipos de resíduos destacam-se aqueles gerados na indústria madeireira, nas culturas básicas como cana-de-açúcar, trigo, milho e arroz, e aqueles provenientes da industrialização de frutas como coco, laranja, maracujá e bananas (HERRMANN et al., 2015; KAMDEM et al., 2013; PEREIRA et al., 2012; SIGRID; MORAR, 2009).

A banana (*Musa sp.*) é considerada uma das frutas mais consumidas no mundo. Cada bananeira produz um cacho de frutos uma única vez no ciclo de vida, gerando grande quantidade de resíduos lignocelulósicos como o pseudocaule, folhas e ráquis, além de cascas, após sua industrialização, e frutos rejeitados para comercialização e consumo humano. Na cultura da banana, normalmente o pseudocaule e folhas permanecem no campo. As folhas são dispostas no solo como cobertura morta, auxiliando na contenção da erosão, evitando a compactação do solo e devolvendo uma parte de nutrientes ao mesmo. No entanto, a incorporação ao solo de matéria orgânica não decomposta implica no processo de humificação, mobilizando intensa atividade microbiana, o que provoca temporariamente uma deficiência de nitrogênio, que é consumido pelos microrganismos em detrimento das plantas (MEDINA, 1995). Já o ráquis, cascas e frutos rejeitados são descartados no local de seu processamento, causando problemas ambientais, como disseminação de doenças ou poluição de lençóis freáticos, pois esses resíduos têm pouco ou nenhum uso produtivo (GUERRERO et al., 2016; SANTA-MARIA et al., 2013).

Conforme dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em 2021 Santa Catarina produziu 10,4% da banana brasileira, totalizando aproximadamente 708 toneladas/ano. Dos quinze municípios catarinenses que mais produziram o fruto, dez se encontram na região norte do estado, representando 50% da produção estadual.

De acordo com Souza *et al.* (2010b), para cada 1000 kg de banana colhida são gerados, aproximadamente, 3000 kg de pseudocaule (~70%), 650 kg de cascas (~14%) e 350 kg de frutos (~7%) rejeitados para comercialização, proporção em massa úmida 10:2:1, respectivamente, além de 8% de folhas e 2% engaço. O uso desses resíduos foi avaliado como substrato das fermentações metanogênica (SOUZA *et al.*, 2010b) e alcoólica (SCHLULZ, 2010; SOUZA *et al.*, 2014, 2017; BELLO *et al.*, 2014; LINZMEYER *et al.*, 2014, 2020; MONTAGNOLI, 2017; SANDRIN, 2018; LIEBL *et al.*, 2019; DE SOUZA *et al.*, 2019, 2021; UCHÔA *et al.*, 2020), onde foram estabelecidas as condições operacionais mais adequadas para a produção de biogás e, principalmente, etanol de 2ª geração (etanol 2G) ou bioetanol.

Em relação ao bioetanol, sabe-se que sua produção em escala comercial não é viável ainda, pois os custos de produção são mais elevados do que aqueles a partir do milho ou cana-de-açúcar (etanol 1G). Considerando a instalação de uma usina de médio porte na região nordeste de Santa Catarina, Uchôa (2018) e Uchôa *et al.* (2020) constataram que, para a produção de etanol 2G a partir de caldo do pseudocaule, caldo das cascas e caldo da polpa de bananas com consumo energético nulo (proposta otimista), o lucro bruto positivo se daria na ordem de US\$ 12,7 milhões/ano. Sem essa condição e com a demanda energética necessária ao processo totalmente fornecida pela rede pública não ocorreria lucro, mas sim um déficit acima de US\$ 131 milhões/ano.

Assim, fica evidente a necessidade da busca por outras fontes energéticas capazes de minimizar esse custo em energia. Uma dessas possibilidades seria a produção de biogás a partir de resíduos sólidos gerados nesta produção do bioetanol como o bagaço de pseudocaule, as cascas de banana e o resíduo sólido obtido após a separação do caldo fermentado, também chamado de torta de filtro ou vinhaça (FEDERIZZI, 2008; SANDRIN, 2018; UCHÔA, 2018).

Além de contribuir positivamente com o balanço de energia, ao ser integrado à produção de bioetanol, o aproveitamento dos resíduos sólidos gerados na sua produção, poderia refletir de forma positiva na diminuição de resíduos sólidos gerados pela usina (UCHÔA, 2018).

Neste trabalho, foi produzido bioetanol conforme proposta e modificações sugeridas por SANDRIN, (2018) e UCHÔA, (2018), avaliando a influência do tipo inóculo sobre a eficiência do processo, realizando as quantificações e caracterizações dos resíduos sólidos gerados no processo e avaliando a produção de biogás a partir dos mesmos com o intuito de integrar, futuramente, essa fonte de energia ao processo produtivo do bioetanol (processo combinado).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Produzir biogás a partir dos resíduos sólidos gerados na obtenção do substrato para a produção de bioetanol a partir de biomassa da bananicultura.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a influência do meio de cultivo do inóculo (M1-meio sintético, M2-caldo concentrado, extrato de levedura e sais e M3-caldo concentrado puro) sobre o rendimento, produtividade e eficiência do processo de produção de bioetanol.
- b) Quantificar e caracterizar os resíduos sólidos gerados na obtenção do substrato para a produção de bioetanol: pseudocaule de bananeira (Resíduo sólido 1 – R1), cascas de banana (Resíduo sólido 2 – R2) e o resíduo sólido obtido após a separação do caldo fermentado contendo o bioetanol (Resíduo sólido 3 – R3).
- c) Definir o potencial de geração de biogás dos resíduos sólidos gerados na produção de bioetanol (R1, R2 e R3), por meio do potencial bioquímico de biogás (PBB).
- d) Simular a produção de biogás e metano, utilizando o modelo não linear de Gompertz e validar o modelo a partir de dados experimentais e de literatura.
- e) Projetar a produção de biogás e metano em volume diário e o potencial de geração de energia elétrica prevendo a produção de 1 m³ de bioetanol.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cenário atual da matriz energética

Uma das maiores preocupações deste século são as mudanças climáticas e segurança energética. Deve-se levar em consideração que as energias renováveis não se dão de forma contínua, devido a fatores como, localização geográfica, condições climáticas, além de exigir uma gigantesca proporção de terra para que seja instalada (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

A matriz energética pode ser definida como o conjunto de fontes de energia disponíveis para movimentar os carros, preparar alimentos no fogão, gerar eletricidade entre outros. Conforme observa-se na Tabela 1, no mundo a matriz energética, segundo a Agência Internacional de Energia (2021) é composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão, petróleo e gás natural, já a matriz energética do Brasil conforme o Balanço Energético Nacional (2021) é muito diferente da mundial, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usa-se mais fontes renováveis que no resto do mundo (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Tabela 1 - Matriz Energética no Brasil e no mundo em 2021.

Matriz energética		Mundo	Brasil
	Biomassa	9,8%	-
	Derivados da cana de açúcar	-	16,4%
Renováveis	Hidráulica	2,7%	11,0%
	Lenha e carvão vegetal	-	8,7%
	Solar, eólica e geotérmica	2,5%	8,7%
	TOTAL	15,0%	44,8%
	Carvão mineral	26,8%	5,6%
	Gás natural	23,7%	13,3%
Não Renováveis	Outras não renováveis	-	0,6%
	Petróleo e derivados	29,5%	34,4%
	Nuclear	5,0%	1,3%
	TOTAL	85,0%	55,2%

Fonte: Adaptado de empresa de pesquisa energética (2022)

A matriz energética brasileira é mais renovável do que a mundial e essa característica da nossa matriz é muito importante, já que as fontes não renováveis de energia são as maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), sendo assim, nosso país emite uma menor quantidade desses gases, comparado a maioria dos outros países (BRASIL, 2022).

2.2 Potencial de geração de energias renováveis no brasil

O Brasil é líder mundial no uso de fontes convencionais de energia renovável, destacando-se principalmente a energia hidrelétrica, porém no que se refere a energias renováveis não convencionais, alguns pontos como regulamentar o quadro legal; levar em consideração questões sociais, econômicas e climáticas para melhorar o planejamento energético a longo prazo e atualizar as instituições que apoiam a fontes dessas energias, atualizando-as com agências energéticas mais específicas, devem ser aprimorados (DE MELO; JANNUZZI; BAJAY, 2016).

A realização da Conferência Rio-92 fez com que o biogás ganhasse atenção e neste evento foi exposto que o gás metano é 21 vezes mais nocivo que o gás dióxido de carbono, como causador do efeito estufa e estabeleceu-se que a simples queima do biogás em um flare (queimador) seria o suficiente (JUNIOR, 2015).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2021), no Brasil a principal matriz elétrica, formada pelo conjunto de fontes utilizadas apenas para a geração de energia elétrica, é originada por meio de fontes renováveis (78,1%), onde a participação é liderada pelas hidrelétricas (56,8%), seguida de eólica (10,6%), biomassa e biogás (8,2%) e solar centralizada (2,5%).

A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética conforme descrito na Tabela 2, isso se dá, pois, grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas. Observa-se que a energia eólica e biomassa vem crescendo, o que contribui para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável. O Brasil possui abundantes fontes naturais de energia renovável e essas fontes fazem parte da estratégia brasileira visando satisfazer a demanda de 6300 MW de capacidade por ano, decorrente do crescimento econômico projetado de 5,1% ao ano nos próximos 10 anos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

Tabela 2 - Matriz elétrica nacional para a geração de energia elétrica no Brasil (2021).

Matriz Elétrica		Brasil
Renováveis	Biomassa	8,2%
	Hidráulica	56,8%
	Eólica	10,6%
	Solar	2,5%
	TOTAL	78,1%
Não Renováveis	Carvão e derivados	3,9%
	Gás natural	12,8%
	Derivados do petróleo	3,0%
	Nuclear	2,2%
TOTAL	21,9%	

Fonte: Adaptado de empresa de pesquisa energética (2022)

Ao contrário da brasileira, a matriz elétrica mundial, tem como base fontes não renováveis para produção de energia elétrica (71,4%), tendo um maior destaque para com relação a matriz energética mundial destaca-se a energia hidráulica (16,6%), em seguida o uso da energia solar, eólica e geotérmica (6,5%) e pôr fim a biomassa (2,5%). A vantagem para o Brasil é que além de possuir menores custos de operação, as usinas que geram energia a partir de fontes renováveis em geral emitem bem menos gases do efeito estufa (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2022; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

A expansão de projetos de energia renovável pode promover o crescimento econômico do Brasil, conter a degradação ambiental e as emissões de carbono, criar oportunidades para desempenhar um papel de liderança no sistema internacional e aumentar a posição competitiva do Brasil com os países mais desenvolvidos. As políticas e decisões do governo brasileiro se tornarão a principal força motriz para um maior crescimento das energias renováveis (PAO; FU, 2018).

Embora o Brasil seja mais proeminente do que outros países latino-americanos na geração de energia renovável não hidrelétrica, ainda enfrenta obstáculos que impedem seu uso para corresponder ao seu potencial, porém recentemente, o país vem adotando uma série de estratégias de incentivo às fontes alternativas de energia renovável na busca pela produção de energia mais limpa e sustentável, o que faz com que o uso da energia renovável não seja mais visto apenas como uma necessidade,

mas uma realidade. Devido à necessidade de alavancar uso de energia renovável para gerar eletricidade no país, o Brasil vem experimentando estratégias de incentivos de longo prazo criadas por meio do PROINFA (Programa de Incentivo à Eletricidade Alternativa). Em destaque temos a tarifas avançadas de energia renovável (tarifas feed-in), um mecanismo utilizado por políticas públicas para fornecer aos produtores de energia renovável contratos de longo prazo, por meio do PROINFA, e subsequente, leilões de contratação de longo prazo, acelerando assim o uso de energia renovável, apoiados por linhas de crédito do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (AQUILA et al., 2017).

De acordo com o relatório BP Energy (2020), o rápido crescimento das energias renováveis e uma base hidrelétrica sólida tornam o Brasil uma das regiões com o mix de energia mais baixo em carbono. Considerando um cenário onde mudanças significativas no comportamento e nas preferências da sociedade, como maior adoção de economias circulares e compartilhadas e a mudança para fontes de energia de baixo carbono, a redução nas emissões de carbono até 2050 será mais de 95% e as emissões líquidas de CO₂ diminuirão 92%.

Em relação ao cenário citado acima, da energia hidrelétrica, o Brasil continua sendo um dos maiores produtores de hidroeletricidade do mundo, chegando a 21% em 2050, contra os 28% de 2018, entretanto, a participação combinada de hidrelétricas e renováveis em 2050 será entre 52% e 80% e o consumo de energia renovável não hídrico do Brasil aumentará 157%. A projeção é de que as fontes renováveis não hídricas, incluindo os biocombustíveis, cresçam a uma taxa de 4,8% a.a., até 2050 e até o final do período, a energia eólica junto com o gás natural serão as maiores fontes de geração de energia no país. O petróleo perde participação, e poderá passar de 39% em 2018 para 7% em 2050. A energia nuclear, é a segunda fonte com maior crescimento, aumentando em 4% a.a., enquanto a energia do carvão cai 8,7% a.a. A produção de biocombustíveis mais que dobrará entre 2018 e 2035, atingindo mais de 1,3 milhões de barris por dia e segundo o documento o consumo total de eletricidade crescerá 2,2% a.a. entre 2018 e 2035. (BP ENERGY (BRITISH PETROLEUM), 2022).

O atual estado do setor elétrico do país necessita diversificar a mistura de geração de eletricidade levando em consideração as muitas fontes renováveis disponíveis. É necessário aproveitar os incentivos governamentais à geração de eletricidade a partir de fontes limpas, onde há espaço para biomassa e

desenvolvimento de seus biocombustíveis, desenvolvimento de parques eólicos e solares, aproveitamento de energia das marés, sistemas de cogeração e de geração híbridos, entre outros. Utilizando estratégias para melhorar a segurança do fornecimento de eletricidade do país, irá posicionar o Brasil como líder no contexto mundial de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018).

2.3 Energias renováveis

A energia renovável como a energia derivada de fontes naturais é sustentável e limpa, além disso, nos dá a oportunidade de enfrentar o esgotamento crescente dos recursos fósseis e os impactos ambientais associados. Entretanto, o Brasil tem buscado manter sua estratégia de incentivo de manutenção da matriz renovável, políticas de segurança energética, que desenvolvam e incentivem iniciativas que visem aumentar a oferta interna de energias renováveis e a promoção de uma economia de baixo carbono, pois são necessários maiores avanços para a consolidação de fontes de energia renovável, como a eólica, a solar, a hidráulica, além da biomassa, que ainda se encontram em muitos locais do nosso país em estado embrionário (PEREIRA et al., 2012).

2.3.1 Energia de biomassa lignocelulósica

Designada ao aproveitamento energético, a biomassa é uma fonte primária de energia, não fóssil, que consiste em matéria orgânica, que pode ser de origem animal ou vegetal e que contém energia armazenada sob a forma de energia química. As biomassas para fins energéticos podem ser classificadas nas categorias de biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética da agropecuária, as culturas agro energéticas e os resíduos e subprodutos provenientes das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2020).

A biomassa lignocelulósica é uma matéria-prima promissora para a produção de etanol devido à sua alta disponibilidade e abundância e esses resíduos agrícolas podem ser usados localmente e não desencadeiam uma competição entre combustível e alimentos. Um número grande de informações estão disponíveis sobre

o processo de produção de bioetanol a partir de resíduos lignocelulósicos de culturas básicas como cana-de-açúcar, trigo, milho e arroz, no entanto, pouca atenção tem recebido biomassa lignocelulósica de culturas não básicas, como é o caso da bananicultura, ainda que grandes áreas sejam dedicadas às suas agricultura em todo o mundo (GUERRERO; BALLESTEROS; BALLESTEROS, 2018a).

A quantidade e tipo de energia obtida da biomassa dependem tanto da matéria prima utilizada quanto da tecnologia de processamento e o seu potencial energético varia com o tipo de biomassa utilizada e pode ser feito por meio da combustão direta (secagem, classificação, compressão, corte/quebra etc.), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (ANEEL, 2008).

2.3.2 Pré-tratamentos de material lignocelulósico

Os componentes estruturais dos resíduos lignocelulósicos formam uma rede resistente e emaranhada que muitas vezes podem ser de difícil de ser hidrolisada. Devido a essa recalcitrância, há a necessidade da utilização de métodos de pré-tratamento para desestabilizar a estrutura lignocelulósica, para assim, ser desestruturada ou removida, facilitando o acesso de reagentes, catalisadores e enzimas à estrutura da celulose e, conseqüentemente, viabilizando o acesso aos monossacarídeos fermentescíveis e a conversão em etanol (CARLOS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ; YASER GARCÍA LÓPEZ, 2014; ZHANG et al., 2005).

A biomassa lignocelulósica tem como seus principais componentes, celulose, lignocelulose e lignina e o pré-tratamento tem por objetivo facilitar o acesso e converter a lignocelulose complexa em componentes menores, como a celulose, a hemicelulose e a lignina que eventualmente pode ser removida, afim de preservar a hemicelulose, reduzir a cristalinidade da celulose e aumentar a porosidade do material. Um processo de pré-tratamento considerado eficiente, deve melhorar a formação de açúcares para as fase de hidrólise enzimática, reduzir a degradação dos carboidratos e diminuir a formação de inibidores para hidrólise e fermentação metanogênica. Para um pré-tratamento eficaz é necessária a formação de açúcares essencialmente por hidrólise, evitar a perda ou degradação dos açúcares formados, reduzir a produção de produtos inibidores e diminuir as demandas de energia, que minimize o custo da produção de biocombustíveis (CHIARAMONTI et al., 2012; KUMARI; SINGH, 2018).

Os principais objetivos do pré-tratamento são a formação de açúcares diretamente para a hidrólise, evitar a perda ou degradação dos açúcares formados, limitar a produção de produtos inibidores, reduzir a demanda de energia e minimizar o custo da produção de biocombustível. É de extrema importância alterar essas propriedades a fim de preparar os materiais para a degradação enzimática, sendo importante ressaltar que os materiais lignocelulósicos são muito complexos e isso faz com que o seu pré-tratamento também não seja simples, sendo assim o melhor método e condições de pré-tratamento dependem muito do tipo de lignocelulose. Fatores como a cristalinidade da celulose, sua área de superfície acessível e proteção pela lignina e hemicelulose, grau de polimerização da celulose e grau de acetilação das hemiceluloses são os principais considerados em afetar a taxa de degradação biológica das lignoceluloses pelas enzimas (KUMARI; SINGH, 2018).

O pré-tratamento pode aumentar a biodigestibilidade dos resíduos para a produção de biogás e aumentar a acessibilidade das enzimas aos materiais, resultando no enriquecimento dos materiais biodegradáveis difíceis e melhorando o rendimento do biogás dos resíduos (TAHERZADEH; KARIMI, 2008).

Vários métodos de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica, são discutidos na literatura (CHIARAMONTI et al., 2012; HAGHIGHI MOOD et al., 2013; KUMARI; SINGH, 2018; TAHERZADEH; KARIMI, 2008), dentre os principais estão os pré-tratamento físico, pré-tratamento químico e pré-tratamento biológico.

2.3.2.1 Pré-tratamento físico

Com o principal objetivo de aumentar a área de superfície para os micro-organismos, existem vários métodos de pré-tratamento físico, dentre os mais utilizados destacam-se o mecânico, por irradiação e o térmico. Como pré-tratamento mecânico, temos a moagem, o lascamento (corte) e a trituração; o pré-tratamento térmico com o aquecimento e/ou congelamento e o pré-tratamento por irradiação através de ultrassom e/ou micro-ondas, sendo os principais empregados para o pré-tratamento dos resíduos lignocelulósicos (KUMARI; SINGH, 2018).

O pré-tratamento mecânico reduz o grau de cristalização da celulose e auxilia no aumento da superfície de contato entre o substrato e os micro-organismos, através de processos mecânicos como a trituração, moagem ou corte da biomassa (RUIZ et al., 2013).

As partículas orgânicas complexas necessitam de cominuição para melhorar o acesso das enzimas hidrolíticas ao substrato, facilitando a sua conversão em compostos mais simples, gerando um aumento da produção e acumulada de biogás (CARLSSON; LAGERKVIST; MORGAN-SAGASTUME, 2012).

Na maioria dos casos, métodos mecânicos são mais simples e menos onerosos, porém, apesar de eficazes apresentam menor eficiência comparado a outras formas de tratamento de substrato, portanto, de forma geral são utilizados em combinação com outros tratamentos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

2.3.2.2 Pré-tratamento químico

Entre todos os métodos de pré-tratamento, o pré-tratamento ácido e o básico são amplamente usados mais extensivamente para o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica devido à alta solubilização do conteúdo de celulose e hemicelulose e remoção de lignina da biomassa. Outros métodos químicos como o pré-tratamento de líquido iônico e com solventes orgânicos têm custos operacionais elevados devido ao uso de líquidos iônicos e orgânicos onerosos e a recuperação desses solventes não é possível. Gás ozônio e oxidação com peróxido de hidrogênio ou ácido peracético também têm altos custos operacionais, portanto, seu uso também é limitado. Embora todos esses métodos de pré-tratamento tenham seus próprios méritos e deméritos, o ácido pode ser considerado melhor se o ácido diluído em alta temperatura for usado para o pré-tratamento de biomassa. Em base, ocorre o desperdício de água para a lavagem da biomassa pré-tratada para remover a base, que não parece ser ecologicamente correto, contamina o solo e oxida os equipamentos de metal se usados (KUMARI; SINGH, 2018).

2.3.2.3 Pré-tratamento biológico

Esse método tem como principal objetivo, a remoção da lignina da lignocelulose como o pré-tratamento com fungos, o consórcio microbiano e o pré-tratamento enzimático os métodos mais utilizados. Dos métodos de pré-tratamento biológicos descritos, o consórcio microbiano é o mais indicado, porque são utilizadas fontes microbianas mistas, o que reduz as chances de contaminação e o custo de manutenção. Os pré-tratamentos enzimáticos possuem altos custos de operação e o

pré-tratamento de fungos, cuidados são necessários para evitar a contaminação de uma espécie para a outra, resultando em uma menor quantidade de produção de biocombustível (KUMARI; SINGH, 2018).

Independente do baixo consumo de energia, condições ambientais simples e nenhuma necessidade química, o pré-tratamento biológico enfrenta algumas desvantagens principalmente no método de pré-tratamento comercial, pois incluem um longo tempo de processo, grande necessidade de espaço e a necessidade de monitoramento contínuo (HAGHIGHI MOOD et al., 2013).

2.3.3 Produção de Bioetanol

O bioetanol é produzido através da fermentação de matéria-prima que contenham amido, onde o produto triturado passa por um processo de hidrólise enzimática a altas temperaturas, resultando na quebra dos polissacarídeos e açúcares. Essa solução, chamada de mosto ou caldo concentrado é fermentada por leveduras e para que se obtenha o etanol (KIM; PARK; KIM, 2014).

O processo de produção de bioetanol no caso da beterraba e a cana-de-açúcar, ou seja, para biomassas ditas açucaradas, não necessita da quebra do amido em açúcares, já que o açúcar se encontra na solução, portanto, a biomassa passa por uma extração por pressão ou até por difusão. No caso de biomassa celulósica, o processo anterior a fermentação dos açúcares passa por uma etapa de trituração seguida de uma hidrólise ácida ou enzimática. E para os dois casos, a fermentação e destilação ocorrem igualmente (NOGUEIRA; COSTA, 2012; SCHAEFFER et al., 2012).

2.3.4 Etapas de produção de bioetanol

A Fermentação alcoólica é a conversão metabólica que ocorre em condições ótimas de pH e temperatura, na presença de microrganismos que catabolizam monossacarídeos a bioetanol e outros subprodutos, como água e dióxido de carbono, além de gerar resíduos sólidos que são utilizados para geração de energia em forma de eletricidade conforme apresenta a Figura 1 (MOHD AZHAR et al., 2017; PHWAN et al., 2018; SIRAJUNNISA; SURENDHIRAN, 2016).

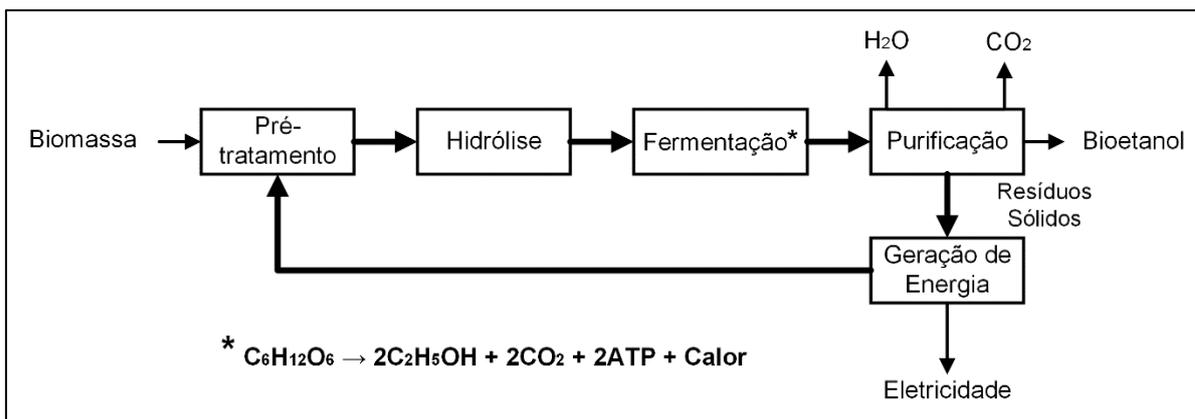


Figura 1 - Etapas de obtenção de bioetanol e subprodutos gerados.

Fonte: Adaptado de ACHINAS; EUVERINK, (2016)

O meio de fermentação é preparado a partir de matérias-primas que contenham açúcares ou amidos, como, por exemplo, resíduos agroindustriais e/ou lignocelulósicos, como o bagaço de cana-de-açúcar, a beterraba, milho ou cascas e polpas de frutas como a laranja, caju e banana. Esses resíduos são tratados para extrair ou converter os açúcares em formas que possam ser utilizadas pelas leveduras. Após a preparação do meio de fermentação, os fungos selecionados, são adicionados ao meio para iniciar a fermentação (ACHINAS; EUVERINK, 2016).

Durante a fermentação alcoólica, as leveduras consomem os açúcares presentes no meio e os convertem em etanol e dióxido de carbono. Esse processo pode levar alguns dias, dependendo das condições de cultivo, como temperatura e pH. Após a fermentação, o bioetanol é separado do meio de fermentação através de processos de destilação ou outras técnicas de separação como a destilação por adsorção, azeotrópica, desidratação química, destilação por difusão, extrativa ou por membrana (ADITIYA et al., 2016).

2.3.4.1 Hidrólise

A hidrólise é uma etapa importante na produção de bioetanol a partir de matérias-primas ricas em amido ou celulose, como milho, trigo, cana-de-açúcar, entre outras. O objetivo da hidrólise é quebrar esses compostos complexos em moléculas menores, como glicose e outros açúcares fermentáveis, que possam ser utilizados pelas leveduras para a produção de etanol durante a fermentação alcoólica. Existem

diferentes métodos de hidrólise, que podem ser divididos em dois grupos principais: hidrólise ácida e hidrólise enzimática (ACHINAS; EUVERINK, 2016).

Na hidrólise ácida, os compostos complexos são quebrados por ácidos fortes, como o ácido sulfúrico ou ácido clorídrico, que são adicionados ao material vegetal em altas temperaturas e pressões. Já na hidrólise enzimática, são utilizadas enzimas para quebrar os compostos complexos em açúcares fermentáveis, geralmente a α -amilase e a β -amilase para amido e a celulase para celulose. Essas enzimas são adicionadas ao material vegetal em temperatura e pH específicos, que variam de acordo com o tipo de enzima utilizada (MOHD AZHAR et al., 2017).

Após a hidrólise, o material vegetal é submetido à fermentação alcoólica, utilizando leveduras selecionadas, para a produção de bioetanol. A eficiência da hidrólise e da fermentação alcoólica é influenciada por diversos fatores, como o tipo de matéria-prima utilizada, as condições de hidrólise e fermentação, e a seleção das leveduras (MOHD AZHAR et al., 2017).

2.3.4.2 Fermentação

A fermentação alcoólica é um processo bioquímico em que as leveduras, sendo a *Saccharomyces cerevisiae* a levedura mais comumente utilizada, convertem açúcares em etanol e dióxido de carbono. Essa reação ocorre naturalmente em muitos organismos, incluindo bactérias, fungos e plantas, mas é mais comumente associada à produção de bebidas alcoólicas, álcool combustível, panificação e de limpeza, bem como na produção de bioetanol a partir de matérias-primas renováveis, como açúcares e amidos vegetais (TOLENTINO et al., 2015).

O processo de fermentação alcoólica envolve três etapas principais, onde a primeira delas é a etapa de crescimento, nesse momento as leveduras são adicionadas ao meio de fermentação, que contém açúcares e outros nutrientes, e começam a crescer e se multiplicar, em seguida, na etapa de fermentação as leveduras consomem os açúcares presentes no meio, produzindo etanol e dióxido de carbono como subprodutos. Essa etapa pode levar alguns dias, dependendo das condições de cultivo, como temperatura, pH e quantidade de açúcares disponíveis e por último o produto da fermentação é submetido a um processo de maturação, que pode envolver a remoção do dióxido de carbono e outras impurezas, bem como a adição de aromas e sabores no caso das bebidas para consumo humano. A eficiência

da fermentação alcoólica pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a seleção das leveduras, as condições de cultivo, o tipo de matéria-prima utilizada e o processo de fermentação (SHARMA; LARROCHE; DUSSAP, 2020).

2.3.4.3 Purificação

A etapa de purificação do bioetanol é crucial para produzir um produto de alta qualidade e com alto teor de etanol, sendo as principais etapas envolvidas no processo de purificação do bioetanol, etapas de destilação, desidratação, filtração, carbonização, osmose reversa e filtração de membrana. Essas etapas de purificação são realizadas em uma ordem específica para produzir etanol de alta qualidade e com alto teor de etanol. O bioetanol purificado é então armazenado em tanques e transportado para locais de uso ou venda (SÁNCHEZ; CARDONA, 2008).

2.3.5 Microrganismos produtores de bioetanol

A fermentação alcoólica pode ser realizada tanto por bactérias, fungos e leveduras que metabolizam e convertem açúcares como glicose, frutose, xilose, manose e arabinose em etanol. Os microrganismos mais utilizados para a obtenção de etanol são as leveduras: *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida sp.*, *Pichia sp.*, *Schizosaccharomyces sp.*, *Kluyveromyces sp.* e *Pachysolen sp.*; fungos filamentosos: *Fusarium sp.*, *Mucor sp.*, *Monilia sp.* e *Paecilomyces sp.*; e bactérias: *Clostridium sp.*, *Bacillus sp.*, *Thermoanaerobacter sp.*, *Klebsiella sp.* e *Zymomonas mobilis* (ERNANDES; GARCIA-CRUZ, 2009).

A *Saccharomyces cerevisiae* é um fungo unicelular conhecido como levedura de cerveja ou fermento de pão. É a levedura mais utilizada no mundo para a produção de etanol em escala industrial e em uma série de outras aplicações biotecnológicas, incluindo na produção de bebidas alcoólicas como cerveja, vinho e destilados, além de ser usado na produção de pão, queijos e outros alimentos fermentados, pois, ela oferece rápido desenvolvimento e alta eficiência fermentativa. Além disso, a *S. cerevisiae* é um importante organismo modelo para pesquisa científica, sendo utilizada em estudos de genética, biologia molecular e celular, bioquímica e outras áreas (TOOGOOD; SCRUTTON, 2018).

Já o *Pachysolen tannophilus* é um fungo também unicelular, que é capaz de fermentar açúcares em álcool e outros compostos orgânicos e apresenta capacidade natural de fermentar e converter a xilose diretamente em etanol, uma característica potencialmente valiosa. Ele é encontrado em habitats diversos, como flores, frutas e excrementos de animais. Na indústria, o *P. tannophilus* é utilizado na produção de etanol, um biocombustível, a partir de substratos como a cana-de-açúcar e outras plantas ricas em açúcares. Além disso, o *P. tannophilus* também é estudado como organismo modelo em pesquisas de biotecnologia e microbiologia, especialmente no desenvolvimento de processos fermentativos mais eficientes e sustentáveis (CONVERTI et al., 2001).

A co-fermentação, ou consórcio de micro-organismos, utilizando duas ou mais leveduras no processo de fermentação, como por exemplo, agregar a levedura *Pachysolen tannophilus* em co-cultura com a *Saccharomyces cerevisiae*, é um processo capaz de obter melhores resultados para produtividade de bioetanol do que apenas realizar o processo fermentativo tradicional. Pode ser realizado em um único biorreator, o que gera menores custos operacionais e, também pode apresentar menos problemas de inibição causados pelo substrato, haja visto que os açúcares fermentáveis são consumidos pelo consórcio durante a produção de etanol. Entretanto, neste processo devem ser considerados alguns parâmetros ideais como fermentação e sacarificação simultâneas para obter uma co-fermentação eficiente (SHADBAHR; KHAN; ZHANG, 2017; TRAKARNPAIBOON et al., 2017).

2.3.6 Produção de Biogás

O biogás é atribuído à mistura gasosa, combustível, resultante da fermentação anaeróbia de matérias orgânicas, pode ser proveniente tanto de resíduos sólidos, quanto líquidos e sua origem provém de resíduos rural, urbano ou industrial (COELHO et al., 2004).

O biogás pode ser produzido continuamente, ao contrário da energia eólica ou solar. Pode ser armazenado na forma de matéria-prima ou gás comprimido a baixo custo. Além disso, devido à sua estabilidade, o biogás pode ser utilizado como mecanismo de regulação intermitente de fontes eólicas e fotovoltaicas. Do potencial de matérias-primas destinadas a produção de biogás, 75% provêm de resíduos agroindustriais (MILANEZ et al., 2018).

O biogás consiste principalmente de metano (55-70% v/v) e dióxido de carbono (30-45% v/v), mas também contém várias impurezas que geralmente são sulfeto de hidrogênio (50-2000 mg/L ou ppm), vapor de água saturado, oxigênio (abaixo de 1% v/v), nitrogênio (abaixo de 2% v/v) e vários traços de hidrocarbonetos (benzeno até 2,5 mg/m³ ou tolueno até 11,8 mg/m³). O processo microbiológico ocorre naturalmente decompondo a biomassa em uma atmosfera úmida, anaeróbia e na presença dos micro-organismos apropriados. Na natureza, o biogás é formado principalmente como gás de pântano, no trato digestivo de ruminantes, em plantas de compostagem úmida. O biogás também é produzido em aterros sanitários, plantas de tratamento de esgoto ou plantas de digestão anaeróbia (PETRAVIĆ-TOMINAC et al., 2020).

2.3.7 Etapas da digestão anaeróbia

A rota metabólica da digestão anaeróbia, a qual transforma a matéria orgânica complexa em biogás, é dividida essencialmente em quatro etapas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese conforme Figura 2.

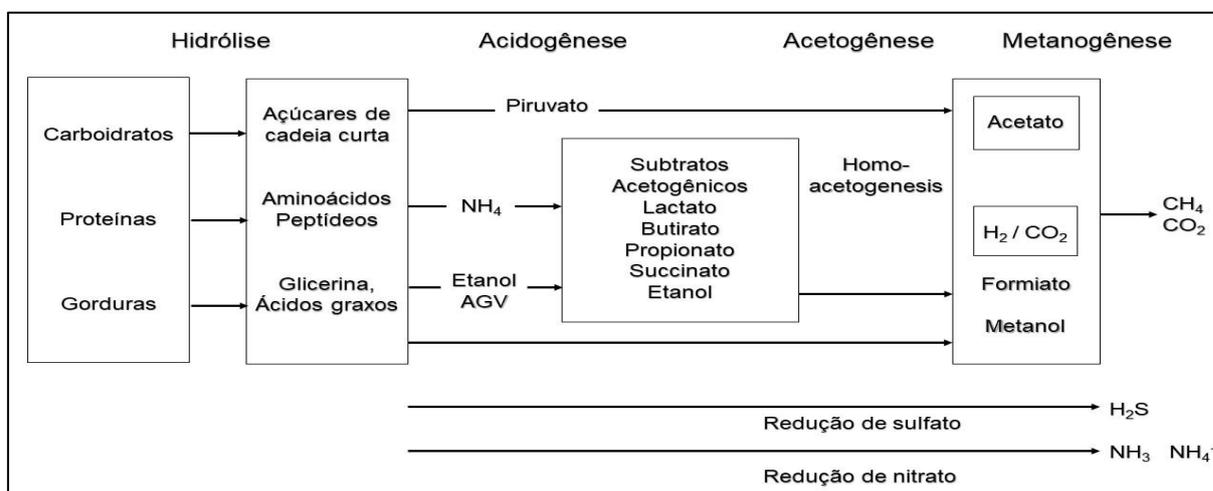


Figura 2 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Fonte: Adaptado de KUNZ; STEINMETZ; AMARAL (2019)

Dentre estas, três grupos de micro-organismos participam do processo: bactérias fermentativas (hidrolíticas e acidogênicas), que gerarão substrato para as bactérias acetogênicas e que por sua vez fornecerão o substrato para as archeas metanogênicas, formando assim o biogás (COSTA; SOTO, 2018).

2.3.7.1 Hidrólise

Na digestão anaeróbia do material lignocelulósico, a matéria orgânica sofre hidrólise, onde os polímeros orgânicos de alta massa molar, como os carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostos em monômeros como açúcares, ácidos orgânicos (aminoácidos) e ácidos graxos de cadeia longa, respectivamente. Já os compostos insolúveis de celulose e hemicelulose serão hidrolisados por intermédio de enzimas extracelulares, produzindo assim monossacarídeos. Essa primeira etapa, é denominada limitante para as próximas etapas de metanização (COSTA et al., 2014; ZAMRI et al., 2021).

Para completa degradação da celulose, três celulasas são necessárias: endoglicanase (EG), exoglicanase ou celobiohidrolase (CBH) e β -glicosidase ou celobiase. Já na cadeia de hemicelulose pode sofrer ataques por enzimas hemicelulasas ou por ácidos diluídos, que passa por sucessivas quebras em oligômeros ainda menores, até que uma molécula de um simples açúcar seja formada (COSTA et al., 2014).

Nesse estágio, a forte ligação de hidrogênio intermolecular da lignina é resistente à penetração de micro-organismos dificultando o processo de hidrólise enzimática. Neste estágio, as estruturas rígidas de lignina requerem pré-tratamento, como deslignificação, para sofrer biodegradação (KOYAMA et al., 2017; ZAMRI et al., 2021).

2.3.7.2 Acidogênese

Na acidogênese ou fermentação, as bactérias fermentativas promovem a conversão de monômeros orgânicos em ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio. Nesse processo a maioria das bactérias são anaeróbias obrigatórias, podendo também encontrar espécies facultativas, sendo então a matéria orgânica metabolizada via oxidativa. Podem nesta fase atuar duas espécies de bactérias: *Clostridium spp.* e *Bacteroids spp.* (COSTA; SOTO, 2018; COSTA et al., 2014).

A queda de pH nessa etapa, pode ser provocada pelo acúmulo de ácidos resultantes da alta atividade fermentativa, o que pode acontecer no caso de substratos

de alto valor energético, especialmente gorduras (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2015).

2.3.7.3 Acetogênese

Na acetogênese, os compostos orgânicos reduzidos (álcoois e ácidos graxos) são oxidados pelas bactérias acetogênicas, gerando hidrogênio, gás carbônico e acetato. O acetato também pode ser formado pela rota do H_2/CO_2 em uma etapa chamada homoacetogênese e em conjunto com o hidrogênio serão utilizados diretamente pelos micro-organismos responsáveis pela metanogênese (COSTA; SOTO, 2018; COSTA et al., 2014).

Nesta fase, observa-se bactérias acetogênicas sintróficas, como *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter* e *Smithella*, que metabolizam os ácidos graxos voláteis, álcoois, alguns aminoácidos e compostos aromáticos em substratos de metanogênese (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono), já na presença de bactérias hidrogenotróficas, favorece esta conversão e acetato a partir da redução do dióxido de carbono com hidrogênio através da via acetil Co-A será produzido (HORI et al., 2011; MANYI-LOH et al., 2013; MCINERNEY et al., 2008).

No entanto, o acúmulo de ácidos graxos voláteis pode resultar em uma diminuição do pH, aumentando assim a acidificação e eliminando as bactérias acidogênicas. Por isso o consumo de ácidos graxos voláteis via arqueobactérias acetoclásticas (pH 6 à 8) ou via hidrogenotróficas (pH 9 à 10), em muitos casos, deve ser monitorado (ZAMRI et al., 2021).

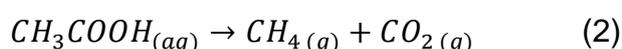
2.3.7.4 Metanogênese

A metanogênese, a última etapa do processo de biodigestão anaeróbia e consiste na transformação do acetato, dióxido de carbono e hidrogênio pelas bactérias metanogênicas em uma mistura de metano e dióxido de carbono. Este sub processo envolve dois grupos de micro-organismos metanogênicos.

Os micro-organismos do primeiro grupo são chamados de acetoclásticos, como *Methanosarcina spp.* e *Methanothrix spp.*, que transformam acetato e dióxido de carbono em metano e o segundo é composto por micro-organismos hidrogenotróficos, como *Methanobacterium spp.*, *Methanobrevibacter spp.* e *Methanospirillum spp.*, e

utilizam o hidrogênio como doador de elétrons e o gás carbônico como acceptor de elétrons para produzir o gás metano (COSTA; SOTO, 2018; REIS, 2012; ZANETTE, 2009).

Na metanogênese, o ácido acético e o hidrogênio que se formaram na fase anterior são transformados em biometano por meio de micro-organismos metanogênicos, que aumentam o pH para valores dentro da faixa de 6,8 e 8 (SZUHAJ et al., 2016). As reações que ocorrem durante a metanogênese, podem ser resumidas conforme Equações 1 e 2.



As bactérias responsáveis por esta fase de fermentação do metano pertencem na maioria dos casos por archaeobactérias dos gêneros *Crenarchaeota* e *Euryarchaeota* (SZUHAJ et al., 2016).

A morfologia das bactérias metanogênicas é muito heterogênea em comparação com as bactérias da acidogênese e da acetogênese e são sensíveis a oscilações de temperatura e pH, portanto, a eficácia da fase de metanogênese é muito dependente da relação equilibrada entre a biocinética dos micro-organismos com o seu ambiente de crescimento, como o abastecimento de alimentos e acessibilidade (ZAMRI et al., 2021).

2.3.8 Fatores que influenciam na produção de biogás

Por se tratar de um processo biológico, são vários fatores que influenciam o desempenho da digestão anaeróbia, uma vez que o meio deve oferecer as condições requeridas pelos micro-organismos para que estes realizem as reações de conversão da matéria orgânica. Dentre os fatores operacionais, se destacam o pH e a alcalinidade, temperatura, nutrientes, razão de carbono e nitrogênio (C:N), além de nitrogênio amoniacal e amônia livre.

2.3.8.1 Potencial hidrogeniônico (pH) e Alcalinidade

Dentre todos os fatores que influenciam na produção do biogás, o pH é um fator importante, pois, influencia a velocidade das reações bioquímicas. Uma vez que cada enzima é ativada somente numa faixa pequena e específica, o pH tem uma grande influência na atividade enzimática. Os valores abaixo de 6 e acima de 8,3 devem ser evitados, uma vez que os micro-organismos formadores de metano se inibem por completo. Valores de pH abaixo de 6,3 poderão ocasionar na Metanogênese fermentação ácida, apontando-se pelo decréscimo da concentração dos ácidos graxos voláteis, causando desequilíbrio e uma possível instabilidade do sistema (REIS, 2012).

Uma ampla gama de valores de pH de matéria-prima de biogás é aceitável devido à alta capacidade tampão do caldo de digestão anaeróbica. O valor do pH na fermentação anaeróbia está entre 6,8 e 8,0 e a digestão eficiente ocorre em pH próximo à neutralidade (ZHAI et al., 2015).

Se o pH na matéria-prima for muito ácido ou muito alcalino e o pH seja alterado significativamente, será necessário neutralizar antes de alimentar como por exemplo, o pH pode ser aumentado artificialmente adicionando base, como cal no reator (ALI, 2018; ZHANG et al., 2005).

2.3.8.2 Temperatura

Associados as variações de temperatura a digestão anaeróbio é composta por micro-organismos psicrófilos, mesófilos e termófilos.

Os psicrófilos se desenvolvem em temperatura de 0°C a 25°C a pouco menor, os mesófilos entre 37°C a 42°C e os termófilos entre 50°C a 60°C. Percebe-se que não existe uma temperatura ideal para realização do processo de biodigestão pois no meio existem tipos de microrganismo suscetíveis a desenvolvimento em diferentes faixas de temperatura. O que se busca é estabilidade térmica do meio com o objetivo de evitar as bruscas mudanças de temperaturas pois as bactérias metanogênicas são muito sensíveis a tais mudanças (CUNHA, 2018).

2.3.8.3 Nutrientes

Embora, para crescer, os micro-organismos anaeróbios precisem mais do que um suprimento de substâncias orgânicas como fonte de carbono e nutrientes, elas também precisam de certos nutrientes minerais. Além de carbono, oxigênio e hidrogênio, a geração de biomassa requer um suprimento adequado de nitrogênio, enxofre, fósforo, potássio, cálcio, magnésio etc. Os resíduos e resíduos agrícolas geralmente contêm quantidades adequadas desses elementos (KIGOZI; ABOYADE; MUZENDA, 2014).

As células dos micro-organismos anaeróbios contêm nitrogênio, fósforo e enxofre nas proporções aproximadas de 12, 2 e 1%, respectivamente, de matéria seca. Para que a digestão anaeróbia ocorra relações de 700:5:1 de demanda biológica de oxigênio, nitrogênio e fósforo são necessárias. Cuidados com compostos de enxofre, que podem causar a precipitação de alguns nutrientes traço, íons de metais pesados como cobre e zinco, íons de metais alcalinos e alcalinos terrosos e amônio, podem ter um certo efeito inibidor. Com tempo suficiente de aclimação, aos micro-organismos anaeróbios a toxicidade na maioria dos casos é reversível (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

A fermentação de materiais ricos em ureia e proteínas libera amônia que dentre outros nutrientes é essencial para o crescimento dos micro-organismos anaeróbios, porém em concentração elevada pode ser tóxica as arqueas metanogênicas. Fatores como pH e temperatura do meio reacional, pode-se gerar elevada concentração de amônia livre (DE PRÁ et al., 2012).

2.3.8.4 Proporção Carbono e Nitrogênio (C:N)

A proporção de carbono para nitrogênio, é um indicador chave da adequação do composto como meio de crescimento. Entre 20-40% do substrato em carbono nos resíduos orgânicos é eventualmente assimilado em novas células microbianas, sendo o restante convertido em CO₂ nos processos de produção de energia. Para a maioria dos tipos de resíduos a relação C:N com cerca de 25-30:1 entre eles, no material inicial, é considerada ideal (POLPRASERT, 2017). No entanto, para um maior rendimento de metano em reatores anaeróbios a faixa relatada na literatura é de 10-30:1 (FNR, 2010; FORSTER-CARNEIRO; PÉREZ; ROMERO, 2008).

2.3.9 Potencialidade do uso de resíduos agroindustriais na geração de biogás

O potencial da biomassa lignocelulósica para ser um elemento-chave no aumento ainda maior da quantidade de bioenergia gerada, a sua disponibilidade global em grandes quantidades e o fato de quase nenhuma biomassa potencialmente disponível estar sendo utilizada atualmente, são os principais motivos pelos quais a biomassa lignocelulósica é considerada um dos recursos mais promissores para a geração futura de bioenergia. A digestão anaeróbia de resíduos agrícolas, culturas energéticas e subprodutos industriais biodegradáveis é citada como uma tecnologia de crescente interesse, capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e facilita o desenvolvimento sustentável do fornecimento de energia. Vários benefícios da digestão anaeróbia são refletidos em escala local, nacional e até global (SIGRID; MORAR, 2009).

O consumo energético em nível global está neste momento em contínuo crescimento, porém as reservas de combustível fóssil vêm diminuindo, elevando o preço da energia. Sob outra perspectiva, nos países desenvolvidos a produção agrícola está em alta produção, acarretando preços mais baixos. A agricultura tem uma grande importância energética atualmente, devido ao seu grande potencial de resíduos gerados e este setor econômico poder sustentar um percentual importante da produção energética. A produção de energia da agricultura é apoiada na exploração de biomassa que pode constituir um produto secundário no processo agrícola ou pode ser obtida exclusivamente com finalidade energética (RANTA et al., 2008).

O grande potencial das matérias-primas lignocelulósicas para a produção de biogás está contido nos três constituintes estruturais principais: celulose 30-50%, hemicelulose 20-40% e lignina 10-25. Resíduos lignocelulósicos são matéria prima atrativa para a produção de biogás devido ao seu alto teor de carboidratos. O uso de resíduos lignocelulósicos como matéria prima para a produção de biogás não é frequente devido à sua estrutura recalcitrante, que é o principal desafio, fazendo-se necessário, para aumentar a taxa de degradação de biomassa e produção de biogás, realizar o pré-tratamento adequado antes da digestão anaeróbia (PETRAVIC-TOMINAC et al., 2020).

2.4 Processos de produção de bioetanol e biogás

Conhecido como bioetanol ou etanol lignocelulósico ou etanol de segunda geração (Etanol 2G) pode ser considerado como uma das energias do futuro. Produzido a partir de coprodutos ou resíduos agrícolas, o bioetanol poderá incrementar a produção brasileira anual de biocombustível, sem a necessidade de competir diretamente com a produção de alimentos, tornando-o bioetanol ainda mais competitivo e capaz de atender à crescente demanda por biocombustíveis (EXLER; SAMPAIO; TEIXEIRA, 2015; FERREIRA, 2015).

Com a perspectiva de um significativo aumento na demanda por etanol e para evitar que haja competição entre o uso da terra para a geração de energia e produção de alimentos, principalmente em locais onde o clima favorável ou extensão territorial para cultivo não são favoráveis, é de extrema necessidade investir no desenvolvimento de novas tecnologias de produção de etanol. A produção de etanol de segunda geração representa uma excelente alternativa para o uso energético da biomassa, apresentando vantagens ambientais e econômicas, por se tratar do etanol produzido de produto lignocelulósico, presente em resíduos de origem vegetal (GOMES, 2019; PAULOVA et al., 2015).

O biogás produzido a partir da digestão anaeróbia de resíduos é um recurso renovável relevante que desempenha um papel significativo na mitigação de problemas ambientais e na geração local de energia elétrica. O processo de geração distribuída a partir de resíduos de biomassa envolve a transformação de resíduos em biogás com o uso de biodigestores. A quantidade produzida varia dependendo de muitos fatores diferentes, como matérias-primas, tecnologia de pré-tratamento, temperatura e tempo no reator, ou seja, um conjunto de variáveis que aumenta a complexidade da produção do biogás e impede uma relação direta entre a qualidade do gás e a tecnologia utilizada para produzi-lo. Na ausência total de oxigênio, colônias de micro-organismos mistos atuam e encontram condições ideais para proliferar, alimentando-se de sólidos solúveis na biomassa sob tratamento, o que causa a degradação da matéria orgânica (FREITAS et al., 2019).

2.5 Cinética da digestão anaeróbia

A cinética do processo de digestão anaeróbia corresponde à velocidade com que os micro-organismos convertem um determinado substrato orgânico em um produto com relação ao tempo, como o exemplo o caso do biogás. Dessa forma, é possível identificar e quantificar os parâmetros que afetam a evolução desse processo, por meio da cinética bioquímica, que possibilita avaliar o crescimento dos micro-organismos, avaliar o consumo de substrato e a formação de produtos, assim como, avaliar a inibição do processo, a taxa de decaimento de micro-organismos e o tempo de residência celular (LIMA, 2016).

A cinética da digestão anaeróbica é obtida por ensaios laboratoriais, realizado em condições controladas e monitoradas com objetivo de investigar características referentes aos substratos, as atividades de micro-organismos, o inóculo e tais ensaios são testes respirométricos anaeróbios que objetivam avaliar a produção de biogás ou de metano, através da biomassa ou matéria orgânica (representada como sólidos voláteis – SV, demanda química de oxigênio – DQO ou carbono orgânico total – COT) proveniente do inóculo ou do substrato de interesse (STEINMETZ, 2016).

Diversos métodos usuais e padronizados, estão disponíveis para avaliação da cinética anaeróbia, como a ISO 11734 (1995) que estima a degradação de substâncias orgânicas diversas pela medida da produção de biogás, a ISO 13641 (2003) utilizado para avaliar a influência de compostos químicos diversos na digestão anaeróbia, a ASTM E2170-01 (2001) método que estima a degradação de substâncias químicas pela medida da produção de biogás e por análises químicas da concentração residual, a DIN 38414-8 (1985) que mensura a degradação de lodos e efluentes por meio da medida da produção de biogás e a VDI 4630 (2016) método para mensurar o potencial bioquímico de biogás (PBB) e o potencial bioquímico de metano (PBM). Aplicado a diversos tipos de substratos, inclusive resíduos agropecuários e culturas agrícolas.

2.5.1 Guia VDI 4630

Os métodos propostos na norma VDI 4630 (2016), apontam que os testes em batelada geram informações, como a possibilidade de produção de biogás e/ou metano de determinado material ou mistura de materiais, bem como, sua

biodegradabilidade anaeróbia; avaliação qualitativa da velocidade de degradação do material investigado; e avaliação do efeito inibitório do material estudado em um determinado intervalo de tempo (STEINMETZ, 2016).

Outra consideração pertinente é a normalização de volume do biogás em condições padrões de temperatura e pressão (273K e 1013 hPa, respectivamente). A Equação 3 é utilizada para normalização

$$V_N = V \times (p - p_w) \times \frac{T_0}{p_0} \times T \quad (3)$$

Onde:

V_N : Volume de biogás normalizado as condições normais de temperatura e pressão (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 ambiente (hPa);

T_0 : Temperatura nas condições normalizadas, 273 K;

p_0 : Pressão nas condições normalizadas, 1013 hPa;

T : Temperatura do biogás (K).

A quantidade de inóculo e substrato no teste em batelada, são determinadas por algumas restrições e devem ser consideradas. A quantidade de substrato não deve exceder a quantidade de inóculo ($SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}} = 0,5$) para prever inibições no ensaio em batelada; a concentração de sólidos não deve exceder 10%; a produção de biogás a partir do substrato deve ser, no mínimo, 80% maior do que a contribuição do inóculo; deve-se utilizar substâncias ou amostras padrão em ensaios paralelos para avaliar a atividade do inóculo (VDI 4630, 2016).

O guia VDI 4630 (2016), também destaca algumas informações referentes ao inóculo anaeróbio utilizado para os testes de fermentação, que deve conter uma concentração de sólidos voláteis maior que 50% dos sólidos totais.

2.5.2 Norma DIN 38414 – S8

A norma DIN 38414 (1985), define quais aparatos e reagentes são necessários para a realização dos ensaios experimentais do potencial bioquímico de metano e seu procedimento consiste na utilização de um conjunto específico de vidrarias que possibilitam a quantificação volumétrica do biogás.

O processo anaeróbio ocorre em um frasco reator de 500 mL (a) operando em regime de batelada; tubo Eudiômetro (b) com capacidade de 500 mL, com escala de graduação de 1 mL, graduado de cima para baixo (de 0 a 500 mL), possuindo um registro de vidro (h) na parte superior, para expurgo do biogás, tubo interno (c), 6 mm de diâmetro, Identificação do ponto 0 mL (d) e suporte de fixação e ancoragem do tubo interno (e); frasco reservatório para armazenamento do líquido selante (g), com volume de 500 mL; mangueira flexível (f) com aproximadamente 1 metro de comprimento; e banho-maria termostático. A estrutura é montada conforme apresentada na Figura 3.

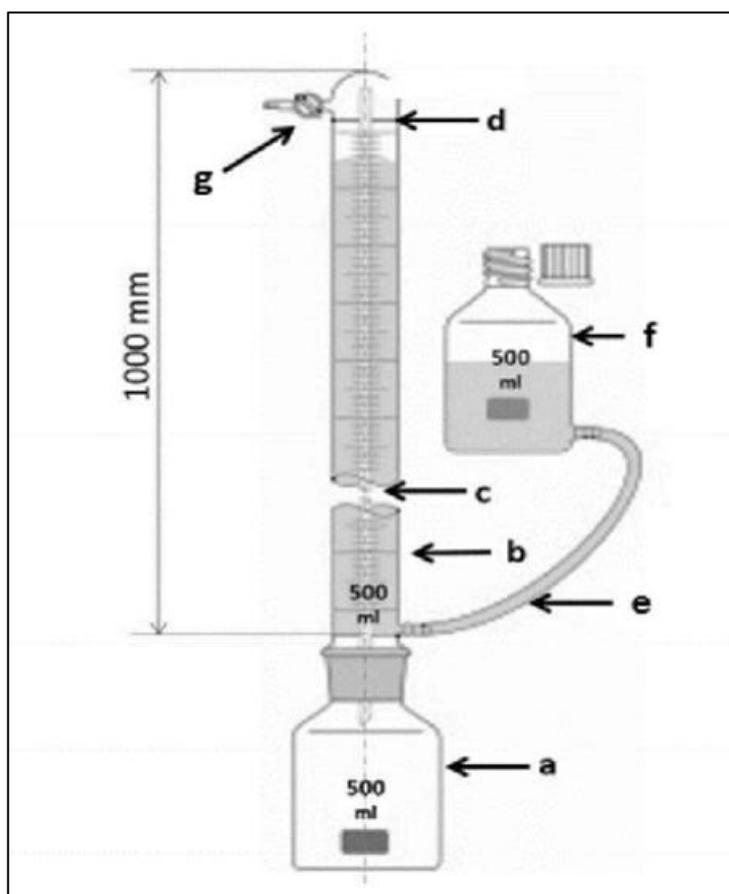


Figura 3 - Estrutura para teste PBB e/ou PBM.
Fonte: adaptado de DIN 38414 (1985)

O ensaio deve ser conduzido por um período mínimo de 21 dias, tempo suficiente para identificar as taxas máximas de produção de biogás.

A montagem da estrutura experimental, de acordo com a DIN 38 414 (S8) consiste dos seguintes itens: Tubo Eudiômetro com capacidade de 500 mL, com escala de graduação de 1 mL, graduado de cima para baixo (de 0 a 500 mL),

possuindo uma torneira de vidro na parte superior, para expurgo do biogás; Frasco Reator com volume de 500 mL; frasco Reservatório para armazenamento do líquido selante, com volume de 500 mL; Mangueira flexível com aproximadamente 1 metro de comprimento; Banho-maria termostático.

O princípio de funcionamento ocorre inicialmente com a digestão anaeróbia da mistura de substrato e inóculo no frasco reator (a). Este frasco fica imerso em um banho-maria, mantendo a temperatura do processo em 35 ± 1 °C. O processo de biometanização, nessas condições operacionais, favorece a ação dos micro-organismos mesofílicos que ao consumirem a matéria orgânica produzem biogás. As emissões de biogás fluem do frasco reator (a) para o tubo Eudiômetro (b) por meio do tubo interno (c). O volume de biogás produzido desloca o líquido selante do tubo Eudiômetro para o frasco reservatório (g).

A produção de biogás obtidos nas primeiras semanas do ensaio permitem ter uma ideia da tendência da curva de produção até o final do processo. A Figura 4 apresenta alguns perfis típicos da produção líquida de biogás, ou seja, de uma solução inóculo + substrato, subtraindo a produção de biogás advinda do inóculo.

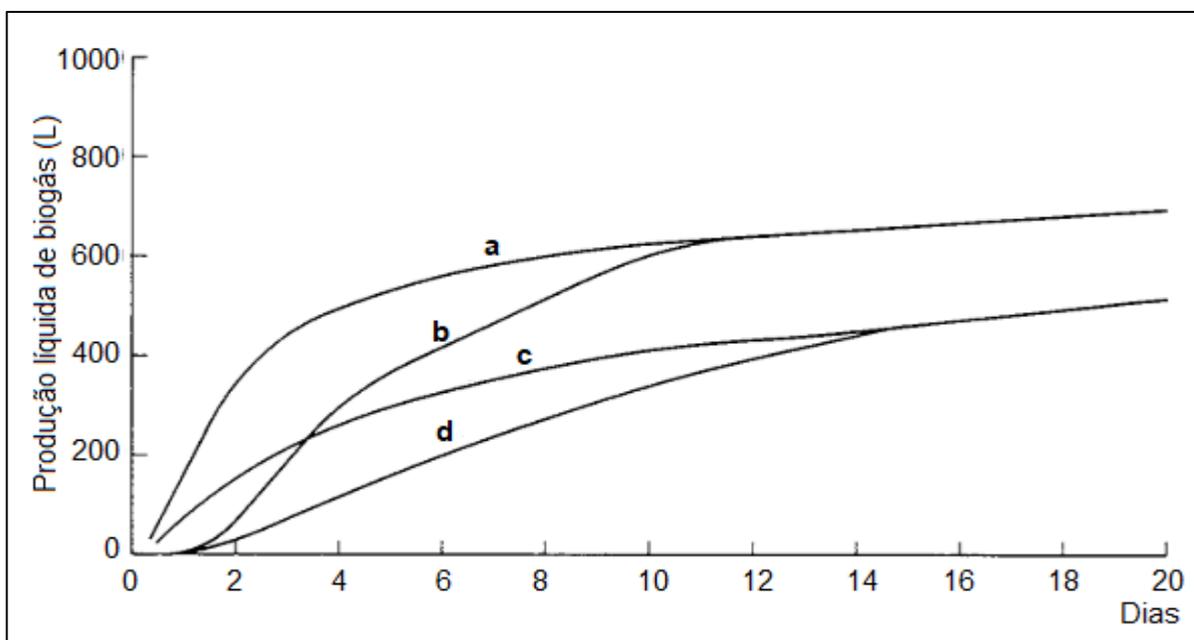


Figura 4 - Curvas típicas acumuladas de produção de biogás/metano.

Fonte: adaptado de DIN 38414 (1985) e VDI 4630 (2006).

Na Figura 4 são observadas as curvas das substâncias degradáveis que são convertidas rapidamente em biogás e conseqüentemente o aumento acentuado da

curva caracteriza-se pela produção acumulada normal de biogás (a). Já a curva que apresenta evolução do gás atrasada no tempo (b), em muitos casos, ocorre devido a composição do substrato possuir uma ou mais fases. Em geral corre com substratos formado pela mistura de vários substratos diferentes e/ou substrato com composição heterogênea. Temos também curvas de inibição do gás (c) e curvas que representam a evolução de gás atrasada no tempo e inibida (d). Além das formas de curva mostradas aqui, há um grande número de formas mistas (DIN38414, 1985; VDI4630, 2006).

Após 40 dias a produção acumulada de biogás atinge 90% e a produção de biogás é estabilizada, sendo possível observar o acréscimo de uma pequena quantidade de gás. No entanto, a atividade dos micro-organismos depende do grau de adaptação do inóculo ao substrato (BERNAT et al., 2015; LOZANO et al., 2009).

2.6 Resíduos da bananicultura

A banana está entre as frutas mais produzidas, comercializadas e consumidas globalmente. No ano de 2018 a produção mundial foi de mais de 85 milhões de toneladas, onde o Brasil produziu aproximadamente 6,7 milhões de toneladas do fruto, ocupando a 4ª posição dos produtores mundiais, ficando atrás apenas de países como a Índia, China e Filipinas. Devido à grande disponibilidade dessa biomassa, busca-se alternativas para o seu reaproveitamento e valorização, além de contribuir com a redução do seu impacto ambiental ao permanecer no campo. Estudos estão sendo realizados para aproveitá-la como fonte alternativa de energia através da produção de bioetanol e biometano (FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2022).

Sawarkar et al., (2022) realizaram uma revisão sobre o a produção de bioetanol a partir de resíduos da bananicultura e apontaram que os resíduos gerados apresentam potencial para se tornar uma alternativa viável e sustentável para a produção de combustíveis. No entanto, os autores apontaram que ainda existem desafios, como a falta de padronização nos métodos de pré-tratamento e fermentação.

Os autores Kusmiyati e Sukmaningtyas (2018) realizaram um estudo sobre a produção de bioetanol a partir do pseudocaule da bananeira. Os autores realizaram o pré-tratamento do pseudocaule com hidróxido de sódio, a fim de avaliar qual seria a

melhor condição para obter açúcares fermentáveis, seguida, de hidrólise enzimática, utilizando celulase. Por fim, foi avaliada a produção de bioetanol a partir dos açúcares fermentáveis. Os autores concluíram que o pré-tratamento com hidróxido de sódio seguido de hidrólise enzimática foi a melhor condição para produzir açúcares fermentáveis e, conseqüentemente, para produzir bioetanol a partir do pseudocaule da bananeira.

De Souza et al., 2017 empregaram o pseudocaule de bananeira previamente desidratado e moído (farelo) e a partir da hidrólise de diferentes concentrações do resíduo por ácido sulfúrico ou por hidróxido de sódio, recomendaram a hidrólise de 70 g/L de farelo por H₂SO₄ 2% (massa de ácido por massa de resíduo seco), seguido de hidrólise enzimática.

Montagnoli et al. (2018) utilizou o mesmo tipo de substrato indicado por Souza et al. (2017) e avaliou o emprego de diferentes tipos de inóculos composto por cultura única (*S. cerevisiae*, *Zimomonas mobilis*, *Scheffersomyces stipitis* e *Pachysolen tannophilus*) ou co-cultura. A autora concluiu que a co-cultura formada por *S. cerevisiae* e *P. tannophilus* propiciou incremento na produtividade em etanol de até 64% em comparação ao mesmo tipo de processo utilizando monocultura.

Estudo semelhante foi realizado por Islam et al., (2019). Os autores realizaram um pré-tratamento químico das fibras de banana e, em seguida, hidrolisaram a celulose em glicose, utilizando diferentes concentrações de enzimas. O processo de fermentação foi realizado com *Saccharomyces cerevisiae* em cultura única e em co-cultura com as enzimas, sendo que a co-cultura produziu uma quantidade maior de bioetanol em comparação com a cultura única de levedura. Esses resultados destacam a importância do pré-tratamento adequado e da seleção de cepas de leveduras e enzimas para obter rendimentos elevados de bioetanol a partir de resíduos da bananicultura, bem como a possibilidade de usar um consórcio de enzimas para aumentar a produção de glicose e de bioetanol.

A produção de etanol a partir de cascas de banana foram estudadas por Palacios et al., (2021) usando duas estratégias operacionais diferentes em altas cargas desse substrato pré-tratado. Eles observaram que a estratégia de produção contínua resultou em maior produção de etanol em comparação com a estratégia de produção em batelada, e sugeriram que a adição de nutrientes durante a fermentação pode aumentar a produção de etanol. Os resultados do estudo indicam que as cascas

de banana podem ser uma fonte viável de matéria-prima para a produção de etanol em escala comercial.

Guo et al.,(2018) investigaram o uso de cascas de banana como matéria-prima para produção de etanol como biocombustível de segunda geração. O pré-tratamento com ácido seguido de hidrólise enzimática converteu tanto a celulose como a hemicelulose em açúcares fermentáveis que foram convertidos em etanol pela fermentação com levedura. O ácido tartárico foi usado no pré-tratamento e obteve melhores resultados do que o ácido sulfúrico tradicionalmente utilizado em outros estudos. O estudo concluiu que as cascas de banana descartadas após o consumo do fruto podem ser convertidas em produtos de valor agregado, como o etanol combustível.

Comparando o uso do caldo proveniente de cascas frescas de bananas maduras (sem hidrólise) com o do mesmo tipo de cascas previamente secas, moídas e hidrolisadas por ácido sulfúrico 2%, (HOPFNER, 2015) concluiu que não é necessário a hidrólise do resíduo para a fermentação. Empregando o resíduo após trituração em meio aquoso seguido da sua solubilização a 120 °C durante 15 min (processo de esterilização) a autora obteve rendimento e produtividade em etanol semelhantes ao resíduo previamente hidrolisado.

A fermentação do caldo de pseudocaule previamente hidrolisado por ácido sulfúrico 2% adicionado de caldos de cascas e polpa de bananas maduras sem hidrólise prévia foi avaliada por Sandrin et al., (2018) e Uchôa et al., (2021). Os autores empregaram mosto (caldo) de fermentação contendo 150 g/L de açúcares redutores proveniente da mistura dos caldos dos resíduos contendo entre si as mesmas relações de massa seca geradas no campo e na industrialização da fruta (10:2:1).

O Brasil possui um clima favorável para a produção de banana, que possibilita o seu cultivo de norte a sul ao longo de todo o ano, atendendo de forma constante a demanda. Em 2021, São Paulo apresentou a maior produção do fruto, com 1.069.483 toneladas, sendo responsável por 14,8% da produção do país, seguido pelos estados da Bahia com 878.517 toneladas, 12,8% da produção, Minas Gerais com 801.884 toneladas, 11,6% da produção e Santa Catarina produziu 714.252 toneladas, 10,4% (EPAGRI/CEPA, 2021; JUNIOR, 2019).

A microrregião de Joinville (municípios de Araquari, Balneário Barra do Sul, Corupá, Garuva, Guaramirim, Itapoá, Jaraguá do Sul, Joinville, Massaranduba, São Francisco do Sul e Schroeder) é a maior produtora com, aproximadamente 354.000

toneladas, representando 53% das bananas produzidas no estado catarinense, seguida da microrregião de Blumenau com aproximadamente 159.000 toneladas e Itajaí próximo de 123.000 toneladas, representando 19% e 16% respectivamente (EPAGRI/CEPA, 2021).

Após cultura e industrialização da banana, são geradas quatro toneladas de massa úmida de resíduos vegetais para cada tonelada de banana colhida, sendo: 73,5% pseudocaule, 11,8% folha, 10,8% casca e 3,9% engaço (SOUZA et al., 2010).

Para cada tonelada de fruta comercializada, 460 kg são consideradas impróprias para o consumo humano, sendo rejeitadas. É possível estimar-se a geração de 2,48 milhões de toneladas dos resíduos polpa, cascas e pseudocaule. (EMBRAPA, 2006 apud FEDERIZZI, 2008).

Muitos estudos sugerem que os resíduos da bananicultura podem ser uma fonte promissora para a produção de bioetanol. No entanto, é importante continuar a investigar e otimizar os processos de produção para maximizar o rendimento e a eficiência desse processo.

2.7 Simulação de processos de produção de biogás

A simulação computacional tem auxiliado cada vez mais no dimensionamento e projeção de diversos setores industriais. No desenvolvimento da produção de biogás o/ou biometano tem sido uma ferramenta utilizada para representar virtualmente a transformação da biomassa utilizada como matéria prima em combustível (SANTOS et al., 2012).

Por representar virtualmente, a partir de aplicativos especializados, modelos capazes de replicar o funcionamento de um sistema real possibilitam, por meio da realização de testes, a otimização de todo o processo, permitindo ao gestor a minimização de erros. De uma forma geral, pode-se definir a simulação computacional, como uma ferramenta de gestão para tomada de decisão em tempo real e antes da execução do projeto de uma dada empresa de gás natural renovável (Biogás e Biometano) (NUNES; JOÃO PAULO BARBIERI; PINHO, 2015).

Exemplos de simuladores de processo amplamente utilizados na indústria química são: o Aspen Plus®, Aspen Hysys®, UniSim e o SuperPro Designer®, que apresentam a capacidade de lidar com processos nos estados sólido, líquido e gasoso. Nestes, por meio de balanços de massa e energia simulam-se todas as

entradas e saídas do processo produtivo, proporcionando uma visão geral de toda a planta de produção, facilitando a análise, tratamento e gerenciamento, economizando tempo e recursos financeiros (ASPENTECH, 2017).

A simulação é um dos processos necessários para realizar a avaliação econômica, pois é a etapa que integra os processos produtivos mostrando as vazões, balanços de massas, equipamentos e energia necessária. Com esses dados é possível realizar a avaliação de opções de equipamentos, a otimização do processo a fim de aumentar a produtividade e/ou rendimento, e a avaliação da rentabilidade global do projeto em função da quantidade de energia necessária, sendo fator determinante para tomada de decisões (SOUZA; MENEZES; RODRIGUES, 2017).

Diversos estudos de processos fermentativos foram realizados utilizando a simulação, com o objetivo de validar novas tecnologias, quantificar os consumos de matéria-prima e energia e verificar a possibilidade de melhorias. A partir da simulação e validação dos processos fermentativos, o volume máximo de etanol produzido, estimado a partir das quantidades de biomassa disponível em cada caso, foi de 45.080,33 m³/ano no processo cocultura com bagaço úmido (UCHÔA, 2018).

3. METODOLOGIA

Os principais procedimentos adotados neste estudo, para atender aos objetivos propostos, foram o preparo dos meios de cultivo dos inóculos (M1 - meio sintético, M2 - caldo concentrado, extrato de levedura e sais e M3 - caldo concentrado puro). Então, foi realizada a produção de bioetanol tendo como substrato a biomassa da bananicultura (caldo do pseudocaule de bananeira, caldo das cascas e polpa de banana) utilizando os diferentes inóculos. As fermentações F1, F2 e F3 foram realizadas com os inóculos M1, M2 e M3, respectivamente.

A partir dessas etapas foi realizada a quantificação e caracterização dos resíduos sólidos gerados derivados da produção de bioetanol: Resíduo sólido 1 (R1) - pseudocaule de bananeira, Resíduo sólido 2 (R2) - cascas de banana e do Resíduo sólido 3 (R3) - obtido após a separação do caldo fermentado contendo o bioetanol.

Após essa etapa foi possível realizar a produção de biogás por digestão anaeróbia com amostras dos resíduos R1, R2 e R3, sendo assim foi possível realizar a determinação da composição do biogás e do potencial bioquímico de biogás (PBB) e potencial bioquímico de metano (PBM) para cada resíduo sólido (R1, R2 e R3).

Por fim foi realizada a simulação computacional da produção de biogás utilizando o modelo não linear de Gompertz e a projeção de volume de biogás e metano gerados.

Essa abordagem permitiu uma análise detalhada da viabilidade e eficiência da produção de bioetanol e biogás a partir dos resíduos da bananicultura, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no aproveitamento de biomassa e redução do impacto ambiental causado por esses resíduos.

3.1 Processo de produção de bioetanol

A partir da biomassa da cultura e industrialização da banana *Musa cavendishii*, popularmente conhecida como nanica ou nanicão, foi realizada produção de bioetanol utilizando substrato de caldo do pseudocaule de bananeira, caldo das cascas e polpa de bananas maduras impróprias para o consumo humano (Uchoa et al, 2021), apresentado na Figura 5.

A proporção de massa úmida de cada uma dessas biomassas foi correspondente à mesma proporção de massa que são gerados no campo, sendo então de 10:2:1 de pseudocaule, casca e polpa, respectivamente.



Figura 5 - Fluxograma operacional simplificado empregado na produção de bioetanol de biomassa da bananicultura.

3.1.1 Preparo do caldo de pseudocaule de bananeira

Para obtenção do caldo de pseudocaule de bananeira foram utilizadas as metodologias estabelecidas por Souza (2016) e Souza *et al.* (2017). O pseudocaule

foi primeiramente prensado para obtenção da seiva, que será utilizado no caldo de polpa e casca da banana. Após a prensagem, o bagaço foi cortado em pedaços, triturado em liquidificador industrial para a obtenção de fibras que sofrerão pré-tratamento químico e sacarificação. Para o pré-tratamento químico, foi empregado solução aquosa de H_2SO_4 2% m/MS (massa de H_2SO_4 98% de pureza por massa seca de pseudocaule) e concentração de 70 g/L de MS (massa seca) de pseudocaule. Após a mistura da solução nas fibras, o recipiente foi submetido a aquecimento de 120 °C em autoclave a vapor por 15 minutos. Em seguida, o pH foi medido e ajustado para 5,5. Para o processo de sacarificação, foi utilizado uma solução aquosa composta por enzimas celulase e hemicelulase com concentração de 6% m/MS e 2% m/MS, respectivamente. Após a sacarificação, o caldo hidrolisado foi filtrado em tecido de algodão, para ficar isento de sólidos. A parte líquida foi utilizada na composição do substrato para fermentação alcoólica e a parte sólida (resíduo de pseudocaule), identificada neste trabalho como “Resíduo sólido 1”.

3.1.2 Preparo do caldo de cascas de banana

As cascas dos frutos rejeitados, impróprios para o consumo humano, foram utilizados para obtenção do caldo de cascas de banana. Os frutos foram reservados para a obtenção do caldo da polpa de banana (item 3.2.3). As cascas foram cortadas com auxílio de uma faca em pequenos pedaços de, aproximadamente, 3 cm e trituradas em liquidificador industrial utilizando a seiva removida no preparo do caldo de pseudocaule como meio de liquefação. A proporção de 200 mL de seiva para cada 400 g de massa úmida de casca foi a mesma utilizada por Uchôa (2018), porém esta utilizou-se de água ao invés de seiva. Após a trituração, a mistura foi aquecida a 120 °C em autoclave por 15 min seguido por filtração. A parte líquida foi utilizada na composição do substrato de fermentação alcoólica e a parte sólida (resíduo de casca), foi identificado como “Resíduo sólido 2”.

3.1.3 Preparo do caldo da polpa da banana

Para a obtenção do caldo da polpa de banana, o fruto maduro foi cortado manualmente com auxílio de uma faca em pedaços menores que 3 cm e adicionado de seiva extraída do pseudocaule, misturados em liquidificador industrial até a obtenção de uma massa homogênea (inspeção visual). Para cada 500 g de polpa de

bananas foi adicionado 1L de seiva. O preparo desse caldo não gerou resíduos e foi utilizado na composição do substrato para a fermentação alcoólica.

3.1.4 Preparo do caldo concentrado

Conforme proposto por Montagnoli, 2017; Sandrin, 2018 e Uchôa, 2018 mistura dos três caldos (3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3) foi inicialmente submetida à evaporação até a obtenção da concentração de 150 g/L de açúcares redutores (AR) utilizando o método colorimétrico de DNS (3,5 dinitrosalicilato) com base na proposta de Miller (1959). A evaporação ocorreu em chapa de aquecimento com agitadores para a homogeneização. Após a mistura atingir a concentração esperada, foram adicionados 3 g/L de extrato de levedura, 0,5 g/L de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0,5 g/L de K_2HPO_4 , 0,1 g/L de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e 0,1 g/L de CaCl_2 , conforme Souza *et al.* (2010b). Esse caldo concentrado foi utilizado na composição dos meios de cultivo M2 e M3 do inóculo (item 3.2.5 – Tabela 4) e como substrato para a fermentação alcoólica.

3.1.5 Preparo dos inóculos

Os meios de cultivo para a produção dos inóculos foram identificados como M1, M2 e M3 e preparados de acordo com a Tabela 4.

Tabela 3 - Composição dos meios de cultivo M1, M2 e M3 dos inóculos utilizando *Saccharomyces cerevisiae* e *Pachysolen tannophilus*.

Concentração (g/L)	M1	M2	M3
Caldo concentrado	-	150	150
Glicose	20	-	-
Extrato de levedura	3	3	-
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,5	0,5	-
K_2HPO_4	0,5	0,5	-
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,1	0,1	-
CaCl_2	0,1	0,1	-

Em frascos Erlenmeyer foram colocados 100 mL de meio M1, M2 ou M3, esterilizados a 120 °C por 15 minutos. Cada frasco foi inoculado com 2 mL de suspensão microbiana (1 mL de cada micro-organismo). Para a obtenção da suspensão microbiana, 5 mL de água destilada e esterilizada foram colocados em placas de Petri contendo as culturas e feita a raspagem das colônias com auxílio de

uma alça de inoculação. Coletou-se, então, 1 mL de cada suspensão microbiana adicionou-se aos 100 mL de meio.

Os frascos foram incubados em agitador orbital (120 min^{-1}) a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h.

3.1.6 Preparo da fermentação alcoólica

Foram realizadas três fermentações alcoólicas (F1, F2, F3), em duplicata, utilizando caldo concentrado (3.2.4) como substrato. A fermentação F1 foi realizada com o inóculo M1, a fermentação F2 com o inóculo M2 a fermentação F3 foi realizada com o inóculo M3 conforme (Tabela 4).

As fermentações foram conduzidas em frascos Erlenmeyer contendo 80 mL de caldo concentrado previamente esterilizados a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ por 15 minutos.

Para a inoculação dos frascos a proporção de massa dos micro-organismos *Saccharomyces cerevisiae* e *Pachysolen tannophilus* foi de 1:1, conforme sugerido por Montagnoli (2017) e cada frasco de fermentação continha 80 mL de caldo concentrado e 20 mL de inóculo (20% v/v). Os frascos foram acondicionados em agitador orbital com frequência de agitação de 120 min^{-1} e temperatura controlada em $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Foram retiradas amostras nos tempos de fermentação 0, 6, 12, 18, 24, 36, 48 e 60 h e determinadas as concentrações de AR e etanol (P) (3.2.7).

Após 60 h de processo, foi realizada separação das frações líquida e sólida por centrifugação (3500 min^{-1} ($2122 \times g$), 15 min). A parte sólida, aqui denominada de “Resíduo sólido 3”, assim como o Resíduo sólido 1 (3.2.1) proveniente da produção do caldo de pseudocaule e o Resíduo sólido 2 (3.2.2) do caldo de cascas, foram congelados para posterior quantificação e caracterização (3.3.1).

3.1.7 Determinação das concentrações de açúcares redutores e etanol

As amostras coletadas durante os ensaios de fermentação foram submetidas a determinação da concentração do AR utilizando o método colorimétrico de DNS (3,5 dinitrosalicilato) com base na proposta de Miller (1959).

Para isso, cada amostra foi centrifugada com frequência de rotação de 10.000 min^{-1} por 10 min. O sobrenadante foi diluído em água destilada em proporção suficiente para obter a leitura na curva de calibração. Após diluição, utilizando um vortex para homogeneização da amostra, foi adicionado em tubos de ensaio $500 \mu\text{L}$ da amostra diluída e $500 \mu\text{L}$ de DNS. Em seguida, os tubos foram aquecidos em

banho-maria a 100 °C por 5 min e posterior banho de gelo para resfriamento. Após esta etapa, foram adicionados 5 mL de água destilada e homogeneizados em vortex para leitura de absorvância feita em espectrofotômetro LKB BIOCHROM, Novaspec II com comprimento de onda de 540 nm. O valor de AR foi determinado a partir da Equação 4 obtida da curva de calibração (Apêndice 1).

$$Abs = 0,56 * (AR) - 0,0156 \quad R^2 = 0,9974 \quad (4)$$

Para determinar as concentrações de bioetanol ao longo do processo de fermentação as amostras coletadas foram filtradas em microfiltro com porosidade de 0,45 µm para preservação da coluna onde as análises foram submetidas a cromatografia gasosa em cromatógrafo da marca Agilent, modelo 6890, acoplado com mostrador automático da Agilent, modelo 7683 e coluna da Hewlett-Packard 54 HP-1 de comprimento 50 m e diâmetro externo de 0,32 mm. Como fase estacionária foi utilizada dimetilpoli-siloxano 100% com espessura de filme de 1,05 µm. Antes da injeção no cromatógrafo, as amostras foram filtradas em microfiltros com porosidade de 0,45 µm para preservação da coluna.

3.1.8 Cálculo do rendimento, produtividade e eficiência do processo

O rendimento em etanol (g/g) foi calculado de acordo com a Equação 5.

$$Y_{P/AR} = \left(\frac{P_f - P_0}{AR_0 - AR_f} \right) \quad (5)$$

Onde, P_f é a concentração de etanol (P) no final da fermentação, P_0 é a concentração de etanol no início da fermentação, AR_0 é a concentração de açúcares redutores (AR) no início da fermentação e AR_f é a concentração de açúcares redutores no final da fermentação.

Considerou-se como tempo final de fermentação quando se inicia a fase de concentração de açúcares redutores (AR) constante.

Para a produtividade de etanol foi utilizada a Equação 6, expressa em g.(Lh)⁻¹.

$$Q_P = \left(\frac{P_f - P_0}{t_f} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde, t_f é o tempo final.

Para o cálculo da eficiência (E_f) a equação (7) foi utilizada:

$$E_f(\%) = \left(\frac{Y_{P/AR}}{0,511} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Onde 0,511 gramas de etanol/grama de glicose é o rendimento teórico para produção de etanol.

3.2 Micro-organismos e manutenção

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* isolada, mantida e identificada como Univille 9080 (ATCC 26603 - linhagem floculante) e a levedura *Pachysolen tannophilus* CCT 1891 (ATCC 32691), ambas mantidas no banco de cepas da UNIVILLE, foram utilizadas neste trabalho. As cepas eram mantidas em placas de Petri contendo meio de cultivo sólido de acordo com a Tabela 3.

Tabela 4 - Composição dos meios de cultivo de manutenção de *Saccharomyces cerevisiae* e *Pachysolen tannophilus*.

Nutrientes	Concentração (g/L)	
	<i>S. cerevisiae</i>	<i>P. tannophilus</i>
Agar-agar	20	20
Glicose	20	20
Extrato de levedura	3	3
(NH ₄)SO ₄	0,5	5
K ₂ HPO ₄	0,5	1
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,1	0,1
CaCl ₂	0,1	0,1

Fonte: adaptado de Montagnoli (2017).

3.3 Quantificação e caracterização dos resíduos sólidos

Conforme mostrado na Figura 5, durante o processo de produção de bioetanol a partir das biomassas da bananicultura foram gerados três resíduos sólidos, que passaram a ser identificados como: (1) Resíduo sólido 1 – sólidos retidos na filtração do caldo de pseudocaule, (2) Resíduo sólido 2 – sólidos retidos na filtração do caldo de cascas de bananas, (3) Resíduo sólido 3 – sólidos retidos na filtração do caldo fermentado.

As quantificações dos Resíduos sólidos foram feitas em massa úmida por pesagem em balança semi-analítica.

3.3.1 Caracterização dos Resíduos sólidos

A análises para a determinação de teor de umidade, sólidos voláteis, fixos e totais, testes cinéticos e a caracterização química do biogás, foram realizadas no laboratório de estudos de biogás (LEB), na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Suínos e Aves, localizada em Concórdia – SC.

Os ensaios de demanda química e bioquímica de oxigênio foram realizados no laboratório de Pesquisa em Meio Ambiente da Univille – Joinville – SC.

Os ensaios de caracterização química como os de análise química elementar - CHN e espectrometria de emissão óptica com plasma - ICP OES, foram realizados no Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo – IQ USP.

3.3.1.1 Teor de Umidade

A determinação de umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM E871-82 (2019), onde 3 g de amostra úmida foram pesadas em cadinhos de porcelana devidamente identificados e levadas para estufa previamente aquecida (103 ± 1) °C até massa constante, sendo todas as análises realizadas em triplicata.

O teor de umidade da amostra foi calculado de acordo com a Equação 8.

$$U(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

W_c = massa do cadinho (g);

W_i = massa inicial (massa inicial da amostra + cadinho) (g);

W_f = massa final (massa final da amostra + cadinho) (g).

3.3.1.2 Sólidos voláteis

A determinação do teor de voláteis foi realizada segundo a norma ASTM E871-82 (2019) e ASTM E872-82 (2019). O teor de materiais voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da amostra que volatiliza durante o aquecimento em forno mufla a uma temperatura previamente estabelecida pela metodologia utilizada. Foram pesadas 3 g de amostra seca a 105 °C até massa constante e acondicionadas

em cadinhos de porcelana com tampa. As amostras preencheram os cadinhos quase completamente, fazendo com que o pouco ar presente evitasse a combustão da amostra. Os cadinhos foram levados ao forno mufla por 7 min, a $(950 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Os cadinhos foram retirados da mufla e transferidos ao dessecador para resfriamento e pesagem. Após a extração dos voláteis, sobram somente carbono fixo e cinzas. O teor de voláteis foi calculado de acordo com a Equação 9.

$$SV(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \cdot 100 \quad (9)$$

W_c = massa do cadinho (g);

W_i = massa inicial (amostra seca + cadinho) (g);

W_f = massa final (amostra final análise + cadinho) (g).

3.3.1.3 Sólidos fixos

A determinação de sólidos fixos (teor de cinzas) foi realizada segundo a norma ASTM E1755-01 (2020). Foram pesadas 3 g de amostra seca a $105 ^\circ\text{C}$ até massa constante, colocada em cadinho de porcelana e levada ao forno mufla a $(550 \pm 25) ^\circ\text{C}$ por 5 h. Para que a amostra não produzisse chamas, a temperatura foi inicialmente estabilizada em $250 ^\circ\text{C}$, e passados 30 min foi elevada para $(550 \pm 25) ^\circ\text{C}$. O teor de cinzas foi calculado utilizando a Equação 10.

$$SF(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \cdot 100 \quad (10)$$

W_c = massa do cadinho (g);

W_i = massa inicial (amostra seca + cadinho) (g);

W_f = massa final (amostra final análise + cadinho) (g).

3.3.1.4 Sólidos Totais

A determinação de sólidos totais foi realizada segundo a norma ASTM E1755-01 (2020). Após a determinação dos teores de umidade, de sólidos voláteis e fixos da amostra, o teor de sólidos totais foi obtido por diferença, como demonstrado na Equação 11.

$$ST(\%) = 100 - (SV + SF) \quad (11)$$

3.3.1.5 Demanda química de oxigênio (DQO)

As determinações de Demanda Química de Oxigênio (DQO) foram realizadas empregando o Kit DQO Reagente da *Hach*, na faixa de 0 a 1500 mg O₂/L. Seguindo a metodologia proposta pelo fornecedor, foram diluídos 500 g das amostras em balão volumétrico de 2L e adicionado água destilada até completar o volume do balão, em seguida foram pipetados 5 mL dessa amostra em balão volumétrico de 500 mL e adicionado água destilada até completar o volume do balão.

Após homogeneização, 2 mL da solução foram transferidos para o tubo de vidro contendo o reagente kit DQO/*Hach* e então acondicionado em digestor *Hach* modelo *Digital Reactor Block 200*, (DRB200) a 150 °C por 120 min. Em seguida, a mistura foi resfriada em béquer contendo água e gelo e conduzida para a leitura de absorbância em espectrofotômetro *Hach* DR/4000 empregando o programa 2720, com comprimento de onda ($\lambda = 620$ nm.) Para cada amostra digerida foram realizadas duas alíquotas de leituras de absorbância.

3.3.1.6 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅)

Os valores da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) foram determinados com base no método do Kit no Manual de Instrução *BodTrac TM, Hach Company* (1998).

Para essas análises foi necessário determinar primeiramente o valor da DQO correspondente a cada amostra. Conhecido o valor da DQO, foi calculado o volume de amostra (V_a) a ser adicionada ao reagente do kit, conforme Equação 12.

$$V_a = \frac{DQO}{350.10} \quad (12)$$

Foi usado o valor de 350 com o objetivo de reduzir-se a DQO original da amostra para a faixa provável do valor de DBO recomendada pelo fornecedor do kit (0 a 700 mg DBO L⁻¹) e o valor 10 foi empregado com o objetivo de reduzir escala, já que o método prevê um volume de amostra inicial de 1 L enquanto, nessa análise optou-se pelo uso de 100 mL de amostra para a determinação da DBO.

Em seguida, os frascos com as amostras foram conectados ao aparelho de MOD.DBOTraK-HACH através de sondas com tampas em roscas, onde permaneceram em sistema de agitação na estufa incubadora bacteriológica a 20 °C por 5 dias.

3.3.1.7 Análise química elementar

A caracterização química elementar foi determinada em analisador elementar Perkin Elmer CHN Analyser 2400 Series II.

As amostras secas (105 °C até massa constante) foram levadas a peneira vibratória, com abertura de 100 mesh (0,149 mm) e em seguida analisadas via combustão a 925 °C. Na análise química elementar foram determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) por analisador elementar, realizadas em duplicata, pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de São Paulo (USP).

3.3.1.8 Espectroscopia Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente – ICPOES

Para a análise do enxofre (S), inicialmente as amostras passam pelo processo de digestão ácida utilizando a metodologia de Schöniger em digestor da marca SCP Science, modelo DigiPrep, com o objetivo de eliminar compostos orgânicos. Após a preparação, a amostra foi exposta à tocha do plasma através de um tubo central, para que seus átomos fossem excitados ou ionizados no Espectrômetro Óptico de Emissão Atômica com Plasma indutivamente acoplado - Spectro, modelo Arcos com visão radial (SOP) com limite de detecção (LD: 0,01 mg. L⁻¹); limite de quantificação (LQ: 0,10 mg. L⁻¹).

A detecção dos comprimentos de ondas (λ) emitidos foi realizada a partir de detectores ópticos presentes no equipamento que possui sistema óptico purgado e selado com argônio em 99,996% de pureza (White Martins - Praxair, Brasil), que possibilita a análise de elementos que apresentam emissão atômica em baixos comprimentos de onda, onde a linha de emissão escolhida para o enxofre (S) foi 180,699 nm. As análises foram realizadas em duplicata, pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de São Paulo (USP).

3.4 Produção de Biogás

3.4.1 Substrato

Foram utilizados como substrato o Resíduo sólido 1 (R1) – sólidos retidos na filtração do caldo de pseudocaule, o Resíduo sólido 2 (R2) – sólidos retidos na filtração do caldo de cascas de bananas e o Resíduo sólido 3 (R3) – sólidos retidos na filtração do caldo fermentado.

3.4.2 Inóculo anaeróbio

O inóculo anaeróbio utilizado neste trabalho, era composto de partes iguais (1:1:1) (m/m/m) dos inóculos iniciadores de lodo anaeróbio proveniente de reator UASB alimentado com dejetos suíno, lodo anaeróbio de reator UASB de indústria de gelatina e esterco fresco de gado leiteiro. A mistura do inóculo mesofílico, aclimatado (37 ± 1) °C foi realizada em um reator do tipo CSTR, com volume de 40 L, alimentada diariamente com carga orgânica volumétrica de 0,3 g_{sv}/L.dia composto por grama seca como fonte de celulose, lignina e clorofila (30% SV); leite em pó como fonte de lactose, aminoácidos, lipídeos e alguns micronutrientes (25% SV); ração à base de milho para suínos (30% SV); e óleo vegetal para enriquecimento do substrato lipídico (15% SV). Antes de iniciar os ensaios cinéticos, o inóculo permaneceu sem alimentação por 7 dias, visando a redução da contribuição da produção de biogás do mesmo, que deve ser inferior a 10% da produção do substrato (STEINMETZ *et al.*, 2016; VDI 4630, 2006).

3.5 Ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás (PBB)

Foram utilizados tratamentos com diferentes relações $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ (0,5 para o Resíduo sólido 1; 0,3 para o Resíduo sólido 2 e 0,4 para o Resíduo sólido 3) de maneira a garantir que a quantidade de substrato não excedesse a quantidade de inóculo, o que poderia causar inibição (VDI 4630, 2016). Os ensaios foram realizados utilizando 10 g de substrato e 190 g de inóculo.

Além dos ensaios conduzidos com os Resíduos sólidos 1, 2 e 3, foi realizado um ensaio com o 200 g de inóculo (controle positivo) e outro com 1 g de celulose

microcristalina (CMC) e 199 g de inóculo (controle CMC), todos em triplicata. O controle positivo serve para garantir a viabilidade da atividade biológica do inóculo e o controle CMC (20 µm, Sigma-Aldrich/Alemanha) foi escolhida, pois os valores de biogás já são amplamente conhecidos pela literatura, na faixa de 740-750 mL/g_{SVsubstrato} sendo recomendado valores de recuperação superiores a 85% dos valores de referência (600 mL/g_{SVsubstrato}) (HOLLIGER et al., 2016, 2021)

Para condução dos ensaios a temperatura foi mantida em faixa mesofílica (37 ± 1) °C, com auxílio de banhos térmicos com controlador de temperatura, com duração de 45 dias, conforme os procedimentos recomendados pelos guias VDI 4630 (2006) e DIN 38414-8 (1985).

Os reatores foram previamente purgados com nitrogênio gasoso, para garantir condições de anaerobiose. No desenvolvimento dos ensaios a produção de biogás foi monitorada por deslocamento de líquido selante ao longo do tubo eudiômetro, sendo este composto por cloreto de sódio (NaCl), ácido cítrico (C₆H₈O₇) e alaranjado de metila (C₁₄H₁₄N₃NaO₃S) (DIN 38414-8, 1985).

A produção de biogás foi considerada estabilizada quando o valor diário de biogás era igual ou inferior a 1% a do total produzido. O volume de biogás foi corrigido às condições normais de temperatura e pressão (273,15 K e 1013 hPa, respectivamente). Para cada Resíduo sólido testado, o potencial bioquímico de biogás (PBB - mL/g_{SV}) foi definido como sendo o maior volume (mL) obtido durante o ensaio pela massa (g) de SV respectiva a cada resíduo (VDI 4630, 2006).

3.5.1 Caracterização do biogás

Para analisar a composição do biogás foi utilizado o analisador portátil de gases Geotech BIOGAS 5000, o qual faz medições de CH₄ (%), CO₂ (%) e H₂S (ppm). Os gases foram coletados com o auxílio de um pacote de amostragem (PET / Al / PE), Hermann Nawrot AG. O biogás foi coletado conforme o deslocamento de líquido selante, ao longo do tubo eudiômetro, e o pacote de amostragem era preenchido com o biogás das triplicatas realizadas para cada resíduo. Não sendo avaliados individualmente.

O PBM (mL CH₄/g_{SV}) foi obtido pela multiplicação do PBB (mL/g_{SV}) e o percentual de CH₄ presente no biogás.

3.5.2 Simulação da produção de biogás

Neste estudo o modelo não linear de Gompertz (Equação 13) foi utilizado somente para ajustar o volume acumulado de biogás.

A Equação 13 é comumente utilizada para simular a produção cumulativa de biogás e avaliar o potencial e velocidade máxima de produção, além do tempo mínimo para produção do gás (fase lag) (SELVARAJ et al., 2018; PELLERA; GIDARAKOS, 2016). Os coeficientes cinéticos foram determinados com o modelo de programação GRG não linear, com o auxílio do Solver do programa de planilhas Microsoft Excel ®.

$$M(\text{dias}) = A \times \exp\left(-\exp\left(\frac{r_m}{A}(\lambda - t)\right) e + 1\right) \quad (13)$$

Onde:

M: Produção acumulada de biogás (mL/g_{sv}) no tempo t (dias);

A: Potencial de produção máxima de biogás (mL/g_{sv});

r_m: Velocidade máxima de produção de biogás (mL/g_{sv}.dia);

λ: fase lag ou fase de adaptação (ln M(t) versus t) (dias)

t: tempo total de processo (dias).

Onde A é equivalente ao PBB, no entanto de maneira simulada.

3.5.3 Determinação do potencial do volume de biogás e CH₄ e de geração de energia elétrica

Os cálculos de volume de geração de biogás e de CH₄ (m³) foram realizados com o auxílio das Equações 14 e 15, adaptadas de Aristarán et al. (2018) .

$$V_{\text{biogás}} = \text{PBB} \times \text{SV} \times \text{R} \quad (14)$$

$$V_{\text{CH}_4} = \text{PBM} \times \text{SV} \times \text{R} \quad (15)$$

Onde:

V_{biogás}: Volume geração de biogás (m³);

V_{CH₄}: Volume geração de CH₄ (m³);

PBB: Potencial bioquímico de biogás (L/kg_{sv});

PBM: Potencial bioquímico de metano (L_{CH₄}/kg_{sv});

SV: Concentração de sólidos voláteis (kg_{sv}/100 kg_R);

R: Resíduos produzidos (kg).

Para o cálculo de volume diário de geração de biogás e de CH₄ (m³/dia) utilizou-se o valor da velocidade obtida no modelo de Gompertz (r_m - L/kgsv.dia) como mostram as Equações 16 e 17.

$$V_{\text{Biogás}}/\text{dia} = r_m \times SV \times R \quad (16)$$

$$V_{\text{CH}_4}/\text{dia} = r_m \times SV \times R \quad (17)$$

Onde:

$V_{\text{biogás}}/\text{dia}$: Volume diário de geração de biogás (m³/dia);

$V_{\text{CH}_4}/\text{dia}$: Volume diário de geração de CH₄ (m³/dia);

r_m : Velocidade máxima de produção de biogás (L/kgsv.dia);

SV: Concentração de sólidos voláteis (kg_{sv}/100 kg_R);

R: Resíduos produzidos (kg).

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica (kWh/dia) foi realizado com o auxílio da Equação 18 (ARISTARÁN et al., 2018) .

$$EE = V_{\text{CH}_4\text{N}} * \eta_c * \rho_{\text{CH}_4} * \text{PCI}_{\text{CH}_4} * \eta_e * f_{\text{cap}} \quad (18)$$

Onde:

EE: Potencial de geração de energia elétrica (kWh/dia);

$V_{\text{CH}_4\text{N}}$: Volume diário de geração de CH₄ (m³/dia);

η_c : Eficiência da captura de biogás (85%);

ρ_{CH_4} : Densidade de CH₄ (0,656 kg/m³);

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior do CH₄ (11.900 kcal/ kg);

η_e : Eficiência da conversão de energia térmica a elétrica (30%);

f_{cap} : Fator de capacidade que representa a disponibilidade total do sistema (90%);

1 kcal: 0,00116 kWh

3.7 Análise Estatística

Os resultados obtidos da produção de bioetanol, da caracterização dos Resíduos sólidos 1, 2 e 3 e da produção de biogás e metano, foram submetidos à análise de variância dos valores médios das amostras, através do Teste Tukey com nível de confiança de 95% (ANOVA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fermentações alcoólicas

Os perfis cinéticos das três fermentações (cada uma conduzida em duplicata) são mostrados na Figura 6 (Fermentações F1, F2 e F3).

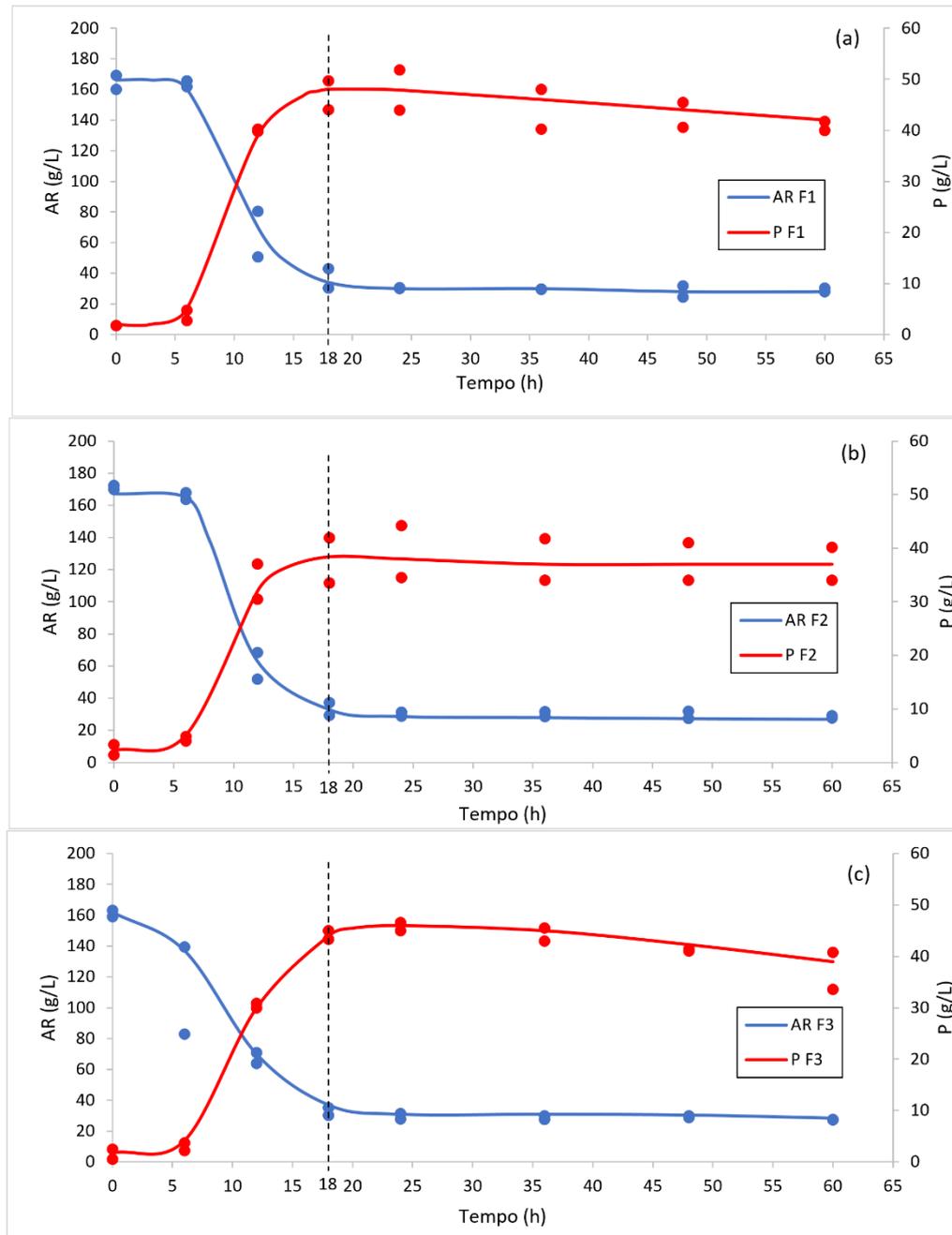


Figura 6 - Cinética do consumo de açúcares redutores (AR) e formação de etanol (P) por *Saccharomyces cerevisiae* e *Pachysolen tannophilus* da Fermentação 1 (a) empregando inóculo cultivado em meio de cultivo sintético (glicose, extrato de levedura e sais), Fermentação 2 (b) empregando inóculo cultivado em meio composto por caldo concentrado + extrato de levedura + sais (sem adição de glicose), Fermentação 3 (c) empregando inóculo cultivado em meio composto por caldo concentrado puro.

Todas as fermentações apresentaram perfis semelhantes (Figura 6) e pode-se verificar que em todas houve uma quantidade residual de açúcares redutores em torno de 34% após 18 horas de cultivo. O tempo de 18 horas foi definido, então, como o tempo final de processo, tempo este em que a concentração residual de açúcares redutores se tornou constante.

Concentração residual de açúcares redutores também foi encontrada por Montagnoli (2017) na fermentação de caldo de pseudocaule por cocultura microbiana, obtendo valor de 10 g/L de açúcares redutores, por Souza (2017, 2020) na fermentação de mesmo tipo de caldo, porém com monocultura de *S. cerevisiae* com valor aproximado de 33 g/L de açúcares redutores e por Sandrin (2018) e Uchoa (2018) utilizando como inóculo apenas *S. cerevisiae* e como mosto de fermentação a mesma mistura dos três caldos (pseudocaule, cascas e poupa) utilizada neste trabalho, obtiveram valores finais de açúcares redutores de aproximadamente 11 g/L e 33 g/L respectivamente. Para os autores, esse açúcar residual pode ser resultado da presença de compostos detectado pelo método analítico empregado (método do DNS). De acordo com Souza (2017), dentre os compostos resultantes da sacarificação do pseudocaule podem ser encontrados, glicose e xilose, inibidores conhecidos da fermentação alcoólica, somado à inibição pela concentração de etanol.

A partir da Figura 6 foram identificados os valores médios de AR e P correspondentes ao início e final dos ensaios de fermentação e os respectivos valores de rendimento ($Y_{P/AR}$), produtividade (Q_p) e eficiência (Ef) conforme mostrados na Tabela 5.

Tabela 3 - Tempo final de fermentação (t_f) e valores médios com desvio padrão das concentrações iniciais (AR_0), finais (AR_f) e ΔAR de açúcares redutores e de etanol (P_0 , P_f e ΔP) e respectivos valores de rendimento em etanol ($Y_{P/AR}$), produtividade (Q_p) e eficiência (Ef) obtidos nas fermentações utilizando inóculos produzidos em diferentes tipos de meio de cultivo. Letras iguais nas mesmas linhas, significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de significância 0,05.

Fermentação*	F1	F2	F3
tf (h)	18	18	18
AR₀ (g/L)	164,6 ± 6,5 a	171,1 ± 1,7 a	159,4 ± 0,6 a
AR_f (g/L)	36,6 ± 9,1 b	33,4 ± 5,5 b	33,2 ± 4,1 b
ΔAR (g/L)	128,0 ± 2,5 c	137,7 ± 3,8 c	126,2 ± 3,5 c
P₀ (g/L)	1,8 ± 0,0 d	2,4 ± 1,4 d	2,0 ± 0,7 d
P_f (g/L)	46,8 ± 4,0 e	37,7 ± 6,0 e	42,0 ± 2,0 e
ΔP (g/L)	45,0 ± 4,0 f	35,3 ± 7,4 f	40,5 ± 3,4 f
Y_{P/AR} (g/g)	0,35 ± 0,04 g	0,26 ± 0,05 g	0,32 ± 0,02 g
Q_p (g/(L h))	2,50 ± 0,22 h	1,96 ± 0,41 h	2,25 ± 0,19 h
Ef (%)	68,9 ± 7,5 i	50,1 ± 9,1 i	62,7 ± 3,4 i

*F1: inóculo meio sintético; F2: inóculo caldo concentrado sem glicose e adicionado de extrato de levedura e sais; F3: inóculo caldo concentrado sem glicose, extrato de levedura e sais.

Nos resultados apresentados na Tabela 5, verifica-se que o tipo de inóculo não influenciou o rendimento ($Y_{P/AR}$) e a produtividade (Q_P) em etanol, pois os valores foram estatisticamente iguais nas três fermentações. Ainda, percebe-se que todas as três fermentações iniciaram com a mesma quantidade de açúcares redutores (AR_0) e de etanol proveniente do inóculo (P_0), indicando que estes parâmetros não influenciaram no processo, pois também foram estatisticamente iguais. O rendimento estequiométrico máximo para a conversão de glicose em etanol ou rendimento teórico para produção de etanol é de 0,511 gramas de etanol/grama de glicose e/ou frutose (AR) consumidos (DARÉ, 2008) e, segundo Lee (1997), a faixa de rendimento considerada normal numa fermentação alcoólica a partir de biomassas vegetais é entre 0,30 e 0,40 g/g. Na Tabela 5, pode-se observar que todos os rendimentos ficaram dentro da faixa normal para esse tipo de fermentação.

A eficiência média (E_f - %), na conversão de AR em etanol, ficou em torno de 60%, independentemente do tipo de inóculo utilizado na fermentação.

Na Tabela 6 estão apresentados valores de rendimento e produtividade em etanol encontrados em diferentes trabalhos na literatura e comparados com os resultados do presente trabalho.

Tabela 4 - Rendimento ($Y_{P/AR}$) e produtividade (Q_P) em etanol obtidos por diferentes autores a partir da fermentação de biomassas da bananicultura utilizando diferentes composições do meio de cultivo.

Composição do meio de cultivo	Inóculo	$Y_{P/AR}$ (g/g)	Q_P (g/(L.h))	Ref*
Polpa, cascas, bagaço úmido e seiva de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i> + <i>P. tannophilus</i>	0,31	2,24	(1)
Polpa, cascas e bagaço úmido de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i> + <i>P. tannophilus</i>	0,40	1,09	(2)
Polpa, cascas e bagaço úmido de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i>	0,32	1,02	(2)
Polpa, cascas e farelo de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i>	0,35	2,72	(3)
Farelo de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i>	0,44	0,56	(4)
Farelo de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i> + <i>P. tannophilus</i>	0,57	0,28	(5)
Farelo de pseudocaule de bananeira	<i>S. cerevisiae</i>	0,46	0,82	(6)

*Valores médios (1) deste trabalho, (2) Uchôa et al., (2021); (3) Sandrin et al., (2018); (4) Guerrero et al., (2018); (5) Montagnoli et al., (2018); (6) Souza et al., (2017).

Analisando-se a Tabela 6, verifica-se que em termos de rendimento ($Y_{P/AR}$) Montagnoli (2017), utilizando somente farelo de pseudocaule de bananeira no meio de cultivo com *S. cerevisiae* e *P. tannophilus* chegou a 0,57 g/g, no entanto sua produtividade foi a menor. A produtividade média encontrada no presente estudo, foi de 2,24 g/(L.h) similar ao encontrado por Sandrin (2018) utilizando apenas *S. cerevisiae* em meio de cultivo composto por polpa, cascas e farelo de pseudocaule de bananeira.

Ao comparar os valores médios de rendimento e produtividade obtidos neste trabalho com a literatura (Tabela 6), é possível identificar a potencialidade do processo fermentativo independentemente do tipo de inóculo utilizado. Assim, sugere-se utilizar o meio de cultivo do inóculo da Fermentação 3, composto somente por caldo concentrado, sem adição de glicose e sais. Lembrando que este caldo concentrado é o mesmo que é utilizado no meio de cultivo para a produção de etanol.

4.2 Quantificação e caracterização dos resíduos gerados na produção de bioetanol

O meio de cultivo utilizado na produção de bioetanol era composto por 3 resíduos, o caldo de pseudocaule da bananeira, caldo das cascas de banana e caldo dos frutos rejeitados. Da obtenção deste meio cultivo foram gerados dois novos resíduos (Figura 6), o retido na filtração do caldo de pseudocaule (Resíduo sólido 1 - R1) e o retido na filtração do caldo de cascas (Resíduo sólido 2 - R2) e da filtração do caldo fermentado após a produção de bioetanol, foi obtido o Resíduo sólido 3 - R3.

Para obter 7,7 L de caldo concentrado, com 165 g/L de açúcares redutores inicial, utilizado na fermentação, foram preparados 7,5 L de caldo de pseudocaule, com geração de 3,8 kg (massa úmida) do R1 e 4,1 L de caldo de cascas, com geração de 2,7 kg (massa úmida) do R2. A massa, obtida na filtração do caldo fermentado foi de 1,2 kg (massa úmida) do R3. Ou seja, para obter 7,7 L do caldo concentrado foram gerados 7,7 Kg (3,8 + 2,7 + 1,2 Kg) de novos resíduos.

Esse volume de caldo concentrado (7,7 L) pode gerar 308,0 g de bioetanol considerando uma concentração média de 40,0 g/L (F1, F2 e F3 - Tabela 5) (5 °INPM ou 6,3 °GL na temperatura de 20 °C). Pode-se estimar, então, que para a produção de 1 m³ de caldo fermentado serão gerados em torno de 1000 kg (1 tonelada) de resíduo úmido (Úchoa, 2018) e 40.000 g de bioetanol. Essas estimativas são

relevantes para dimensionar a produção de resíduos e a quantidade de bioetanol obtida a partir do processo de fermentação.

Por sua vez, essa massa de bioetanol (40.000 g) corresponde a 43,5 L de bioetanol na graduação alcoólica de 920 g/L ou 95,5 °GL (graduação média do etanol combustível na faixa de graduação exigida pela Agência Nacional de Petróleo: 95,1 °GL a 96 °GL). Então, para a produção de 1 m³ desse bioetanol combustível serão gerados 22.988 Kg (~ 23 toneladas) de massa úmida de resíduos.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados da caracterização do Resíduo sólido 1 (R1), Resíduo sólido 2 (R2) e Resíduo sólido 3 (R3), em termos de umidade, ST, SV, SF, relação SV/ST, DQO, DBO₅, DBO₅/DQO, análise elementar (C, N, S e H), relação C:N.

Tabela 5 - Caracterização física e química dos resíduos sólidos R1, R2 e R3. Letras iguais nas mesmas linhas significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de significância 0,05.

Parâmetros	Unidade	R1	R2	R3
Umidade	%	75,49 ±2,97 <i>a</i>	84,17 ±0,85 <i>b</i>	77,89 ±2,02 <i>a</i>
Sólidos Totais	%	24,51 ±2,97 <i>a</i>	15,83 ±0,85 <i>b</i>	22,11 ±2,02 <i>a</i>
Sólidos Voláteis	%	23,49 ±2,83 <i>a</i>	14,41 ±0,84 <i>b</i>	20,25 ±2,01 <i>a</i>
Sólidos Fixos	%	1,02 ±0,15 <i>a</i>	1,42 ±0,03 <i>b</i>	1,86 ±0,03 <i>c</i>
SV/ST	-	95,85 ±0,13 <i>a</i>	91,01 ±0,43 <i>b</i>	91,54 ±0,69 <i>b</i>
DQO	(mg O ₂ /L)	346,00 ±4,00 <i>a</i>	349,50 ±2,50 <i>a</i>	1111,00 ±2,83 <i>b</i>
DBO₅	(mg O ₂ /L)	206,50 ±10,50 <i>a</i>	174,50 ±4,50 <i>b</i>	865,50 ±0,50 <i>c</i>
DBO₅/DQO	%	59,73 ±3,72 <i>a</i>	49,92 ±0,93 <i>b</i>	77,90 ±0,18 <i>c</i>
C (carbono total)	%	21,21 ±0,08 <i>a</i>	9,73 ±0,16 <i>b</i>	11,07 ±0,07 <i>c</i>
N (nitrogênio)	%	0,26 ±0,01 <i>a</i>	0,48 ±0,00 <i>b</i>	1,01 ±0,07 <i>c</i>
Relação C:N	-	81,6:1	20,3:1	11,0:1
S (enxofre)	ppm	527,99 ±13,33 <i>a</i>	465,96 ±3,79 <i>b</i>	1287,44 ±16,16 <i>c</i>
Relação C:N:S	-	402:5:1	209:10:1	86:8:1

*R1 - retido na filtração do caldo de pseudocaule; R2: retido na filtração do caldo de cascas; R3: retido da filtração do caldo fermentado alcoólico (vinhaça).

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 7, de um modo geral, pode-se notar que todos os resíduos apresentaram elevada umidade, tendo R2 o maior valor (84,17 %). Com relação ao pseudocaule, valores semelhantes foram observados por Maia (2013) que obteve uma umidade de 62,03% (base úmida) e Athayde (2015) que obteve uma umidade de 68,75% (base úmida) após o processo de prensagem. Já Santos (2019) determinou valores para os resíduos agroindustriais de frutas, umidade de 81,49%; 80,77% e 70,96% para casca de maracujá, bagaço de

laranja e bagaço de caju respectivamente, corroborando com os valores encontrados neste trabalho.

Como um dos parâmetros utilizados para verificar a potencialidade de produção de biogás utilizou-se a relação de sólidos voláteis por sólidos totais (SV/ST) e verificou-se que R1 apresentou o maior valor para esta relação, 95,85 (Tabela 7). No entanto, os resíduos R2 e R3, apresentaram, também, valores elevados para a relação SV/ST, sem diferença estatisticamente significativa, em torno de 91,3. A relação SV/ST indica a proporção de matéria orgânica que pode ser transformada em biogás durante o processo de digestão anaeróbia, ou seja, quanto maior a proporção de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais, maior será a quantidade de biogás produzida (CÉ, 2019).

O estudo realizado por Arreola-Vargas et al., (2016) apresentada a recuperação de energia da digestão anaeróbica com o hidrolisados de bagaço de Agave, com valores da relação de SV/ST acima de 70, onde aproximadamente 60% do DQO inicial foi convertido em metano. Shen et al., (2013) relata valores de SV/ST próximo a 94, onde realizou a codigestão de resíduos de frutas e vegetais e resíduos alimentares em várias proporções de carga orgânica, observando em termos de produção de CH₄ a diminuição de SV à medida que os níveis de carga orgânica aumentaram. Já Varol e Ugurlu, (2016) utilizaram da microalga *Spirulina platensis* como fonte de energia renovável tiveram reduções de 89-93% SV, com produção de biogás entre 210 e 260 mL_N/g_{SV} com relação de SV/ST acima de 86.

De acordo com Jouanneau et al. (2014) partir da razão entre DBO₅ e DQO é possível esperar que o resíduo de maior biodegradabilidade seja o R3, que apresenta índice percentual desta razão 77,9%. Para os sólidos retidos na filtração do caldo de cascas (R2) esse valor foi de 59,73% e para os sólidos retidos na filtração do pseudocaule (R1), 49,92%.

O carbono é a principal fonte de energia para as atividades metabólicas e crescimento dos micro-organismos, geralmente encontrado em grandes quantidades em resíduos lignocelulósicos. O nitrogênio é o principal elemento inorgânico requerido para o crescimento e metabolismo dos micro-organismos e após o carbono, o nitrogênio é o nutriente mais importante para o metabolismo dos micro-organismos (CHERNICHARO, 1997; FNR, 2010). De acordo com a Tabela 7, a quantidade de carbono encontrada nos três resíduos foi diferente. O resíduo R1, apresentou a maior quantidade de C (21,21%), enquanto nos resíduos R2 e R3 os valores de 9,73% e

11,07%, foram encontrados, respectivamente. Já, a maior quantidade de nitrogênio foi encontrada no R3, com 1,01%.

As relações C:N apresentaram grandes variações entre os três resíduos (Tabela 7). Os resíduos R2 e R3 apresentaram valores de 20,3:1 e 11,0:1, respectivamente, de acordo com a faixa relatada na literatura (10-30:1) para um maior rendimento de metano em reatores anaeróbios (FNR, 2010; FORSTER-CARNEIRO; PÉREZ; ROMERO, 2008). Já, para o R1, que apresentou um valor mais elevado para a relação C:N (81,6:1) constata-se que este resíduo é menos favorável à digestão anaeróbia, pois o rendimento de metano não atinge o pico máximo devido a redução da atividade metabólica dos micro-organismos e como consequência, o carbono não é totalmente degradado (FNR, 2010).

A literatura apresenta como relação ótima de macronutrientes de 600:15:3 (C:N:S) (FNR, 2010) e 500-1000:15-20:3 (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2010). Na Tabela 7, pode-se verificar que para R1 a relação de C:N:S foi de 402:5:1 (1206:15:3) e para R2 esta relação foi de 209:10:1 (627:30:3), valores estes similares à literatura. Já, R3, por conter a maior quantidade de enxofre (1287,44 ppm) resultou na relação C:N:S de 86:8:1 (258:24:3), diferente daquela apresentada como ótima na literatura em termos de carbono (C). De acordo com Kunz, Steinmetz e Amaral (2019) a presença de enxofre no meio em excesso, pode causar a precipitação de alguns nutrientes traço e alguns metais essenciais ao processo. Além disto, quantidades em excesso de S podem favorecer uma maior produção de sulfeto de hidrogênio (H₂S), gás altamente tóxico e corrosivo.

4.3 Potencial bioquímico de biogás-metano (PBB-PBM)

A composição dos principais gases do biogás para o controle de celulose microcristalina (CMC), para o resíduo retido na filtração do caldo de pseudocaule (Resíduo sólido 1 - R1), o resíduo retido na filtração do caldo de cascas (Resíduo sólido 2 – R2) e o resíduo da filtração do caldo fermentado após a produção de bioetanol (Resíduo sólido 3 – R3) está apresentada na Tabela 8.

Tabela 6 - Composição do biogás após digestão anaeróbia em termos de metano (CH₄), gás carbônico (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) para o controle CMC e para os resíduos R1, R2 e R3.

Parâmetro	Unidade	Controle CMC	R1	R2	R3
CH ₄	%	53	44	58	57
CO ₂	%	45	32	40	40
H ₂ S	ppm	172	115	151	783

Observa-se na Tabela 8 que em termos de CH_4 , os resíduos R2 e R3 apresentaram os maiores percentuais, 58 e 57%, respectivamente. Valores estes similares ao encontrado no controle CMC (53%). Cabe lembrar que a composição aproximada de CH_4 esperada na produção de biogás quando carboidratos são utilizados como substrato é de 50% (HOLLIGER et al., 2016; VDI 4630, 2006). Por outro lado, observa-se uma menor produção de CH_4 no R1, pois o pseudocaule da bananeira contém fibras e lignina, que são difíceis de serem degradados pelas bactérias durante a digestão anaeróbica, resultando em menor produção de biogás (JI et al., 2017). Já, os resíduos R2 e R3, compostos por frutos e cascas de banana, que originalmente são ricos em amido e celulose, sendo esses dois tipos de carboidratos facilmente decompostos por bactérias durante a digestão anaeróbia, apresentaram uma maior produção de metano.

Verifica-se ainda, na Tabela 8 que percentuais similares de CO_2 , também foram encontrados entre o controle CMC e os resíduos R2 e R3. Abatzoglou e Boivin, (2009) afirmam que a remoção do dióxido de carbono somente se faz necessária para utilização do biogás como gás veicular ou para introdução na linha de gás natural, com o objetivo de ampliar a concentração de metano.

Em termos de H_2S , observa-se que R3 apresentou teor muito superior aos demais (783 ppm). O H_2S é considerado uma impureza no biogás, no entanto, é comumente produzido (ZICARI, 2003). A combustão do H_2S junto com o biogás resulta na produção de dióxido de enxofre (SO_2) que causa severos problemas ambientais, sendo necessário utilizar filtração (KUNZ, STEINMETZ e AMARAL, 2019). Pode-se, também, utilizar algum processo de dessulfuração antes da combustão (COLTURATO, 2015; ZICARI, 2003). Ainda, segundo Colturato (2015) elevadas concentrações de enxofre podem ser encontradas na vinhaça e podem resultar em um biogás com valores de H_2S que podem superar os 30.000 ppm. Geralmente, deve-se removê-lo a concentrações inferiores a 200 ppm. Assim, verifica-se que apesar do R3 apresentar 1287 ppm de S (Tabela 7) que resultou em 783 ppm de H_2S (Tabela 8), este valor está bastante abaixo do já encontrado na literatura. Em relação ao biogás obtido nos resíduos R1 e R2, estes não precisariam passar por um processo de dessulfuração.

Os perfis cinéticos da produção de biogás e metano estão apresentados na Figura 7.

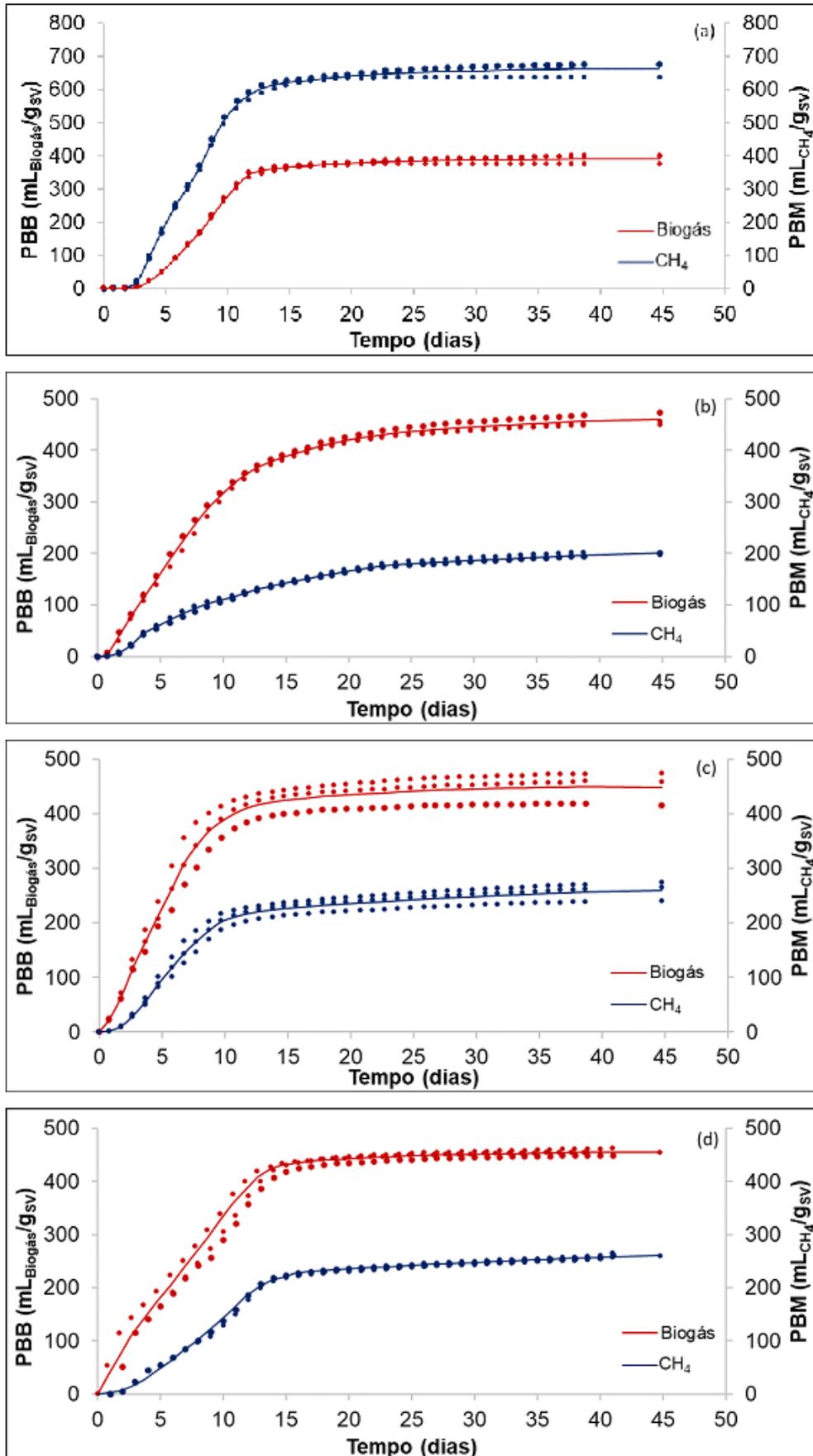


Figura 7 - Perfil da produção de biogás (PBB) e metano (PBM) por grama de sólido volátil acumulado para o controle CMC (a), resíduo R1(b) , R2 (c) e R3 (d).

Observando-se a Figura 7, percebe-se que tanto R2 (Figura 7c) quanto R3 (Figura 7d) alcançaram a estabilização da produção de biogás e metano, mais rapidamente do que R1 (Figura 7b). Isto pode estar relacionado, como já discutido anteriormente, pela maior facilidade das bactérias em degradar estes tipos de resíduos cuja composição apresentam cascas e polpa de banana (CASTRO-GÓMEZ; TAMBURINI; CAL-VIDAL, 1988). Considerando como critério de estabilização do volume diário de biogás menor que 1% (VDI 4630, 2016) por três dias consecutivos (HOLLIGER et al., 2016), chegou-se a 21 dias para o controle CMC, 18 dias para R1, 15 dias para R2 e 14 dias para R3.

No entanto, quando o tempo de estabilização foi definido pelas curvas de velocidade de produção de biogás (dV/dt) (Figura 8), esse tempo foi cerca de 24 dias tanto para o CMC quanto para os resíduos R1, R2 e R3.

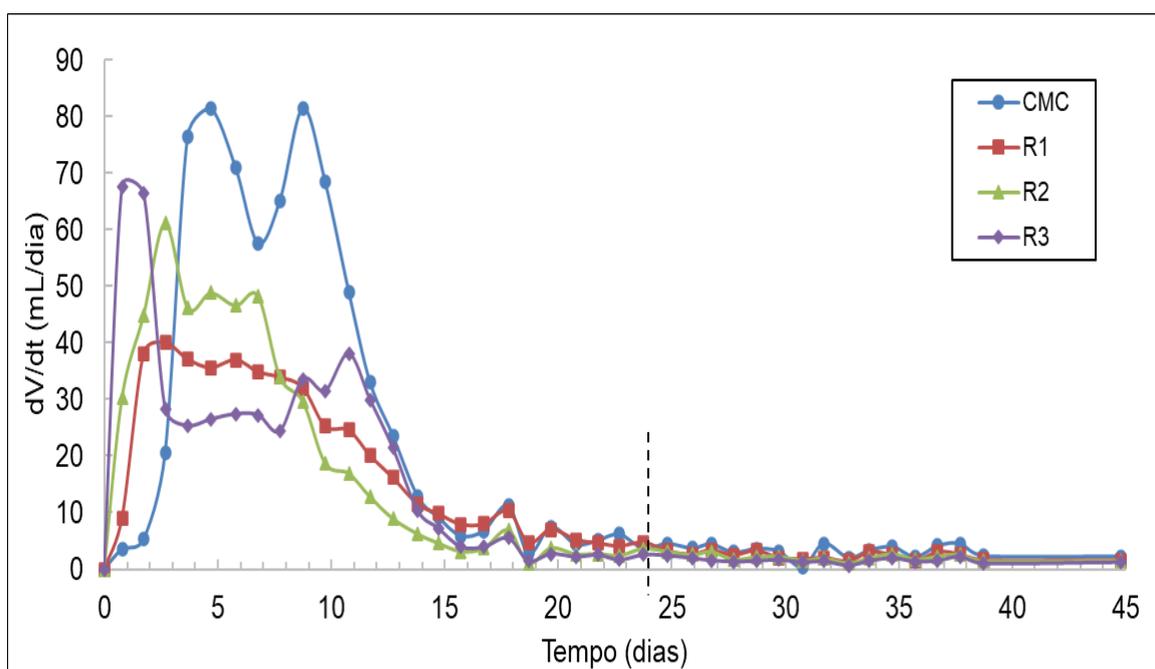


Figura 8 - Perfis de velocidade (dV/dt) de PBB (mL_{biogás}/g_{sv}) obtidos para o controle CMC e para os resíduos R1, R2 e R3.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores do potencial bioquímico de biogás (PBB) e de metano (PBM) obtidos para o controle CMC, para os resíduos R1, R2 e R3. Para o controle positivo (inóculo) apenas o PBB foi determinado.

Tabela 7 – Potencial bioquímico de biogás (PBB) e de metano (PBM) para o controle CMC e para os resíduos R1, R2 e R3. Letras iguais nas mesmas linhas significam médias sem diferença significativo pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.

Ensaio	Controle Positivo	Controle CMC	R1	R2	R3
PBB (mL/g _{sv})	23±2 <i>a</i>	664±23 <i>b</i>	459±12 <i>c</i>	449±30 <i>c</i>	455±7 <i>c</i>
PBM (mL _{CH₄} /g _{sv})	-	352±12 <i>a</i>	201±5 <i>b</i>	260±18 <i>c</i>	260±4 <i>c</i>

O ensaio que usou apenas o inóculo (controle positivo), na digestão anaeróbia, produziu 23 mL/g_{sv}, valor inferior ao obtido nos demais ensaios. Observa-se, então, que o inóculo, por apresentar PBB correspondente a apenas 3,5% do PBB do Controle CMC e 5,0% do PBB dos resíduos R1, R2 e R3, não influenciou o potencial bioquímico de biogás e de metano.

Para verificar a atividade satisfatória do inóculo mesofílico o valor do PBB do controle CMC deve ser superior a 85% do valor padrão 750 mL/g_{sv}, ou seja, acima de 634 mL/g_{sv} (VDI 4630, 2006). Assim, verifica-se a atividade biológica do inóculo foi satisfatória pois o controle CMC apresentou um valor de PBB de 664 mL/g_{sv}.

Comparando os valores de PBB do controle CMC com os resíduos R1, R2 e R3, verifica-se que o controle CMC (Tabela 9) foi estatisticamente superior aos resíduos R1, R2 e R3, que por sua vez, não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si ficando em torno de 454 mL/g_{sv}. Este valor de 454 mL/g_{sv} corresponde a 68% do PBB obtido com CMC. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que a celulose microcristalina (CMC), considerada um padrão na produção de biogás (VDI 4630, 2016), está mais facilmente disponível ao inóculo, uma vez que a celulose presente nos resíduos R1, R2 e R3 não sofreu tratamento para diminuição da sua cristalização.

Ainda, pelos resultados da Tabela 9, verifica-se que os resíduos R2 e R3 apresentaram o mesmo valor de PBM (260 mL_{CH₄}/g_{sv}), valor este maior que o obtido para R1 (201 mL_{CH₄}/g_{sv}) e menor daquele do controle CMC (352 mL_{CH₄}/g_{sv}). Valores de até 750 mL/g_{sv} e composição aproximada de 50% de CH₄ são esperados no que se diz respeito a produção de biogás quando carboidratos são utilizados como substrato (HOLLIGER et al., 2016; VDI 4630, 2006). Assim, verifica-se que, como o biogás proveniente dos resíduos R2 e R3 apresenta 58 e 57% de CH₄,

respectivamente, em sua composição, estes resíduos estão de acordo com o predito na norma VDI 4630 (2006).

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados em termos de produção de biogás (PBB) e de metano (PBM) de estudos a partir de diferentes resíduos.

Tabela 8 – Comparação dos valores de PBB e PBM a partir de diferentes substratos e inóculo.

Composição do substrato	Inóculo	PBB (mL/g _{sv})	PBM (mL _{CH₄} /g _{sv})	Ref*
Pseudocaule de bananeira – R1	Dejeto suíno, lodo anaeróbico de indústria de gelatina e esterco fresco de gado leiteiro.	459	201	(1)
Casca de banana – R2		449	260	
Filtração do caldo fermentado – R3		455	260	
Palha de milho	Efluente líquido de um sistema alimentado com resíduos municipais.	-	81,2	(2)
Palha de trigo			66,9	
Gramma			55,4	
Folhas (bordo)			40,8	
<i>Spirulina platensis</i>	Dejeto suíno, lodo anaeróbico de indústria de gelatina e esterco fresco de gado leiteiro.	-	326	(3)
<i>Spirulina platensis</i>	Lodo de uma estação de tratamento de águas residuais municipal.	640	-	(4)
Cascas de banana	Lodo anaeróbico de digestor anaeróbico utilizado para valorizar resíduos agroindustriais.	-	182	(5)
Casca de maracujá	Lodo de esgoto de estação de Tratamento de efluentes municipal.	190	104	(6)
Bagaço de laranja		232	94	
Torta de filtro usina cana-de-açúcar	Lodo anaeróbico de uma usina de cana de açúcar.	-	353	(7)
Vinhaça da produção de etanol de cana-de-açúcar		-	476	

*Valores médios (1) Deste trabalho; (2) Liew *et al.*, (2012); (3) Rempel *et al.*, (2019); (4) (Varol *et al.*, (2016); (5) Serna-Jiménez *et al.*, (2021); (6) Santos, (2019); (7) Volpi *et al.* (2022).

Verifica-se na Tabela 10 que os resultados em termos de PBB e PBM obtidos com resíduos da bananicultura, utilizados no presente trabalho foram superiores aos

obtidos a partir de resíduos semelhantes como palha de milho, palha de trigo, grama e folhas (bordo) (LIEW et al., 2012), casca de maracujá e bagaço de laranja (SANTOS, 2019). Logicamente, como já explanado, além das diferenças entre os substratos utilizados, os inóculos destes trabalhos foram bastante diferentes, isso ressalta a originalidade e o valor do presente trabalho, uma vez que não foram encontrados outros estudos que utilizassem esses mesmos tipos de resíduos como substrato. É importante ressaltar que os inóculos empregados nesses estudos também foram diferentes.

No presente estudo, para o resíduo R2, que corresponde a cascas de banana sem o caldo, foi encontrado o valor de 260 mL_{CH₄}/g_{SV}, ou seja, 42% maior ao obtido por Serna-Jiménez et al. (2015) (182 mL_{CH₄}/g_{SV}) que utilizaram cascas de banana, como substrato. Nestes dois exemplo o inóculo continha lodo anaeróbio.

No estudo realizado por Rempel et al., (2019) que utilizaram o mesmo tipo de inóculo, utilizado neste trabalho, mas como substrato a *Spirulina platenses*, foi encontrado o valor de PBM de 326 mL_{CH₄}/g_{SV}, 25% superior ao maior valor de PBM obtido no presente estudo, com os Resíduos sólidos 2 e 3. Quando o mesmo substrato foi utilizado com outro inóculo (VAROL et al., 2016) um valor de PBB de 640 mL_{CH₄}/g_{SV} foi encontrado, valor este cerca de 40% superior ao PBB dos resíduos R1, R2 e R3.

Quando resíduos da produção de etanol por cana-de açúcar foram utilizados (Volpi et al., 2022), valores bastante elevados de PBM foram encontrados.

Observou-se que os resíduos sólidos (R1, R2 e R3) utilizados neste trabalho apresentaram valores de acordo com a literatura, reforçando sua relevância e contribuição para o campo de estudo (Tabela 10).

4.4 Simulação da produção de biogás

O modelo não linear de Gompertz foi ajustado às cinéticas do volume acumulado de biogás e os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 9 - Parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de Gompertz para fase “lag” (λ), velocidade máxima de produção (r_m), potencial bioquímico máximo de biogás (simulado) (A) e coeficiente de correlação (R^2) para os resíduos R1, R2 e R3. Letras iguais nas mesmas linhas significam médias sem diferença significativo pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.

Ensaio	R1	R2	R3
λ (dias)	0,60 \pm 0,25 a	0,62 \pm 0,07 a	0,00 \pm 0,00 b
r_m (mL/g _{sv} dia)	35 \pm 1 a	53 \pm 7 b	40 \pm 1 c
A (mL/g _{sv})	446 \pm 10 a	443 \pm 24 a	454 \pm 6 a
R^2	0,997	0,998	0,992

A fase adaptativa (“lag” - λ) dos três resíduos foi inferior a um dia com valores de 0,60 e 0,62 para os resíduos R1 e R2 respectivamente, o que seriam aproximadamente 15 horas, indicando que os microrganismos demoraram mais para se adaptar ao meio e começar a produzir biogás comparados ao R3 onde a fase “lag” foi inexistente (IBRAHIM, 2014; ZHAO et al., 2016)

Para a velocidade máxima de produção de biogás (r_m) observa-se que o resíduo R2 apresentou o maior valor de r_m (53 mL/g_{svd}) (Tabela 11). No entanto, os três resíduos (R1, R2 e R3) apresentaram velocidade máxima superior ao obtido por Santos (2019) que estudou o potencial de geração de biogás, a partir de resíduos agroindustriais de bagaço de laranja (29,02 mL/g_{svd}) e casca do maracujá (17,3 mL/g_{svd}). Sonwai et al., (2019) obtiveram r_m de 25,8 mL/g_{svd} ao utilizarem grama fresca como substrato.

Os respectivos valores médios dos potenciais máximos de produção de biogás (A - mL/g_{svd}) não apresentaram diferença estatisticamente significativa ficando em torno de 448 mL/g_{sv} para R1, R2 e R3. Esses valores foram estatisticamente iguais aos valores experimentais (454 mL/g_{sv} – Tabela 9), indicando que o modelo de Gompertz pode ser utilizado para ajustar as curvas de biogás para esses tipos de substrato.

Observa-se ainda um ajuste cinético satisfatório para o modelo, com coeficiente de correlação (R^2) de biogás elevados, superiores a 0,99, indicando que o modelo utilizado foi adequado para descrever os dados experimentais do teste PBB (ANGELIDAKI et al., 2009; DA SILVA et al., 2018).

A Figura 9 apresenta graficamente o perfil da produção acumulada de biogás dos resíduos R1, R2 e R3, comparando os dados experimentais com simulados utilizando o modelo matemático de Gompertz.

Observa-se nas Figuras 9(a) e 9(b) um bom ajuste para praticamente todo o período (45 dias). Para a Figura 9(c) o período inicial não apresentou um bom ajuste. É por este motivo que uma curva Gompertz é indicada como um dos modelos candidatos à modelação de curvas desse tipo, porque permite uma interpretação simples e facilitada e que vem sendo amplamente estudada (ARREOLA-VARGAS et al., 2016; CÉ, 2019; GASPARETO et al., 2020; QUEIROZ, 2001; SANTOS et al., 2015).

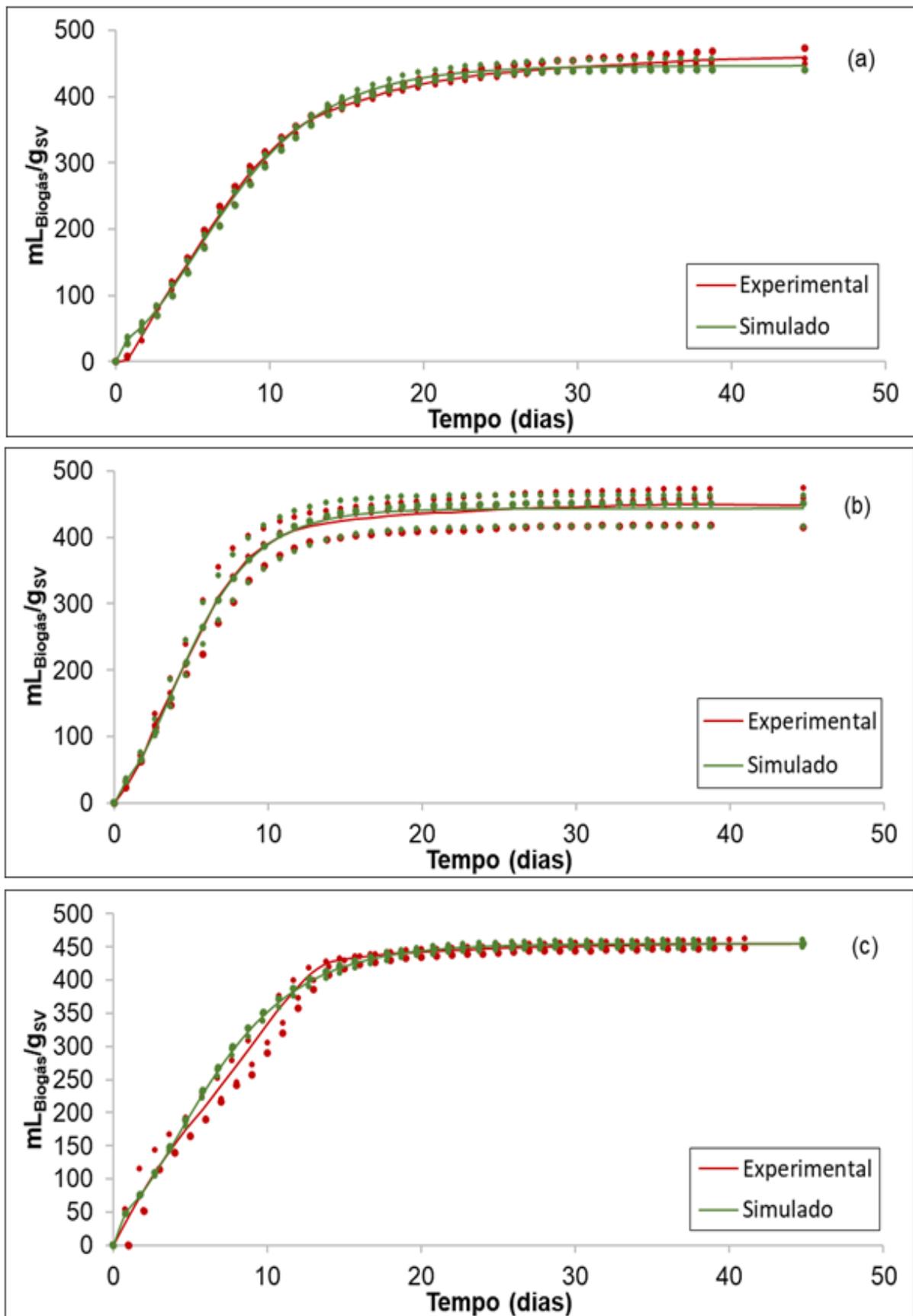


Figura 9 - Perfil da produção experimental e simulada do acúmulo de biogás para os resíduos R1(a) , R2 (b) e R3 (c).

4.5 Volume de biogás e metano gerado

Como visto no item 4.2, para obter 7,7 L de caldo concentrado para a produção de bioetanol foram gerados em massa úmida 3,8 kg do resíduo R1 e 2,7 kg do R2. A massa obtida na filtração do caldo fermentado gerou 1,2 kg do R3. Ou seja, para obter 7,7 L do caldo concentrado (Cc) foram gerados 7,7 Kg (3,8 + 2,7 + 1,2 Kg) de resíduos. Pode-se dizer então que a produção de bioetanol gerou os resíduos sólidos R1, R2 e R3 na proporção em massa úmida de 3,2 : 2,3 : 1,0, respectivamente, equivalente a 0,49 kg_{R1}/L_{Cc}, 0,35 kg_{R2}/L_{Cc} e 0,16 kg_{R3}/L_{Cc}.

Ainda, como visto no item 4.2, para a produção de 1 m³ de bioetanol serão geradas 23 toneladas de resíduos e para produzir 1 m³ de bioetanol são necessários 23 m³ de caldo concentrado. Tomando-se a relação entre a massa de resíduo por volume de caldo, temos que, na produção de 1 m³ de bioetanol serão gerados 11270 kg (11,27 t) do R1, 8050 kg (8,05 t) do R2 e 3680 kg (3,68 t) do R3. Considerando-se esses valores pode-se observar na Tabela 12 a projeção do volume e potencial de geração de energia elétrica de biogás e de metano gerados, tomando-se como base os valores de SV (Tabela 7), PBB, PBM (Tabela 9) e r_m (Tabela 11) obtidos para os resíduos R1, R2 e R3. Utilizou-se o valor de r_m nesta projeção pelo fato de que o ajuste do modelo cinético de Gompertz foi acima de 99% (Tabela 11), ou seja, muito próximo do experimental.

Tabela 10 – Projeção do volume (m³) e velocidade (m³/dia) de biogás e de metano gerados e potencial de geração de energia elétrica (EE) a partir dos resíduos R1, R2 e R3 prevendo a produção de 1 m³ de bioetanol.

Parâmetros	R1	R2	R3	Total
SV* (%)	23,49	14,41	20,25	-
PBB** (L _{Biogás} /kg _{SV})	459	449	455	-
PBM** (L _{CH₄} /kg _{SV})	201	260	260	-
r_m*** (L/kg _{SV} dia)	35	53	40	-
Resíduos produzidos (kg)	11270	8050	3680	23000
Biogás (m ³)	1215,1	520,8	339,1	2075
(m ³ /dia)	92,6	61,5	29,8	183,9
CH₄ (m ³)	532,1	301,6	193,7	1027,4
(m ³ /dia)	40,6	35,6	17,0	93,2
EE (kWh/dia)	84,4	74	35,3	193,7

*(Tabela 7), **(Tabela 9), *** (Tabela 11)

De acordo com os resultados da Tabela 12, é possível observar que R1 apresentou a maior produção diária de CH₄ (40,6 m³/dia) e o maior potencial de geração de energia elétrica (84,4 kWh/dia). Então, considerando somente esses valores, pode-se concluir que R1, resíduo sólido da produção de caldo do pseudocaule, é aquele que tem um maior potencial. Esse resultado já era esperado uma vez que foi este o resíduo que apresentou a maior relação de SV/ST (95,85 - Tabela 7). No entanto, de acordo com Uchôa, (2018), o pré-tratamento do bagaço úmido de pseudocaule, para a produção do caldo de pseudocaule, apresenta elevados custos e alta demanda de energia, representando 97% dos custos totais, como prensagem, trituração e filtragem, além dos custos com hidrólise ácida, neutralização e hidrólise enzimática.

Avaliando o resíduo R2 observa-se uma produção diária de CH₄ de 35,6 m³/dia e potencial de geração de energia elétrica de 74 kWh/dia, similar ao obtido com o R1. No entanto, cabe lembrar que as cascas de banana não passam por tratamento químico nem enzimático, ou seja, R2 apresenta menor custo de geração. Conforme exposto por Schlulz (2010), que tratou cascas de banana por hidrólise química, verificou ganhos percentuais em produção de CH₄ em torno de apenas 1 a 2% não sendo vantajoso. Portanto, é necessário apenas trituração e filtragem das cascas de banana.

Com relação ao H₂S (Tabela 8), tanto R1 quanto R2 apresentaram produções que se encontram dentro dos valores recomendados (item 4.3) não necessitando tratamento para remoção deste contaminante. Já, o resíduo R3, por ser o resíduo com a menor massa (3680 kg) teve conseqüentemente a menor produção diária de biogás e de CH₄ e o menor potencial de geração de energia elétrica dentre os três resíduos (Tabela 12). Ainda, ao avaliar a geração de H₂S, este resíduo foi o que apresentou um maior teor, 783 ppm (Tabela 8), acima de 200 ppm, devendo passar por processo de dessulfuração (COLTURATO, 2015) para que o gás metano possa ser utilizado de forma segura e eficiente. Outro ponto a ser levado em conta, é que a geração desse resíduo se dá após as etapas de concentração e fermentação dos caldos, conforme descritos por Uchôa, (2018), gerando também altos custos e alta demanda de energia, mostrando-se necessário estudos mais aprofundados com este resíduo.

Assim, se os resíduos forem utilizados separadamente para a geração de gás metano, sugere-se o resíduo R2, parte sólida na produção do caldo de cascas de

banana. Este resíduo além de apresentar valores diários de metano e energia similar a R1 e maior que R3, é o resíduo que menor custo demanda na sua geração.

Porém, os resíduos sólidos R1, R2 e R3 são gerados no processo de produção de bioetanol utilizando biomassa da bananicultura e, se os três resíduos fossem utilizados concomitantemente na geração de biogás, poder-se-ia ter uma produção diária de CH₄ de 93,2 m³/dia e potencial de geração de energia elétrica de 193,7 kWh/dia. No entanto, testes experimentais seriam necessários para confirmar estes valores, além de compreender melhor as relações de SV, ST, DBO, DQO, C, N, S, cinéticas de produção de biogás e sua composição.

Valores de produção diária de CH₄ e potencial de geração de energia elétrica são importantes para avaliar o desempenho dos sistemas de produção de gás metano. A produção diária de CH₄ pode ser usada para calcular a capacidade do sistema em atender as necessidades energéticas de uma determinada instalação. Já o potencial de geração de energia elétrica pode ser utilizado para estimar a viabilidade econômica de um sistema, levando em consideração os custos envolvidos na produção e uso da eletricidade gerada (PARSAEE; KIANI DEH KIANI; KARIMI, 2019).

Considerando a produção de bananas em Santa Catarina em 2021 (714.252.000 kg) de acordo com EPAGRI/CEPA e utilizando os valores obtidos neste trabalho, pode-se estimar uma produção de biogás de 64.437.952,2 m³, produção de CH₄ de 31.905.326,3 m³ e potencial de geração de energia elétrica de 6.015.244 kWh/dia. Na microrregião de Joinville, destacada como a principal produtora de banana em Santa Catarina, em 2021 a produção foi de cerca de 354.000.000 kg (EPAGRI/CEPA) sendo assim, resultaria em uma produção de biogás estimada em 31.936.956,5 m³, produção de CH₄ de 15.813.026,1 m³ e potencial de geração de energia elétrica de 2.981.295,6 kWh/dia.

Porém, é preciso ressaltar que a seleção dos resíduos com maior potencial de geração de energia depende de outros fatores, como disponibilidade e custo do tratamento dos resíduos e da tecnologia de aproveitamento do biogás gerado. Uma análise mais detalhada e abrangente é necessária para determinar quais resíduos têm maior potencial de produção de energia em uma determinada situação.

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado comparou o desempenho das leveduras *Saccharomyces cerevisiae* e *Pachysolen tannophilus* em três fermentações diferentes. Os resultados obtidos demonstraram que o tipo de inóculo utilizado não teve impacto significativo no rendimento, produtividade e eficiência na produção de bioetanol. Com base nesses resultados, sugere-se o uso do meio de cultivo da Fermentação 3, que consiste apenas de caldo concentrado, sem adição de glicose e sais. Esse meio de cultivo é o mesmo utilizado na produção de bioetanol, o que indica sua viabilidade para fins práticos.

O volume de caldo concentrado produzido (7,7 L) foi capaz de gerar 308,0 g de bioetanol, considerando uma concentração média de 40,0 g/L. Com base nos resultados obtidos, estima-se que a produção de 1 m³ de caldo fermentado resultará em aproximadamente 1 tonelada de resíduo úmido e 40.000 g de bioetanol. Essa quantidade de bioetanol equivale a 43,5 litros considerando uma graduação alcoólica de 920 g/L ou 95,5 °GL.

Os três resíduos analisados apresentaram alta umidade, com destaque para o R2. A relação SV/ST indicou potencialidade de produção de biogás, sendo que o R1 teve a maior proporção de sólidos voláteis. A quantidade de carbono, variou entre os resíduos, com o R1 apresentando a maior quantidade. Os resíduos R1 e R2, apresentaram relações de C:N:S similares àquelas apresentadas como ótimas na literatura, enquanto para R3, houve uma relação diferente em termos de carbono. As relações C:N variaram, sendo favoráveis para R2 e R3, mas menos favoráveis para R1 na digestão anaeróbia. Os resíduos analisados não atenderam completamente à relação ótima de macronutrientes sugerida pela literatura, especialmente em relação ao enxofre para o R3. A presença excessiva de enxofre pode ter efeitos adversos no processo de digestão anaeróbia.

Na produção de metano, os resíduos R2 e R3, mostraram que são mais adequados devido ao teor de CH₄ mais elevado (260 mL_{CH4}/g_{SV}) que o R1 (201 mL_{CH4}/g_{SV}).

O modelo não linear de Gompertz foi capaz de descrever satisfatoriamente as cinéticas de produção de biogás dos três resíduos sólidos estudados (R1, R2 e R3) com coeficientes de correlação superior a 0,99.

Projetando uma produção de 1 m³ de bioetanol seriam geradas 23 toneladas de resíduos sólidos R1 (11270 kg), R2 (8050 kg) e R3 (3680 kg).

O R1 apresentou a maior produção diária de CH₄ (40,6 m³/dia) e o maior potencial de geração de energia elétrica (84,4 kWh/dia). O R2 apresentou uma boa produção diária de CH₄ (35,6 m³/dia) e potencial de geração de energia elétrica (74 kWh/dia). O R3 apresentou a menor produção diária de CH₄ e potencial de geração de energia elétrica dentre os três resíduos.

A produção de biogás utilizando os três resíduos sólidos concomitantemente apresentou a maior produção diária de CH₄ (93,2 m³/dia) e o maior potencial de geração de energia elétrica (193,7 kWh/dia), porém testes experimentais são necessários para confirmar estes valores.

A escassez de estudos na literatura, com os resíduos utilizados neste trabalho, ressalta a sua contribuição inovadora. Os resíduos sólidos (R1, R2 e R3) apresentaram valores de PBB e PBM superiores aos encontrados na literatura com resíduos semelhantes, fortalecendo a relevância para este campo de estudo.

Assim, como continuidade deste trabalho sugere-se um experimento utilizando os três resíduos sólidos R1, R2 e R3 na proporção em que são gerados (3,2 : 2,3 : 1,0), respectivamente, para confirmar os valores projetados em PBM e EE. Ainda, com base nestes resultados fazer uma análise de sustentabilidade energética dos dois processos combinados, produção de bioetanol e biogás.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 3, n. 1, p. 42–71, jan. 2009.
- ACHINAS, S.; EUVERINK, G. J. W. Consolidated briefing of biochemical ethanol production from lignocellulosic biomass. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 23, p. 44–53, 2016.
- ADITIYA, H. B. et al. Second generation bioethanol production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 631–653, 2016.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Balço de energia mundial**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>>. Acesso em: 4 jun. 2021.
- ALI, R. S. Biogas Production from Poultry Faeces. **Innovative Energy & Research**, v. 07, n. 04, 2018.
- ANEEL. **Parte III Fontes não-renováveis: derivados de petróleo**. [s.l: s.n.].
- ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009.
- AQUILA, G. et al. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, n. August, p. 1090–1098, 2017.
- ARISTARÁN, L. et al. Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora. **RedBioLAC**, n. September, p. 20–27, 2018.
- ARREOLA-VARGAS, J. et al. Single and two-stage anaerobic digestion for hydrogen and methane production from acid and enzymatic hydrolysates of Agave tequilana bagasse. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 2, p. 897–904, jan. 2016.
- ASPENTECH. **Aspen HYSYS - User guide** Cambridge, 2017.
- ASTM E1755-01. Standard Test Method for Ash in Biomass. 2020.
- ASTM E871-82. Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. 2019.
- ASTM E872–82. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. 2019.
- ATHAYDE, C. S. **Análise Dos Resíduos Gerados Pela Bananicultura Como Possível Fonte De Geração De Energia**. Belo Horizonte: UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- BERNAT, K. et al. Biogas production from different size fractions separated from solid waste and the accompanying changes in the community structure of methanogenic Archaea. **Biochemical Engineering Journal**, v. 100, p. 30–40, ago. 2015.
- BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **INTERCIÊNCIA**, v. 43, n. 10, p. 680–688, 2018.
- BP ENERGY (BRITISH PETROLEUM). Energy Outlook 2020 edition - Insights from the Rapid, Net Zero and Business-as-usual scenarios – Brazil. **BP Energy Outlook 2020 edition**, p. 1–2, 2022.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

CARLOS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, D. M.; YASER GARCÍA LÓPEZ, M. Use of basic and specific pre-treatments for the biogas production. Revision and analysis Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás. Revisión y análisis. **Scientia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 2071–54, 2014.

CARLSSON, M.; LAGERKVIST, A.; MORGAN-SAGASTUME, F. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. **Waste Management**, v. 32, n. 9, p. 1634–1650, 2012.

CASTRO-GÓMEZ, R. J. H.; TAMBURINI, E. R.; CAL-VIDAL, J. Álcool De Resíduos De Frutas Tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 23, n. Souza 1972, p. 1151–1159, 1988.

CÉ, A. **Caracterização Da Cama De Aviário De Peru E Potencialidade De Produção De Biogás**. Farnsico Beltrão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 1997.

CHIARAMONTI, D. et al. Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 25–35, nov. 2012.

COELHO, S. T. et al. Programa De Uso Racional De Energia E Fontes Alternativas – Purefa. **An. 5. Enc. Energ. Meio Rural**, 2004.

COLTURATO, L. F. DE D. B. **Dessulfuração De Biogás Da Metanização Da Vinhaça: Uma Nova Abordagem Para Remoção De Altas Concentrações De H₂S**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

CONVERTI, A. et al. Effect of temperature on the microaerophilic metabolism of *Pachysolen tannophilus*. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 28, n. 4–5, p. 339–345, mar. 2001.

COSTA, A. A.; SOTO, F. R. M. TRATAMENTO DO DEJETO DE SUÍNO POR BIODIGESTÃO ANAERÓBIA. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 3, p. 801, 27 set. 2018.

COSTA, A. G. et al. Geração de metano a partir de resíduos lignocelulósicos oriundos da produção do biocombustível: revisão. **Revista DAE**, v. 62, n. 194, p. 36–51, 2014.

CUNHA, S. R. DA. **Desenvolvimento de biodigestor anaeróbico com sistema eletrônico de controle de temperatura**. Recife - PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

DA SILVA, C. et al. Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation. **Waste Management**, v. 71, p. 19–24, 2018.

DE MELO, C. A.; JANNUZZI, G. D. M.; BAJAY, S. V. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 222–234, ago. 2016.

DE PRÁ, M. C. et al. Simultaneous removal of TOC and TSS in swine wastewater using the partial nitrification process. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 87, n. 12, p. 1641–1647, 2012.

DE SOUZA, E. L. et al. The Influence of Different Strategies for the Saccharification of the Banana Plant Pseudostem and the Detoxification of Concentrated Broth on Bioethanol Production. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 183, n. 3, p. 943–965, 2017.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. 2.ed. ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.

DIN38414. **Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)**Berlin, 1985.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ENERGETICA>>. Acesso em: 6 abr. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). Balanço Energético Nacional 2020. **Rio de Janeiro : EPE**, p. 7–295, 2020.

EPAGRI/CEPA. **Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2020-2021**. v. 1 ed. Florianópolis: [s.n.].

ERNANDES, F. M. P. G.; GARCIA-CRUZ, C. H. Zymomonas mobilis: Um microrganismo promissor para a fermentação alcoólica. **Semina:Ciencias Agrarias**, v. 30, n. 2, p. 361–380, 2009.

EXLER, R. B.; SAMPAIO, L. P.; TEIXEIRA, L. P. B. **Bioenergia : um diálogo renovável Volume 2**. Salvador: [s.n.]. v. 2

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Value of Agricultural Production**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>>. Acesso em: 8 fev. 2022.

FEDERIZZI, M. **Potencialidade do uso de resíduos lignocelulósicos da bananicultura como substrato de fermentação do processo de metanização**. Joinville: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, 2008.

FERREIRA, J. ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO: definição e perspectivas. **Revista Conexão Eletrônica**, v. 12, n. 1, 2015.

FNR. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. - Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização. **Probiogás**, p. 236, 2010.

FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Anaerobic digestion of municipal solid wastes: Dry thermophilic performance. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8180–8184, nov. 2008.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, n. November 2018, p. 146–157, 2019.

GASPARETO, T. C. et al. Pre-treatment Strategies for Value Addition in Poultry Litter. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, n. May, p. 1–11, 2020.

GOMES, M. **Produção de biogás a partir de bagaço de cana-de-açúcar após pré-tratamento com ácido cítrico diluído**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

GUERRERO, A. B. et al. GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. **Waste and Biomass Valorization**, v. 7, n. 2, p. 405–415, 10 abr. 2016.

GUERRERO, A. B.; BALLESTEROS, I.; BALLESTEROS, M. The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. **Fuel**, v. 213, n. April 2017, p. 176–185, 2018a.

GUERRERO, A. B.; BALLESTEROS, I.; BALLESTEROS, M. The potential of agricultural banana waste for bioethanol production. **Fuel**, v. 213, p. 176–185, fev. 2018b.

- GUO, J. et al. Optimization of acid pretreatment and enzymatic hydrolysis on the production of ethanol fuel from waste banana peels. **Energy & Environment**, v. 29, n. 8, p. 1354–1364, 30 dez. 2018.
- HAGHIGHI MOOD, S. et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 77–93, nov. 2013.
- HERRMANN, H. W. et al. Biogás como Alternativa Energética para Resíduos Industriais. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 86–101, 2015.
- HOLLIGER, C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 14 dez. 2016.
- HOLLIGER, C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests: A commentary. **Water Science and Technology**, v. 83, n. 1, p. 247–250, 2021.
- HOPFNER, S. A. **Produção de Etanol por diferentes espécies de micro-organismos a partir de mostos de cascas de banana (frescas ou sacarificadas) com diferentes concentrações de açúcares redutores**. Joinville: Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, 2015.
- HORI, T. et al. Detection of active, potentially acetate-oxidizing syntrophs in an anaerobic digester by flux measurement and formyltetrahydrofolate synthetase (FTHFS) expression profiling. **Microbiology**, v. 157, n. 7, p. 1980–1989, 2011.
- IBRAHIM, M. A.-R. Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. **African Journal of Biotechnology**, v. 13, n. 16, p. 1745–1755, 2014.
- ISLAM, M. Z. et al. Bioethanol Production from Banana Pseudostem by Using Separate and Cocultures of Cellulase Enzyme with *Saccharomyces cerevisiae*. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, n. 4, p. 157–163, 15 jun. 2019.
- Jl, C. et al. A Review of the Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 183, n. 3, p. 906–922, 17 nov. 2017.
- JOUANNEAU, S. et al. Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. **Water Research**, v. 49, n. 1, p. 62–82, fev. 2014.
- JUNIOR, C. B. **Biogás: a energia invisível**. 2ª ed. ed. São Paulo - SP: [s.n.].
- JUNIOR, R. G. **Banicultura: Produção e exportações brasileiras (2014-2018)**. IX Congresso da APDEA e o III Encontro Lusófono em Economia, Sociologia, Ambiente e Desenvolvimento Rural - 15-18 oct. 2019. Lisboa/Oeiras. **Anais...**Lisboa: 2019Disponível em: <https://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/Artigos/Banicultura_prod_export_brasileira_2014_18.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2022
- KAMDEM, I. et al. Comparative biochemical analysis during the anaerobic digestion of lignocellulosic biomass from six morphological parts of Williams Cavendish banana (Triploid Musa AAA group) plants. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 29, n. 12, p. 2259–2270, 2013.
- KIGOZI, R.; ABOYADE, A.; MUZENDA, E. Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock. v. 1, n. 1, 2014.
- KIM, S. B.; PARK, C.; KIM, S. W. Process design and evaluation of production of bioethanol and β -lactam antibiotic from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 172, p. 194–200, nov. 2014.

KOYAMA, M. et al. Inhibition of anaerobic digestion by dissolved lignin derived from alkaline pre-treatment of an aquatic macrophyte. **Chemical Engineering Journal**, v. 311, p. 55–62, mar. 2017.

KUMARI, D.; SINGH, R. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 877–891, jul. 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Airton Kunz, Ricardo Luis Radis Steinmetz, André Cestonaro do Amaral (editores Técnicos), 2019.

KUSMIYATI; SUKMANINGTYAS, R. P. Pretreated of banana pseudo-stem as raw material for enzymatic hydrolysis and bioethanol production. **MATEC Web of Conferences**, v. 154, p. 01035, 28 fev. 2018.

LIEW, L. N.; SHI, J.; LI, Y. Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 125–132, nov. 2012.

LIMA, H. Q. DE. Determination of kinetic parameters of the anaerobic digestion process of the organic residues of Santo André - SP by means of biochemical methane potential tests. p. 153, 2016.

LOZANO, C. J. S. et al. Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 704–711, fev. 2009.

MAIA, B. G. DE O. **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BANANICULTURA E DA RIZICULTURA NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES** Title No Title. Joinville: Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, 2013.

MANYI-LOH, C. E. et al. Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 10, n. 9, p. 4390–4417, 2013.

MCINERNEY, M. J. et al. Physiology, ecology, phylogeny, and genomics of microorganisms capable of syntrophic metabolism. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1125, p. 58–72, 2008.

MEDINA, J. C. **Banana cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos**. 3ª ed. ed. Campinas: [s.n.].

MILANEZ, A. Y. et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **Biogás | BNDES Setorial**, v. 47, p. 221–276, 2018.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. [s.l: s.n.]. v. 2

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco energético nacional**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>.

MOHD AZHAR, S. H. et al. Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. **Biochemistry and Biophysics Reports**, v. 10, n. February, p. 52–61, jul. 2017.

MONTAGNOLI, M. DA S. **Análise da Produção de Etanol 2G de Pseudocaule de Bananeira por Cocultura Microbiana em Bateladas Sequenciais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2017.

MONTAGNOLI, M. S.; SOUZA, O.; FURIGO JR, A. **PRODUÇÃO DE ETANOL 2G DE PSEUDOCAULE DE BANANEIRA POR COCULTURA MICROBIANA**. Blucher Chemical Engineering Proceedings. **Anais...**São Paulo: Editora Blucher, set. 2018Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/28447>>

NOGUEIRA, L.; COSTA, J. Opções tecnológicas em energia: uma visão brasileira. p. 51, 2012.

NUNES, D. L.; JOÃO PAULO BARBIERI; PINHO, A. F. DE. Análise do ritmo de trabalho em um processo produtivo através da Simulação Baseada em Agentes. **XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 782–793, 2015.

PALACIOS, A. S. et al. Ethanol production from banana peels at high pretreated substrate loading: comparison of two operational strategies. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, n. 5, p. 1587–1596, 18 out. 2021.

PAO, H. T.; FU, H. C. Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 381–392, 2018.

PARSAEE, M.; KIANI DEH KIANI, M.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, n. January, p. 117–125, mar. 2019.

PAULOVA, L. et al. **Lignocellulosic ethanol: Technology design and its impact on process efficiency**. [s.l.] Elsevier B.V., 2015. v. 33

PEREIRA, M. G. et al. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, ago. 2012.

PETRAVIĆ-TOMINAC, V. et al. Current state of biogas production in Croatia. **Energy, Sustainability and Society**, v. 10, n. 1, p. 8, 7 dez. 2020.

PHWAN, C. K. et al. Overview: Comparison of pretreatment technologies and fermentation processes of bioethanol from microalgae. **Energy Conversion and Management**, v. 173, n. May, p. 81–94, out. 2018.

POLPRASERT, C. **Organic Waste Recycling**. 4th. ed. London: [s.n.]. v. 6

QUEIROZ, S. DE C. Função Gompertz aplicada a modelagem de produção do biogás em biodigestor tipo batelada. **Aleph**, p. viii, 64 f. : il., 2001.

RANTA, O. et al. The agriculture – as energy producer. **Proenvironment Promediu**, v. 1, n. 2, p. 39–41, 2008.

REIS, A. DOS S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

REMPEL, A. et al. **Bioethanol from Spirulina platensis biomass and the use of residuals to produce biomethane: An energy efficient approach****Bioresource Technology**, 2019.

RUIZ, H. A. et al. A importância dos pré-tratamentos no conceito das biorrefinarias. **Boletim de Biotecnologia**, v. 2, n. 3, p. 3–6, 2013.

SÁNCHEZ, Ó. J.; CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 13, p. 5270–5295, 2008.

SANDRIN, B. M. **Fermentação alcoólica de mosto composto por diferentes combinações de biomassas residuais da bananicultura**. Joinville: Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, 2018.

SANDRIN, B. M.; SELLIN, N.; SOUZA, O. **Produção de bioetanol de mosto composto por diferentes combinações de biomassas residuais da bananicultura**. Congresso SulBiotec. **Anais...Canela**: 2018

SANTA-MARIA, M. et al. Assessing the Feasibility of Biofuel Production from Lignocellulosic Banana Waste in Rural Agricultural Communities in Peru and Colombia. **BioEnergy Research**, v. 6, n. 3, p. 1000–1011, 16 set. 2013.

SANTOS, L. A. DOS. **Potencial de geração de biogás a partir de resíduos agroindustriais de frutas**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SANTOS, J. T. S. et al. Estimativa da viabilidade de produção de biogás a partir do efluente de indústrias de laticínios no estado de Sergipe utilizando modelagem e simulação. **Exacta**, v. 13, n. 2, p. 229, 2015.

SAWARKAR, A. N. et al. Bioethanol from various types of banana waste: A review. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, p. 101092, jun. 2022.

SCHAEFFER, R. et al. Energia E Economia Verde : Cenários Futuros E Políticas Públicas Diretrizes Para Uma Economia Verde No Brasil. **Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável - FBDS**, p. 56, 2012.

SCHLULZ, M. A. **Produção de bioetanol a partir de rejeitos da bananicultura: polpa e cascas de banana**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, 2010.

SERNA-JIMÉNEZ, J. A. et al. Valorisation of banana peel waste as a precursor material for different renewable energy systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 155, n. October, 2021.

SHADBAHR, J.; KHAN, F.; ZHANG, Y. Kinetic modeling and dynamic analysis of simultaneous saccharification and fermentation of cellulose to bioethanol. **Energy Conversion and Management**, v. 141, p. 236–243, 2017.

SHARMA, B.; LARROCHE, C.; DUSSAP, C. G. Comprehensive assessment of 2G bioethanol production. **Bioresource Technology**, v. 313, n. January, p. 123630, 2020.

SHEN, F. et al. Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 80–85, set. 2013.

SIGRID, K.; MORAR, M. V. Integration of Lignocellulosic Biomass into Renewable Energy Generation Concepts. **ProEnvironment/ProMediu**, v. 2, n. 3, p. 32–37, 2009.

SIRAJUNNISA, A. R.; SURENHIRAN, D. Algae – A quintessential and positive resource of bioethanol production: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 248–267, 2016.

SONWAI, A. et al. Biochemical Methane Potential of Fresh and Silage 4190 Grass Under Thermophilic Conditions. ... **Engineering Journal**, v. 33, n. 1, p. 21–29, 2019.

SOUZA, G. D. A. L. E; MENEZES, G. C.; RODRIGUES, F. D. Á. Simulação E Análise Técnica Econômica Da Obtenção De Bioetanol a Partir Das Frações Sacarínea E Lignocelulósica Do Sorgo Sacarino. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 3, p. 507–532, 2017.

SOUZA, O. et al. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 438–443, 2010.

STEINMETZ, R. L. R. **Avaliação do Efeito de Drogas Veterinárias na Produção Específica de Biogás de Substratos Agropecuários**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

STEINMETZ, R. L. R. et al. Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 21–28, nov. 2016.

SZUHAJ, M. et al. Conversion of H₂ and CO₂ to CH₄ and acetate in fed-batch biogas reactors by mixed biogas community: A novel route for the power-to-gas concept. **Biotechnology for Biofuels**, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2016.

TAHERZADEH, M.; KARIMI, K. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1621–1651, 1 set. 2008.

TOLENTINO, N. M. DE C. et al. **Processos produtivos em biotecnologia**. 1. ed. São Paulo - SP: [s.n.].

TOOGOOD, H. S.; SCRUTTON, N. S. Discovery, Characterization, Engineering, and Applications of Ene-Reductases for Industrial Biocatalysis. **ACS Catalysis**, v. 8, n. 4, p. 3532–3549, 6 abr. 2018.

TRAKARNPAIBOON, S. et al. Enhanced production of raw starch degrading enzyme using agro-industrial waste mixtures by thermotolerant *Rhizopus microsporus* for raw cassava chip saccharification in ethanol production. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, v. 47, n. 8, p. 813–823, 2017.

UCHÔA, P. Z. **Etanol de biomassa da bananacultura: produção, simulação e análise econômica preliminar**. Joinville: Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, 2018.

UCHÔA, P. Z. et al. Ethanol from residual biomass of banana harvest and commercialization: A three-waste simultaneous fermentation approach and a logistic-economic assessment of the process scaling-up towards a sustainable biorefinery in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 174, p. 114170, dez. 2021.

VAROL, A.; UGURLU, A. Biogas Production from Microalgae (*Spirulina platensis*) in a Two Stage Anaerobic System. **Waste and Biomass Valorization**, v. 7, n. 1, p. 193–200, 28 fev. 2016.

VDI4630. **Fermentation of organic materials characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**, 2006.

VOLPI, M. P. C. et al. Use of Lignocellulosic Residue from Second-Generation Ethanol Production to Enhance Methane Production Through Co-digestion. **BioEnergy Research**, v. 15, n. 1, p. 602–616, 22 mar. 2022.

ZAMRI, M. F. M. A. et al. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, n. November 2020, p. 110637, mar. 2021.

ZANETTE, A. L. P. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

ZHAI, N. et al. Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. **Waste Management**, v. 38, n. 1, p. 126–131, abr. 2015.

ZHANG, B. et al. The Influence of pH on Hydrolysis and Acidogenesis of Kitchen Wastes in Two-phase Anaerobic Digestion. **Environmental Technology**, v. 26, n. 3, p. 329–340, mar. 2005.

ZHAO, C. et al. Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 52, p. 295–301, 2016.

ZICARI, S. M. **Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow - manure compost**. Ithaca: Cornell University, 2003.

APENDICE 1

Curvas padrão para análises de açúcares pelo método DNS

Tabela A 1 - Valores de absorvância a 540 nm de amostra contendo diferentes concentrações de glicose para a confecção da curva de calibração pelo método DNS.

Concentração (g/L)	Absorbância	AR
0,0	0,082	0,17
0,2	0,099	0,20
0,4	0,214	0,41
0,6	0,312	0,59
0,8	0,422	0,78
1,0	0,555	1,02

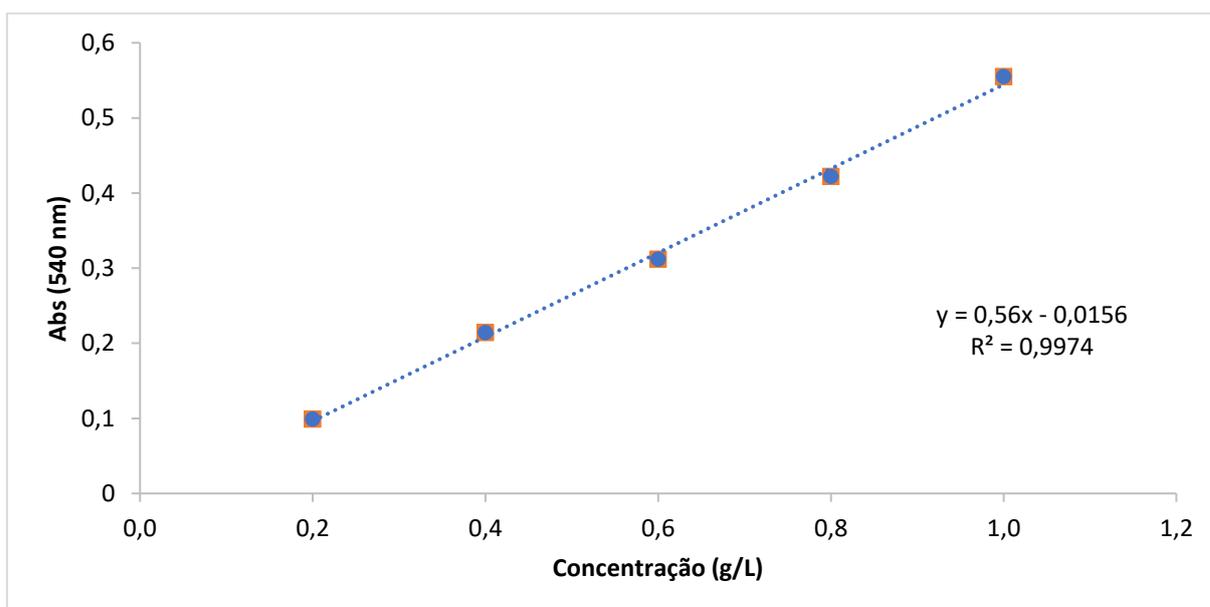


Figura A 1 - Curva de Calibração obtida a partir de diferentes concentrações de glicose pelo método DNS.

