

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

GEORGIA NAYANE SILVA BELO GOIS

**Codigestão do caldo de capim elefante *BRS-Capiaçu* com efluente de suinocultura
visando a produção de metano**

Maceió

2023

GEORGIA NAYANE SILVA BELO GOIS

**Codigestão do caldo de capim elefante *BRS-Capiaçu* com efluente de suinocultura
visando a produção de metano**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Professor Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Coorientador: Professor Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva.

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

A553u Gois, Georgia Nayane Silva Belo.

Codigestão do caldo de capim elefante BRS-Capiaçu com efluente de suinocultura visando a produção de metano / Georgia Nayane Silva Belo Gois. – 2023.

99 f. il. : figs.; tabs. color.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Co-orientador: Carlos Eduardo de Farias Silva.

Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de pós-Graduação em Engenharia Química. Maceió, 2023.

Inclui bibliografias.

1. Resíduos agropecuários. 2. Biomassa energética. 3. Bicarbonato de sódio. 4. Simplex lattice. 5. Codigestão anaeróbia. I. Título.

CDU:66.098.4

A Deus, pelo dom da VIDA.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram no caminhar de mais uma etapa da minha vida, em especial:

À Deus, pelo dom da vida e por me guiar nos momentos difíceis.

Aos meus amados pais, George e Zeneide, pelo amor, criação e dedicação. Por me compreender nos momentos difíceis e por sempre guardar uma palavra de conforto. Tudo o que sou hoje devo a eles.

A minha avó, Maria, por todo amor.

A meu esposo, Philippe, por todo amor, cuidado e companheirismo.

A meu sobrinho, Carlos Eduardo, por me ensinar a descobrir um amor incomparável.

A minha irmã Maria Eduarda, meus tios Kéu, Zezinho e Rodrigo, minhas tias Vaninha, Pretinha, Zilvaneide, Zanete, Karol, Zefinha, Leleia, Adriana, Neide e Bela e meus primos pela amizade, companhia e incentivo, vocês alegam minha vida.

A toda minha família, por todo amor, dedicação, paciência e, principalmente, por não deixar de acreditar em mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena, pela atenção, orientação e disponibilidade de ajudar sempre, pelos ensinamentos e pela cobrança. Muito obrigada!

À minha coorientador, Prof. Dr. Carlos, que também é meu amigo e incentivador pela atenção, paciência, cobrança, ensinamentos e disponibilidade. Muito obrigada!

À Taciana Chaves, Fernanda Peiter e Norma que não mediram esforços para ajudar, sempre estando presente com suas experiências, ensinamentos e amizade, foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, Thaila, Jefferson, Ilana, Victor, Gustavo, Tarso, Marília, Paula, Ruth, Bahia, Raul, João Felipe, Victor Pugliese, Gabi, Glaucia por todos os momentos de descontração e de apoio sempre que precisei.

Aos meus amigos do EJC, Chaves, Juh, Mila, George, Tatá, André, Flávia, Gregório. E a os amigos da Qualitex, Geovanio, Giovanna, Rafaela, Larissa, Aline, Eduardo e Galeguinho. Por sempre ter uma palavra de apoio.

Aos amigos que fiz no doutorado, Anamália, Danilo, Francine, Juliana Paulino, Kléber, Karlysson, Rodrigo, Julyane, Nadjane, por todos os momentos de aflição, companheirismo e descontração. Juntos, conseguimos realizar mais essa etapa.

Aos mestres, pelos ensinamentos e dedicação.

Ao o pessoal do apoio do CTEC, Dona Marlir, Flávia, Marcos e outros que no período de pandemia foram nossas companhias no bloco.

À CAPES, pelo financiamento do projeto.

À EMBRAPA e o Prof. Anderson Marafon, pelo fornecimento dos substratos e insumos para as análises.

Ao pessoal dos laboratórios LSA e LTBA, pelo companheirismo e trabalho em equipe.

Por fim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta conquista e que, por distração, não foram citados, o meu obrigado.

“Nada te perturbe, nada te espante, tudo passa, Deus não muda, a paciência tudo alcança; quem a Deus tem, nada lhe falta: só Deus basta.”

Santa Teresa d’Ávila.

RESUMO

Os resíduos gerados nas atividades agrícolas ou da agropecuária são fontes promissoras para produção de energia renovável. Atualmente a procura pela produção de biocombustíveis vêm crescendo e analisando o mercado agrícola e industrial brasileiro, observa-se a crescente produção de capim elefante e o consumo de carne suína. O capim elefante é uma biomassa energética vastamente utilizada para produção de briquetes e pellets, sendo o caldo do capim um resíduo resultante dessa produção. Os altos índices de nitrogênio presentes no efluente de suinocultura e o alto teor de carbono no caldo do capim elefante, podem representar uma combinação favorável para o processo de codigestão anaeróbia visando a produção de biogás. O objetivo deste estudo foi realizar a codigestão do capim elefante (*BRS-Capiaçu*) (CC) e efluente de suinocultura (ES) visando a produção de metano. A pesquisa foi realizada em reatores do tipo batelada. Em uma primeira etapa (E_1) sem a adição de alcalinizante, realizou-se um planejamento de mistura *Simplex Lattice*, onde fixou a DQO_{apl} em 4,0 g/L e variou-se as composições de mistura (0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20, 100:0, CC:ES) para avaliar os ajustes ao modelo linear e quadrático. Na segunda etapa (E_2) com a adição de bicarbonato de sódio, foi utilizado um planejamento experimental 2^3 com condições onde variou-se (4,0-8,0 $gDQO_{apl}/L$; 0,0-0,20 $g/g\ NaHCO_3$; 40:60-20:80 CC:ES), para avaliar o modelo linear. Na E_1 , os resultados mostraram eficiência de remoção de carboidratos entre 42 e 72,48%, de DQO entre 18,78 e 53,82% e de SVT entre 34,81 e 54,78%. A maior produção acumulada de metano foi referente a monodigestão do efluente de suinocultura com 2.728,11 mL_{CH_4} e em segundo 2.235,49 mL_{CH_4} na condição 20:80. Ainda na mesma condição, foram obtidos os valores máximos de rendimento e taxa de produção volumétrica de 3.921,90 $mL_{-CH_4}/gDQO_{apl}$ e 98,11 $mL_{-CH_4}/(gDQO_{apl}.d)$, respectivamente. O modelo quadrático teve o melhor ajuste em comparação ao linear e verificou-se que houve uma interação sinérgica entre si. Já na segunda etapa (E_2), o sistema apresentou um melhor resultado em comum referente a remoção de DQO, carboidratos e SVT na condição experimental F8 (8 $gDQO/L$; 0,2 $gNaHCO_3/g$; 40:60), com 76,09, 95,08 e 75,97%, respectivamente. Ainda na mesma condição, a maior produção cumulativa de metano foi de 2.637,39 mL_{CH_4} e alcançou um rendimento e taxa de produção volumétrica de 2.090,22 $mL_{-CH_4}/gDQO_{apl}$ e 40,32 $mL_{-CH_4}/(g-DQO_{apl}.d)$, respectivamente. Verificou-se na E_2 que a presença do bicarbonato de sódio foi primordial para o tamponamento do meio reacional, visto o pH se manteve na faixa adequada nas condições experimentais que o alcalinizante estava adicionado. O modelo linear obteve melhor ajuste para o potencial máximo e para fase lag. Diante disso, conclui-se que a tecnologia de codigestão anaeróbia foi satisfatória visto que, a digestibilidade dos resíduos envolvidos, o efluente de suinocultura (ricos em nitrogênio) e o caldo do capim elefante (alto teor de carbono), foi positiva para o tratamento de ambos e para a produção de metano.

Palavras-chave: resíduo agropecuário, biomassa energética, bicarbonato de sódio, *Simplex Lattice*, codigestão anaeróbia.

ABSTRACT

Waste generated in agricultural or farming activities are promising sources for the production of renewable energy. Currently, the demand for the production of biofuels is growing and analyzing the Brazilian agricultural and industrial market, we can observe the growing production of elephant grass and the consumption of pork. Elephant grass is an energetic biomass widely used for the production of briquettes and pellets, with the grass juice being a residue resulting from this production. The high levels of nitrogen present in swine effluent and the high carbon content in the elephant grass broth may represent a favorable combination for the anaerobic co-digestion process aiming at the production of biogas. The objective of this study was to carry out the co-digestion of elephant grass (BRS-Capiaçu) (CC) and swine effluent (ES) aiming at the production of methane. The research was carried out in batch-type reactors. In a first stage (E1) without the addition of alkalinizer, a Simplex Lattice mixture planning was carried out, where the COD apl was set at 4.0 g/L and the mixture compositions were varied (0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20, 100:0, CC:ES) to evaluate the fits to the linear and quadratic model. In the second stage (E2) with the addition of sodium bicarbonate, an experimental design 23 was used with conditions where it varied (4.0-8.0gDQOapl/L; 0.0-0.20g/g CNaHCO₃; 40: 60-20:80 CC:ES), to evaluate the linear model. In E1, the results showed carbohydrate removal efficiency between 42 and 72.48%, COD between 18.78 and 53.82% and SVT between 34.81 and 54.78%. The highest accumulated methane production was related to the monodigestion of swine effluent with 2,728.11 mLCH₄ and secondly 2,235.49 mLCH₄ in the 20:80 condition. Still under the same condition, maximum yield and volumetric production rate values of 3,921.90 mL-CH₄/gDQOapl and 98.11 mL-CH₄/(gDQOapl.d) were obtained, respectively. The quadratic model had the best fit compared to the linear model and it was found that there was a synergistic interaction between them. It was found in E2 that the presence of sodium bicarbonate was essential for buffering the reaction medium, as the pH remained in the appropriate range under the experimental conditions in which the alkalinizer was added. The linear model obtained a better fit for the maximum potential and lag phase. In view of this, it is concluded that the anaerobic co-digestion technology was satisfactory since the digestibility of the residues involved, the swine effluent (rich in nitrogen) and the elephant grass broth (high carbon content), was positive for the treatment. of both and for the production of methane.

Keywords: agricultural residue, energy biomass, sodium bicarbonate, Simplex Lattice, anaerobic codigestion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plantação de Capim Elefante - BRS Capiacu (a); Caldo do Capim Elefante Após o Processo de Extração(b).	20
Figura 2: Representação esquemática do aproveitamento dos dejetos suínos pela digestão anaeróbia e consequente mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).	25
Figura 3: Fluxograma com as etapas da co-digestão.	30
Figura 4: Representação da rede simplex para três componentes.	35
Figura 5: Pontos para obtenção dos modelos testados: a) linear; b) quadrático; c) cúbico simples;	35
Figura 6: Fluxograma das atividades desenvolvidas no experimento.	37
Figura 7: Sistema de válvulas acoplada nos reatores e Seringa utilizadas.	40
Figura 8: Produções cumulativas de CH ₄ ajustadas ao modelo de Gompertz Modificado em função da proporção de caldo de capim elefante (CC) e efluente de suinocultura (ES) no substrato (R1 = CC ₀ /ES ₁₀₀ , R2 = CC ₂₀ /ES ₈₀ , R3= CC ₄₀ /ES ₆₀ , R4 = CC ₆₀ /ES ₄₀ , R5 = CC ₈₀ /ES ₂₀ , R6 = CC ₁₀₀ /ES ₀)	48
Figura 9: Produções cumulativas de CH ₄ ajustadas ao modelo de Gompertz Modificado referente ao Planejamento Experimental utilizado na Etapa 2. [F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C _{DQO} ;CB;CC/ES)].	57
Figura 10: Gráfico de Pareto referente ao potencial máximo.	62
Figura 11: Gráfico de Pareto referente a taxa máxima de produção.	64
Figura 12: Gráfico de Pareto referente a fase lag.	65
Figura 13: Gráfico de Pareto referente ao rendimento volumétrico (A) e a taxa de produção volumétrica (B).	66
Figura 14: Gráfico de Médias Preditas para interação CBxDQO referente ao potencial máximo de metano (P).	67
Figura 15: Gráficos de Médias Preditas da interação CBxDQO referente a Taxa máxima de produção (Rm).	68
Figura 16: Gráficos de Médias Preditas pra interação CBxDQO referente à Fase Lag.	68
Figura 17: Gráfico de Médias Preditas para interação CCxDQO referente ao potencial máximo de metano (P).	69
Figura 18: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxDQO referente ao Rendimento Volumétrico.	70

Figura 19: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxDQO referente a Taxa de Produção Volumétrica.	70
Figura 20: Gráfico de Médias Preditas para interação CCxCB referente ao potencial máximo de metano (P).	71
Figura 21: Gráficos de Médias Preditas da interação CCxCB referente a Taxa máxima de produção (Rm).	72
Figura 22: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxCB referente ao Rendimento Volumétrico.	72
Figura 23: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxCB referente a Taxa de Produção volumétrica.	73
Figura 24: Gráficos de Médias Marginais pra interação do %CC referente à Fase Lag.	73
Figura 25: Gráfico Valores Preditos x Valores Observados referente ao Potencial Máximo de Produção.	77
Figura 26: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente a Fase Lag.	78
Figura 27: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente a Taxa Máxima de Produção.	78
Figura 28: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente ao Rendimento Volumétrico.	79
Figura 29: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente ao Taxa de Produção Volumétrica.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudos que utilizaram o capim elefante na Codigestão Anaeróbia.....	21
Tabela 2: Estudos comparativos da produção de metano a partir de dejetos suínos.	26
Tabela 3: Condições experimentais da primeira etapa (E1).	38
Tabela 4: Resumo das condições experimentais da Segunda Etapa E ₂	39
Tabela 5: Caracterização do inóculo e substratos utilizados.	45
Tabela 6: Características iniciais e finais e eficiências de remoção nos reatores estudados na Etapa 1 (R1=CC ₀ /ES ₁₀₀ , R2=CC ₂₀ /ES ₈₀ , R3=CC ₄₀ /ES ₆₀ , R4=CC ₆₀ /ES ₄₀ , R5=CC ₈₀ /ES ₂₀ , R6=CC ₁₀₀ /ES ₀).	46
Tabela 7: Parâmetros cinéticos do Modelo de Gompertz Modificado para as condições da Etapa 1 (R1 = CC ₀ /ES ₁₀₀ , R2 = CC ₂₀ /ES ₈₀ , R3= CC ₄₀ /ES ₆₀ , R4 = CC ₆₀ /ES ₄₀ , R5 = CC ₈₀ /ES ₂₀ , R6 = CC ₁₀₀ /ES ₀).	49
Tabela 8: Parâmetros indicadores de desempenho para as condições avaliadas na Etapa 1 (R1 = CC ₀ /ES ₁₀₀ , R2 = CC ₂₀ /ES ₈₀ , R3= CC ₄₀ /ES ₆₀ , R4 = CC ₆₀ /ES ₄₀ , R5 = CC ₈₀ /ES ₂₀ , R6 = CC ₁₀₀ /ES ₀).	50
Tabela 9: ANOVA para os modelos lineares e quadráticos.	52
Tabela 10: Coeficientes de regressão, erros padrão e significados estatísticos obtidos pelo modelo quadrático.	52
Tabela 11: Rendimentos e taxas de produção de CH ₄ experimentais e previstos.	54
Tabela 12: Características iniciais e finais e eficiências de remoção nos reatores estudados na Etapa 2. [F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C _{DQO} ; CB; CC/ES)].....	55
Tabela 13: Parâmetros cinéticos do Modelo de Gompertz Modificado para as condições da Etapa 2. F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C _{DQO} ; CB; CC/ES)].....	59
Tabela 14: Parâmetros indicadores de desempenho para as condições avaliadas na Etapa 2. [F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C _{DQO} ; CB; CC/ES)]	59
Tabela 15: Coeficientes de regressão, erros padrão e valor de p do planejamento experimental 2 ³ utilizado na E ₂	61
Tabela 16: Tabela ANOVA para o modelo linear.	74
Tabela 17: Coeficientes de regressão, erros padrão e significados estatísticos obtidos pelo modelo linear.	76

Tabela 18:Produções volumétricas diárias de CH ₄ para as condições estudadas na Etapa 1 (CC ₀ /ES ₁₀₀ , CC ₂₀ /ES ₈₀ , CC ₄₀ /ES ₆₀ , CC ₆₀ /ES ₄₀ , CC ₈₀ /ES ₂₀ , CC ₁₀₀ /ES ₀).	89
Tabela 19: Produções volumétricas diárias de CH ₄ para as condições estudadas na Etapa 2.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	- Análise de Variância
AGV	- Ácidos Graxos Voláteis
CC	- Caldo de Capim Elefante (<i>BRS- Capiacu</i>)
C_{final}	- Concentração final de carboidratos
C_{inicial}	- Concentração inicial de carboidratos
CH₄	- Metano
C_{NaHCO₃}	- Concentração de bicarbonato
COP 26	- 26 ^a Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
COT	- Carbono Orgânico Total
COV	- Carga Orgânica Volumétrica
CoDA	- Codigestão Anaeróbia
CSTR	- Reator contínuo de tanque agitado
DA	- Digestão Anaeróbia
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
DQO_{apl}	- Demanda Química de Oxigênio aplicada
DQO_{final}	- Concentração final de DQO
DQO_{inicial}	- Concentração inicial de DQO
Ec	- Eficiência de remoção de carboidratos
EdQO	- Eficiência de remoção de DQO
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
E_{H2}	- Eficiência de conversão do substrato em hidrogênio
E_{SVT}	- Eficiência de remoção de biomassa
ES	- Efluente de Suinocultura
E₁ e E₂	- Etapas operacionais
F₁, F₂, F₃, F₄, F₅, F₆, F₇ e F₈	- Reatores segunda etapa
FID	- Detector de Ionização em Chama
GL	- Grau de liberdade
GEE	- Gases do Efeito Estufa
H₂	- Hidrogênio
MPR	- Taxa de produção volumétrica de CH ₄
M(t)	- Produção acumulada de CH ₄

MY	- rendimento molar de CH ₄ por substrato consumido
MRPA	- Manejo de Resíduos da Produção Animal
MHPR_{DQOapl}	- Taxa de produção molar de H ₂ por carga aplicada
MHPR_{SVTapl}	- Taxa de produção molar de CH ₄ por biomassa aplicada
MHY_{DQOapl}	- Rendimento molar de CH ₄ por carga aplicada
MHY_{SVTapl}	- Rendimento molar de CH ₄ por biomassa aplicada
MQ	- Média quadrática
NTK	- Nitrogênio Total Kejl Dahl
P	- potencial máximo de produção de CH ₄
pH	- Potencial hidrogeniônico
P_{total}	- Fósforo Total
R₁, R₂, R₃, R₄, R₅ e R₆	- Reatores da primeira etapa
R²	- Coeficiente de regressão linear
RALF	- Reator anaeróbio de leito fluidizado
R_m	- Taxa máxima de produção de CH ₄
SQ	- Soma quadrática
SST	- Sólidos Suspensos Totais
SSV	- Sólidos Suspensos Voláteis
ST	- Sólidos Totais
SVT	- Sólidos Voláteis Totais
SVT_{final}	- Concentração final de sólidos voláteis totais
SVT_{inicial}	- Concentração inicial de sólidos voláteis totais
TCD	- Detector de Condutividade Térmica
TDH	- Tempo de Detenção Hidráulica
UASB	- Reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo
MPR_{DQOapl}	- Taxa de produção volumétrica de CH ₄ por carga aplicada
MPR_{SVTapl}	- Taxa de produção volumétrica de CH ₄ por biomassa aplicada
MY_{DQOapl}	- Rendimento volumétrico de CH ₄ por carga aplicada
MY_{SVTapl}	- Rendimento volumétrico de CH ₄ por biomassa aplicada
V_R	- Volume reacional
λ	- Duração da fase lag

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 GERAL	18
2.2 ESPECÍFICOS	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 O CAPIM-ELEFANTE COMO RECURSO ENERGÉTICO	19
3.2 EFLUENTE DE SUINOCULTURA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	24
3.3 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	28
3.4 PRODUÇÃO DE METANO	31
3.3.1 O efeito do bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e o do pH na produção de metano.	31
3.3.2 Codigestão como alternativa para potencializar a digestão anaeróbia.	33
3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	34
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 SUBSTRATOS E INÓCULO	37
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
4.3 REATORES EM BATELADA	40
4.4 MONITORAMENTO DOS REATORES	40
4.4.1 Etapa 1 – Influência da Composição do Substrato na Produção de CH_4	41
4.4.2 Etapa 2 –Influência da concentração inicial, da alcalinidade e da composição (CC/ES) na produção de CH_4	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 ETAPA 1 – INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE CH_4	45
5.1.1. Caracterização físico-química dos substratos e do inóculo utilizado.	45
5.1.2. Eficiências de remoção em termos de carboidratos, DQO e SVT.....	46
5.1.3. Produção de metano e parâmetros cinéticos.....	48
5.1.4. Rendimento e taxa de produção de metano	50
5.1.5. Análise estatística	51

5.2 ETAPA 2 – INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO INICIAL, DA ALCALINIDADE E DA COMPOSIÇÃO (CC/ES) NA PRODUÇÃO DE CH ₄	55
5.2.1 Eficiências de remoção em termos de carboidratos, DQO e biomassa aplicada	55
5.2.2 Produção de metano e parâmetros cinéticos	57
5.2.3 Rendimento e taxa de produção volumétrica de metano	59
5.2.4 Análise estatística	61
6. CONCLUSÃO	80
7. TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE I – DADOS DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE CH ₄ AO LONGO DO TEMPO PARA OS REATORES E GRÁFICOS INDIVIDUAIS DE PRODUÇÃO ACUMULADA-ETAPA I	89
APÊNDICE II - DADOS DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE CH ₄ AO LONGO DO TEMPO PARA OS REATORES E GRÁFICOS INDIVIDUAIS DE PRODUÇÃO ACUMULADA-ETAPA II	94

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as questões ambientais tem se tornado cada vez mais nítida, levando à procura por novas tecnologias limpas e sustentáveis. Nesse contexto, surge como alternativa o uso de fontes energéticas renováveis, diferentes das fontes poluidoras e oriundas de combustíveis fósseis. Estudos mostram que a produção de biocombustíveis a partir de processos biológicos tem se tornado uma alternativa viável e promissora de se produzir energia renovável (GAO et al., 2019; KHANAL et al., 2021).

Por meio da digestão anaeróbia, a matéria orgânica utilizada como substrato, além de ser convertida em biogás tem seu potencial poluidor reduzido significativamente, implicando no tratamento do efluente e na produção de energia (SIDDIQUE; WAHID, 2018; NUALSRI; KONGJAN; REUNGSANG, 2016).

Além do substrato, existem outros fatores importantes para produção de metano via digestão anaeróbia, dentre eles o pH, tipo de inóculo, temperatura, tipo de reator e a junção de cossustratos. A digestão de dois ou mais substratos pode ser aplicada buscando potencializar a produção de biogás e balancear as desvantagens da utilização da monodigestão (MATAALVAREZ et al., 2014).

No Brasil, o capim elefante (*Pennisetum purpurem*) é uma espécie cultivada que possui alto teor de nutrientes como carboidratos e proteínas e de fácil cultivo, uma vez que é capaz de crescer em solo de baixa qualidade. É bastante utilizada para produção de combustíveis sólidos, principalmente para produção de briquetes/pellets, bioeletricidade, biogás e/ou etanol celulósico (JENSEN & ELLER, 2020; MACHADO et al., 2017).

Uma grande problemática nos países em desenvolvimento, é o efluente de suinocultura, visto que os planos de gestão dos mesmos são escassos, ou seja, esse efluente ainda é descartado de maneira imprópria trazendo assim sérios danos para a humanidade e o meio ambiente, tendo em vista que áreas agrícolas para a devida eliminação são limitadas (YIN et al., 2015; ZHANG et al., 2012). A importância no desenvolvimento de novos estudos na problemática desses resíduos, se torna fundamental para a manutenção do produto final no mercado e para o ganho ambiental, tendo em vista a diminuição de poluentes (AKHATOR, et al., 2016).

Alguns autores sugerem a adição de substratos ricos em carbono orgânico, com o intuito de minimizar o seu elevado teor de nitrogênio, visto que pode gerar um alto nível de amônia tóxica, gerando danos ao meio ambiente (OJEDIRAN et al., 2021). Estudos que aplicaram dejetos suínos associados à glicerina (SCHWINGEL et al., 2016), ao óleo de descarte (ORRICO

et al., 2015) e a mandioca/batata doce (VILLA et al., 2020) com o intuito de produzir metano, concluíram como positiva a codigestão.

Apesar de favorável, trabalhos envolvendo a codigestão do caldo do capim elefante e o efluente de suinocultura na produção de metano são escassos, e enfrentam algumas dificuldades operacionais (composição de mistura, fator de diluição, alcalinizantes), portanto esse estudo propõe possíveis desdobramentos da resolução destes problemas.

Outro aspecto interessante desta pesquisa é a utilização do caldo do capim elefante, um resíduo gerado a partir da produção de briquetes, ou seja, mais uma alternativa para a utilização por completo dessa biomassa energética, sendo aproveitado tanto a palha quanto o caldo.

Este estudo tem como principais objetivos avaliar primeiramente (E_1) em diferentes combinações de mistura do efluente de suinocultura (ES) e do caldo do capim elefante (CC), de modo a diagnosticar a melhor composição (CC:ES) para alcançar uma produção estável e com alto rendimento de CH_4 , sem adição de bicarbonato de sódio.

Em uma segunda etapa (E_2) analisar a produção de metano frente as variáveis concentração inicial de substrato (DQO), concentração de alcalinizante ($NaHCO_3$) e das duas melhores composições CC/ES verificadas em E_1 .

Vale salientar que essa pesquisa é uma parceria com um projeto de pesquisa nacional liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) junto com outras instituições, dentre elas a Universidade Federal de Alagoas, o qual desempenha atividades sobre a utilização do capim elefante e suas diferentes espécies, como biomassa para fins energéticos, que se destaca como foco no presente trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a produção de metano a partir da codigestão anaeróbia de caldo de capim elefante e efluente de suinocultura.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da composição do substrato (proporção do caldo do capim-elefante e efluente de suinocultura) no rendimento e na taxa de produção de metano a partir da codigestão anaeróbia dos mesmos em reatores em batelada;
- Avaliar a eficiência de remoção de DQO, carboidratos e sólidos voláteis totais no processo;
- Realizar o planejamento experimental *Simplex Lattice* para avaliar os efeitos sinérgicos e ou antagônicos;
- Realizar o planejamento experimental 2^3 aplicando as variáveis concentração inicial de substrato aplicada (DQO_{Apl}), concentração de alcalinizante ($NaHCO_3$) e da composição de substrato CC/ES verificadas na E_1 para avaliar o comportamento das variáveis na produção de metano.
- Obter modelos preditivos para a codigestão entre o caldo de capim elefante e o efluente de suinocultura visando a produção de metano.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O CAPIM-ELEFANTE COMO RECURSO ENERGÉTICO

A biomassa oriunda de cultivos dedicados de gramíneas energéticas pode ser aplicada como fonte de matéria-prima complementar para produção de energia térmica e elétrica (cogeração), criando ganhos econômicos, pois aumenta o período de exploração industrial das usinas, gerando receitas e rotatividade comercial.

Dentre as gramíneas tropicais com elevado potencial de rendimento e produção, o capim-elefante se apresenta como uma das fontes incrementais de biomassa mais promissoras. A diversidade dessas gramíneas vêm sendo um ponto de pesquisa importante, visto que as espécies diferem em relação ao potencial produtivo, às demandas ambientais, às necessidades de armazenagem e manejo, como também as características físico-químicas da biomassa. As mais estudadas nos Estados Unidos e na Europa são: *Panicum virgatum* (Switchgrass), *Miscanthus spp.* (Miscanto), *Phalaris arundinacea* (capim amarelo) e *Arundo donax* (cana-do-reino) (JENSEN & ELLEN, 2020).

No Brasil, o capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum*) tem sido alvo desses estudos, sendo a maior parte deles com foco na sua utilização como combustível sólido, principalmente para produção de pellets, bioeletricidade, biocarvão (FONTOURA; BRANDÃO; GOMES, 2015; MARAFON et al., 2020; HE et al., 2017).

A alta produção de matéria seca, poder calorífico de 3898,24 (kcal/g) e produção de biocombustíveis (percentual de celulose de 38,50%) torna o capim-elefante uma fonte de energia promissora. Além disso, ele é altamente eficiente na fixação do CO₂ da atmosfera e, como cultura energética, possui vantagens como rápido crescimento, resistência a doenças, adaptabilidade, pouco manuseio e fácil propagação (BRITO DA SILVA et al., 2020).

Existe um novo tipo de cultivar que vem sendo desenvolvido no Brasil, em especial por apresentar um grande potencial para geração de energia, é a espécie *BRS Capiçu*. A EMBRAPA e parceiros com outras instituições desenvolveram o cultivo do mesmo e tem registro no RNC (Registro Nacional de Cultivares) desde 2015. O *BRS Capiçu* trata-se de um clone do capim elefante (*Pennisetum purpureum Schum*) que possui elevado rendimento e alto potencial de produção (50 toneladas/hectare/ano) (EMBRAPA, 2021).

Dentre as possíveis formas de uso do capim-elefante (Figura 1a) está a produção de bioetanol (ELIANA et al., 2014) e a produção de biocarvão e bioóleo por meio do processo de pirólise (COLLAZZO et al., 2017). Porém, mais comumente, o capim-elefante é pensado como

biomassa sólida, por exemplo, na forma de pellets e briquetes, ou forragem seca para uso em caldeiras a combustão (MARAFON et al., 2020).

Figura 1: Plantação de Capim Elefante - BRS Capiacu (a); Caldo do Capim Elefante Após o Processo de Extração(b).



(a)



(b)

Fonte: MARAFON et al., 2020.

Entretanto, o alto teor de umidade constitui uma das dificuldades no manuseio do capim-elefante (palha). Em vista disso, algumas técnicas são empregadas, como a secagem para combustão da biomassa seca, como para a produção de silagem, uma vez que a presença de água interfere no processo fermentativo e altera a qualidade do produto final (FERREIRA et al., 2004). Outra alternativa promissora, como o processo de extração (Figura 1b), que resulta em um resíduo (caldo) com grande quantidade de compostos orgânicos, como açúcares, ácidos orgânicos e proteínas, interessante para ser tratado por digestão anaeróbia (ZANINE et al., 2010).

O aproveitamento do caldo do capim, resultante da extração do mesmo, ou seja, um resíduo ainda rico em nutrientes importantes para produção de biogás a partir da codigestão. Sua aplicação como cossubstrato, por exemplo, em mistura com esterco suíno, bovino e esgoto (OJEDIRAN et al., 2021; HARYANTO et al., 2018; CARVALHO et al., 2016), poderia resultar em maior produção de biogás.

Pesquisas desenvolvidas com o apoio da EMBRAPA, por exemplo, a codigestão anaeróbia do caldo do capim-elefante com vinhaça foi analisada em um estudo inicial desenvolvido por Rocha e Silva (2020), realizado em reatores em batelada e em seguida por Barros (2022) que aprimorou alguns parâmetros desse estudo inicial. Observaram que a alta concentração de caldo do capim-elefante elevou o acúmulo de ácidos, e que estudos futuros com outros tipos de substratos devem ser analisados a fim de avaliar melhor a participação do caldo do capim elefante na produção de metano.

Estudos que utilizam o capim-elefante como substrato para codigestão ainda são escassos, porém alguns autores pesquisaram a utilização do capim-elefante e suas variações

para produção de metano. Na Tabela 1, são apresentados os principais estudos envolvendo algumas espécies de capim-elefante.

Tabela 1: Estudos que utilizaram o capim elefante na Codigestão Anaeróbia.

Referências	Substrato (s)	Principais Condições	Resultados
Carvalho et al., 2016	Hidrolisado de Capim Elefante e Esgoto	F0 (100:0); F1 (75:25) e F2 (50:50, v/v) R) 0,94 e 1,16 gSV/Ld	Remoção de DQO 77% F1 e 86% F2 Rendimento de CH ₄ 23% F1 e 38% F2
Moset et al., 2017	Capim e Esterco Bovino	Temperatura termofílica TRH: 25 dias; pH: 7,96-7,87	Capim Escoriado/Rendimento Volumétrico: 13,03± 0,65 NLCH ₄ kg ⁻¹
Himanshu et al., 2018	Silagem de capim e lodo de suinocultura/bovino	silagem 1 e silagem 2	673,7 L/kgSV e 610,6 L/kgSV,
Haryanto et al., 2018	Capim Elefante (<i>Pennisetum Purpureum</i>) e Esterco Bovino	25:25:100 (esterco de vaca:grama:água)	7.35, 16.75 e 111.72 L/kgSV
Rocha e Silva (2020)	Caldo de Capim elefante e Vinhaça	A-25/75, B-50/50, C-75/25, D-100/0, E-0/100	B - 50/50 370,94 mLCH ₄ /gSV
Thaemngoan et al., 2020	Capim Napier (<i>Pennisetum purpureum</i>)	4 kgSV/m ³ d	145.2 m ³ /ton _{seca}
Lianhua et al., 2020	Híbrido de Capim Napier (<i>Pennisetum</i>) e esterco suíno	Proporção(capim:esterco) (50:50 e 75:25) (OLRs) 2,0–5,0 gVS/(L·d)	Rendimento: 383,86 ± 65,13 a 574,28 ± 72,04 mL/gVS Produção volumétrica: 0,87 ± 0,07 a 2,36 ± 0,13 m ³ /(m ³ d)
Mbachu et al., 2021	capim-elefante (<i>pennisetum purpureum</i>) e extrato líquido de banana-da-terra (<i>Musa paradisiacal normalis</i>)	pH: 8.0 GP (grama+extrato de banana)	45,95% e 33,95% no rendimento de biogás e teor de metano.
Ojediran et al., 2021	Esterco suíno e Capim elefante	Capim pré-tratado: pH: 6,50 e 133,41 gCOD/gVS Capim não tratado: pH: 6,55 e 151 gCOD/gVS	pré-tratado: 409,5 m ³ CH ₄ /kg e 11,07 m ³ CH ₄ /kg VS/dia não tratado:

Fonte: Autora, 2022.

Carvalho et al. (2016) estudaram o processo de codigestão anaeróbica em um reator contínuo (CSTR) com uma mistura de lodo de esgoto (SS) e hidrolisado de capim-elefante (EG) sob condições mesofílicas 37°C e TRH de 15 dias foram avaliadas, com diferentes proporções de mistura F0 (100:0), F1 (75:25) e F2 (50:50, v/v), mantendo a carga orgânica (COV) em uma faixa de 0,94 e 1,16 gSV/Ld.

Moset et al. (2017) avaliaram a monodigestão do esterco bovino e o efeito da codigestão do mesmo as variações de capim: escoriado, amassado e picado, sendo avaliados em reatores contínuos a temperatura termofílica e tempo de retenção hidráulica de 25 dias. Os resultados mostraram que a adição de 5% de capim na matéria fresca aumentou a produção volumétrica de CH₄ em cerca de 20% e o teor de matéria orgânica do digerido, diminuiu o teor de proteína e não afetou a relação N:P:K. O melhor rendimento de CH₄ foi obtido com a adição de capim escoriado (13,03±0,65 NLCH₄ kg⁻¹), com incrementos de 20% e 35% em relação à monodigestão e do esterco bovino em reatores de 15L e 30 m³, respectivamente.

Himanshu et al., (2018) avaliaram a codigestão de lodo de suinocultura e bovino com a silagem de capim. Os testes foram realizados com dois substratos (lodo e capim), para avaliar a melhor produção de biogás. Foram utilizados reatores de 160 mL, as proporções testadas entre lodo e capim foram: 1:0/0,25:0,75/0,50:0,50/0,75:0,25/0:1. Foi observado que a produção de biogás foi afetada de acordo com o tipo de lodo e silagem de capim utilizado. A silagem produziu para o tipo 1 e 2 um valor de 673,7 L/kgSV, 610,6 L/kgSV, respectivamente. O rendimento de metano para as misturas apresentou resultado não linear, e a produção máxima foi abaixo dos rendimentos da monodigestão dos substratos.

Haryanto et al. (2018) verificaram a codigestão de capim elefante *Pennisetum purpureum* e esterco bovino e obtiveram nas composições de substrato 25:25:100 (esterco bovino:capim:água) e observaram que quanto maior a diluição da mistura maior foi a produção de metano, chegando à produção máxima de 111,72 L/kgSV. Concluíram que a adição de capim elefante ao esterco bovino aumentou potencialmente a produção de metano. Já Thaemngoen et al. (2020) avaliaram a monodigestão utilizaram da mesma espécie de capim em um sistema bifásico, uma seco e a outra úmida a uma taxa de 4 kgSV/m³d e alcançaram 145.2 m³/ton_{seca}.

Lianhua et al. (2020) avaliaram o desempenho da comunidade microbiana na codigestão do híbrido da espécie *Pennisetum* e o esterco suíno, estudaram as proporções de mistura

(capim:esterco) (50:50 e 75 :25) e as taxas de carregamento orgânico variáveis (COV de 2,0 – 5,0 gVS/(Ld), onde obtiveram os rendimentos específico e volumétrico de biogás de $383,86 \pm 65,13$ a $574,28 \pm 72,04$ mL/gVS e $0,87 \pm 0,07$ a $2,36 \pm 0,13$ m³/(m³d), respectivamente. Concluíram que nas COVs de 5,5 e 7,0 gVS/(Ld), os reatores apresentaram instabilidade, possivelmente devido ao acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV).

Rocha e Silva (2020) estudou a produção de biogás a partir da codigestão do capim-elefante e vinhaça e lodo de esgoto domésticos, como inóculo. O capim-elefante foi testado na forma de caldo. O caldo do capim e a vinhaça foram testados em diferentes proporções %v/c (A - 25/75, B - 50/50, C - 75/25, D - 100/0, E - 0/100) no ensaio I. A adição de alcalinizante e o efeito da diluição dos substratos, foram estudadas no ensaio II. Obteve como melhor resultado a proporção B - 50/50 apresentou a maior produção de biogás acumulada chegando a 370,94 mL_{CH4}/gSV.

Ojediran et al. (2021) estudaram a codigestão do capim elefante (tratado e não tratado) com esterco de porco resultou em um aumento da capacidade de produção de biogás do capim elefante. A produção de biogás iniciou-se no 5º e 7º dias e foi progressiva até o 30º e 24º dias. Concluíram que a codigestão pode aumentar a produção de biogás do capim elefante obtiveram com pré-tratado 409,5 m³CH₄/kg de biogás total e 11,07 m³CH₄/kgVS/dia média de Sólidos Voláteis e o não tratado de 184,1 m³CH₄/kg e 4,98 m³CH₄/kgVS/dia.

Mbachu et al. (2021) avaliaram a codigestão do capim com o extrato líquido do pseudocaule da bananeira em reatores de 500 mL, pH 8, foram operados por 36 dias. Os resultados do experimento mostram uma melhoria de 45,95% e 33,95% no rendimento de biogás e teor de metano, respectivamente, quando o extrato líquido do pseudocaule da banana foi misturado ao capim-elefante em vez de água destilada.

Diante do exposto acima, observou-se que os estudos utilizaram espécies de capim elefante em diferentes condições: *in natura*, hidrolisado, escoriado, triturado e etc. A principal composição dos substratos derivadas de plantas é a lignina, uma possível solução para eliminar previamente esse composto é o processo físico de extração. A resultante desse processo é o caldo do capim elefante e surge como um excelente cosubstrato, por apresentar características de alto valor, que pode ser aproveitada para a produção de biogás via codigestão anaeróbia em associação com outro substrato.

Assim sendo, a escolha dos substratos para a codigestão deve estar relacionada principalmente às propriedades químicas dos resíduos.

3.2 EFLUENTE DE SUINOCULTURA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O aumento da produção brasileira de suínos passou por grandes transformações nos últimos 20 anos, resultado do crescente avanço em novas tecnologias e, por sua vez, a produtividade, que visam como objetivo principal o aumento da competitividade (LEITÃO et al., 2020). Devido essa crescente, o volume de dejetos suínos gerados acompanhou esse aumento, e os efeitos desse volume sobre o meio ambiente e a saúde pública estão se tornando uma preocupação crescente em muitos países em desenvolvimento (SONG et al., 2010; GAWORSKI et al., 2017).

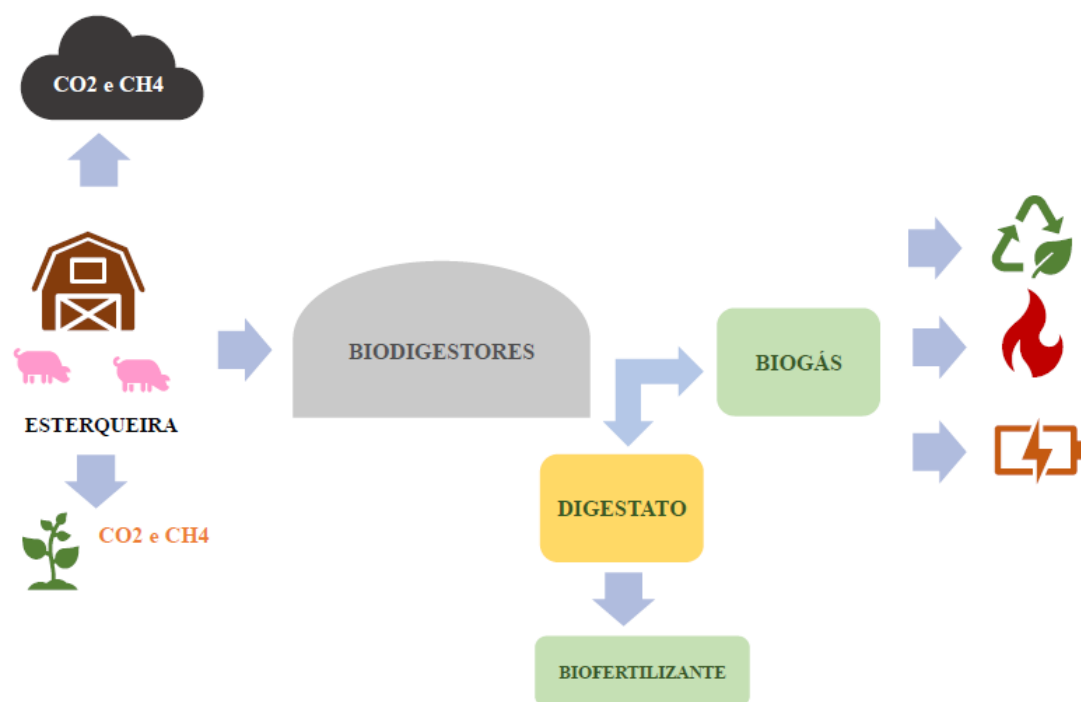
De acordo com Isbizuka (1998), cada suíno produz, em média, $2,35 \text{ kgd}^{-1}$ de fezes. Juntamente com a urina, esse valor chega a $5,80 \text{ kgd}^{-1}$; além disso, somando-se a água excedente empregada nas mais diversas formas de manejo, totaliza-se $8,60 \text{ kgd}^{-1}$ por animal.

Durante a 26ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26) foi acordado a meta de redução de 30% das emissões coletivas de metano, conhecido como compromisso global de metano. No Brasil, as políticas públicas que podem contribuir para a redução de gases de efeito estufa (GEE) são: o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC+) e o Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA), que incentiva a utilização de dejetos e outros resíduos resultados das atividades pecuárias para geração de subprodutos como energia e biofertilizante. Dentre as principais tecnologias sugeridas a compostagem e a digestão anaeróbia ganham destaque (KUNZ et al., 2022).

Com isso, a digestão anaeróbia surge como alternativa para atender a demanda do efluente de suinocultura, que pode ser convertido em biogás. A geração de uma energia limpa pode contribuir tanto para o meio ambiente como também em uma futura crise energética. Para os agricultores, pode contribuir diretamente para o desenvolvimento sustentável em áreas rurais, garantindo aos mesmos uma nova oportunidade de geração de renda (CAVINATO et al., 2010).

De acordo com a Figura 2, o esquema mostra a conversão dos dejetos suínos em biogás a partir da digestão anaeróbia. Ao invés dos gases resultante da degradação da matéria orgânica serem liberados diretamente para a atmosfera, ele é enclausurado no biodigestor para aproveitamento posterior, seja ele na forma de biofertilizante e/ou biogás, contribuindo para a sustentabilidade da atividade (CHENG et al., 2021).

Figura 2: Representação esquemática do aproveitamento dos dejetos suínos pela digestão anaeróbia e consequente mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).



Fonte: KUNZ et al., 2022.

Alguns estudos que utilizaram apenas o esterco de porco como substrato em processo de monodigestão observaram dificuldades devido aos altos índices de nitrogênio em relação ao carbono orgânico disponível (WANG et al., 2012; YIN et al., 2015). O elevado teor de nitrogênio pode gerar um alto nível de amônia tóxica. Com isso, materiais ricos em carbono orgânico precisam ser adicionados ao esterco de suínos para fornecer a carbono orgânico necessário, ou seja, uma codigestão de substratos com a finalidade de melhorar a produção de metano no processo (OJEDIRAN et al., 2021).

Os principais parâmetros para o aperfeiçoamento da produção de biogás no processo de codigestão devem ser mantidos em condições estáveis. Desta maneira, o acompanhamento da temperatura, pH, tamanho das partículas, relação C/N, dentre outros, são importantes para maximizar o desempenho dos microrganismos presentes no sistema (SIDDIQUE; WAHID, 2018a). Alguns trabalhos que utilizaram dejetos de suínos para produção de metano através da monodigestão e codigestão anaeróbia podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Estudos comparativos da produção de metano a partir de dejetos suínos.

Referências	Substrato (s)	pH Concentração	Resultados
Fernandes et al., 2006	Águas residuárias de suinocultura	7.2-8.0 DQO: 7.557 - 11.640 mg L ⁻¹	A produção volumétrica de metano máxima de 0,755 m ³ CH ₄ (m ³ d) ⁻¹
Riaño et al., 2011	Dejetos suínos e água residuária de vinícola	7.7 0.7 gDQO/gssv.	85% de água residuária: 348 mLCH ₄ /gDQOd Sem adição: 27 mLCH ₄ /gDQOd
Cremonese et al., 2015	Águas residuárias de suinocultura e Vinhaça	6.0-8.0 DQO: 30195,56 mg/L	R1: 29.9 e 69.0 R2: 25.4 e 68.4 % Remoção de STV e DQO, respectivamente.
Orrico et al., 2015	Dejeto suíno e Óleo de descarte	7.03-7.07 202.10-204 g O ₂ L ⁻¹ afluente	222,9 L _{biogás} /kgST e 263,6 L _{biogás} /kg SV
Yin et al., 2015	Estrume Suíno Monodigestão PM ₁ : C/luz PM ₂ : S/luz	6.40 8% TS	PM ₁ : 15020,0 mL; PM ₂ : 2675,0 mL Produção de biogás acumulada.
Schwingel et al., 2016	Dejeto suíno e Glicerina	pH < 5 1.880 gO ₂ .L ⁻¹ ; 4% glicerina bruta.	11,88 L dia ⁻¹
Villa et al., 2020	Dejetos de suínos e Batata doce (BD) Ou mandioca (M)	6,9-7,3 28,6-30,7 SV (g L ⁻¹)	Rendimento de Biogás: BD: 901 L _N .kgSV _{adic} ⁻¹ M: 883 L _N .kgSV _{adic} ⁻¹ CH ₄ BD: 590 L _N .kgSV _{adic} ⁻¹ M: 547 L _N .kgSV _{adic} ⁻¹

Fonte: Autora, 2023.

Villa et al. (2020) estudaram a codigestão dos dejetos de suínos (DS), acrescidos de batata doce (BD) ou mandioca (M) em diferentes inclusões, em biodigestores semicontínuos. Inicialmente, em reator batelada, foram testadas as relações C/N iguais a 10/1, 13/1, 17/1, e 22/1. Com base na primeira etapa a relação C/N de 10/1, apresentou maiores reduções de sólidos voláteis (SV) e produções específicas de biogás. O tratamento controle diferiu dos demais e apresentou menor desempenho no rendimento de biogás (752 L_N.kgSV_{adic}⁻¹), CH₄ (449 L_N.kgSV_{adic}⁻¹) e concentração de CH₄ (59,7%). Os tratamentos em CoDA (BD e M) não

diferiram entre si para o rendimento de biogás (901 e 883 $L_N.kgSV_{adic}^{-1}$) e CH_4 (590 e 547 $L_N.kgSV_{adic}^{-1}$), no entanto diferiram na concentração de CH_4 (65,5 e 61,9%, respectivamente). Os tratamentos apresentaram médias gerais de reduções de 76,1 e 85,9% para ST e SV, respectivamente, não sendo encontrada diferença estatística entre eles.

Schwingel et al. (2016) e Orrico et al. (2015) estudaram a codigestão de dejetos de suínos e resíduos lipídicos (glicerina bruta e óleo de descarte, respectivamente). Schwingel et al. (2016), observaram que a produção de biogás e potencial de produção apresentaram efeito quadrático nos TRH de 17 e 24 dias, evidenciando como doses ideais 4,09 e 5,63% de glicerina bruta, respectivamente, para produção e 4,52 e 5,42% de glicerina bruta para potencial de produção. Enquanto, Orrico et al. (2015) obtiveram melhores resultados nas inclusões de 5,4 e 6,1% de óleo que permitiram o alcance de potenciais de 222,9 $L_{biogás}/kgST$ e 263,6 $L_{biogás}/kgSV$, que foram superiores em 10,8 e 5,5% aos rendimentos observados para a dose contendo 0% de óleo. A inclusão de óleo na composição de substratos contendo dejetos de suínos nas doses entre 5 e 6% melhora os rendimentos de biogás.

Cremones et al. (2015) avaliaram a codigestão anaeróbia da vinhaça com resíduos de suinocultura em reatores tubulares sob diferentes condições de temperatura. Alcançaram as eficiências de remoção de sólidos totais voláteis (STV) foram de 29,9% para o reator termicamente controlado contra 25,4% do reator a temperatura ambiente, para eficiência de remoção de DQO verificaram-se valores médios de 69,0% no Reator 1 e 68,4% no Reator 2.

Yin et al. (2015) analisaram o comportamento de reatores anaeróbios sob condições de luz solar (PM_1) e escuridão (PM_2) utilizaram como substrato estrume suíno e acompanharam o efeito sob os parâmetros ácidos graxos voláteis (AGV), nitrogênio amoniacal total (NAT), alcalinidade total (AT) e pH. Obtiveram um resultado maior na produção de biogás acumulada em PM_1 15020,0 mL e uma concentração de NAT mais baixa de 1414,5 mg/L, já em PM_2 2675,0 mL e 1670,0 mg/L, respectivamente.

Riaño et al. (2011) avaliaram a produção de metano por codigestão anaeróbia de dejetos suínos com água residuária de vinícola, em reator operando em batelada e de modo semicontínuo, sob condições mesofílicas. Os experimentos em batelada revelaram que o maior rendimento de metano foi de 348 $mLCH_4/gDQOd$, obtido com adição de 85% de água residuária de vinícola e 0,7 $gDQO/gSSV$. A produção de metano a partir dos dejetos suínos sem adição de água residuária de vinícola foi de 27 $mLCH_4/gDQOd$. No modo semicontínuo, alcançaram-se produções máximas de 635 $mLCH_4/gDQOd$ com adição de 40% de água residuária de vinícola e 256 $mLCH_4/gDQOd$ sem adição.

Fernandes et al. (2006) estudaram desempenho de processo anaeróbio em dois estágios um reator compartimentado (ABR) seguido de reator UASB para tratamento de águas residuárias de suinocultura, foram submetidos a tempos de detenção hidráulica (TDH) de 56 a 18 h no primeiro reator e de 13 a 4 h no segundo reator. Já a concentração de DQO_{total} variando de 7.557 a 11.640 mg/L alcançou um teor de metano no biogás acima de 70% para os dois reatores. A produção volumétrica de metano máxima de $0,755 \text{ m}^3\text{CH}_4 (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$ ocorreu no reator \1, com COV de $10,12 \text{ kg } DQO_{total} (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$ e TDH de 18 h. Os valores médios de pH variaram na faixa de 7,2 a 8,0 para os efluentes dos reatores 1 e 2.

Diante do exposto, verifica-se a importância de estudos alternativos que envolve o tratamento biológico dos resíduos da atividade de suinocultura.

3.3 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

O processo anaeróbio envolve quatro etapas metabólicas complexas, as quais ocorrem em estágios sequenciais e precisam da atividade de no mínimo três diferentes grupos de microrganismos: bactérias fermentativas/acidogênicas, bactérias sintróficas/acetogênicas e microrganismos metanogênicos. De forma simplificada, a digestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio e que utiliza ação de bactérias e arqueas para quebrar compostos complexos, gerar biogás, que é composto basicamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) e em um digestato que pode ser aplicado como biofertilizante (CREMONEZ et al., 2021; KARKI et al., 2021; De FARIAS SILVA et al., 2019). Outros gases também podem ser convertidos, porém em pequenas quantidades, como nitrogênio, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e vapor d'água (NESHAT et al., 2017).

Estudos apontam a digestão anaeróbia como uma promissora alternativa para o tratamento e adequação de resíduos orgânicos agroindustriais, utilizando-os como fontes renováveis para geração de energia, como também contribui com a redução da disposição inadequadas e as emissões de carbono. Além disso, ajuda a atenuar a produção energética oriunda de combustíveis fósseis e promove a redução de impactos ambientais (WU et al., 2021a; WU et al., 2019).

O principal produto gerado, o biogás, é composto por diversos gases, sendo os principais o metano (CH_4) (60-70%), e o dióxido de carbono (CO_2), em cerca de 30% na mistura. Em pequenas quantidades, H_2 (0-1%), N_2 (0-7%), O_2 (0-2%), H_2S (0-3%) e NH_3 (0-1%). Classificados como impurezas, os gases CO_2 , H_2S e NH_3 , quando em altas concentrações interferem negativamente na qualidade do biogás. O CO_2 , por exemplo, diminui o poder

calorífico do biogás, enquanto o H_2S exala cheiro desagradável e torna o biogás corrosivo para os materiais metálicos, sendo necessário um cuidado especial na escolha dos equipamentos para transportar e armazenar (De FARIAS SILVA et al., 2019; CREMONEZ et al., 2021; LI; CHEN; WU, 2019).

Na primeira etapa da digestão anaeróbia, ocorre a hidrólise que é um processo onde o material orgânico complexo (polímeros) é transformado em materiais orgânicos dissolvidos mais simples (açúcares, aminoácidos e peptídeos). Nesta etapa, a transformação de materiais particulados em materiais dissolvidos só é possível pela ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Entre as bactérias com capacidade hidrolítica, podem-se citar os gêneros *Clostridium*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Bacteroides*, *Butyvirio*, *Bacillus*, *Acetivirio* e *Eubacterium* (KHANAL et al., 2021; ORDAZ-DIAZ; BAILON-SALAS, 2020).

Na segunda etapa, denominada acidogênese, grande parte dos microrganismos fermenta açúcares, aminoácidos e ácidos graxos resultantes da hidrólise do material orgânico complexo, produzindo ácidos orgânicos (principalmente os ácidos acético, propiônico e butírico), alcoóis (etanol), cetonas (acetona), dióxido de carbono e hidrogênio. A produção de ácidos promove a diminuição do pH do meio (LI; CHEN; WU, 2019; ORDAZ-DIAZ; BAILON-SALAS, 2020).

Posteriormente, na acetogênese ocorre a oxidação dos produtos gerados na acidogênese em substrato próprio para as arqueas metanogênicas. As bactérias acetogênicas atuam como intermediárias dos processos de acidogênese e metanogênese, formando hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Neste ensaio o pH decresce muito devido à formação dos ácidos acético e propiônico (LI; CHEN; WU, 2019; LYU et al., 2018).

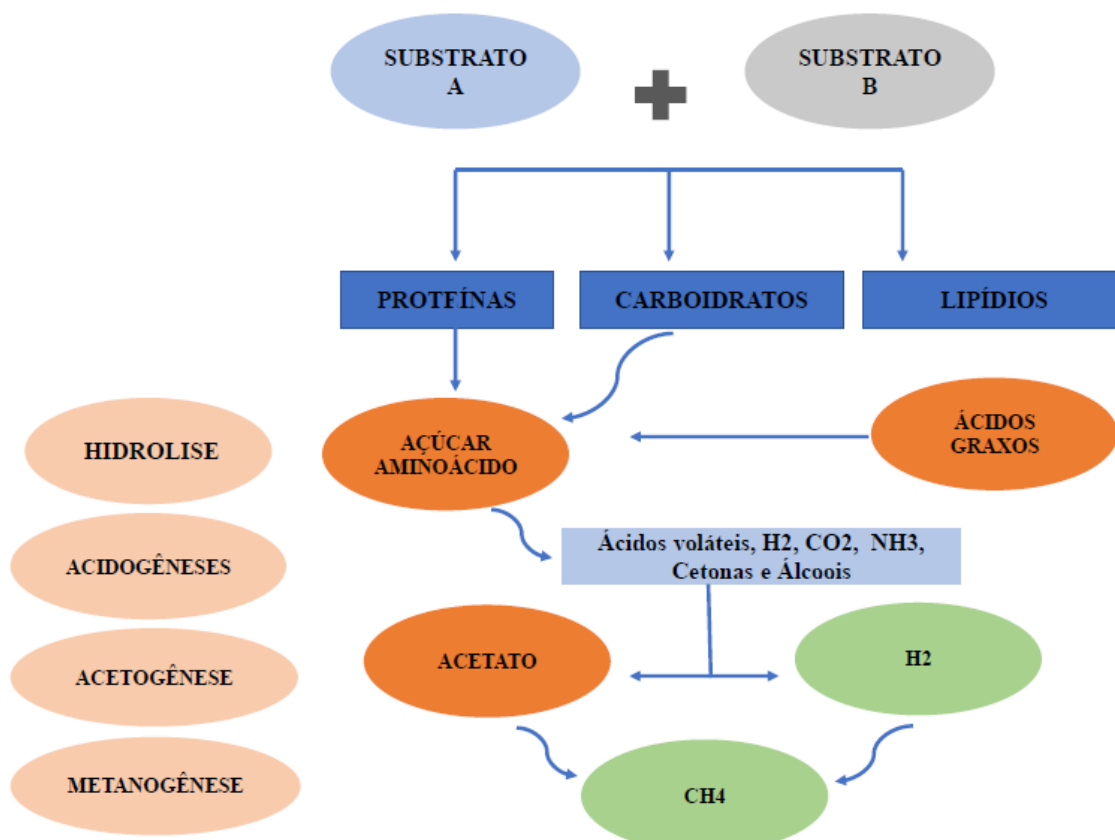
Para os casos em que a natureza do substrato apresente a presença de sulfato, pode-se levar uma quinta fase, a sulfetogênese, onde bactérias redutoras de sulfato (BRS), atuam reduzindo o sulfato a sulfeto, competindo por H_2 e matéria orgânica com as arqueas metanogênicas (LYU et al., 2018).

Para acelerar a digestão dos compostos mais complexos podem ser adotadas condições operacionais do sistema de tratamento para favorecer o processo, como por exemplo a associação de dois ou mais substrato. Sendo assim codigestão é uma tecnologia simples, que pode trazer vantagens como redução da concentração de compostos tóxicos, melhora na taxa de digestão e aumento da produção de biogás (BEDOÍĆ et al., 2019; COOK et al., 2017; NESHAT et al., 2017). A união de dois ou mais resíduos, aumentam a produção de biogás de 25 a 400% em relação a monodigestão dos mesmos substratos (SIDDIQUE; WAHID, 2018).

Tanto o processo de digestão anaeróbia, quanto o da codigestão são compostas pelas mesmas etapas, o que diferem é justamente a associação de substratos. Na Figura 3 é

apresentado um fluxograma esquemático da divisão de fases no processo de codigestão anaeróbia.

Figura 3: Fluxograma com as etapas da co-digestão.



Fonte: Adapado de Siddique; Wahid, (2018b)

No geral, todos os microrganismos presentes no processo da digestão/codigestão anaeróbio precisam desempenhar perfeitamente a devida degradação da matéria orgânica. Estudos estão sendo direcionados aos principais fatores operacionais que interferem a produção de biogás a partir da codigestão, sendo eles: temperatura, inóculo, pH, Composição de substrato, alcalinidade e a relação C/N (VILLA et al., 2020; SIDDIQUE; WAHID, 2018; TENA et al. 2020; OJEDIRAN et al., 2021).

3.4 PRODUÇÃO DE METANO

O biogás é gerado basicamente pela decomposição natural do material orgânico, ou seja, através de processos biológicos, tendo como componentes o hidrogênio, o metano, o dióxido de carbono e o gás nitrogênio, sendo a maior parte composta por metano cerca de 40 a 60% e a menor por concentrações do gás nitrogênio (De FARIAS SILVA et al., 2019).

As arqueas metanogênicas acetoclásticas, responsáveis pela maior produção de metano envolvido no processo de digestão anaeróbia, crescem com tempo mínimo de duplicação entre 2 e 3 d. Elas normalmente ajudam a controlar o valor de pH da fermentação por meio da remoção do ácido acético e da formação de dióxido de carbono, como mostra a reação descrita na Equação 1 (LI; CHEN; WU, 2019).

Produção de metano:



As arqueas metanogênicas hidrogenotróficas são coletoras de hidrogênio, regulando o potencial redox do processo de digestão anaeróbia, a taxa de produção total de ácido e a mistura de ácidos que são gerados pelos microrganismos formadores de ácido. O tempo mínimo de crescimento de duplicação cerca de 6h e elas absorvem energia para o crescimento a partir da reação descrita na Equação 2 (LI; CHEN; WU, 2019).

Produção de metano:



Mecanismos biológicos realizados em meio anaeróbio para a produção de metano são influenciados por diversos fatores, sendo os mais importantes a concentração de substrato, a temperatura, o pH e o teor de sólidos.

3.3.1 O efeito do bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e o do pH na produção de metano.

A acidez e a alcalinidade são parâmetros de grande importância na produção de metano, pois estão diretamente ligados às rotas metabólicas, ou seja, à sobrevivência dos microrganismos no reator e são determinadas pelo pH. Existe uma faixa adequada para cada tipo de reator e para produção de hidrogênio/metano ou outro subproduto envolvido nos processos anaeróbios.

Os microrganismos produtores de metano necessitam de um ambiente parcialmente neutro, com um pH na faixa entre 7 e 8,5, o que influencia na solubilidade e na dissociação de alguns compostos, a exemplo do sulfureto. O reator metanogênico, operando em temperatura mesofílica (30 a 40 °C), apresenta uma faixa ótima de pH (6,7 a 7,5), a queda do pH pode ocasionar um desequilíbrio devido ao acúmulo de ácidos orgânicos. Valores fora dessa faixa podem ocasionar o decrescimento da produção de metano (HOLLIGER et al., 2021).

A utilização do bicarbonato de sódio no processo anaeróbico é aplicada com o intuito de garantir um tamponamento adequado do sistema, pois em relação a produção de metano, o meio reacional precisa se manter neutro. Alguns autores avaliavam a adição do bicarbonato para uma melhor estabilidade operacional (ZHANG et al., 2018; DOLL & FORESTI, 2010) e ensaios com e sem adição (ROCHA E SILVA, 2020).

Zhang et al. (2018) avaliaram o efeito da concentração de bicarbonato (HCO_3^-) como uma opção de tamponamento na digestão anaeróbica. Observaram mudanças na energia livre de Gibbs (ΔG) e nas transferências interespecies de elétrons e prótons, no processo de oxidação do butirato sintrófico. Os resultados mostraram que a taxa de degradação do butirato foi acrescida em 32,07% quando a concentração de HCO_3^- aumentou de 0 para 0,20 mol/L. No entanto, na concentração de 0,10 mol/L, a produção de metano e a degradação do acetato foram fortemente inibidas. No geral, o HCO_3^- diminuiu o ΔG da metanogênese sintrófica do butirato enquanto aumenta o ΔG da metanogênese do acetato, enriqueceu a produção de *M. harundinacea* e *M. concilii*, e por fim aumentou a taxa de difusão de prótons entre os consórcios sintróficos.

Doll & Foresti (2010) estudaram a influência do bicarbonato de sódio (NaHCO_3) no desempenho do reator anaeróbio batelada sequencial com biomassa imobilizada tratando vinhaça a 55 e a 35°C. Os autores chegaram à conclusão que em relação ao carregamento orgânico e a quantidade de bicarbonato adicionado ao sistema, o reator operado a 35°C mostrou maior estabilidade operacional no tratamento anaeróbio da vinhaça, enquanto que o reator operado a 55°C, mostrou uma dependência do bicarbonato. Alcançaram como melhores condições no reator termofílico 0,6 g de HCO_3^- /gDQO e COV de 4,50 e 5,24 g/Ld, e o reator mesofílico 0,2 g de HCO_3^- /g DQO até a COV de 35,94 g/Ld.

Rocha e Silva (2020) estudou a produção de biogás a partir da codigestão do capim-elefante e vinhaça, utilizando lodo de esgoto domésticos, como inóculo. E avaliaram a produção de metano com e sem adição de bicarbonato de sódio. As seguintes concentrações foram analisadas 0;0,05;0,11 e 0,25 g HCO_3^- /gDQO⁻¹ onde obteve uma maior produção de 836,18 mL CH_4 /gSV na concentração de 0,05, verificando assim que a produção de metano não

aumentou à medida que a concentração de bicarbonato aumentava, e que mesmo sem a adição de bicarbonato não foi empecilho para a devida produção.

Com isso, observa-se a importância do tamponamento do meio reacional, visto que exerce principal atuação no pH e influência diretamente as rotas metabólicas.

3.3.2 Codigestão como alternativa para potencializar a digestão anaeróbia.

A codigestão é uma estratégia que visa potencializar a monodigestão anaeróbia por meio da melhoria do equilíbrio de macro e micronutrientes, da diversificação das comunidades microbianas, da redução da concentração de compostos tóxicos, da capacidade de tamponamento aumentada e da melhoria na taxa de digestão (ZHANG et al., 2021). Dessa forma, quando dois ou mais substratos são associadamente tratados, maior será o desempenho do processo e conseqüentemente, melhor será a produção de biogás (POCHWATKA et al., 2020).

Com o avanço e incentivo da produção de biocombustíveis a codigestão anaeróbia vem sendo bem utilizada nos diversos setores, em destaque o agronegócio que visar soluções para melhorar a eficiência dos digestores para produção de biogás. Conseqüentemente, é fundamental avaliar os pontos como proporção entre substratos e suas composições, otimização da produção de biogás, entre outros (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

É imprescindível analisar as principais características do cosubstrato, como a disponibilidade, biodegradabilidade, custo de transporte, composição química. Além disso, também devem ser definidas as melhores condições operacionais, como a melhor proporção de mistura dos substratos para viabilizar uma maior sinergia entre os resíduos e a diluição de compostos inibitórios e promover a estabilidade do sistema e facilitar a biodegradação dos componentes (VOLPI; FUESS; MORAES, 2021; HAGOS et al. 2017; PAVI et al. 2017).

Os efeitos sinérgicos e antagônicos comumente estão presentes na mistura dos substratos, cada um desempenhando um papel importante na codigestão. Os efeitos sinérgicos proporcionam um ajuste dos parâmetros como o pH, a umidade, a capacidade tampão do sistema, nutrientes ou enzimas que um substrato por si só pode faltar. Enquanto os efeitos antagônicos ocorrem à medida que o processo é exposto a um desequilíbrio na relação C/N, excesso/deficiência nas proporções de oligoelementos, toxicidade de amônia e elevadas concentrações de AGV (ZHOU et al., 2021; HIMANSHU et al., 2018; GONZÁLEZ et al., 2015).

Com base nos estudos de Kainthola, Kalamdand & Goud (2019) relatam que, em partes, substratos ricos em carboidratos apresentam baixa relação carbono/nitrogênio (C/N). Nessas situações, os autores, indicam a cofermentação para tentar atenuar esse fator, e assim gerar o aumento da biodigestibilidade dos materiais. Levando em consideração que os valores variam de acordo com o tipo e concentração do substrato, com a comunidade microbiana presente e com as condições operacionais (CREMONEZ et al., 2021).

Estudos recentes que utilizam o capim elefante e suas variações, por ser uma biomassa lignocelulósica promissora em processos fermentativos, investigam sua associação a um segundo substrato com o intuito de potencializar a produção de biogás (OJEDIRAN et al., 2021; LIANHUA et al., 2020; THAEMNGOEN et al., 2020; HARYANTO et al., 2018). De forma similar ocorre com os resíduos da suinocultura, com características que podem beneficiar essa produção (VILLA et al., 2020; SCHWINGEL et al., 2016; CREMONEZ et al., 2015).

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

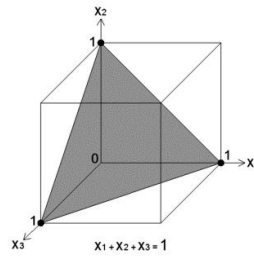
O planejamento de experimentos é uma análise estatística importante, visto que é necessário para o andamento dos experimentos, de maneira que ele seja capaz de diagnosticar questionamentos mais próximos do desejável (BARROS NETO et al., 2010).

A sequência para realizar um planejamento, deve-se iniciar selecionando as variáveis mais importantes para o sistema. Em seguida, é necessário avaliar a influência sobre a resposta desejada, juntamente com as possíveis interações. Por fim, é construir modelos empíricos que descrevam o comportamento do processo estudado com base nos dados obtidos (DUARTE, 2005).

No experimento de mistura, a quantidade total de mistura se mantém constantes, o que varia são as componentes, logo qualquer variação que ocorra nos componentes, espera-se uma variação proporcional na resposta. As proporções dos diversos componentes de uma mistura não são independentes, e obedecem à equação (A) onde “q” representa o número de componentes da mistura (ou fatores). A representação gráfica desta equação para três componentes (q = 3) é apresentada na Figura 4.

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1,0 \quad (A)$$

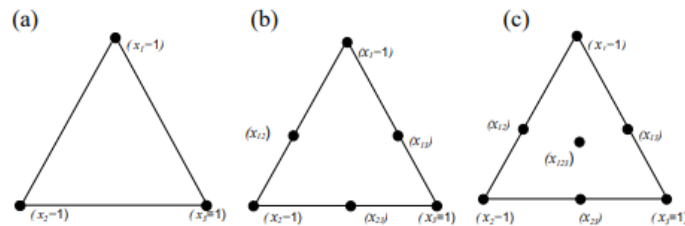
Figura 4: Representação da rede simplex para três componentes.



Fonte: CORNELL, 1990

A superfície resposta e os pontos experimentais para os respectivos modelos matemáticos, são ilustrados na Figura 5, os pontos para os modelos linear (3 pontos), modelo quadrático (6 pontos), modelo cúbico simples (7 pontos).

Figura 5: Pontos para obtenção dos modelos testados: a) linear; b) quadrático; c) cúbico simples;



Fonte: CORNELL, 1990

Assim, representa-se o modelo polinomial por uma única equação matricial: na qual $\hat{y}$ e b são as matrizes contendo respectivamente os valores previstos pelo modelo para y e as estimativas dos parâmetros. X representa a matriz de composição das misturas.

$$\hat{y} = Xb \quad (B)$$

Assim sendo, os parâmetros b 's são calculados resolvendo-se apenas uma equação matricial (C), podendo ser facilmente comprovado escrevendo as matrizes por extenso de acordo com:

$$X^t X b = X^t y \quad (C)$$

Isolando-se a matriz b têm-se de forma direta os valores da estimativa dos parâmetros. Se ampliarmos as matrizes X e y adequadamente, tem-se a solução geral para o ajuste de um modelo por mínimos quadrados, não importando quanto sejam as observações ou quantos parâmetros sejam necessários para caracterizar o modelo.

Uma aplicação viável do planejamento de misturas reside na codigestão anaeróbia. Neste processo, diversos substratos são empregados para a produção de biogás, sendo fundamental a investigação das proporções ideais de cada componente para alcançar os

melhores resultados. Com isso, na primeira etapa (E1) este estudo utilizou o *Simplex Lattice* (CORNELL, 1990) afim de avaliar os efeitos sinérgicos e antagônicos do caldo do capim elefante (CC) e efluente de suinocultura (ES).

O objetivo da utilização da metodologia do planejamento experimental 2^3 (HELLER, 1986) é encontrar um modelo empírico com capacidade de prever o processo em estudo, através da avaliação das variáveis de entrada, concentração de DQO, concentração de bicarbonato (CB), % composição de substrato referente ao caldo de capim elefante (CC) esse delineamento foi aplicado na segunda etapa (E₂) desta pesquisa.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da revisão bibliográfica realizada, obteve-se um delineamento dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho, de forma a apresentar os resultados esperados frente a codigestão anaeróbia do caldo de capim elefante e efluente de suinocultura.

Diante disto, surge como alternativa a geração de novas tecnologias e processos que auxiliem na transformação de fontes renováveis em energias limpas e sustentáveis, reduzindo a emissão de gases poluentes e, por conseguinte, o aquecimento global.

Analisando o mercado agrícola e a industrial brasileira, observa-se a crescente produção de capim elefante e suas variantes e o consumo de carne suína que gera uma quantidade excessiva de efluente não tratado. Como alternativa para reduzir a elevada umidade presente no capim elefante (parte sólida) utilizada para produção de briquetes, percebeu-se que o caldo resultante do processo de extração possuía alto teor de componentes orgânicos. Outro fato importante, é que ambos podem ser produzidos em pequenas ou grandes fazendas, viabilizando a agricultura de subsistência, a geração de lucros para os produtores e ganhos para o meio ambiente, pois tudo será reaproveitado de alguma forma.

Diante do que foi abordado anteriormente, esse trabalho analisou a produção de metano a partir da codigestão anaeróbia do caldo de capim elefante e efluente de suinocultura. A codigestão anaeróbia é um processo em que as etapas são influenciadas por diversos fatores, alguns parâmetros como a composição de mistura, a concentração de substrato, a temperatura, o pH, a adição ou não de um alcalinizante são fundamentais para uma adequada conversão em biogás.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SUBSTRATOS E INÓCULO

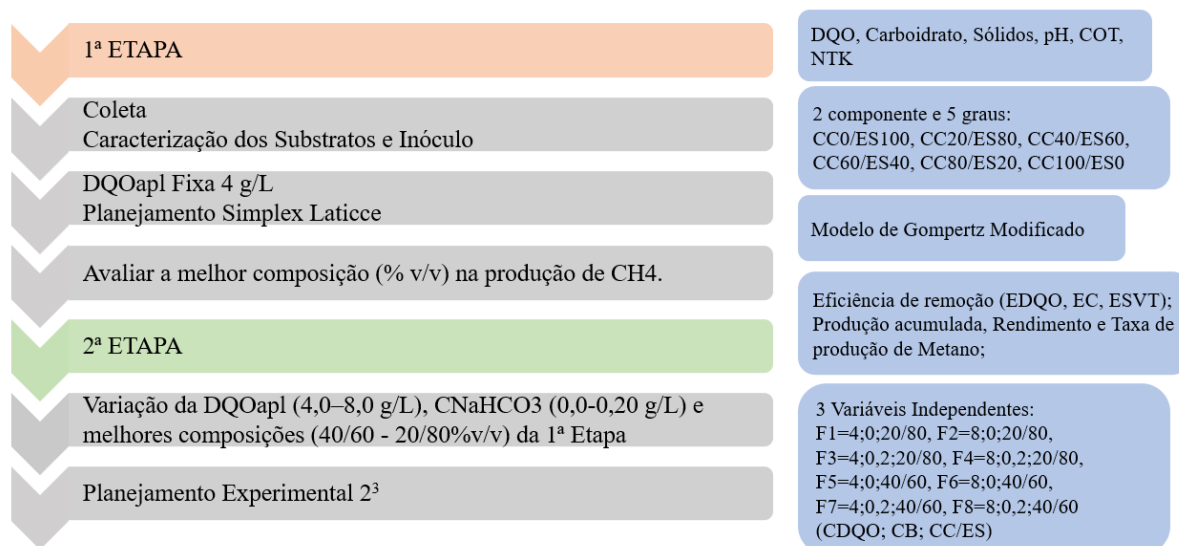
Foram utilizados como substratos o caldo do capim elefante do tipo *BRS Capiaçu* (CC) e o efluente de suinocultura (ES), os quais foram cedidos pela Embrapa Tabuleiros Costeiros - UEP Rio Largo/AL. O caldo do capim foi obtido através da extração do capim através de forrageiras (máquina responsável pela extração do caldo). Após isso foi coletado e levado até a UFAL. Nenhum pré-tratamento foi realizado no mesmo. Os substratos, foram armazenados a -4°C.

O inóculo utilizado nos experimentos foi o lodo proveniente de um reator anaeróbico de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB) que trata esgotos domésticos, o qual foi mantido resfriado em geladeira a 19 °C.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas, conforme fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma das atividades desenvolvidas no experimento.



Fonte: Autora (2023).

Na primeira etapa (E_1), o efeito da composição do substrato na produção de CH₄ foi o principal parâmetro estudado, variando-se as proporções (v/v%) de caldo de capim elefante (*BRS-Capiaçu*) (CC) e efluente de suinocultura (ES) em termos de porcentagem de DQO (Tabela 3), com base no planejamento experimental *Simplex Lattice* que foi aplicado nas

pesquisas de Tena et al. (2020) e Lee;Wee;Cho (2014), onde os estudos avaliaram a importância da porcentagem de cada substrato.

A concentração inicial da alimentação foi fixada em 4 g-DQO/L (FERNANDES & OLIVEIRA, 2006), variando-se apenas os volumes de cada material, considerando um volume total de substrato igual a 90% do volume útil e os 10% restante correspondem o volume do inóculo a uma temperatura de 35 °C. O pH ficou em torno da neutralidade sem necessidade de alcalinizantes, como podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Condições experimentais da primeira etapa (E1).

CC (v/v%)	ES (v/v%)	pH Inicial	Identificação do Reator
0	100	7.30 ±0,01	R 1
20	80	7.26 ±0,03	R 2
40	60	7.31 ±0,00	R 3
60	40	7.34 ±0,04	R 4
80	20	7.42 ±0,05	R 5
100	0	7.43 ±0,03	R 6

Siglas: CC = caldo de capim-elefante (BRS-Capiaçu), ES = Efluente de Suinocultura

Fonte: Autora (2023).

Na segunda etapa (E₂), foram realizados ensaios em batelada com as melhores composições da primeira etapa (E₁), onde foram desenvolvidos por meio de um planejamento experimental 2³ completos em duplicatas, tendo como variáveis concentração de DQO, concentração de bicarbonato (CB) e melhores composições de substrato da E₁. Nessa etapa o intuito foi observar o comportamento das composições de substrato acima citadas.

Na Tabela 4, consta o detalhamento do planejamento experimental 2³, onde os fatores independentes foram: DQO_{apl} (4,0–8,0 g/L), concentração de bicarbonato de sódio (CB) (0,00–0,20 g/g) e nas melhores composições de substrato CC/ES da primeira etapa E₁ (40/60 - 20/80%).

Tabela 4: Resumo das condições experimentais da Segunda Etapa E₂.

DQO aplicada (g/L)	C_{NaHCO₃} (g/g)	Composição de Substratos CC/ES (v/v%)	pH Inicial	Tag do Reator
4,0 (-)	0,00 (-)	20/80 (-)	7.29 ±0,00	F 1
8,0 (+)	0,00 (-)	20/80 (-)	7.55 ±0,00	F 2
4,0 (-)	0,20 (+)	20/80 (-)	7.43 ±0,00	F 3
8,0 (+)	0,20 (+)	20/80 (-)	7.61 ±0,00	F 4
4,0 (-)	0,00 (-)	40/60 (+)	7.61 ±0,00	F 5
8,0 (+)	0,00 (-)	40/60 (+)	7.35 ±0,00	F 6
4,0 (-)	0,20 (+)	40/60 (+)	7.58 ±0,00	F 7
8,0 (+)	0,20 (+)	40/60 (+)	7.61 ±0,00	F 8

Fonte: Autora, 2023.

Com o intuito de avaliar a variação da carga aplicada (DQO_{apl}) e da composição de substrato (CC/ES) juntamente com a ação do bicarbonato na produção de CH₄. Alguns autores estudaram os efeitos do bicarbonato de sódio visando melhores condições para o meio produtivo (FERNANDES & OLIVEIRA, 2006; ZHANG et al., 2018, DOLL & FORESTI, 2010; ROCHA E SILVA, 2020; BARROS 2022).

Os reatores foram operados até estabilização da produção de CH₄, nas duas etapas. O gás CH₄ foi analisado 3-5 vezes por semana. As análises de DQO, carboidratos e sólidos foram realizados no início e final das bateladas. Após montagem dos reatores, para garantir o ambiente anaeróbio no meio reacional durante o experimento, foi purgado gás nitrogênio puro por cerca de 2 minutos.

Nas duas etapas, foram analisados os parâmetros cinéticos do modelo de Gompertz Modificado (potencial máximo de produção de metano, taxa máxima de produção de metano e duração da fase lag) e avaliados os rendimentos e as taxas de produção volumétricas de metano, as eficiências de remoção de matéria orgânica (DQO) e de carboidratos, a remoção de biomassa (SVT) e o pH.

4.3 REATORES EM BATELADA

Os experimentos das etapas E₁ e E₂ foram realizados em frascos de vidro Duran dispostos em bateladas e em duplicata, todos vedados com rolha de borracha nitrílica e tampa de plástico, com uma válvula de 3 vias acoplada as rolhas para retirada de amostras gasosas (Figura 7).

Os frascos foram mantidos em uma incubadora a 35 °C e sob agitação de 120 rpm. Na primeira etapa (E₁) foram utilizados 14 reatores de 300 mL de volume total (150 mL de volume útil), onde 12 continham as diferentes proporções de caldo de capim elefante (CC) e efluente de suinocultura (ES) e 2 serviu como controle para o inóculo. Na segunda etapa (E₂), com o intuito de manter condições operacionais iguais as da E₁, foram utilizados 16 reatores.

Figura 7: Sistema de válvulas acoplada nos reatores e Seringa utilizadas.



Fonte: Autora, 2023.

4.4 MONITORAMENTO DOS REATORES

O tratamento dos dados da produção de metano em batelada foi apresentado a partir das médias das duplicatas. O gás CH₄ foi coletado com uso de seringa acoplada as válvulas de 3 vias enquanto as amostras líquidas para monitoramento do pH, DQO, carboidratos, sólidos totais foram retiradas no início da incubação e no final do experimento.

As análises de DQO, pH e sólidos foram realizados de acordo com os procedimentos detalhados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os carboidratos totais foram quantificados de acordo com o método de Dubois et al. (1956). Os gases foram determinados a partir de um cromatógrafo gasoso Shimadzu, modelo GC 2010, em

conformidade com o método aplicado por Maintinguer et al. (2008), munido de detector de condutividade térmica (TCD), coluna Carboxen 1010 PLOT com capilar de sílica fundida (30m x0,53mm), temperaturas do injetor, do detector e da coluna em 30, 200 e 230 °C, respectivamente, e tendo argônio como gás de arraste.

4.4.1 Etapa 1 – Influência da Composição do Substrato na Produção de CH₄

Os reatores foram operados por 55 dias até estabilização da produção de CH₄ (variação máxima de 5% do volume acumulado de gás). Nas análises de carboidratos e DQO, devido as características dos substratos apresentarem bastante sólidos em suas amostras, foi necessário a prévia filtração das mesmas, com a finalidade de suprir pequenos desvio na leitura do espectro.

Os efeitos sinérgicos ou antagônicos do caldo do capim elefante (CC) e do efluente de suinocultura (ES) na mistura foram analisados pelo planejamento *Simplex Lattice* aplicado a mistura de dois componentes e quinto grau (CC₀/ES₁₀₀, CC₂₀/ES₈₀, CC₄₀/ES₆₀, CC₆₀/ES₄₀, CC₈₀/ES₂₀, CC₁₀₀/ES₀), tendo como variáveis resposta (dependentes) o rendimento volumétrico de metano por carga aplicada (MY_{DQOapl} - Equação 4.4.1) e a taxa de produção volumétrica de CH₄ por carga aplicada (MPR_{DQOapl} - Equação 4.4.2).

$$MY_{DQOapl} \left(\frac{mL-CH_4}{g-DQO_{apl}} \right) = \frac{mL \text{ de } CH_4 \text{ acumulado } [M(t)]}{grama \text{ de DQO aplicada na partida}} \quad (4.4.1)$$

$$MPR_{DQOapl} \left(\frac{mL-CH_4}{g-DQO_{apl} \cdot d} \right) = \frac{mL \text{ de } CH_4 / \text{dia } (R_m)}{grama \text{ de DQO aplicada na partida}} \quad (4.4.2)$$

M(t) e R_m são parâmetros estimados pelo ajuste dos dados experimentais ao modelo de Gompertz Modificado (Equação 4.4.3) aliado ao *software* OriginPro® 8. Para ensaios em bateladas este é um dos modelos mais utilizados para descrever a produção de metano (HOLLAS et al., 2021; OJEDIRAN et al., 2021; GONZÁLEZ et al., 2017; GONZÁLEZ et al., 2015)

$$M(t) = P \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (4.4.3)$$

Onde:

M(t) = produção acumulada de metano (mL);

P = potencial máximo de produção de metano (mL);

R_m = taxa máxima de produção de metano (mL/h);

λ = intervalo de tempo (fase lag) necessário para o início da produção exponencial de CH_4 (h);

t = tempo (h);

e = constante adimensional de Euler = $\text{Exp}(1) = 2,718$.

Os resultados do experimento *Simplex Lattice* foram analisados no *software* MINITAB Release 20.3, por meio do ajuste aos modelos de regressão linear e quadrático (Equações 4.4.4 e 4.4.5) avaliados com um nível de significância de 5% (valores- $p \leq 0,05$) pela análise de variância (ANOVA) e com teste F de falta de ajuste para verificar a adequação dos modelos aos dados (valores- $p \geq 0,05$).

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 \quad (4.4.4)$$

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (4.4.5)$$

Onde:

y = Variáveis respostas: MY_{DQOapl} e MPR_{DQOapl} ;

x_1 e x_2 = Composição (%) de caldo do capim elefante (CC) e efluente de suinocultura (ES) = x_{CC} e x_{ES} ;

b_1 , b_2 e b_{12} = Coeficientes do modelo = b_{CC} , b_{ES} e b_{CCES} ;

4.4.2 Etapa 2 –Influência da concentração inicial, da alcalinidade e da composição (CC/ES) na produção de CH_4 .

Nesta etapa os reatores foram operados por 84 dias até estabilização da produção de CH_4 (variação máxima de 5% do volume acumulado de gás). O gás CH_4 foi analisado 3-5 vezes por semana. O pH inicial foi entre 7,3 e 7,6. Após aferir o pH, para garantir o ambiente anaeróbio dentro dos reatores durante o período operacional, purgou-se gás nitrogênio puro por cerca de 2 minutos.

O objetivo da utilização da metodologia do planejamento experimental é encontrar um modelo empírico com capacidade de prever o processo em estudo, através da avaliação das variáveis de entrada, concentração de DQO, concentração de bicarbonato (CB), proporção de substrato referente ao caldo de capim elefante (CC).

Na segunda etapa, os resultados do planejamento experimental 2^3 aplicados foram tratados no *software* STATISCA 7.0, por meio do ajuste aos modelos de regressão linear (Equações 4.4.6) avaliados com um nível de significância de 5% (valores- $p \leq 0,05$) pela análise de variância (ANOVA) e com teste F de falta de ajuste para verificar a adequação dos modelos

aos dados (valores-p $\geq 0,05$).

$$y = bo + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (4.4.6)$$

Onde:

y = Variáveis respostas: P, R_m, Fase Lag, MY e MPR;

x₁, x₂ e x₃ = Concentração de DQO, Concentração de bicarbonato (CB), % de Substrato referente ao caldo de capim elefante (CC);

b₁, b₂, b₃, b₁₂, b₁₃, b₂₃ = Coeficientes do modelo linear;

Para um melhor controle e com o intuito de avaliar a estabilidade e desempenho do sistema, os seguintes parâmetros foram acompanhados (i-v):

- i. as eficiências de remoção de matéria orgânica em termos de DQO (E_{DQO} - Equação 4.4.7) e de remoção de carboidratos (E_C - Equação 4.4.8):

$$E_{DQO} (\%) = \left(\frac{DQO_{inicial} - DQO_{final}}{DQO_{inicial}} \right) * 100 \quad (4.4.7)$$

$$E_C (\%) = \left(\frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \right) * 100 \quad (4.4.8)$$

- ii. a eficiência de remoção de biomassa (E_{SVT} - Equação 4.4.9):

$$E_{SVT} (\%) = \left(\frac{SVT_{inicial} - SVT_{final}}{SVT_{inicial}} \right) * 100 \quad (4.4.9)$$

- iii. o rendimento (MMY_{DQOapl} - Equação 4.4.10) e a taxa de produção (MMPR_{DQOapl} - Equação 4.4.11) molares por carga aplicada:

$$MMY_{DQOapl} \left(\frac{mmol-CH_4}{g-DQO_{apl}} \right) = \frac{mmol \text{ de } CH_4 \text{ acumulado}}{\text{grama de DQO aplicada na partida}} \quad (4.4.10)$$

$$MMPR_{DQOapl} \left(\frac{mmol-CH_4}{g-DQO_{apl}.d} \right) = \frac{mmol \text{ de } CH_4 \text{ acumulado/dia (R}_m\text{)}}{\text{grama de DQO aplicada na partida}} \quad (4.4.11)$$

- iv. os rendimentos molares (MMY_{SVTapl} - Equação 4.4.12) e volumétricos (VMY_{SVTapl} - Equação 4.4.13) por biomassa aplicada:

$$MM_{SVT_{apl}} \left(\frac{\text{mmol-CH}_4}{\text{g-SVT}_{apl}} \right) = \frac{\text{mmol de CH}_4 \text{ acumulado}}{\text{grama de SVT aplicado na partida}} \quad (4.4.12)$$

$$VMY_{SVT_{apl}} \left(\frac{\text{mL-CH}_4}{\text{g-SVT}_{apl}} \right) = \frac{\text{mL de CH}_4 \text{ acumulado}}{\text{grama de SVT aplicado na partida}} \quad (4.4.13)$$

- v. as taxas de produção molar ($MHPR_{SVT_{apl}}$ - Equação 4.4.14) e volumétrica ($VHPR_{SVT_{apl}}$ - Equação 4.4.15) por biomassa aplicada:

$$MHPR_{SVT_{apl}} \left(\frac{\text{mmol-CH}_4}{\text{g-SVT}_{apl} \cdot \text{d}} \right) = \frac{\text{mmol de CH}_4 \text{ acumulado/dia (R}_m\text{)}}{\text{grama de SVT aplicado na partida}} \quad (4.4.14)$$

$$VHPR_{SVT_{apl}} \left(\frac{\text{mL-CH}_4}{\text{g-SVT}_{apl} \cdot \text{d}} \right) = \frac{\text{mL de CH}_4 \text{ acumulado/dia (R}_m\text{)}}{\text{grama de SVT aplicado na partida}} \quad (4.4.15)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ETAPA 1 – INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE CH₄.

A seguir foram discutidos os resultados obtidos na primeira etapa (E₁) do estudo, que visou diagnosticar a influência da proporção da composição do substrato, ou seja, verificar qual a melhor proporção de efluente de suíno cultura (ES) e caldo de capim elefante (CC) aprimorou a produção de metano.

5.1.1. Caracterização físico-química dos substratos e do inóculo utilizado.

Na Tabela 5 são apresentadas as principais características físico-químicas dos substratos e do inóculo utilizados nas montagens dos reatores.

Tabela 5: Caracterização do inóculo e substratos utilizados.

Parâmetros	CC	ES	Inóculo
DQO total (g/L)	99,0	25,0	23,76*
Carboidratos totais (g/L)	71,52	5,6	-
Sólidos totais (g/L)	59,2	16,2	30
Sólidos voláteis totais (g/L)	52,9	11,1	24
Sólidos totais fixos (g/L)	6,3	5,1	20,7
NTK (g/L)	0,73	-	-
COT (g/L)	22,9	-	-
C/N	31,4	-	-
pH	5,34	7,13	6,38

CC-Caldo do Capim Elefante; ES- Efluente de suinocultura bruto; *Demanda química de oxigênio (DQO) estimada com base nos sólidos suspensos voláteis. NTK - nitrogênio amoniacal; COT - carbono orgânico total; C/N – relação carbono-nitrogênio;

Fonte: Autora (2023).

O efluente de suinocultura é uma biomassa promissora, onde estudos aplicam o mesmo na biodigestão anaeróbia visando a produção de biogás, tendo em vista que pode fornecer nutrientes importantes para o processo como: carbono, nitrogênio e fósforo.

Romero et al. (2020) avaliaram a produção de metano a partir da digestão anaeróbia do efluente de suinocultura bruto e filtrado usando carvão ativado, obtiveram como resultado físico-químico para o efluente bruto 12,6 g/L de ST, 7,2 g/L de SVT e um pH de 7,58, em

comparação com o presente estudo, constata-se que o efluente de suinocultura é uma fonte promissora para processos anaeróbios.

Com o intuito de incrementar a produção de metano alguns estudos avaliaram a codigestão anaeróbia de resíduos da suinocultura e capim elefante (HUANG et. al, 2019; LIANNHUH, 2020; OJEDIRAN et al., 2021), porém esses estudos foram direcionados a fibra do capim. O intuito é utilizar o caldo do capim elefante e propor uma digestibilidade do efluente de suinocultura.

5.1.2. Eficiências de remoção em termos de carboidratos, DQO e SVT

A Tabela 6 mostra a caracterização inicial e final das misturas de capim elefante e efluente de suinocultura investigadas, bem como as eficiências de remoção em termos de carboidratos, DQO e SVT.

Tabela 6: Características iniciais e finais e eficiências de remoção nos reatores estudados na Etapa 1 (R1=CC₀/ES₁₀₀, R2=CC₂₀/ES₈₀, R3=CC₄₀/ES₆₀, R4=CC₆₀/ES₄₀, R5=CC₈₀/ES₂₀, R6=CC₁₀₀/ES₀).

Parâmetros	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
DQO _{Inicial} (g/L)	4,40 ± 0,05	3,85 ± 0,36	3,76 ± 0,17	3,40 ± 0,14	4,45 ± 0,29	3,12 ± 0,57
DQO _{Final} (g/L)	3,18 ± 0,10	1,78 ± 0,02	2,51 ± 0,04	2,11 ± 0,01	3,24 ± 0,05	2,53 ± 0,01
EdQO (%)	27,73±0,61	53,82 ± 1,04	33,23 ± 0,62	38,06 ± 0,65	27,16 ± 0,60	18,78 ± 0,29
C _{Inicial} (g/L)	1,78± 0,019	1,41 ± 0,002	1,53 ± 0,009	2,34 ± 0,109	2,62 ± 0,037	2,22 ± 0,020
C _{Final} (g/L)	0,83± 0,014	0,82 ± 0,007	0,81 ± 0,028	0,80 ± 0,008	0,82 ± 0,010	0,61 ± 0,020
Ec (%)	53,71±0,48	42,0 ± 0,58	47,39 ± 0,62	65,74 ± 0,77	68,9 ± 0,90	72,48 ± 1,26
STV _{Inicial} (g/L)	14,5 ± 2,84	14,84 ± 0,8	12,53 ± 0,71	11,13 ± 1,93	7,44 ± 0,44	6,72 ± 0,70
STV _{Final} (g/L)	9,31 ± 1,45	6,71 ± 2,25	5,75 ± 0,63	5,44 ± 0,92	4,85 ± 0,51	3,18 ± 0,74
ESTV (%)	35,79 ± 2,60	54,78 ± 4,07	54,11 ± 3,39	51,12 ± 2,85	34,81 ± 1,30	52,68 ± 1,77
pH _{final}	7,10 ± 0,00	7,11 ± 0,13	6,86 ± 0,02	6,56 ± 0,06	5,08 ± 0,0	4,14 ± 0,08
C _{Inicial} , C _{final} e Ec- Concentração de carboidrato inicial e final e eficiência de remoção; DQO _{inicial} , DQO _{final} e EdQO – Concentração de DQO inicial e final e eficiência de remoção; SVT _{inicial} , SVT _{final} e ESTV – Concentração de sólidos voláteis totais inicial e final e eficiência de remoção; ± - desvio padrão.						

Fonte: Autora (2023)

Em relação a DQO_{inicial}, observou-se que as concentrações iniciais ficaram em torno de 3,12 g/L (R6) e 4,40 (R1), mantendo-se aproximadamente em torno do que foi estipulado na metodologia (DQO ≈ 4g/L), o que dificultou a estabilidade foi a característica do efluente de suinocultura, pois o mesmo possuía elevadas concentrações de sólidos voláteis totais. As concentrações finais (DQO_{final}) variaram entre 2,53 g/L (R6). e 3,18 g/L (R1).

Observou-se uma maior eficiência de remoção de 53,82% na condição experimental R2. Autores como Cremonez et al. (2015), que utilizaram águas residuárias de suinocultura e vinhaça, obtiveram melhor eficiência de remoção de 68,40%. Carvalho et al. (2016) estudaram o processo de codigestão anaeróbia com uma mistura de lodo de esgoto (SS) e hidrolisado de capim-elefante (EG) nas fases F1 (75:25) e F2 (50:50, v/v) e obtiveram uma eficiência de remoção da demanda química de oxigênio solúvel (DQOs) em torno de 77% e 86% para os ensaios F1 e F2, respectivamente.

Quanto à concentração de carboidrato inicial, o caldo de capim elefante possui uma maior quantidade de açúcar (R6) de 2,22 g/L em comparação ao efluente de suinocultura (R1) de 1,78 g/L. Observou-se maiores eficiências de remoção nas condições experimentais R4 (65,74%), R5 (68,9%) e R6 (72,48%). Estes exibiram as melhores conversões provavelmente devido a maior disponibilidade de açúcar no caldo do capim elefante para ser consumida pelos microrganismos.

Em relação aos sólidos voláteis totais, inicialmente houve uma variação entre 14,5 (R1) e 6,72 g/L (R6) e no final do experimento variou entre 9,31 (R1) e 3,18 g/L (R6), fato observado provavelmente pelas características do efluente de suinocultura, onde o mesmo possui elevadas concentrações de sólidos totais, em comparação ao caldo do capim elefante.

A remoção de SVT, como é mostrado na Tabela 6, ficou entre 34,81 e 54,78% Cremonez et al. (2015) alcançaram as eficiências de remoção de 29,9% para o reator termicamente controlado contra 25,4% do reator a temperatura ambiente.

Ainda em relação a Tabela 6, o pH final dos reatores R1, R2, R3, R4 se mantiveram próximo a 7,0, o que foi estabelecido no início. Observou-se que mesmo sem a adição de um alcalinizante, o pH ficou na faixa ótima para produção de metano.

Em contrapartida, as condições experimentais R5 (5,08) e R6 (4,14) apresentaram um decaimento no pH, constatando assim que a presença em maior quantidade do caldo de capim acidificou o meio. O que poderia ter favorecido a produção de hidrogênio, fato que não foi observado nas condições relatadas. A presença do gás metano foi detectado em todos os reatores.

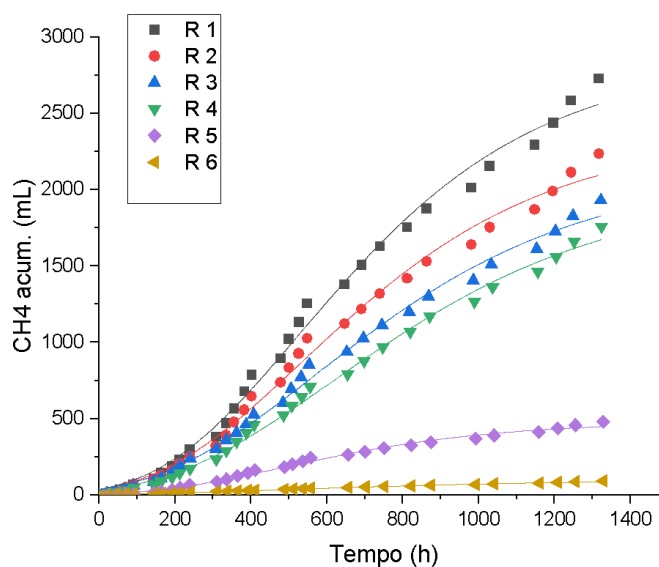
Autores que estudaram a codigestão visando a produção de metano e analisaram o pH na faixa próxima a este estudo e utilizaram resíduos de suinocultura (VILLA et al., 2020; CREMONEZ et al., 2015; ORRICO et al., 2015; YIN et al., 2015) e capim elefante (OJEDIRAN et al., 2021; LIANHUA et al., 2020; THAEMNGOEN et al., 2020; HARYANTO et al., 2018; MOSET et al., 2017; BARROS, 2022).

5.1.3. Produção de metano e parâmetros cinéticos

A Figura 8 e as informações apresentadas no Anexo 1 mostram os dados experimentais de produção acumulada de metano em relação ao tempo para as seis condições operacionais, bem como a curva de ajuste dos dados ao modelo de Gompertz Modificado.

Observou-se que as maiores produções acumuladas foram: 2.235,49 mL-CH₄ (R2-CC₂₀/ES₈₀), 1.930,94 mL-CH₄ (R3-CC₄₀/ES₆₀) e 1.757,81 mL-CH₄ (R4-CC₆₀/ES₄₀). As misturas contendo maiores proporções de efluente de suinocultura tiveram a produção de metano potencializada, em relação à monodigestão do caldo do capim elefante. Portanto, CC20:ES80, CC40:ES60 e CC60:ES40 foram as melhores proporções para codigestão dos substratos.

Figura 8: Produções cumulativas de CH₄ ajustadas ao modelo de Gompertz Modificado em função da proporção de caldo de capim elefante (CC) e efluente de suinocultura (ES) no substrato (R1 = CC₀/ES₁₀₀, R2 = CC₂₀/ES₈₀, R3 = CC₄₀/ES₆₀, R4 = CC₆₀/ES₄₀, R5 = CC₈₀/ES₂₀, R6 = CC₁₀₀/ES₀)



Fonte: Autora (2023)

Ainda sobre a Figura 7, a produção acumulada na monodigestão do efluente de suinocultura foi de 2.728,11 mL-CH₄ (R1-CC₀/ES₁₀₀), sobressaindo à produção de 91,06 mL-CH₄ (R6-CC₁₀₀/ES₀) obtida com o caldo do capim elefante. Os autores Yin et al. (2015) estudaram a monodigestão do estrume suíno e obtiveram uma maior na produção de metano acumulada de 15.020 mL com luminosidade em comparação a 2.675,0 mL na ausência de luz.

Em relação às proporções de mistura dos substratos as melhores condições foram em R2 (CC₂₀/ES₈₀) com 2.235,49 mL-CH₄ e R3 (CC₄₀/ES₆₀) com 1.930,94 mL-CH₄, porém ainda

foi superior a monodigestão do efluente de suinocultura com 2.728,11 mL-CH₄ (R1-CC₀/ES₁₀₀).

As condições experimentais R5 (CC₈₀/ES₂₀) e R6 (CC₁₀₀/ES₀) foram os que apresentaram os menores índices acumulados de CH₄ de 480,39 e 91,06 mL-CH₄, respectivamente. Este fato, possivelmente ocorreu devido à faixa do pH em que os reatores ficaram 5,08 e 4,14, deixando assim o meio mais acidificado e prejudicando a produção. Outra possibilidade observada é que a maior concentração de caldo de capim elefante ocasionou o possível acúmulo de ácidos.

Vale salientar que durante os 55 dias de operação, a presença de H₂ não foi detectada em nenhum reator, ou seja, o experimento respondeu à metodologia adotada.

Todas as situações apresentaram dados com bom ajuste ($R^2 > 0,99$) ao modelo de Gompertz Modificado. A Tabela 7 mostra os parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de regressão. Em relação ao potencial máximo de produção (P), o melhor resultado foi observado em R3 (3.404,44 mL-CH₄) e o menor em R6 (101,05 mL-CH₄). Os maiores valores da taxa máxima de produção (R_m) foram observados nas condições R2 (2,33 mL-CH₄/h), R3 (1,93 mL-CH₄/h) e R4 (1,74 mL-CH₄/h) e representaram mais do que o dobro do alcançado pela monodigestão do caldo do capim R6 (0,083 mL-CH₄/h).

Tabela 7: Parâmetros cinéticos do Modelo de Gompertz Modificado para as condições da Etapa 1 (R1 = CC₀/ES₁₀₀, R2 = CC₂₀/ES₈₀, R3 = CC₄₀/ES₆₀, R4 = CC₆₀/ES₄₀, R5 = CC₈₀/ES₂₀, R6 = CC₁₀₀/ES₀).

Parâmetros cinéticos	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
P (mL)	2861,84 ± 87,15	2370,66 ± 76,72	3404,44 ± 109,88	2022,96 ± 70,45	484,92 ± 12,86	101,05 ± 3,64
R _m (mL/h)	2,92 ± 0,095	2,33 ± 0,0750	1,93 ± 0,052	1,74 ± 0,042	0,54 ± 0,019	0,083 ± 0,0024
λ (h)	167,85 ± 11,98	160,76 ± 12,17	163,2 ± 10,99	187,95 ± 10,09	149,83 ± 12,67	55,87 ± 12,91
R ²	0,99404	0,99384	0,99499	0,9958	0,9935	0,9933

P - Potencial máximo de produção de CH₄; R_m - Taxa máxima de produção de CH₄; λ (h) - Duração da fase lag; R² - Coeficiente de regressão.

Fonte: Autora (2023)

Em relação a fase lag, a condição experimental que apresentou menor fase de adaptação foi o R6 (55 h), porém nessa mesma condição expressou os menores índices referente ao potencial máximo e a taxa máxima de produção.

As condições R1, R2, R3 e R4 apresentaram resultados similares e constatou-se que para alcançar índices maiores tanto no potencial quanto na taxa, foi necessária uma fase lag acima de 160h.

5.1.4. Rendimento e taxa de produção de metano

Na Tabela 8 são apresentados os resultados de rendimento e taxa de produção de CH₄, volumétricas, em relação a DQO e biomassa aplicada (SVT).

Tabela 8: Parâmetros indicadores de desempenho para as condições avaliadas na Etapa 1 (R1 = CC₀/ES₁₀₀, R2 = CC₂₀/ES₈₀, R3 = CC₄₀/ES₆₀, R4 = CC₆₀/ES₄₀, R5 = CC₈₀/ES₂₀, R6 = CC₁₀₀/ES₀).

Parâmetros	Unidades	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
VMY _{DQOapl}	mL-CH ₄ /g-DQO _{Apl}	4133,50	3921,90	3432,78	3446,69	727,87	195,84
VMY _{SVTapl}	mL-CH ₄ /g-SVT _{Apl}	1254,30	1004,26	1027,37	1052,90	430,46	90,34
MMY _{DQOapl}	mmoL-CH ₄ /g-DQO _{Apl}	150,08	142,40	124,64	125,14	16,96	7,11
MMY _{SVTapl}	mmoL-CH ₄ /g-SVT _{Apl}	45,54	36,46	37,30	38,23	10,03	3,28
VMPR _{DQOapl}	mL-CH ₄ /g-DQO _{Apl} d	106,18	98,11	82,35	81,88	19,64	4,28
VMPR _{SVTapl}	mL-CH ₄ /g-SVT _{Apl} d	32,22	25,12	24,64	25,01	11,61	1,98

VMY_{DQOapl}, VMY_{SVTapl} - Rendimentos volumétrico por carga e biomassa aplicada MMY_{DQOapl}, MMY_{SVTapl} - Rendimentos molar por carga e biomassa aplicada; VMY_{DQOapl} e VMPR_{DQOapl} e VMPR_{SVTapl} - taxas de produção volumétricas, por carga aplicada e biomassa aplicada;

Fonte: Autora (2023)

Em relação as condições de monodigestão (R1 e R6), a R1 (CC₀/ES₁₀₀) mostrou-se mais eficiente em relação ao R6 CC₁₀₀/ES₀, tanto para o rendimento quanto para a taxa de produção.

A codigestão nas condições R4, R3 e R2 a medida que o efluente de suinocultura aumentou, observou-se um aumento significativo no rendimento de metano para nas condições R4 (3.446,69 mL_{CH4}/g-DQO_{apl}), R3 (3.432,78 mL_{CH4}/g-DQO_{apl}) e R2 (3.921,90 mL_{CH4}/g-DQO_{apl}). A monodigestão do caldo de capim elefante resultou em apenas 195,84 mL_{CH4}/g-DQO_{apl}. Logo, a presença do efluente de suinocultura foi favorável para o sistema.

Vale salientar, que em R3-CC₄₀/ES₆₀ e R4-CC₆₀/ES₄₀, a quantidade de CC no sistema demonstraram valores similares. Deste modo, foram avaliados em uma segunda etapa juntamente com outros fatores para melhor avaliar a interação. O mesmo comportamento foi observado em relação ao rendimento molar de CH₄ por carga aplicada.

Ainda em relação à Tabela 8, para o rendimento de CH₄ por biomassa aplicada, os reatores R2, R3 e R4 apresentaram os melhores resultados. A composição de 60% de caldo de capim elefante e 40% de efluente suinocultura resultou na melhor produção de 1.052,90 mL_{CH4}/g-SVT_{apl}, superior à monodigestão do caldo do capim elefante que apresentou valor de 90,34 mL_{CH4}/g-SVT_{apl}.

Lianhua et al. (2020) avaliaram o desempenho da comunidade microbiana na codigestão da espécie *Pennisetum* e o esterco suíno. Os autores estudaram as proporções de mistura

(capim:esterco) [50:50 e 75:25], e obtiveram os rendimentos específico e volumétrico de biogás de 383,86 a 574,28 mL/gSV e 0,87 a 2,36 m³/(m³d), respectivamente. Observa-se um comportamento similar ao presente estudo, visto que o maior rendimento foi dado na composição 75% de capim e 25% esterco suíno, ou seja, o capim estava em maior quantidade.

Barros (2022) também alcançou um rendimento de 1091,56 mL_{CH₄}/g-SV na proporção 75% de caldo de capim e 25% vinhaça. Em contrapartida, Rocha e Silva (2020) encontrou o melhor rendimento de 370,94 mL_{CH₄}/gSV na proporção de 50% de caldo de capim e 50% vinhaça.

Quanto à taxa de produção de CH₄ por carga aplicada, o resultado mínimo de 4,28 mL CH₄/[g-DQO_{apl.d}] foi obtido em R6 e o máximo de 106,18 mL CH₄/[g-DQO_{apl.d}] em R1. Já a taxa de produção por biomassa aplicada, apresentou um menor resultado de 1,8 mLCH₄/[gSVT_{apl.d}] em R1 e maior de 32,22 mLCH₄/[gSVT_{apl.d}] em R6. Constatando assim, que a monodigestão do efluente de suinocultura se sobressaiu em relação ao caldo do capim elefante.

Riaño et al. (2011) avaliaram a produção de metano por codigestão anaeróbia de dejetos suínos com água residuária de vinícola, em reator operando em batelada e de modo semicontínuo, sob condições mesofílicas. Os experimentos revelaram que a produção de metano a partir dos dejetos suínos sem adição de água residuária de vinícola foi de 27 mLCH₄/gDQOd, em reatores contínuos e 256 mLCH₄/gDQOd em reatores semicontínuo.

5.1.5. Análise estatística

Na Tabela 9 são mostrados os resultados da análise de variância (ANOVA) dos modelos lineares e quadráticos para as variáveis respostas (rendimentos e taxas de produção volumétricos por carga aplicada).

Analizando os valores calculados de F para as regressões ($MQ_{regressão}/MQ_{resíduo}$) referentes aos modelos quadráticos de rendimento e de taxa de produção de CH₄ (F-cal_{2,3}) são 16,42 e 21,46, respectivamente. Já para o modelo linear (F-cal_{1,4}) são 19,14 e 26,80. Já os valores tabelados de F, no nível de 95% de confiança, são 9,55 (F-tab_{2,3}) para os modelos quadráticos e 7,71 (F-tab_{1,4}) para os modelos lineares. Logo, comparando os F calculados com os F tabelados, ambos modelos apresentaram uma significância plausível a partir do teste F de regressão.

Tabela 9: ANOVA para os modelos lineares e quadráticos.

Modelo	Resposta	R ² (%)	Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-P
Linear	MY _{DQOapl}	82,71	Regressão	1	12227737	12227737	19,14	0,012
			Erro de Resíduo	4	2555423	638856		
			Total	5	14783160			
	MPR _{DQOapl}	87,01	Regressão	1	7937	7937,0	26,80	0,007
			Erro de Resíduo	4	1184	296,1		
			Total	5	9121			
Quadrático	MY _{DQOapl}	91,63	Regressão	2	13545480	6772740	16,42	0,024
			Erro de Resíduo	3	1237680	412560		
			Total	5	14783160			
	MPR _{DQOapl}	93,47	Regressão	2	8525,7	4262,8	21,46	0,017
			Erro de Resíduo	3	595,8	198,6		
			Total	5	9121,5			

MY_{DQOapl} - rendimento volumétrico de CH₄ por carga aplicada; MPR_{DQOapl} - taxa de produção volumétrica de CH₄ por carga aplicada; GL - grau de liberdade; SQ - soma quadrática; MQ - média quadrática.

Fonte: Autora (2023)

Em contrapartida em relação ao R², observou-se que tanto para o modelo quadrático quanto para o linear o rendimento e a taxa de produção de CH₄, foram estatisticamente significativos ($p < 0,05$) e apresentam R² (0,92 e 0,94) e (0,83 e 0,87), respectivamente. Se sobressaindo o modelo quadrático comparado ao linear, por apresentar R² maior.

Tabela 10: Coeficientes de regressão, erros padrão e significados estatísticos obtidos pelo modelo quadrático.

Resposta	Coefficiente	Estimativa	Erro padrão	Valor-P
VMY _{DQOapl}	Cc	-73	582	0,172
	ES	4107	582	
	CCES	4697	2628	
VMPR _{DQOapl}	Cc	-1,1	12,8	0,184
	ES	105,4	12,8	
	CCES	99,3	57,7	

MY_{DQOapl} - rendimento volumétrico de CH₄ por carga aplicada; MPR_{DQOapl} - taxa de produção volumétrica de CH₄ por carga aplicada.

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 10 estão apresentados os termos de interação bifásica entre os componentes, e revelam que as misturas apresentam efeitos sinérgicos ($b_{CCES} > 0$), com coeficientes 4697 para o rendimento e 99,30 para a taxa de produção. Com isso, os dois componentes, caldo de capim elefante e efluente de suinocultura, interagiram sinergicamente entre si, contribuindo para a melhora do rendimento e da taxa de produção de metano.

Os modelos quadráticos resultam nas Equações 5.1.1 e 5.1.2, a partir das quais é possível prever as respostas de rendimento e de taxa de produção de metano, respectivamente, para quaisquer proporções de CC e ES.

$$VMY_{DQOapl} = -73x_{CC} + 4107x_{ES} + 4697x_{CC}x_{ES}, R^2 = 91,63\% \quad \text{Equação 5.1.1}$$

$$VMPR_{DQOapl} = -1,1x_{CC} + 105,4x_{ES} + 99,3x_{CC}x_{ES}, R^2 = 93,47\% \quad \text{Equação 5.1.2}$$

Olugbemide et al. (2012) avaliaram codigestão anaeróbica de folhas de milho (ML) com capim elefante (EG) e investigaram os efeitos sinérgicos e antagônicos dos substratos na produção de biogás. Estabeleceram seis tratamentos nas proporções ML/EG (A-100/0, B-90/10, C-80/20, D-70/30, E-60/40). Concluíram que as condições B e E tiveram efeitos sinérgicos na produção de biogás com 870 mLCH₄ e 610 mLCH₄, respectivamente. Em contrapartida, as condições C e D tiveram efeitos negativos na produção de biogás 460 mLCH₄ e 400 mLCH₄.

Em contrapartida, López González et al. (2015) avaliaram a codigestão a partir de lama da prensagem da cana de açúcar pré-tratada termicamente (fração líquida e sólida) e vinhaça pura, e diagnosticaram efeitos antagônicos para a maioria das misturas examinadas, principalmente nas misturas de vinhaça com a fração líquida.

Comparando os modelos lineares e os quadráticos de acordo com a Tabela 11, comprovou-se que os resultados previstos referentes ao modelo quadráticos apresentaram proximidades aos resultados experimentais, constatando assim o melhor ajuste para o modelo em questão.

Tabela 11: Rendimentos e taxas de produção de CH₄ experimentais e previstos.

	Misturas	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
Rendimento (mL-CH ₄ /gDQOapl)	Experimental	4133,5	3921,9	3432,78	3446,69	727,87	195,84
	Previsto L	4733,00	3897,00	3061,00	2225,00	1389,00	553,00
	Previsto Q	4107	4022,52	3562,28	2726,28	1514,52	-73
Taxa de Produção (mL-CH ₄ /(g-DQOapl.d))	Experimental	106,18	98,11	82,35	81,88	19,64	4,28
	Previsto L	118,6	97,32	76,04	54,76	33,48	12,2
	Previsto Q	105,4	99,988	86,632	65,332	36,088	-1,1

L - Valores obtidos pela parte linear do modelo quadrático (sem interações sinérgicas ou antagônicas).

Q- Valores obtidos pelo modelo quadrático considerando interações sinérgicas ou antagônicas. Fonte: Autora, 2023.

5.2 ETAPA 2 – INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO INICIAL, DA ALCALINIDADE E DA COMPOSIÇÃO (CC/ES) NA PRODUÇÃO DE CH₄.

Os resultados da segunda etapa (E₂) foram tratados no *Statistica 7.0*, foi possível delinear o comportamento dos parâmetros expressos no planejamento 2³ em relação ao potencial máximo de produção (P), taxa máxima de produção (R_m), fase lag, rendimento volumétrico (MY) e taxa de produção volumétrica (MPR).

5.2.1 Eficiências de remoção em termos de carboidratos, DQO e biomassa aplicada

A Tabela 12 mostra a caracterização inicial e final das misturas de capim elefante e efluente de suinocultura investigadas, bem como as eficiências de remoção em termos de carboidratos, DQO e SVT.

Tabela 12: Características iniciais e finais e eficiências de remoção nos reatores estudados na Etapa 2. [F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C_{DQO}; CB; CC/ES)]

Parâmetros	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
DQO _{Inicial} (g/L)	4,51 ± 0,02	7,13 ± 0,21	3,77 ± 0,09	7,23 ± 0,16	4,87 ± 0,14	8,64 ± 0,19	5,61 ± 0,024	8,42 ± 0,26
DQO _{Final} (g/L)	1,26 ± 0,18	1,77 ± 0,15	1,20 ± 0,17	1,48 ± 0,15	2,76 ± 0,02	4,87 ± 0,73	1,64 ± 0,02	2,01 ± 0,14
E _{DQO} (%)	71,86 ± 0,07	75,12 ± 0,03	68,10 ± 0,04	79,41 ± 0,007	43,12 ± 0,06	43,53 ± 0,27	70,72 ± 0,002	76,09 ± 0,05
C _{Inicial} (g/L)	1,03 ± 0,15	2,07 ± 0,33	1,01 ± 0,046	2,63 ± 0,124	2,32 ± 0,13	4,40 ± 0,12	2,33 ± 0,081	4,42 ± 0,24
C _{Final} (g/L)	0,444 ± 0,13	0,162 ± 0,002	0,207 ± 0,023	0,372 ± 0,068	0,206 ± 0,019	0,145 ± 0,019	0,122 ± 0,01	0,217 ± 0,01
Ec (%)	56,83 ± 0,01	92,17 ± 0,16	81,26 ± 0,01	85,87 ± 0,02	91,71 ± 0,057	96,71 ± 0,052	94,78 ± 0,037	95,08 ± 0,12
STV _{Inicial} (g/L)	2,31 ± 0,56	7,69 ± 2,06	4,94 ± 0,44	8,38 ± 0,44	2,87 ± 0,38	5,00 ± 1,00	5,69 ± 0,94	8,06 ± 3,56
STV _{Final} (g/L)	1,81 ± 1,19	3,31 ± 0,31	1,56 ± 0,44	2,63 ± 0,56	2,31 ± 0,81	1,37 ± 0,75	3,56 ± 0,31	1,94 ± 0,53
E _{STV} (%)	21,62 ± 0,35	61,41 ± 3,73	68,35 ± 2,39	68,66 ± 4,07	19,57 ± 0,40	72,50 ± 2,56	37,36 ± 1,50	75,97 ± 4,33
pH _{final}	6,43 ± 0,01	6,63 ± 0,02	7,39 ± 0,02	8,10 ± 0,135	5,76 ± 0,015	4,47 ± 0,04	7,29 ± 0,06	7,55 ± 0,005

C_{inicial}, C_{final} e E_C- Concentração de carboidrato inicial e final e eficiência de remoção; DQO_{inicial}, DQO_{final} e E_{DQO} – Concentração de DQO inicial e final e eficiência de remoção; SVT_{inicial}, SVT_{final} e E_{SVT} – Concentração de sólidos voláteis totais inicial e final e eficiência de remoção; ± - desvio padrão.

Fonte: Autora (2023)

Em relação a $DQO_{inicial}$, observou-se que as concentrações iniciais se mantiveram aproximadamente em torno do que foi estipulado na metodologia, as condições experimentais F1, F3, F5, F7 mantiveram-se próximos a 4,0 g/L e F2, F4, F6, F8 próximos a 8,0 g/L.

Pelas características iniciais do efluente de suinocultura, a presença elevada de sólidos voláteis dificultou a estabilidade da carga inicial no desenvolvimento da pesquisa. Verificou-se que as condições F2 (75,12%), F4 (79,41%), F8 (76,09%) apresentaram as maiores eficiência de remoção em relação a carga aplicada E_{DQO} (%).

No geral, este desempenho de remoção de DQO pode ser comparável ou até mesmo superior a digestão de substratos similares, como Carvalho et al. (2016) que alcançaram uma eficiência de remoção em torno de 77% e 86% e Huang et. al (2019) $91,3 \pm 2,0$ %, ambos estudos utilizaram hidrolisado ácido de capim elefante, por fim Romero et al. (2020) obtiveram uma eficiência de 76,7% avaliando a CoDA do efluente de suinocultura e carvão ativado.

Em relação a digestão anaeróbia do capim napier fresco em dois estágios, os autores Sinbuathong et al. (2016) alcançaram uma remoção de DQO e STV de 75% e 63%, respectivamente.

No que se refere a concentração de carboidrato inicial ($C_{Inicial}$), houve uma variação entre 1,01 (F3) e 4,42 g/L (F8), e as maiores eficiências de remoção deu-se nas condições F7 (94,78%), F8 (95,08 %) e F6 (96,71%), ambos na mesma composição de 40/60 (CC/ES).

Quanto à concentração inicial de sólidos voláteis totais, observou-se que nas condições F2, F3, F4, F7 e F8 apresentaram uma proximidade aos valores da $DQO_{inicial}$ nas respectivas condições, em contrapartida, F1, F5 e F6 não acompanharam o mesmo comportamento. Em relação a eficiência de remoção de SVT, verificou-se que as condições F2 (61,41%), F4 (68,66%), F6 (72,50%) e F8 (75,97%) atingiram as maiores eficiências, em relação a F5 (19,57%), F1 (21,62%), e F7 (37,36%).

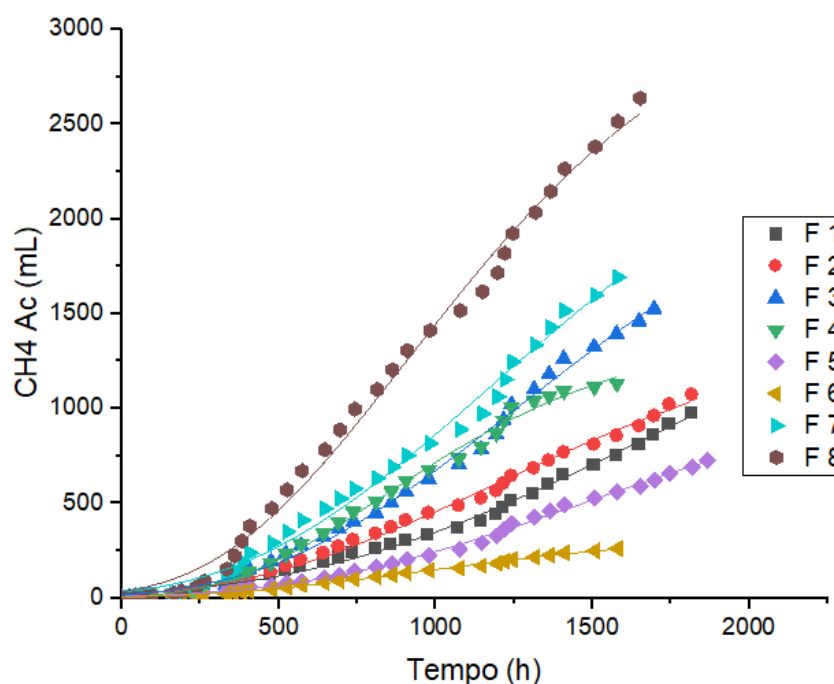
Ainda na Tabela 11, referente ao pH_{final} , nas condições experimentais F3, F4, F7 e F8 os quais foram adicionados bicarbonato de sódio verificou-se um tamponamento mais eficiente, em comparação com a F1, F2, F5 e F6 que não foram adicionados alcalinizantes. O papel do bicarbonato foi fundamental para manutenção do pH e consequentemente do meio alcalino proporcionando a atividade das arqueas metanogênicas. Observou-se ainda que nos reatores F5 (5,76) e F6 (4,47) apresentaram decaimento no pH, mesmo diante desta faixa de pH foi possível detectar a presença do gás metano nos respectivos reatores.

Os autores Mao et al. (2017) alcançaram como melhores condições para o rendimento máximo de metano e a taxa de produção de metano a um $pH_{inicial}$ 7,5 e composição de substrato dejetos suíno/palha de milho de 70/30.

5.2.2 Produção de metano e parâmetros cinéticos

A Figura 9 e as informações apresentadas no Anexo II (Tabela 18) mostram os dados experimentais de produção acumulada de metano em relação ao tempo para as oito condições operacionais, bem como a curva de ajuste dos dados ao modelo de Gompertz Modificado.

Figura 9: Produções cumulativas de CH₄ ajustadas ao modelo de Gompertz Modificado referente ao Planejamento Experimental utilizado na Etapa 2. [F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C_{DQO};CB;CC/ES)].



Fonte: Autora (2023)

Durante os 84 dias de operação, a produção de metano foi detectada em todas as condições. Como podem ser vistos na Figura 8, a fase lag (fase de adaptação dos microrganismos) durou cerca de 13 dias (290 h), visto que para produção de metano a duração da fase lag é mais longa em comparação a produção de hidrogênio.

Diante do exposto, as maiores produções acumuladas destacaram-se as condições F3 (15244,68 mL_{CH₄}), F7 (1691,92 mL_{CH₄}) e F8 (2637,39 mL_{CH₄}). Um fator comum a esses reatores foi a adição de bicarbonato de sódio, ou seja, devido a manutenção do pH o meio reacional potencializou a produção de metano.

Em contrapartida, os menores índices acumulados ocorreram nas condições F5 (726,90 mL_{CH₄}) e F6 (260,73 mL_{CH₄}). Este fato, possivelmente ocorreu devido o decaimento do pH_{final} onde ficaram 5,76 e 4,47, deixando assim o meio mais acidificado e prejudicando a

produção de metano. Portanto, pode-se afirmar que a adição de bicarbonato de sódio foi positiva para a produção de metano na segunda etapa (E_2).

Na Tabela 13, encontram-se os parâmetros cinéticos obtidos com o modelo de regressão e todas as situações os dados apresentaram ajuste ($R^2 > 0,99$) ao modelo de Gompertz Modificado. Autores como Almomani & Bhosale (2020) e Mao et al. (2017) avaliaram o mesmo modelo cinético e obtiveram ótimos valores de $R^2 > 0,99$.

Constatou-se em relação ao potencial máximo de produção (P), que o maior potencial foi observado na condição experimental F8 (3387,70 mL_{CH4}) e o menor na F6 (362,33 mL_{CH4}) e os maiores valores da taxa máxima de produção (Rm) foram observados nas condições F8 (2,12 mL_{CH4}/h), F7 (1,45mL_{CH4}/h) e F3 (1,74 mL_{CH4}/h).

Em relação a fase de adaptação (fase lag), observou-se que o melhor resultado foi no reator F6, onde o mesmo apresentou aproximadamente 307 horas (12 dias), fazendo um comparativo com estudo de Mao et al. (2017), eles obtiveram uma melhor fase lag em 5 dias, avaliando a codigestão de dejetos suínos e palha de milho. Já o estudo de Almomani & Bhosale (2020) alcançaram em 1,5 dias analisando a codigestão de resíduos agrícolas e esterco de vaca.

Para avaliar a eficiência do processo são levados em consideração uma fase lag mais curta, fato que interfere diretamente em uma produção de metano mais rápida. Isso ocorre porque ambos os parâmetros permitem reduzir o tamanho do digestor, resultando em economia significativa nos custos de implementação (Bohutskyi et al., 2018).

Tabela 13: Parâmetros cinéticos do Modelo de Gompertz Modificado para as condições da Etapa 2. F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C_{DQO}; CB; CC/ES)]

Parâmetros cinéticos	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8
P (mL)	3555,83±473,67	1598,78±98,60	2671,46±197,30	1439,03±53,37	1405,65±92,55	369,33±16,90	3047,038±370,93	3387,70±184,99
R _m (mL/h)	0,97 ± 0,059	0,76 ± 0,013	1,29 ± 0,026	1,09±0,024	0,58 ± 0,011	0,22±0,003	1,45 ± 0,050	2,12±0,049
λ (h)	801,63 ± 65,28	407,21± 16,25	482,93 ± 18,25	342,48 ± 11,53	603,54 ± 19,15	307,43 ± 10,78	408,36 ± 30,37	316,05±15,30
R ²	0,996	0,995	0,996	0,996	0,997	0,997	0,991	0,994

P - Potencial máximo de produção de CH₄; R_m - Taxa máxima de produção de CH₄; λ (h) - Duração da fase lag; R² - Coeficiente de regressão.

Fonte: Autora (2023)

5.2.3 Rendimento e taxa de produção volumétrica de metano

Na Tabela 14 são apresentados os resultados de rendimento e taxa de produção de CH₄, volumétricas, em relação a DQO aplicada e biomassa aplicada (SVT).

Tabela 14: Parâmetros indicadores de desempenho para as condições avaliadas na Etapa 2. [F1=4;0;20/80, F2=8;0;20/80, F3=4;0,2;20/80, F4=8;0,2;20/80, F5=4;0;40/60, F6=8;0;40/60, F7=4;0,2;40/60, F8=8;0,2;40/60(C_{DQO}; CB; CC/ES)]

Parâmetros cinéticos	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
VMY (mL _{CH4} /g _{DQOapl})	1779,22±259,46	1004,37±14,16	2704,37±183,36	1037,52±221,54	996,89±26,98	200,78±17,97	1770,36±251,05	2090,22±103,67
VMPR (mL _{CH4} /g _{DQOh})	1,50±0,04	0,72 ±0,03	2,31±0,18	1,02 ±0,31	0,82 ±0,0	0,17 ± 0,02	1,52 ± 0,22	1,68 ±0,10
VMPR (mL _{CH4} /g _{DQOd})	36 ± 0,96	17,28 ±0,72	55,44 ± 4,32	24,48 ± 7,44	19,68 ±0,0	4,08 ±0,48	36,48 ±5,28	40,32 ±2,40
VMY (mL _{CH4} /g _{SVTApI})	3464,58±60,31	932,97 ±12,16	2066,17 ±96,29	907,47 ±239,94	1688,55 ± 68,79	349,7 ± 13,77	1751,03 ± 49,75	2246,08±361,64
VMPR (mL _{CH4} /g _{SVTh})	2,96±0,31	0,67 ±0,01	1,76 ±0,06	0,90 ± 0,31	1,38 ± 0,02	0,29 ±0,01	1,50 ± 0,04	1,80 ± 0,27
VMPR (mL _{CH4} /g _{SVTd})	71,04±7,44	16,08 ±0,24	42,24 ±1,44	21,06 ±7,44	33,12 ±0,48	6,96 ± 0,24	36,0 ± 0,96	43,2 ± 6,48

VMY_{DQOapl}, VMY_{SVTApI}- Rendimentos volumétrico por carga e biomassa aplicada; VMPR_{DQOapl} e VMPR_{SVTApI} - taxas de produção volumétricos, por carga aplicada e biomassa aplicada;

Fonte: Autora (2023)

De acordo com o exposto, os maiores rendimentos volumétricos deram-se nas condições F3 (2.704,37 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}}) e F8 (2.090,22 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}}) e os menores índices foram nas condições F6 (200,78 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}}) e F5 (996,89 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}}). O mesmo comportamento foi observado em relação a taxa de produção volumétrica, onde as condições F8 (40,32 mL_{CH4}/g_{DQOd}) e F3 (55,44 mL_{CH4}/g_{DQOd}) apresentaram as maiores taxas e as condições F6 (4,08 mL_{CH4}/g_{DQOd}) e F5 (19,68 mL_{CH4}/g_{DQOd}) as menores.

Vale salientar, que em F1 onde as condições eram (4 g/L; 0,0 g/g; 20/80) em comparação com F3 (4 g/L; 0,20 g/g; 20/80), constatou-se um aumento de 1.779,22 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}} para 2704,37 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}} e no rendimento de 36,0 mL_{CH4}/g_{DQOd} para 55,44 mL_{CH4}/g_{DQOd}, mesmo comportamento foi observado quando se compara as condições F5 (4 g/L; 0,0 g/g; 40/60) e F7 (4 g/L; 0,20 g/g; 40/60).

O mesmo acontece nas condições F2 (8 g/L; 0,0 g/g; 20/80) e F4 (8 g/L; 0,20 g/g; 20/80), verificou-se uma proximidade nos valores de 1004,37 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}} e 1037,52 mL_{CH4}/g_{DQO_{Apl}} e pequeno acréscimo no rendimento de 17,28 mL_{CH4}/g_{DQOd} para 24,48 mL_{CH4}/g_{DQOd}, mesmo comportamento foi observado quando se compara as condições F6 (8 g/L; 0,0 g/g; 40/60) e F8 (8 g/L; 0,20 g/g; 40/60).

Com isso, reforça-se mais uma vez que a presença de bicarbonato de sódio foi um fator positivo para esse crescimento em todas as condições acima citadas.

Almomani & Bhosale (2020) estudaram o efeito do bicarbonato de sódio na codigestão de resíduos sólidos agrícolas e esterco de vaca e alcançaram uma produção acumulada de metano de 297,99 NL/kgVS na proporção de 60/40 e observaram que a adição de 1,0 g de NaHCO₃/gVS levando à redução dos componentes lignina, celulose e hemicelulose em 3,5%, 10,5% e 15,9%, respectivamente. O uso do alcalinizante melhorou a produção de metano em 29,7%.

5.2.4 Análise estatística

Análise de Significância dos Efeitos e Diagrama de Pareto

Os coeficientes de regressão e correlação, bem como os erros padrão dos planejamentos experimentais, teste t e p-valor, considerando-se 5% de significância, descritos na Tabela 15.

Tabela 15: Coeficientes de regressão, erros padrão e valor de p do planejamento experimental 2³ utilizado na E₂.

Tratamento	Variáveis	Efeito	R ²	Erro Padrão	t (8)	p-valor
P (mL)	Média*	2192,228	0,91882	105,9218	20,69667	0,000000
	(1) DQO (g/L) *	-950,483		211,8435	-4,48672	0,002038
	(2) CB (g/g) *	729,227		211,8435	3,44229	0,008794
	(3) % CC	-450,494		211,8435	-2,12654	0,066148
	1 X 2*	741,272		211,8435	3,49915	0,008089
	1 X 3*	772,154		211,8435	3,64492	0,006542
	2 X 3*	1336,258		211,8435	6,30776	0,000231
Rm (mL/h)	Média*	1,050713	0,85742	0,052496	20,01515	0,000000
	(1) DQO (g/L)	0,009377		0,104992	0,08932	0,931026
	(2) CB (g/g) *	0,804028		0,104992	7,65801	0,000060
	(3) % CC	0,000437		0,104992	0,00417	0,996777
	1 X 2*	0,319550		0,104992	3,04357	0,015976
	1 X 3	0,221755		0,104992	2,11212	0,067650
	2 X 3*	0,486100		0,104992	4,62989	0,001688
Fase Lag (h)	Média*	469,261	0,88856	21,89569	21,43166	0,000000
	(1) DQO (g/L) *	-244,449		43,79139	-5,58213	0,000521
	(2) CB (g/g) *	-162,048		43,79139	-3,70045	0,006039
	(3) % CC *	-118,070		43,79139	-2,69620	0,027234
	1 X 2*	145,002		43,79139	3,31120	0,010679
	1 X 3	45,011		43,79139	1,02785	0,334090
	2 X 3	46,866		43,79139	1,07021	0,315748
MY (mLCH ₄ /gDQOapl)	Média*	1447,966	0,83991	59,2985	24,41823	0,000000
	(1) DQO (g/L) *	-729,490		118,5971	-6,15099	0,000274
	(2) CB (g/g) *	905,300		118,5971	7,63341	0,000061
	(3) % CC *	-366,806		118,5971	-3,09288	0,014825
	1 X 2	55,992		118,5971	0,47212	0,649451
	1 X 3*	491,364		118,5971	4,14314	0,003239
	2 X 3*	426,150		118,5971	3,59326	0,007051
MPR (mLCH ₄ /gDQOh)	Média*	1,215875	0,87795	0,054372	22,36205	0,000000
	(1) DQO (g/L) *	-0,638139		0,108744	-5,86824	0,000375
	(2) CB (g/g) *	0,832063		0,108744	7,65154	0,000060
	(3) % CC *	-0,342579		0,108744	-3,15032	0,013592
	1 X 2	0,075856		0,108744	0,69756	0,505215
	1 X 3*	0,393560		0,108744	3,61913	0,006791
	2 X 3*	0,274964		0,108744	2,52853	0,035336

* fatores estatisticamente significativos (95% confiança) 1 – Concentração de DQO (g/L); 2 – Concentração de Bicarbonato de Sódio (CB) (g/g); 3 – % Composição de Caldo de Capim Elefante (CC)

Fonte: Autora (2023)

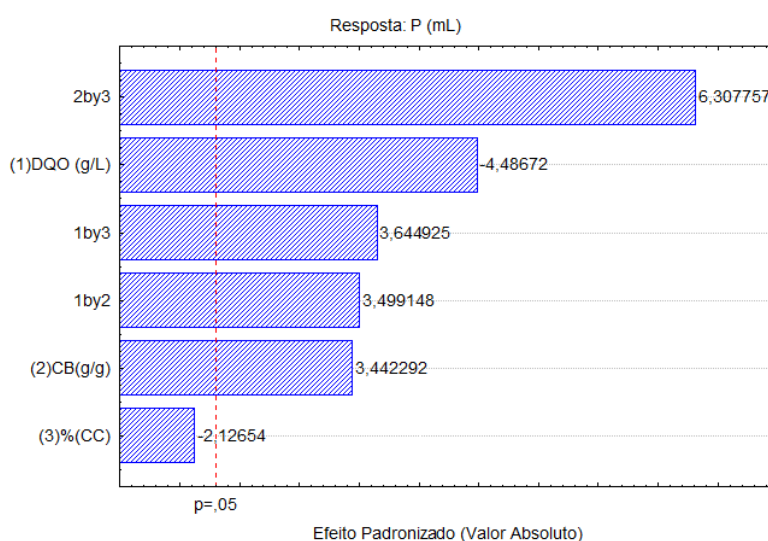
Sabe-se que interações são estatisticamente significativas a partir da verificação dos valores de teste t, p-valor, como também do limite de confiança. O teste t comparou-se o valor t (8) com o t_{student} , ou seja, se $|t| > t_{\text{student}}$, seja $t_{\text{student}} = 2,31$ juntamente com o p-valor, onde considera-se $p < 0,05$, conclui-se que diante dessas constatações as interações são estatisticamente significativas.

A seguir iremos analisar a influência das variáveis independentes e das interações entre elas do planejamento 2^3 sobre os fatores (P, Rm, fase lag, MY e MPR) através da Tabela de efeitos e dos diagramas de Pareto (i-iv).

A influência da concentração inicial (DQO), concentração de bicarbonato de sódio (CB) e da composição de substrato (CC/ES) no potencial máximo de produção P (mL).

Em relação ao potencial máximo de produção (P), observa-se na Tabela 15 que a porcentagem de caldo de capim elefante (CC) não atingiu o nível de 95% de confiabilidade, porém os parâmetros DQO e CB foram significativos. A concentração de DQO interagiu tanto com CB quanto com %CC, em contrapartida a concentração de bicarbonato (CB) sua única interação foi com a %CC, ambas correlações foram significativas e exerceram influência para o aumento do potencial.

Figura 10: Gráfico de Pareto referente ao potencial máximo.



1 – Concentração de DQO (g/L); 2 – Concentração de Bicarbonato de Sódio (CB) (g/g); 3 – % Composição de Caldo de Capim Elefante (CC) Fonte: Autora (2023)

Como pode ser visto no diagrama de Pareto (Figura 10), é possível identificar que os efeitos da concentração de bicarbonato (2), da interação entre CB e %CC (2x3), da interação DQO e CB (1x2), como também a interação DQO e %CC (1x3) foram significativos e apresentaram um efeito positivo sobre o potencial máximo de produção, relacionando os fatores, quanto mais bicarbonato juntamente com o caldo de capim elefante estiver presente no meio reacional, melhor será o comportamento do potencial máximo de produção.

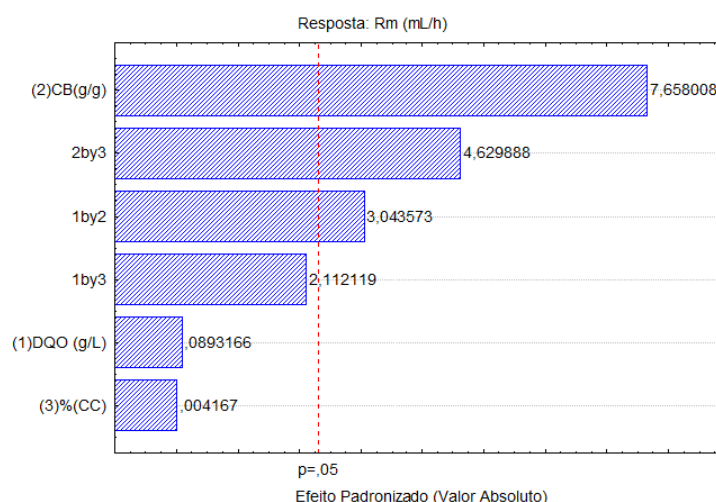
Observou-se que em relação a concentração de DQO, mesmo sendo significativa exerceu um efeito negativo, com isso à medida que aumenta a concentração menor será o potencial máximo de produção. Em contrapartida, sua conjunção com a CB e a %CC apresentaram um efeito positivo, constatando assim que a concentração de DQO sozinha não influenciou para o aumento do potencial.

A influência da concentração inicial (DQO), concentração de bicarbonato de sódio (CB) e da composição de substrato (CC/ES) na taxa máxima de produção (R_m).

Analisando os efeitos sobre a taxa máxima de produção (R_m), descreveu-se um comportamento onde os parâmetros a concentração de DQO e a composição de caldo de capim %CC, como também suas correlações não apresentaram significância. Observou-se que a concentração de bicarbonato (CB) exerceu um papel fundamental, visto que sua presença intensificou positivamente a taxa de produção, inclusive com suas interações, onde ambas foram significativas ao nível de 95%.

Em relação a Figura 11, percebeu-se que a concentração de bicarbonato de sódio apresentou um efeito positivo na taxa máxima de produção (R_m), como também suas interações com DQO e %CC. Isto significa, que a presença do bicarbonato de sódio foi fundamental para o aumento da taxa de produção, visto que tanto a presença do bicarbonato sozinho quanto em conjunto com a DQO e %CC foram primordiais para esse incremento.

Figura 11: Gráfico de Pareto referente a taxa máxima de produção.



1 – Concentração de DQO (g/L); 2 – Concentração de Bicarbonato de Sódio (CB) (g/g); 3 – % Composição de Caldo de Capim Elefante (CC) Fonte: Autora (2023)

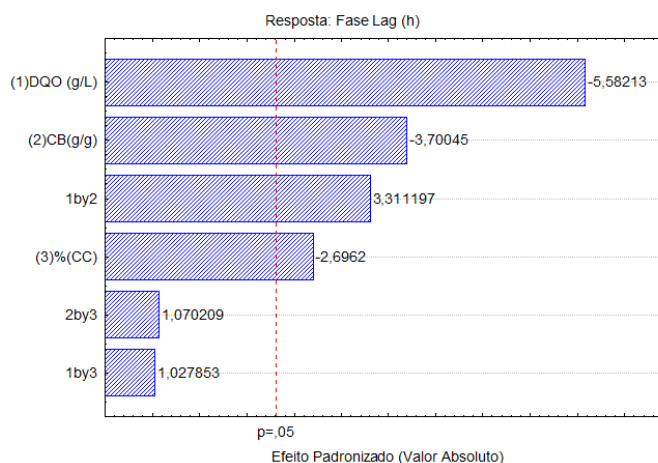
A influência da concentração inicial (DQO), concentração de bicarbonato de sódio (CB) e da composição de substrato (CC/ES) na fase lag.

Ainda na Tabela 15, sobre o efeito referente a fase lag percebeu-se que a composição dos substratos em questão, onde variou-se [20/80;40/60 (CC/ES)] e como referência utilizou as % de caldo de capim elefante (CC) foi significativa, porém sua correlação com a DQO e a CB não apresentaram o mesmo comportamento. Já as interações e os parâmetros de DQO e CB foram significativos e exerceram contribuições para uma menor fase lag.

No que se refere a Figura 12, percebeu-se que as concentrações de DQO e CB mesmo sendo significativas, apresentaram um efeito negativo sobre o sistema, ou seja, atuando separadamente aumentaria a fase lag e compreende-se que quanto menor for a fase de adaptação dos microrganismos melhor será para o sistema operacional.

Por outro lado, constatou-se que a junção das concentrações de DQO e CB exerceu um efeito positivo e influenciaram para uma menor fase lag, favorecendo assim o início da produção de metano.

Figura 12: Gráfico de Pareto referente a fase lag.



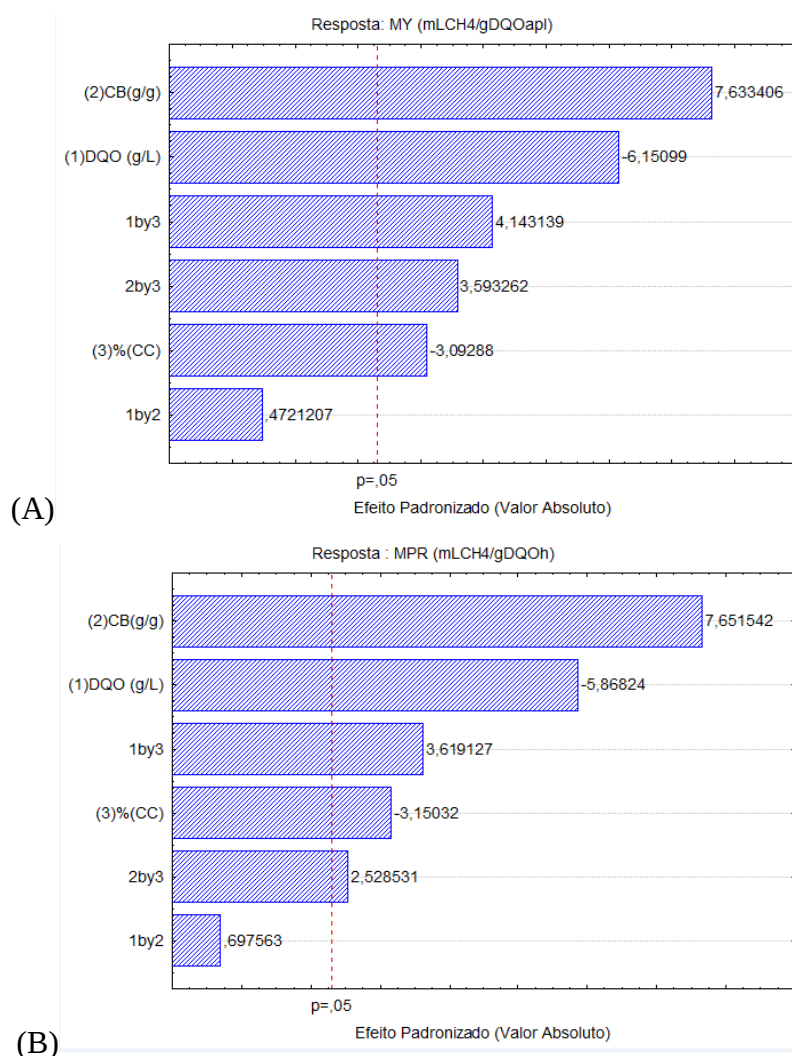
1 – Concentração de DQO (g/L); 2 – Concentração de Bicarbonato de Sódio (CB) (g/g); 3 – % Composição de Caldo de Capim Elefante (CC) Fonte: Autora (2023)

A influência da concentração inicial (DQO), concentração de bicarbonato de sódio (CB) e da composição de substrato (CC/ES) no rendimento volumétrico (VMY) e na taxa de produção volumétrica (VMPR).

Em relação ao rendimento volumétrico (VMY) e a taxa volumétrica (VMPR) observou-se que expressaram o mesmo comportamento, visto que os três parâmetros (DQO, CB e %CC) e as interações entre DQO e %CC, como também, CB e %CC, foram significativas e contribuíram para o rendimento volumétrico (MY) e a taxa volumétrica (MPR).

A respeito das Figuras (13A) e (13B), verificou-se que a concentração de bicarbonato (CB) apresentou um efeito positivo, tanto para o rendimento volumétrico (VMY) quanto para taxa volumétrica (VMPR). Assim como sua interação com a %CC que apresentou o mesmo comportamento, isto confirma mais uma vez que a presença do bicarbonato de sódio foi essencial para o aumento do rendimento e da taxa.

Figura 13: Gráfico de Pareto referente ao rendimento volumétrico (A) e a taxa de produção volumétrica (B).



1 – Concentração de DQO (g/L); 2 – Concentração de Bicarbonato de Sódio (CB) (g/g); 3 – % Composição de Caldo de Capim Elefante (CC) Fonte: Autora (2023)

Percebeu-se ainda, que em relação aos parâmetros concentração de DQO e %CC exerceram um efeito negativo, porém sua conjunção apresentou um efeito positivo, constatando assim que a concentração de DQO e %CC não podem atuar sozinhas para o incremento do rendimento e da taxa.

Em resumo, analisando a tabela de efeitos e os diagramas de Pareto apresentados, observou-se um fator comum entre eles, constatou-se a importância da concentração de bicarbonato de sódio (CB), onde a mesma foi significativa para todos os fatores e exerceu um efeito positivo para as seguintes respostas: potencial máximo (P), taxa máxima de produção (Rm), rendimento volumétrico (MY) e a taxa de produção volumétrica (MPR), exercendo um efeito negativo somente na fase lag, com isso sua adição do foi essencial na segunda etapa (E₂) do experimento para o incremento das respostas acima citadas.

O comportamento das interações aplicadas no planejamento experimental 2³.

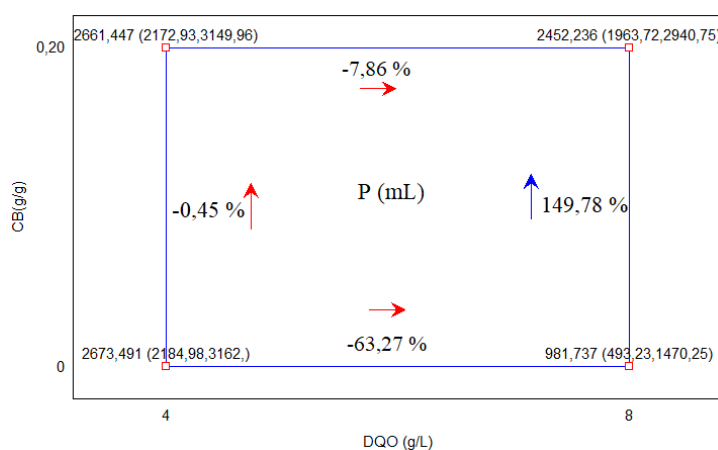
Prosseguindo com o comportamento das interações entre as variáveis: concentração inicial (DQO), concentração de bicarbonato de sódio (CB) e da composição de substrato (CC/ES) observa-se a seguir os gráficos de médias predita para as interações possíveis ao planejamento.

A interação entre concentração de bicarbonato de sódio (CB) *versus* concentração inicial (DQO).

O gráfico 14 exprime o comportamento da interação entre a concentração inicial aplicada (DQO) e a concentração de bicarbonato de sódio (CB) sobre o potencial máximo de metano. Inicialmente, percebeu-se que quando o sistema não tinha alcalinizante, o potencial máximo de metano em relação a carga aplicada obteve uma redução de 63% da DQO de 4g/L para 8g/L.

Porém quando adicionado uma concentração de bicarbonato de sódio de 0,20g/g, observou-se que houve um aumento significativo de 149% para DQO de 8g/L e ainda constatou uma pequena redução de 7% para DQO de 4g/L, porém os valores do potencial se mantiveram próximos, atestando assim que a adição do alcalinizante ajudou na manutenção do pH e com isso interferiu diretamente em uma maior produção de metano.

Figura 14: Gráfico de Médias Preditas para interação CBxDQO referente ao potencial máximo de metano (P).



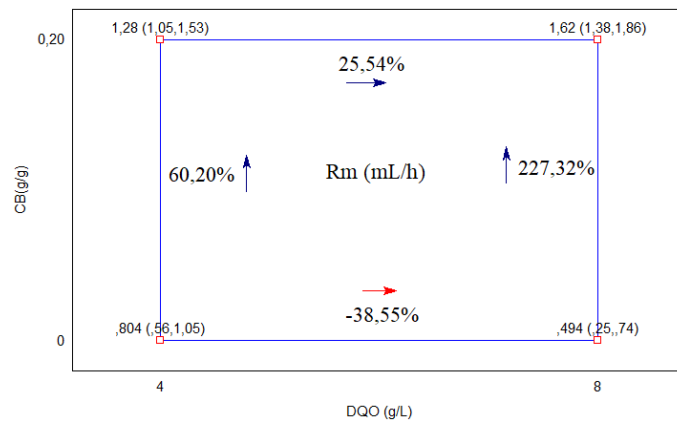
Fonte: Autora (2023)

A Figura 15, exprime o comportamento da interação entre a carga aplicada (DQO) *versus* concentração de bicarbonato de sódio (CB) sobre a taxa máxima de produção de metano. Levando em consideração a carga aplicada e sem alcalinizante, observou-se uma redução de -

38% na taxa quando a DQO aumentou de 4g/L para 8g/L. Com a adição de 0,20 (g/g) de alcalinizante o sistema apresentou um crescimento de 25%, entre ambas concentrações.

O tamponamento do sistema manteve o pH na faixa ótima para produção de metano, justificando assim os acréscimos de 60% e 227% para as DQO 4g/L e 8g/L, respectivamente. Vale destacar, que a DQO de 8g/L se sobressaiu pelo fato de apresentar maior quantidade de carboidratos no substrato em comparação com a 4g/L.

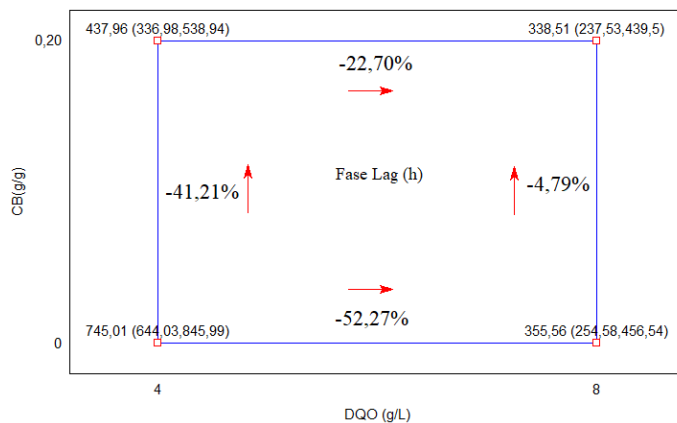
Figura 15: Gráficos de Médias Preditas da interação CBxDQO referente a Taxa máxima de produção (Rm).



Fonte: Autora (2023)

Na Figura 16, ainda analisando a interação sobre a fase lag, certificou-se que em todas as combinações os resultados levaram a uma redução da fase lag, ou seja, quanto menor for fase de adaptação dos microrganismos mais rápido será o início da produção de metano.

Figura 16: Gráficos de Médias Preditas pra interação CBxDQO referente à Fase Lag.



Fonte: Autora (2023)

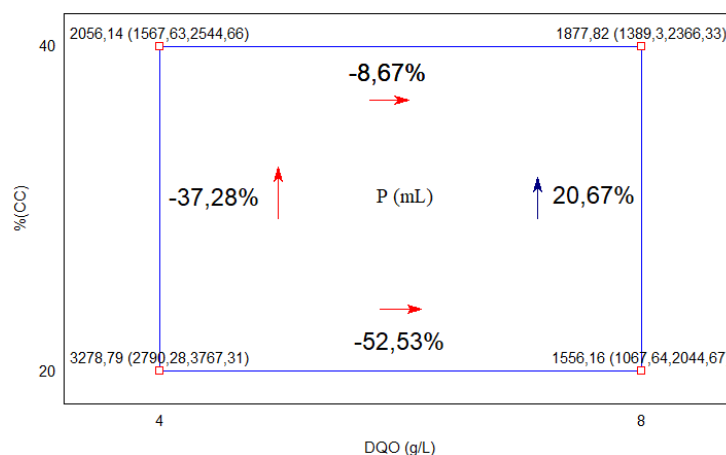
Em resumo, a interação entre a concentração de bicarbonato (CB) e a carga aplicada (DQO) interferiram diretamente nos parâmetros: potencial máximo de metano (P), taxa máxima de produção (R_m) e a fase lag. Desta forma, percebe-se que a concentração de bicarbonato (CB) e a carga aplicada (DQO) separada não exerceu influência sobre os parâmetros acima citados.

A interação entre composição do substrato (% CC) versus concentração inicial (DQO)

A composição do substrato onde variou-se (20/80; 40/60 %CC/ES), para uma melhor discussão utilizou-se a composição de caldo de capim elefante (%CC) como referência. De acordo com a Figura 17, onde analisou-se a interação entre a composição do substrato (% CC) versus a carga aplicada DQO sobre o potencial máximo de metano.

Considerando a composição de 20% de caldo de capim elefante apresentou uma redução de 52% da DQO de 4g/L para 8g/L, já para composição de 40% houve uma pequena redução de 8% entre ambas. O aumento da composição para DQO de 8g/L foi positiva e apresentou um acréscimo de 20,67%, em contrapartida para DQO de 4g/L houve uma redução de 37%.

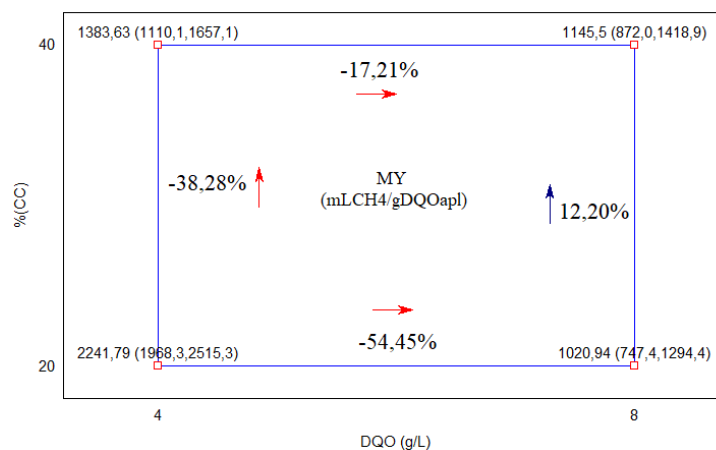
Figura 17: Gráfico de Médias Preditas para interação CCxDQO referente ao potencial máximo de metano (P).



Fonte: Autora (2023)

Ainda sobre a interação em questão, verificou-se o mesmo comportamento sobre o rendimento e a taxa volumétrica. De acordo com a Figura 18, na composição de 20% observou-se, uma redução de 54% da DQO de 4g/L para 8g/L e uma redução de 17% foi constatada na composição de 40%, entre as cargas aplicadas. Na DQO de 4 g/L o aumento da composição de 20% para 40 % apresentou uma redução de 38%, porém o houve um aumento de 12% na DQO de 8g/L.

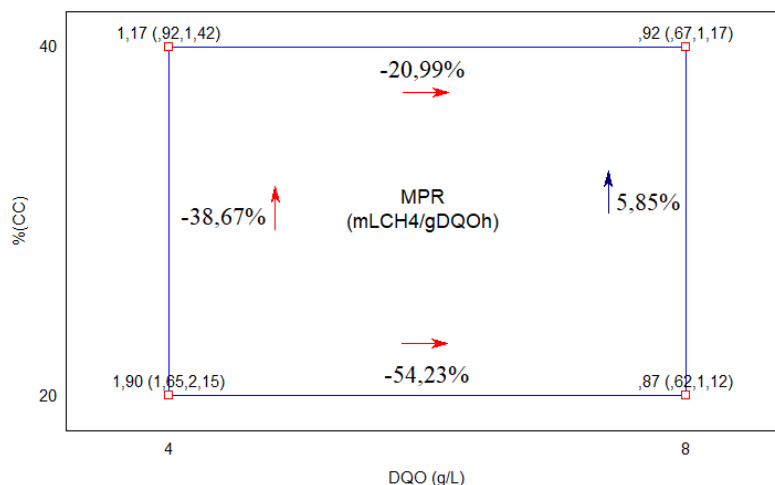
Figura 18: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxDQO referente ao Rendimento Volumétrico.



Fonte: Autora (2023)

Referente a Figura 19, na composição de 20% observou-se, uma redução de 54% da DQO de 4g/L para 8g/L e uma redução de 20,99% foi constatada na composição de 40% entre as cargas aplicadas. Na DQO de 4 g/L o aumento da composição de 20% para 40 % apresentou uma redução de 38%, porém houve um aumento de 5,8% na DQO de 8g/L.

Figura 19: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxDQO referente a Taxa de Produção Volumétrica.



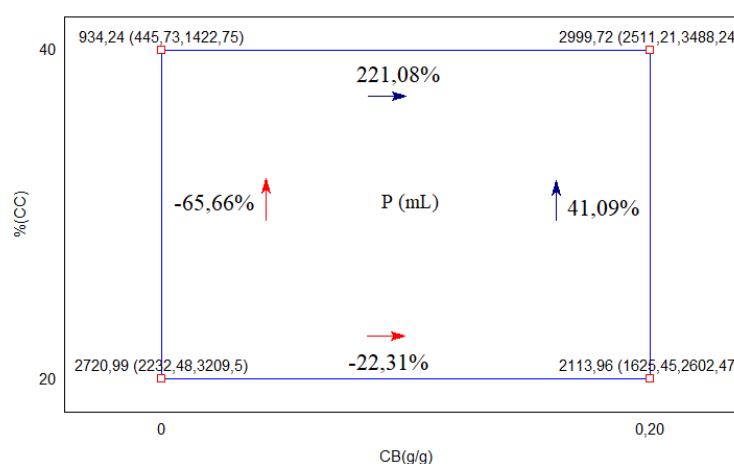
Fonte: Autora (2023)

Em síntese, a interação entre a composição de caldo de capim elefante (%CC) e a carga aplicada (DQO) interferiram diretamente nos parâmetros: potencial máximo de metano (P), rendimento volumétrico (MY) e a taxa de produção volumétrica (MPR). Desse modo, a composição e a carga separadamente não influenciaram no incremento dos parâmetros citados.

A interação entre composição do substrato (% CC) *versus* concentração de bicarbonato de sódio (CB)

Analisando a interação entre a composição de substrato (%CC) e a concentração de bicarbonato (CB) (Figura 20) referente ao potencial máximo de metano, considerando uma composição de 20% houve uma redução de -22% do meio sem alcalinizante para o meio alcalinizado, comportamento adverso quando a composição foi de 40%, onde diagnosticou-se um aumento significativo de 221% na produção de metano. Verificou que o bicarbonato de sódio impulsionou um aumento de 41% considerando 40% de caldo de capim elefante no sistema.

Figura 20: Gráfico de Médias Preditas para interação CCxCB referente ao potencial máximo de metano (P).

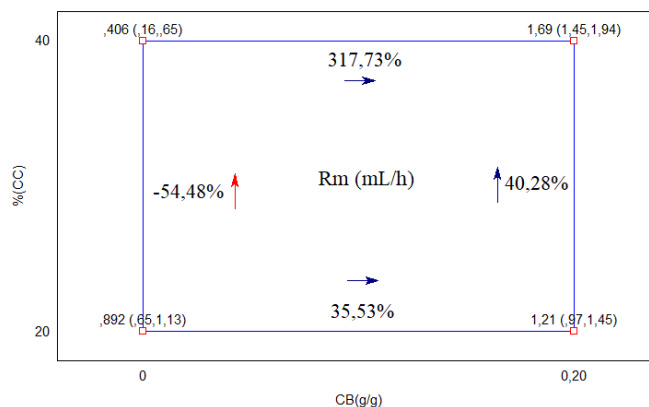


Fonte: Autora (2023)

Em relação a Figura 21, a referida interação (%CCxCB) sobre a taxa máxima de produção, observou-se que na composição de 20% de caldo de capim elefante a adição do alcalinizante no sistema apresentou um acréscimo de 35% na taxa de produção, o mesmo comportamento pode ser visto na composição de 40% que gerou um acréscimo significativo de 317%.

A respeito da composição (%CC), o aumento de 20 para 40% de caldo e capim elefante, sem alcalinizante observou-se uma redução de -54%, ao contrário do meio alcalinizado que apresentou um aumento de 40,28%, confirmando assim que a adição do bicarbonato foi fundamental para o aumento da taxa de produção.

Figura 21: Gráficos de Médias Preditas da interação CCxCB referente a Taxa máxima de produção (Rm).

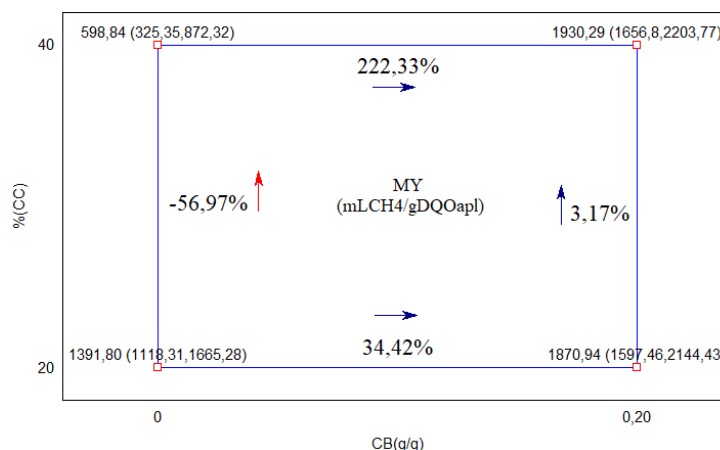


Fonte: Autora (2023)

A interação entre a concentração de bicarbonato (CB) e a composição de substrato (%CC) expressaram o mesmo comportamento para o rendimento e a taxa volumétrica. Na Figura 22, constatou-se que na composição de 20% a adição do alcalinizante gerou um incremento de 34% no rendimento volumétrico e na composição de 40% acarretou num aumento significativo de 222%.

Quando a composição passou de 20 para 40% para um sistema sem alcalinizante, constatou-se um decréscimo de 56% no rendimento volumétrico, em contrapartida houve um aumento de 3% com a adição do bicarbonato.

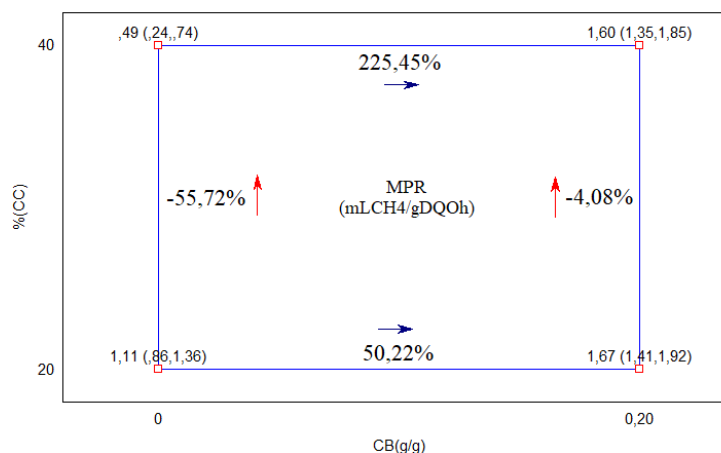
Figura 22: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxCB referente ao Rendimento Volumétrico.



Fonte: Autora (2023)

Em relação a taxa de produção volumétrica (Figura 23) houve um acréscimo de 50% na taxa volumétrica referente a composição de 20% e um aumento significativo de 225% na composição de 40%, observados a partir da adição do bicarbonato de sódio (0,20g/g). Referente a composição do substrato observou-se uma redução de -55% para o sistema sem alcalinizante e -4% para o sistema alcalinizado, isso quando a composição (%CC) passou de 20 para 40%.

Figura 23: Gráficos de Médias Preditas pra interação %CCxCB referente a Taxa de Produção volumétrica.



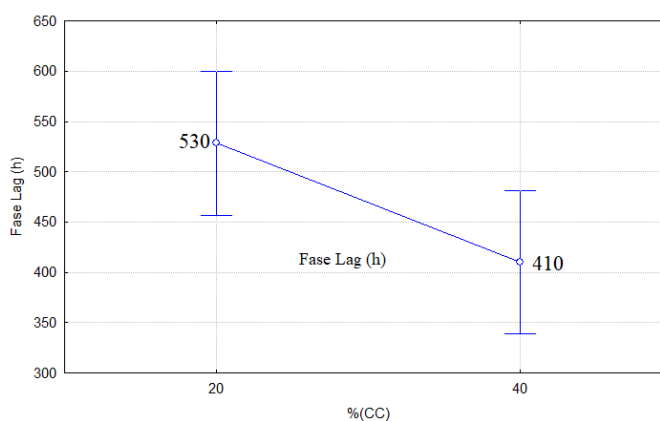
Fonte: Autora (2023)

Em suma, a interação entre a composição de caldo de capim elefante (%CC) e a concentração de bicarbonato (CB) influenciaram diretamente nos parâmetros: potencial máximo de metano (P), taxa máxima de produção (R_m), rendimento volumétrico (MY) e a taxa de produção volumétrica (MPR). Dessa forma, tanto a composição quanto a concentração de bicarbonato foram variáveis que separadamente não interferem nos parâmetros estudados.

A influência da composição do substrato (% CC)

A influência da composição de caldo de capim elefante foi um parâmetro primordial para o comportamento da fase lag (Figura 24), visto que quando a composição (%CC) aumenta de 20 para 40%, a fase lag decresce de 530h para 410h, respectivamente. A composição do substrato onde a configuração era (CC/ES), ou seja, a combinação (20/80) possuía mais efluente de suinocultura do que a combinação (40/60), confirmando assim que a presença do efluente de suinocultura foi negativa, visto que a presença elevada de sólidos prejudicou a redução da fase lag.

Figura 24: Gráficos de Médias Marginais pra interação do %CC referente à Fase Lag.



Fonte: Autora (2023)

Análise de Variância e Teste-f

Na Tabela 15 são mostrados os resultados da análise de variância (ANOVA) para o modelo linear para as variáveis respostas (potencial máximo de produção (P), taxa máxima de produção (R_m), fase lag, rendimento volumétrico (MY) e taxa de produção volumétrica (MPR).

Tabela 16: Tabela ANOVA para o modelo linear.

Modelo	Resposta	R ² (%)	Fonte	GL	SQ	MQ	Valor-F	Valor-P
Linear	P (mL)	91,882	Regressão	6	18277694	3046282	16,97671414	0,347415
			Resíduo	9	1614950	179439		
			Falta de Ajuste	1	178864	178864	0,996397718	
			Erro Puro	8	1436086	179511		
			Total	15	19892644			
	R_m (mL/h)	85,742	Regressão	6	4,1365	0,6894	9,020655815	0,024798
			Resíduo	9	0,6878	0,0764		
			Falta de Ajuste	1	0,3351	0,3351	7,599751627	
			Erro Puro	8	0,3527	0,0441		
			Total	15	4,8244			
	Fase Lag (h)	88,856	Regressão	6	500814	83469	11,95958797	0,675495
			Resíduo	9	62813	6979		
			Falta de Ajuste	1	1447	1447	0,188680769	
			Erro Puro	8	61366	7671		
			Total	15	563627			
	VMY (mLCH4/g DQOapl)	83,991	Regressão	6	7649791	1274965	7,869733303	0,002866
			Resíduo	9	1458078	162009		
			Falta de Ajuste	1	1007990	1007990	17,91629026	
			Erro Puro	8	450089	56261		
			Total	15	9107870			
	VMPR (mLCH4/g DQOh)	87,795	Regressão	6	5,8126	0,9688	10,79008732	0,016716
			Resíduo	9	0,8081	0,0898		
			Falta de Ajuste	1	0,4296	0,4296	9,083038224	
			Erro Puro	8	0,3784	0,0473		
			Total	15	6,6207			

Fonte: Autora (2023)

Os valores calculados de F para as regressões ($MQ_{\text{regressão}}/MQ_{\text{resíduo}}$) foram para o potencial máximo de produção (P) (16,97), taxa máxima de produção (R_m) (9,02), fase lag (11,95), rendimento volumétrico (VMY) (7,86) e taxa de produção volumétrica (VMPR)

(10,79), respectivamente, comparando com o valor de $F_{6,9}$ tabelado (3,37), todos os $F_{6,9}$ calculados foram maiores, ou seja, $F_{\text{cal } 6,9} > F_{\text{tab } 6,9}$, apresentando assim regressões significativas a partir do teste F.

Analisando o teste F para falta de ajuste, observa-se que os valores de $F_{a1,8}$ calculados foram (0,99) para o potencial máximo de produção (P), (7,59) para taxa máxima de produção (R_m), (0,18) para fase lag, (17,91) para o rendimento volumétrico (MY) e (9,08) para a taxa de produção volumétrica (MPR) e em comparação ao $F_{a1,8}$ tabelado (5,32), constata-se que apresentaram significância o potencial máximo de produção e a fase lag por possuírem $F_{\text{acal } 1,8} < F_{\text{atab } 1,8}$.

Em contrapartida em relação ao R^2 , observou-se que para o modelo linear o potencial máximo de produção e a fase lag, foram estatisticamente significativos ($p > 0,05$) e apresentam R^2 (0,91 e 0,88), respectivamente. Como os efeitos de terceira ordem (DQO*pH*T) foram todos insignificantes e ainda a exclusão dos mesmos não alteram significativamente o valor do R^2 dos modelos, tais efeitos foram desconsiderados no cálculo da ANOVA para possibilitar a avaliação da falta de ajuste por meio dos testes F.

Na Tabela 17, estão dispostos os coeficientes de regressão referente ao modelo linear para as variáveis, os modelos resultaram nas Equações abaixo a partir das quais é possível prever as respostas do potencial máximo de produção (P), da taxa máxima de produção (R_m), da fase lag, do rendimento volumétrico (MY) e taxa de produção volumétrica (MPR), respectivamente.

Tabela 17: Coeficientes de regressão, erros padrão e significados estatísticos obtidos pelo modelo linear.

Resposta	Coeficiente	Estimativa	Erro padrão	Valor-P
P (mL)	b ₀	2192,23	105,9218	0,347415
	b ₁	-475,2		
	b ₂	364,61		
	b ₁₂	370,63		
	b ₁₃	386,07		
	b ₂₃	668,13		
Rm (mL/h)	b ₀	1,05	0,052496	0,024798
	b ₂	0,40		
	b ₁₂	0,16		
	b ₂₃	0,24		
Fase Lag (h)	b ₀	469,3	21,89569	0,675495
	b ₁	-122,2		
	b ₂	-81,02		
	b ₃	-59,04		
	b ₁₂	72,50		
VMY (mLCH ₄ /gDQOapl)	b ₀	1447,97	59,29854	0,002866
	b ₁	-364,74		
	b ₂	452,65		
	b ₃	-183,40		
	b ₁₃	245,70		
	b ₂₃	213,07		
VMPR (mLCH ₄ /gDQOh)	b ₀	1,21	0,054372	0,016716
	b ₁	-0,31		
	b ₂	0,42		
	b ₃	-0,17		
	b ₁₃	0,20		
	b ₂₃	0,14		

VMY_{DQOapl} – rendimento volumétrico de CH₄ por carga aplicada; VMPR_{DQOapl} – taxa de produção volumétrica de CH₄ por carga aplicada. Fonte: Autora (2023)

Os modelos lineares que foram significativos estão dispostos nas Equações abaixo, a partir das quais é possível prever as respostas de potencial máximo de produção e da fase lag, respectivamente, para quaisquer variáveis independentes ($x_1 = C_{DQO}$, $x_2 = CB$ e $x_3 = \%CC$).

$$P(mL) = 2192,23 - 475,24x_1 + 364,61x_2 + 370,63x_1x_2 + 386,07x_1x_3 + 668,13x_2x_3$$

$$Fase\ Lag\ (h) = 469,3 - 122,2x_1 - 81,02x_2 - 59,04x_3 + 72,50x_1x_2$$

De acordo com a determinação das variáveis significativas foi possível definir o modelo linear que auxilia na predição de valores para condições estabelecidas, é importante avaliar o modelo linear para saber se ele realmente se adequou aos pontos obtidos experimentalmente.

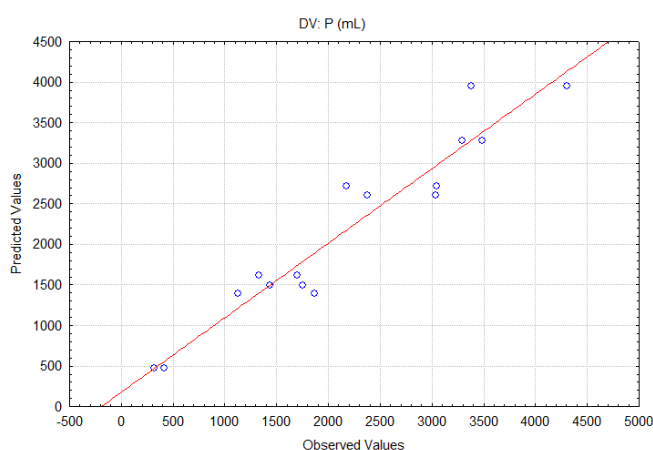
Essa avaliação é estabelecida por meio da observação dos valores preditos versus os valores observados como demonstrados nas Figuras seguintes (25-29).

Nos gráficos dos valores preditos pelo modelo linear são representados por uma linha vermelha, já os valores medidos experimentalmente são representados pelos pontos. Observam-se nas figuras que os pontos que estão próximos à reta de predição do modelo, indicam que este teve uma boa adequação para modelar o experimento de produção de biometano.

Na Figura 25, referente ao potencial máximo de produção verifica-se que a dispersão apresentou alguns pontos próximos a linha vermelha, ou seja, essa proximidade justifica um bom ajuste referente ao modelo linear. Uma similaridade pode ser diagnóstica na Figura 26, referente a fase lag, onde a dispersão resultou na proximidade de alguns pontos a linha, justificando assim não somente o bom ajuste como também serem estatisticamente significativos.

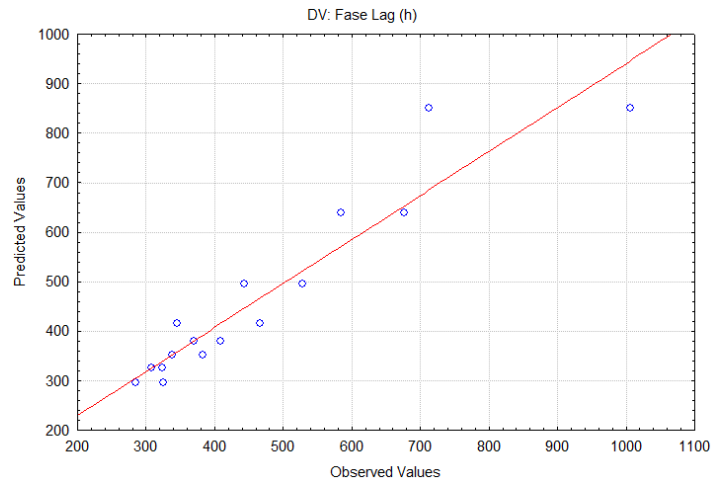
Com o intuito de validar o modelo linear referente ao potencial máximo de produção e a fase lag, observou-se o R^2 que indica o quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, como também o valor de p ($p > 0,05$) para justificar a referida significância. Para os referentes modelos foram encontrado o R^2 de 0,91 e 0,88, respectivamente indicando assim um bom ajuste aos pontos experimentais.

Figura 25: Gráfico Valores Preditos x Valores Observados referente ao Potencial Máximo de Produção.



Fonte: Autora (2023)

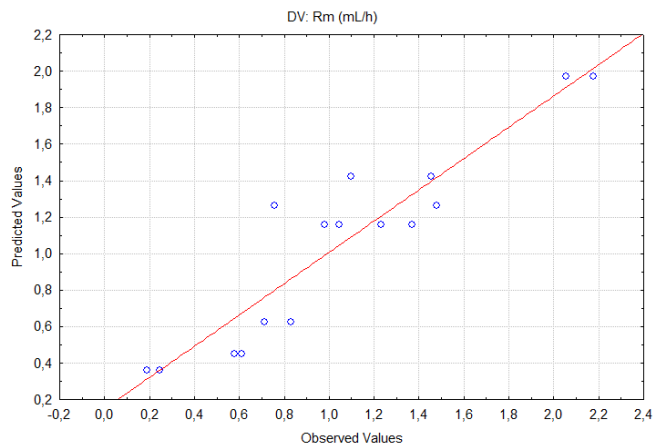
Figura 26: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente a Fase Lag.



Fonte: Autora (2023)

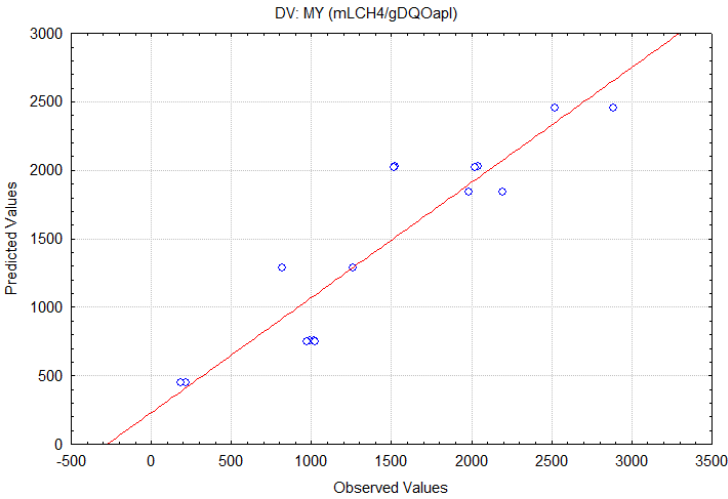
Em relação aos parâmetros R_m , MY e MPR através das Figuras 27, 28 e 29, verificou-se que a dispersão dos pontos não apresentou uma proximidade a reta, e como registrado na Tabela 15 os mesmos apresentam R^2 de 0,85, 0,83, 0,87 e valores de $p < 0,05$, confirmando assim que os parâmetros não foram estatisticamente significativos.

Figura 27: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente a Taxa Máxima de Produção.



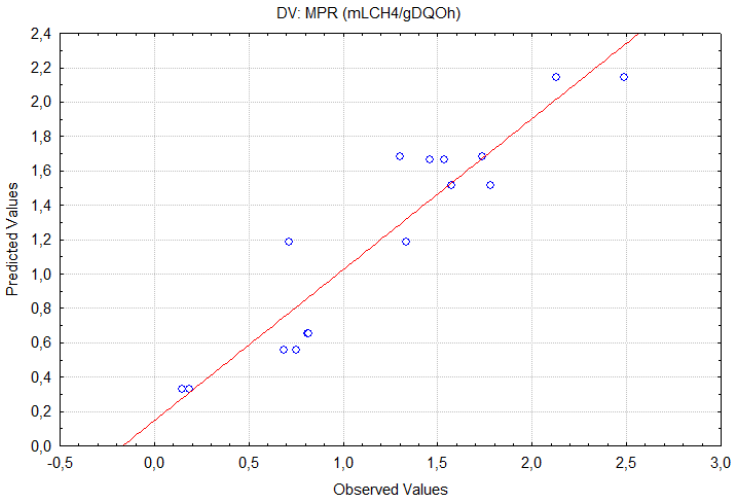
Fonte: Autora (2023)

Figura 28: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente ao Rendimento Volumétrico.



Fonte: Autora (2023)

Figura 29: Gráfico Valores Predito x Valores Observados referente ao Taxa de Produção Volumétrica.



Fonte: Autora (2023)

6. CONCLUSÃO

Em relação a codigestão dos substratos envolvidos, conclui-se que os resultados indicaram que o uso em conjunto do caldo de capim elefante e do efluente de suinocultura foram favoráveis para a produção de metano.

Na primeira etapa (E_1), o sistema apresentou uma maior remoção de DQO e SVT no reator com 20% de caldo do capim elefante e 80% do efluente de suinocultura com 53,82% e 54,78%, respectivamente. Em relação a remoção de carboidratos, deu-se nos reatores R5 (CC_{80}/ES_{20}) com 68,9% e R6 (CC_{100}/ES_0) 72,48%, provavelmente devido a maior quantidade de açúcar no caldo do capim elefante para ser consumida pelos microrganismos.

Em relação à monodigestão, conclui-se que a produção acumulada de CH_4 na monodigestão do efluente de suinocultura foi de 2.728,11 mL- CH_4 (R1- CC_0/ES_{100}) se sobressaindo à do caldo do capim elefante de 91,06 mL- CH_4 (R6- CC_{100}/ES_0). A melhor composição de substrato deu-se na conjuntura de 20 % do caldo e 80% do efluente de suinocultura, com uma produção de 2.235,49 mL- CH_4 , ou seja, a presença do efluente de suinocultura foi essencial nesse processo.

As condições R5 e R6 foram as que apresentaram os menores índices de produção de metano. Isto deve-se tanto à faixa do pH que reduziu ficando em torno de 5,0, quanto à presença maciça do caldo do capim elefante, visto que a alta relação C/N de 31,4 pode ter ocasionado a instabilidade do sistema.

Os melhores índices de rendimentos foram 3.432,78 e 3.921,90 mL- CH_4 /g-DQO_{apl}, juntamente com as taxas de 82,35 e 98,11 mL- CH_4 /[g-DQO_{apl}.d], foram constatadas nas conjunturas 40:60 e 20:80 (CC:ES) de cada substrato.

Os ensaios de codigestão realizados e fundamentados no planejamento de mistura *Simplex Laticce*, observou-se que o modelo quadrático se mostrou melhor que o linear, isso em comparação ao R^2 , porém ambos foram estatisticamente significativos ($p < 0,05$). Analisou-se também que houve uma interação sinérgica entre si, contribuindo para a melhora do rendimento e da taxa de produção de metano.

Já em relação a segunda etapa (E_2), conclui-se que o sistema apresentou um melhor resultado em comum referente a remoção de DQO, carboidratos e SVT na condição experimental F8 (8gDQO/L; 0,2gNaHCO₃/g; 40:60%), com 76,09, 95,08 e 75,97%, respectivamente. Já o rendimento volumétrico apresentou melhores resultados nas condições 2.090,22 (F8) e 2.704,37 (F3) mL- CH_4 /g-DQO_{apl}.

Ainda em relação a condição F8, o modelo de Gompertz utilizado para simular a produção cumulativa de metano, delimitou a maior produção de 2.637,39 mL-CH₄ e os menores índices foram encontrados nas condições F5 (726,90 mL-CH₄) e F6 (260,73 mL-CH₄), fato justificado devido a adição de 0,2 g/g de bicarbonato de sódio no F8, auxiliando na manutenção do pH no F8 (7,55) em comparação a F5 (5,76) e F6 (4,47) sem a presença de alcalinizantes.

Analisando os resultados do planejamento experimental 2³, obteve-se como resultado da análise de variância (ANOVA) o bom ajuste para o modelo linear, que as respostas significativas estatisticamente ($p > 0,05$) e R^2 (0,91 e 0,88), foram o potencial máximo de produção (P) e a fase lag, isto é, ambas as variáveis independentes (DQO, CB e %CC) impactaram no incremento da produção de metano.

O tamponamento do sistema manteve o pH na faixa ótima para produção de metano, justificando assim os acréscimos de 227% para o potencial máximo e 149% para taxa máxima aumentando a concentração de DQO de 4g/L para 8g/L. Verificou-se ainda que o bicarbonato de sódio impulsionou um aumento de 41% para o potencial máximo e um acréscimo significativo de 317% para taxa máxima, aumentando a % de caldo de capim elefante de 20% para 40%.

Assim, conclui-se que a condição ótima encontrada na segunda etapa (E₂), consistiu em uma concentração de DQO de 8g_{DQO}/L, 0,2g_{NaHCO₃}/g de bicarbonato de sódio e % de composição de substrato de 40:60. Alcançando um potencial máximo de 3.387,70 mL-CH₄, uma taxa máxima de 2,12 mL-CH₄/h.

Diante disso, a tecnologia de codigestão anaeróbia foi satisfatória visto que, a digestibilidade dos resíduos envolvidos, o efluente de suinocultura (ricos em nitrogênio) e o caldo do capim elefante (alto teor de carbono), foi positiva para o tratamento de ambos e para a produção de biometano.

7. TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de otimizar o aproveitamento do caldo do capim elefante e do efluente de suinocultura na codigestão visando a produção de metano, sugere-se, futuramente, os seguintes estudos:

- ✓ Investigar diferentes relações CC/ES para as condições de mistura para observar o comportamento dos microrganismos quando se tem maior ou menor disponibilidade de substrato, objetivando-se aumentar o rendimento de metano acumulado;
- ✓ Avaliar a adição do caldo de capim elefante com diferentes substratos, devido à dificuldade encontrada em estudos direcionados ao mesmo;
- ✓ Realizar a análises de ácidos orgânicos, a fim de justificar a acidificação do sistema;
- ✓ Avaliar as melhores condições deste estudo na codigestão anaeróbia dos substratos envolvidos em reatores de fluxo contínuo.

REFERÊNCIAS

- ALBANEZ, R.; LOVATO, G.; RATUSZNEI, S. M.; ZAIAT, M.; RODRIGUES, J. A. D. Feasibility of biohydrogen production by co-digestion of vinasse (sugarcane stillage) and molasses in an AnSBBR. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 1, p. 27–41, 2018.
- ALMOMANI, F., & BHOSALE, R. R. (2020). Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. **Chemosphere**, 255, 126805.
- AKHATOR, E. P., OBANOR, A. I., & EZEMONYE, L. I. Electricity generation in Nigeria from municipal solid waste using the Swedish Wasteto-Energy Model. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, 20(3), 635-643, (2016).
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 2005.
- BARROS, T. F. **Produção de metano a partir da codigestão do caldo do capim elefante e vinhaça**. 2022. 86 f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2022.
- BEDOÍĆ, R., ČUČEK, L., ČOSIĆ, B., KRAJNC, D., SMOLJANIĆ, G., KRAVANJA, Z., ... & DUIĆ, N. (2019). Green biomass to biogas—a study on anaerobic digestion of residue grass. **Journal of Cleaner Production**, 213, 700-709, 2019.
- BOHUTSKYI, P., PHAN, D., KOPACHEVSKY, A. M., CHOW, S., BOUWER, E. J., & BETENBAUGH, M. J. (2018). Synergistic co-digestion of wastewater grown algae-bacteria polyculture biomass and cellulose to optimize carbon-to-nitrogen ratio and application of kinetic models to predict anaerobic digestion energy balance. **Bioresource technology**, 269, 210-220.
- BRITO DA SILVA, V.; DAHER, R. F.; DE SOUZA, Y. P.; DA SILVA MENEZES, B. R.; AZEVEDO SANTOS, E.; SOUZA FREITAS, R.; DA SILVA OLIVEIRA, E.; FRANCESCONI STIDA, W.; CASSARO, S. Assessment of energy production in full-sibling families of elephant grass by mixed models. **Renewable Energy**, v. 146, p. 744–749, 2020.
- CARDOSO, E. G.; DA SILVA, J. M. **Silos, silagem e ensilagem**. Campo Grande, MS, 1995. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/317210/silos-silagem-e-ensilagem>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- CARVALHO, A. R., FRAGOSO, R., GOMINHO, J., SARAIVA, A., COSTA, R., & DUARTE, E. Water-energy nexus: Anaerobic co-digestion with elephant grass hydrolyzate. **Journal of environmental management**, 181, 48-53, 2016.
- CAVINATO, C.; FATONE, F.; BOLZONELLA, D. E PAVAN, P. (2010) - Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: comparison of pilot and full scale experiences. **Biores. Techn.**, vol. 101, n. 2, p. 545-550.
- COOK, S. M., SKERLOS, S. J., RASKIN, L., & LOVE, N. G. A stability assessment tool for anaerobic codigestion. **Water research**, 112, 19-28, 2017.
- COLLAZZO, G. C.; BROETTO, C. C.; PERONDI, D.; JUNGES, J.; DETTMER, A.; DORNELLES FILHO, A. A.; FOLETTO, E. L.; GODINHO, M. A detailed non-isothermal kinetic study of elephant grass pyrolysis from different models. **Applied Thermal Engineering**, v. 110, p. 1200–1211, 2017.
- CORNELL, J. A. Experiments with mixture: Designs, models, and analysis of mixture data. **John Wiley & Sons.**, 1990.
- CREMONEZ, P. A., DE ROSSI, E., FEROLDI, M., TELEKEN, J. G., FEIDEN, A., & DIETER, J. Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas. **Revista de Ciências Agrárias**, 38(1), 103-110, 2015.
- CREMONEZ, P. A.; TELEKEN, J. G.; MEIER, W. T. R.; ALVES, H. J. Two-Stage

anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. **Journal of Environmental Management**. V. 281, ID 111854, mar. 2021.

CHENG, Q., HUANG, W., JIANG, M., XU, C., FAN, G., YAN, J., CHAI, B., ZHANG, Y., ZHANG, Y., ZHANG, S., XIAO, B., SONG, G. Challenges of anaerobic digestion in China. **Int. J. Environ. Sci. Technol**, 2021.

DE FARIAS SILVA, C. E., GOIS, G. N. S. B., ABUD, A. K. S., AMORIM, N. C. S., GIROTTO, F., MARKOU, G., ... & AMORIM, E. L. Anaerobic Digestion: Biogas Production from Agro-industrial Wastewater, Food Waste, and Biomass. In *Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems* (pp. 431-470). **Springer**, Cham, 2019.

DÖLL, M. M. R., & FORESTI, E. Effect of the sodium bicarbonate in the treatment of vinasse in AnSBBR operated at 55 and 35°C. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 15, 275-282, 2010.

DUARTE, A. **Planejamento experimental de misturas de óxidos de ferro, caulinita e matéria orgânica na modelagem do fenômeno de adsorção de fósforo**. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 91f, 2005.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Secagem solar e extração do caldo do capim-elefante para uso bioenergético da biomassa**. Aracaju; 2021.

ELIANA, C.; JORGE, R.; JUAN, P.; LUIS, R. Effects of the pretreatment method on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentability of the cellulosic fraction from elephant grass. **Fuel**, v. 118, p. 41–47, 2014.

EGWU, U. Improvement of biomethane potential of Elephant grass (Napier grass, *Pennisetum purpureum* Schum) by addition of biomass ash and ash-extracts as supplements. **Bioresource Technology Reports**, 15, 100760, 2021.

FERREIRA, A. C. H.; NEIVA, J. N. M.; RODRIGUEZ, N. M.; LÔBO, R. N. B.; VASCONCELOS, V. R. de. Valor nutritivo das silagens de capim-elefante com diferentes níveis de subprodutos da indústria do suco de caju. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 6, p. 1380–1385, 2004.

FERNANDES, G. F., & OLIVEIRA, R. A. D. (2006). Desempenho de processo anaeróbico em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia agrícola**, 26(1), 243-256.

FONTOURA, C. F., BRANDÃO, L. E., & GOMES, L. L. Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix?. **Journal of Cleaner Production**, 96, 85-93, 2015.

GAO, M., WANG, D., WANG, H., WANG, X., & FENG, Y. Biogas potential, utilization and countermeasures in agricultural provinces: A case study of biogas development in Henan Province, China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 99, 191-200, (2019).

GAWORSKI M, JABŁOŃSKI S, PAWLACZYK-GRAJA I, ZIEWIECKI R, RUTKOWSKI P, WIECZYŃSKA A, ET AL. Enhancing biogas plant production using pig manure and corn silage by adding wheat straw processed with liquid hot water and steam explosion. **Biotechnol Biofuels** 2017;10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0922-x>.

GRAVINA, L. M.; REBECCA A. DE OLIVEIRA, T.; DAHER, R. F.; GRAVINA, G. A.; ANA, A. K.; STIDA, W. F.; CRUZ, D. P.; DE SANT'ANNA, C. Q. S. S.; ROCHA, R. S.; PEREIRA, A. V.; GUSTAVO, G. H. Multivariate analysis in the selection of elephant grass genotypes for biomass production. **Renewable Energy**, v. 160, p. 1265–1268, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.094>.

GONZÁLEZ, L. M. L., REYES, I. P., & ROMERO, O. R. Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. **Waste management**, 68, 139-145, 2017.

GONZALEZ, L. M.L., REYES, I. P., ROMERO ROMERO, O., BUDDE, J., HEIERMANN, M., & VERVAEREN, H. Antagonistic effects on the methane yield of liquid hot-water pretreated press mud fractions co-digested with vinasse. **Energy & Fuels**, 29(11),

7284-7289, 2015.

HARYANTO, A., HASANUDIN, U., AFRIAN, C., & ZULKARNAEN, I. (2018, MARCH). Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum Purpureum*) using batch digester. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** (Vol. 141, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

HAGOS, K., ZONG, J., LI, D., LIU, C., & LU, X. Processo de codigestão anaeróbica para produção de biogás: avanços, desafios e perspectivas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 76,1485-1496, 2017.

HE, C. R., KUO, Y. Y., & LI, S. Y. Lignocellulosic butanol production from Napier grass using semi-simultaneous saccharification fermentation. **Bioresource technology**, 231, 101-108, 2017.

HELLER, B. (1986). Estatísticas para experimentadores, uma introdução ao design, análise de dados e construção de modelos: GEP Box, WG Hunter e JS Hunter, **John Wiley and Sons**, Nova York, NY. 1978.

HIMANSHU, H., MURPHY, J. D., GRANT, J., & O'KIELY, P. Antagonistic effects on biogas and methane output when co-digesting cattle and pig slurries with grass silage in in vitro batch anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**, v. 109, p. 190-198, 2018.

HOLLAS, C. E., BOLSAN, A. C., CHINI, A., VENTURIN, B., BONASSA, G., CÂNDIDO, D., ... & KUNZ, A. (2021). Effects of swine manure storage time on solid-liquid separation and biogas production: A life-cycle assessment approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 150, 111472.

HOLLIGER, C., ASTALS, S., DE LACLOS, H. F., HAFNER, S. D., KOCH, K., & WEINRICH, S. (2021). Towards a standardization of biomethane potential tests: a commentary. **Water Science and technology**, 83(1), 247-250.

HUANG, C., XIONG, L., GUO, H. J., LI, H. L., WANG, C., CHEN, X. F., ... & CHEN, X. D. (2019). Anaerobic digestion of elephant grass hydrolysate: biogas production, substrate metabolism and outlet effluent treatment. **Bioresource technology**, 283, 191-197.

ISBIZUKA, M.M.A. (1998) Biotecnologia no tratamento de dejetos de suínos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, p. 16-17.

JENSEN, A. B., & ELLER, F. Hybrid Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schumacher × *P. americanum* (L.) Leeke cv. Pakchong1) and Giant reed (*Arundo donax* L.) as candidate species in temperate European paludiculture: Growth and gas exchange responses to suboptimal temperatures. **Aquatic Botany**, 160, 103165, 2020.

KARKI, R.; CHUENCHART, W.; SURENDRA, K. C.; SHRESTHA, S.; RASKIN, L.; SUNG, S.; HASHIMOTO, A.; KHANAL, K. S. Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 330, Article ID 125001, jun. 2021.

KAINTHOLA, J.; KALAMDHAD, A. S.; GOUD, V. V. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. **Process Biochemistry**, v. 84, p. 81-90, 2019.

KUNZ, A., STEINMETZ, R., HOLLAS, C., & TÁPPARO, D. Oportunidades à suinocultura pela geração e uso de biogás frente às metas de redução de metano estabelecidas na COP26. **Suinocultura Industrial** - Número 01'2022 – Ano 44 – Edição 304, 2022.

KHANAL, k. S.; LU, F.; WONG, J. W. C.; WU, D.; OECHSNER, H. Anaerobic digestion beyond biogas. **Bioresource Technology**, v. 337, Article ID 125378, out. 2021.

LEITÃO, F. O., DIAS, C. P., & BRISOLA, M. V. (2020). Mensuração da capacidade de geração de energia elétrica a partir do tratamento dos dejetos suínos. **Informe Gepec**, 24(1), 91-115.

LEE, J.-Y.; WEE, D.; CHO, K.-S. Effects of Volatile Solid Concentration and Mixing Ratio on Hydrogen Production by Co-Digesting Molasses Wastewater and Sewage Sludge. **J. Microbiol. Biotechnol.**, v. 24, n. 11, p. 1542–1550, 2014.

LIANHUA, L., SHUIBIN, H., YONGMING, S., XIHUI, K., JUNFENG, J., ZHENHONG, Y., & DINGFA, L. Anaerobic co-digestion of Pennisetum hybrid and pig manure: A comparative study of performance and microbial community at different mixture ratio and organic loading rate. **Chemosphere**, v. 247, p. 125871, 2020.

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied Energy**, v. 240, p. 120-137, abr. 2019.

LYU, Z., SHAO, N., AKINYEMI, T., & WHITMAN, W.B. Metanogênese. **Current Biology**, 28 (13), R727-R732 2018.

LOVATO, G.; ALBANEZ, R.; RUGGERO, L. S.; STRACIERI, L.; RATUSZNEI, S. M.; DOMINGUES RODRIGUES, J. A. Energetic feasibility of a two-stage anaerobic digestion system compared to a single-stage system treating whey and glycerin. **Biochemical Engineering Journal**, v. 161, n. January, p. 107653, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107653>.

MAO, C., ZHANG, T., WANG, X., FENG, Y., REN, G., & YANG, G. (2017). Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. **Scientific reports**, 7(1), 9379.

MATA-ALVAREZ, J., DOSTA, J., ROMERO-GÜIZA, MS, FONOLL, X., PECES, M., & ASTALS, S. Uma revisão crítica sobre as conquistas da codigestão anaeróbica entre 2010 e 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 36, 412-427, 2014.

MARAFON, A. C.; MACHADO, J. C.; AMORIM, E. L. C.; SALOMON, K. R.; SANTOS, J. P.; ROCHA E SILVA, O. E. Elephant grass as a feedstock for bioenergy production. **Biorefinery Sustainable Solutions**, v. 2, n. 2, 2020.

MARAFON, ANDERSON & MACHADO, JUAREZ. (2021). Secagem solar e extração do caldo do capim-elefante para uso bioenergético da biomassa. 10.13140/RG.2.2.34265.60000.

MACHADO, J. C., CARNEIRO, P. C. S., DA COSTA CARNEIRO, J., RESENDE, M. D. V., DA SILVA LÉDO, F. J., & DE SOUZA CARNEIRO, J. E. Bioenergetic potential and genetic diversity of elephantgrass via morpho-agronomic and biomass quality traits. **Industrial Crops and Products**, 95, 485-492, (2017).

MAINTINGUER, S. I.; FERNANDES, B. S.; DUARTE, I. C. S.; SAAVEDRA, N. K.; ADORNO, M. A. T.; VARESCHE, M. B. Fermentative hydrogen production by microbial consortium. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 30, p. 1–9, 2008.

MOSET, V. FONTAINE, D.; MØLLER, H. B. Co-digestion of cattle manure and grass harvested with different technologies. Effect on methane yield, digestate composition and energy balance. **Energy**, v. 141, p. 451-460, 2017.

MBACHU, V. M., IGBOANUGO, A. C., ALUKWE, U. J., & OKWU, M. O. Enhanced biogas production from fresh elephant grasses, using liquid extract from plantain pseudo stem. **Int J Sci Technol Res**, 10(3), 123-127, 2021.

NESHAT, S. A., MOHAMMADI, M., NAJAFPOUR, G. D., & LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 79, 308-322, 2017.

NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., & BRUNS, R. E. Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. **Bookman Editora**, (2010).

NUALSRI, C.; KONGJAN, P.; REUNGSANG, A. Direct integration of CSTR-UASB reactors for two-stage hydrogen and methane production from sugarcane syrup. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 40, p. 17884–17895, 2016.

ORDAZ-DIAZ, L. A.; BAILON-SALAS, A. M. Molecular identification of microbial communities in the methane production from vinasse: A review. **BioResources**, v.15, n.2, p.

4528-4552, mai. 2020.

OJEDIRAN, O. J., DAHUNSI, S. O., ADERIBIGBE, V., ABOLUSORO, S., ADESULU-DAHUNSI, A. T., ODEKANLE, E. L., ... & OGUNWOLE, J. O. Valorization of Pennisetum purpureum (Elephant grass) and piggery manure for energy generation. **Fuel**, 302, 121209, 2021.

OLUGBEMIDE, A. D., IMASUEN, A. O., OLEGHE, P. O., & EFOSA, J. O. Anaerobic co-digestion of fresh maize leaves with elephant grass. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, 16(1), 155-157, 2012.

ORRICO, A. C., SUNADA, N. D. S., LUCAS, J. D., ORRICO, M. A., & SCHWINGEL, A. W. (2015). Codigestão anaeróbia de dejetos de suínos e níveis de inclusão de óleo de descarte. **Engenharia Agrícola**, 35, 657-664. Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p657-664/2015>.

PAVI S, KRAMER LE, GOMES LP, MIRANDA LAS. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. **Bioresource Technology** 228:362–367, 2017.

POCHWATKA, P.; KOWALCZYK-JUŚKO, A.; MAZUR, A.; JANCZAK, D.; PULKA, J.; DACH, J.; & MAZURKIEWICZ, J. **Energetic and Economic Aspects of Biogas Plants Feed with Agriculture Biomass**. 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), pp. 130-133. Cingapura, 2020.

RAMOS SUÁREZ, J. L.; GÓMEZ, D.; REGUEIRO, L.; BAEZA, A.; HANSEN, F. Alkaline and oxidative pretreatments for the anaerobic digestion of cow manure and maize straw: Factors influencing the process and preliminary economic viability of an industrial application. **Bioresource technology**, v. 241, p. 10–20, 2017.

RAMOS-SUÁREZ, J. L., RITTER, A., GONZÁLEZ, J. M., & PÉREZ, A. C. (2019). Biogas from animal manure: A sustainable energy opportunity in the Canary Islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 104, 137-150.

RIAÑO, B.; MOLINUEVO, B.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C. Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 4131–4136, 2011.

ROCHA E SILVA, O. E. **Produção de biogás a partir da codigestão anaeróbia de capim-elefante com vinhaça em reator em batelada**. 2020. - Universidade Federal de Alagoas, [s. l.], 2020.

ROMERO, R. M., VALENZUELA, E. I., CERVANTES, F. J., GARCIA-REYES, R. B., SERRANO, D., & ALVAREZ, L. H. (2020). Improved methane production from anaerobic digestion of liquid and raw fractions of swine manure effluent using activated carbon. **Journal of water process engineering**, 38, 101576.

SANTOS, C. C.; DE SOUZA, W.; SANT ANNA, C.; BRIENZO, M. Elephant grass leaves have lower recalcitrance to acid pretreatment than stems, with higher potential for ethanol production. **Industrial Crops and Products**, v. 111, n. October 2017, p. 193–200, 2018.

SAWASDEE, Vanatpornratt; PISUTPAISAL, Nipon. Feasibility of biogas production from napier grass. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 61, p. 1229–1233, 2014. a. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.1064.

SONG M, SHIN SG, HWANG S. Methanogenic population dynamics assessed by realtime quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater. **Bioresour Technol**; 101, S23–8, 2010.

SINBUATHONG, N., SANGSIL, Y., LEUNGPRASERT, S., & SAWANON, S. Methane production from napier grass by two-stage anaerobic digestion. **International Journal of Global Warming**, 10(4), 423-436 (2016).

SIDDIQUE, Md. Nurul Islam; WAHID, Zularisam Ab. Achievements and perspectives

of anaerobic co-digestion: A review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 194, p. 359–371, 2018. a. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.155.

SHAH, F. A., MAHMOOD, Q., RASHID, N., PERVEZ, A., RAJA, I. A., & SHAH, M. M. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 627-642, 2015.

SCHWINGEL, A. W., ORRICO, A. C. A., ORRICO JUNIOR, M. A. P., SUNADA, N. D. S., & CENTURION, S. R. (2016). Desempenho da co-digestão anaeróbia de dejetos suínos com inclusão de glicerina bruta. **Revista Ciência Agronômica**, 47, 778-783 ISSN 1806-6690.

TENA, M.; LUQUE, B.; PEREZ, M.; SOLERA, R. Enhanced hydrogen production from sewage sludge by cofermentation with wine vinasse. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, p. 5977–5984, 2020.

THAEMNGOEN, A., SARITPONGTEERAKA, K., LEU, S. Y., PHUTTARO, C., SAWATDEENARUNAT, C., & CHAIPRAPAT, S. (2020). Anaerobic digestion of napier grass (*Pennisetum purpureum*) in two-phase dry digestion system versus wet digestion system. **BioEnergy Research**, 13(3), 853-865 <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10110-1>.

VILLA, LM, ORRICO, ACA, AKAMINE, LA, LUCAS JUNIOR, JD E SUNADA, NDS (2020). Codigestão anaeróbia de dejetos suínos com batata-doce ou mandioca em diferentes relações C/N. **Ciência Rural**, 50.

VOLPI, M. P. C.; FUESS, L. T.; MORAES, B. S. Anaerobic co-digestion of residues in 1G2G sugarcane biorefineries for enhanced electricity and biomethane production. **Bioresour Technol**, v. 330, jun. 2021.

WANG XJ, YANG GH, FENG YZ, REN GX, HAN XH. Optimizing feeding composition and carbon—nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic codigestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresour Technol** 2012;120: 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>. PMID: 22784956.

WU, D., LI, L., ZHAO, X., PENG, Y., YANG, P., & PENG, X. Anaerobic digestion: A review on process monitoring. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 103, 1-12, 2019.

WU, D.; PENG, X.; LI, L.; YANG, P.; PENG, Y.; LIU, H.; WANG, X. Commercial biogas plants: Review on operational parameters and guide for performance optimization. **Fuel**, v. 303, Article ID 121282, nov. 2021a.

YANG, L.; XU, F.; GE, X.; LI, Y. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 824–834, 2015.

YIN D, LIU W, ZHAI N, FENG Y, YANG G, WANG X, HAN X. Production of bio-energy from pig manure: a focus on the dynamics change of four parameters under sunlight-dark conditions. **Plos One**.2015;10(5).

ZANINE, A. de M.; SANTOS, E. M.; DÓREA, J. R. R.; DANTAS, P. A. de S.; DA SILVA, T. C.; PEREIRA, O. G. Evaluation of elephant grass silage with the addition of cassava scrapings. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 12, p. 2611–2616, 2010.

ZHOU, J., ZHANG, Y., KHOSHNEVISAN, B., & DUAN, N. Meta-analysis of anaerobic co-digestion of livestock manure in last decade: Identification of synergistic effect and optimization synergy range. **Applied Energy**, 282, 116128, 2021.

ZHANG, W.; WANG, X.; XING, W.; LI, R.; YANG, T.; YAO, N.; LV, D. Links between synergistic effects and microbial community characteristics of anaerobic co-digestion of food waste, cattle manure and corn straw. **Bioresour technology**, v. 329, n. 124919, p. 124919, 2021.

ZHANG, Y. G. et al. Pig production in subtropical agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 92, n. 5, p. 1016-1024, 2012.

ZHANG, Y., LI, J., LIU, F., YAN, H., LI, J., & ZHANG, X. (2018). Reduction of Gibbs free energy and enhancement of Methanosaeta by bicarbonate to promote anaerobic syntrophic butyrate oxidation. **Bioresour technology**, 267, 209-217.

APÊNDICE I – DADOS DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE CH₄ AO LONGO DO TEMPO PARA OS REATORES E GRÁFICOS INDIVIDUAIS DE PRODUÇÃO ACUMULADA-ETAPA I

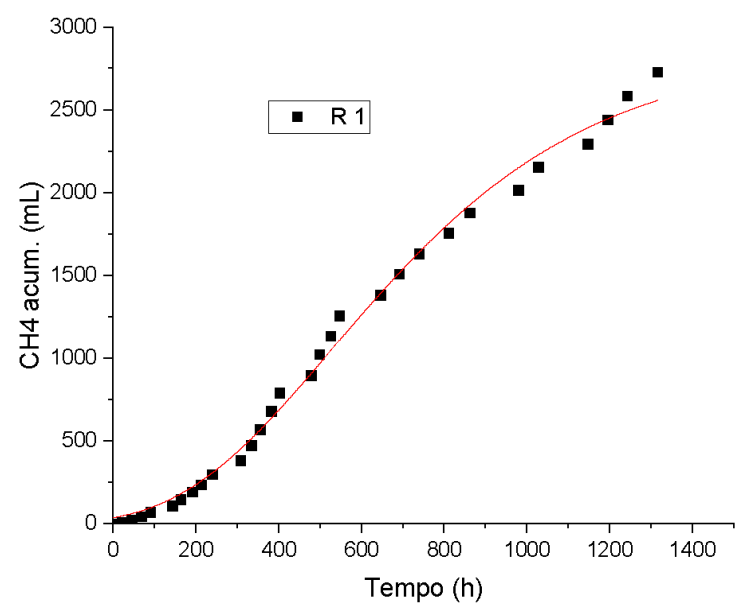
Tabela 18:Produções volumétricas diárias de CH₄ para as condições estudadas na Etapa 1 (CC₀/ES₁₀₀, CC₂₀/ES₈₀, CC₄₀/ES₆₀, CC₆₀/ES₄₀, CC₈₀/ES₂₀, CC₁₀₀/ES₀).

R1		R2		R3		R4		R5		R6	
Tempo (h)	mL _{CH₄}	Tempo (h)	mL _{CH₄}	Tempo (h)	mL _{CH₄}	Tempo (h)	mL _{CH₄}	Tempo (h)	mL _{CH₄}	Tempo (h)	mL _{CH₄}
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
20	7,16 ± 0,02	20	8,22 ± 0,30	21	8,61 ± 0,36	21	4,85 ± 0,13	22	2,25 ± 0,04	22	1,99 ± 0,01
44	21,38 ± 0,13	44	22,57 ± 1,06	45	22,02 ± 0,62	45	14,63 ± 0,13	46	4,53 ± 0,10	46	3,99 ± 0,02
68	43,51 ± 2,26	68	45,01 ± 2,26	69	39,94 ± 2,54	69	28,81 ± 0,22	69	7,03 ± 0,18	70	5,99 ± 0,02
20	7,16 ± 0,02	20	8,22 ± 0,30	20	8,61 ± 0,36	21	4,84 ± 0,13	21	2,25 ± 0,04	22	1,99 ± 0,01
163	146,26 ± 18,16	163	129,01 ± 14,27	163	111,04 ± 4,28	164	89,13 ± 0,14	164	21,72 ± 0,70	165	12,21 ± 0,12
143	106,66 ± 10,50	144	99,86 ± 9,38	144	84,19 ± 4,69	145	66,96 ± 1,40	145	15,15 ± 0,09	146	10,08 ± 0,08
191	191,48 ± 22,86	191	163,97 ± 17,66	192	147,47 ± 2,16	192	114,83 ± 1,85	193	33,13 ± 2,56	193	14,42 ± 0,23
90	70,24 ± 6,58	91	71,62 ± 4,55	91	60,60 ± 3,52	92	45,79 ± 0,91	92	9,79 ± 0,25	93	8,03 ± 0,04
212	234,30 ± 42,79	213	207,36 ± 22,21	213	194,08 ± 0,69	213	143,72 ± 4,29	214	49,39 ± 3,21	214	16,49 ± 0,25
239	297,96 ± 56,02	239	254,68 ± 22,16	240	239,69 ± 11,11	240	174,29 ± 7,52	240	64,78 ± 3,43	241	18,65 ± 0,34
308	382,03 ± 62,52	308	321,81 ± 33,01	309	299,45 ± 10,35	309	232,45 ± 4,68	310	83,66 ± 2,77	310	21,22 ± 0,79
334	472,10 ± 69,59	334	394,10 ± 35,90	335	358,98 ± 6,26	335	289,63 ± 0,53	336	102,73 ± 2,11	337	24,24 ± 1,60
355	569,33 ± 74,21	355	476,89 ± 40,30	362	409,70 ± 14,93	362	347,77 ± 4,83	364	122,10 ± 2,18	365	26,90 ± 2,29
382	680,48 ± 71,51	382	557,83 ± 48,16	388	462,91 ± 20,32	389	406,03 ± 11,78	391	141,77 ± 2,50	391	29,63 ± 2,89
402	789,61 ± 76,02	402	646,66 ± 50,21	408	525,34 ± 26,15	409	461,98 ± 14,24	411	161,53 ± 2,73	411	32,57 ± 3,60
478	897,07 ± 75,79	478	738,39 ± 63,93	485	605,80 ± 20,45	486	521,97 ± 24,85	488	181,98 ± 3,23	489	35,61 ± 4,44
499	1022,69 ± 79,65	500	834,52 ± 80,58	506	693,97 ± 14,04	508	583,90 ± 29,32	510	203,23 ± 3,94	511	38,82 ± 5,28
526	1134,57 ± 81,16	526	927,58 ± 89,19	532	773,14 ± 11,12	534	643,27 ± 30,04	536	221,99 ± 5,56	537	41,68 ± 6,00

547	1257,09 ± 78,75	548	1024,65 ± 97,92	554	853,98 ± 6,12	556	708,06 ± 27,42	558	242,51 ± 7,59	558	44,60 ± 6,77
646	1381,61 ± 81,23	647	1120,94 ± 107,90	653	937,20 ± 3,99	655	792,26 ± 23,13	657	263,55 ± 8,82	657	48,03 ± 7,89
811	1754,98 ± 90,12	812	1418,46 ± 146,47	817	1198,99 ± 13,81	820	1068,90 ± 19,30	823	324,98 ± 12,00	823	59,58 ± 12,81
691	1508,83 ± 81,18	691	1219,27 ± 121,93	697	1024,53 ± 13,48	699	878,66 ± 24,37	701	284,11 ± 10,01	702	51,55 ± 9,17
740	1631,52 ± 87,17	740	1317,67 ± 126,65	746	1112,47 ± 13,48	748	970,07 ± 21,47	752	304,58 ± 11,20	752	55,61 ± 11,03
862	1877,94 ± 92,41	863	1528,72 ± 163,15	868	1300,92 ± 20,89	871	1168,73 ± 17,03	874	347,09 ± 12,62	875	64,02 ± 14,89
980	2015,03 ± 95,67	981	1638,97 ± 179,79	986	1404,53 ± 23,32	989	1264,22 ± 10,12	992	368,44 ± 13,27	993	68,41 ± 17,01
1028	2155,25 ± 94,97	1029	1753,50 ± 197,89	1034	1509,79 ± 18,60	1037	1362,37 ± 14,94	1040	390,55 ± 14,46	1041	72,91 ± 19,17
1147	2294,77 ± 98,76	1148	1868,55 ± 220,14	1153	1613,55 ± 40,22	1156	1462,05 ± 20,68	1159	412,84 ± 16,48	1160	77,36 ± 21,38
1196	2439,26 ± 96,68	1196	1990,27 ± 231,46	1202	1727,79 ± 61,96	1204	1560,91 ± 29,97	1208	435,34 ± 16,44	1208	81,83 ± 23,59
1243	2584,49 ± 99,36	1244	2112,47 ± 250,60	1249	1826,75 ± 66,30	1252	1659,73 ± 43,83	1255	458,01 ± 17,24	1256	86,49 ± 25,90
1316	2728,11 ± 99,02	1317	2235,49 ± 264,97	1322	1930,94 ± 72,29	1324	1757,81 ± 58,85	1328	480,39 ± 17,11	1328	91,06 ± 28,17

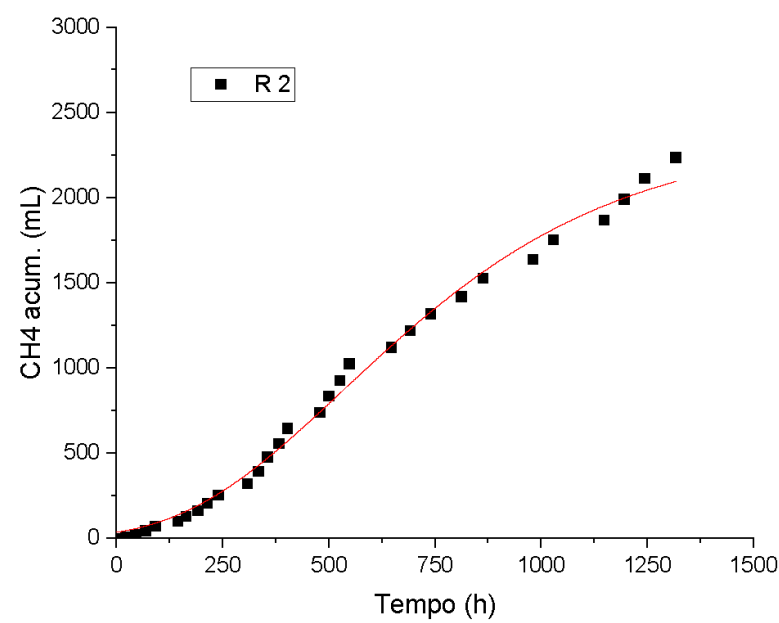
Fonte: Autora, 2022.

Figura A. 1: Produção acumulada de CH₄ e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para R1 (CC₀/ES₁₀₀).



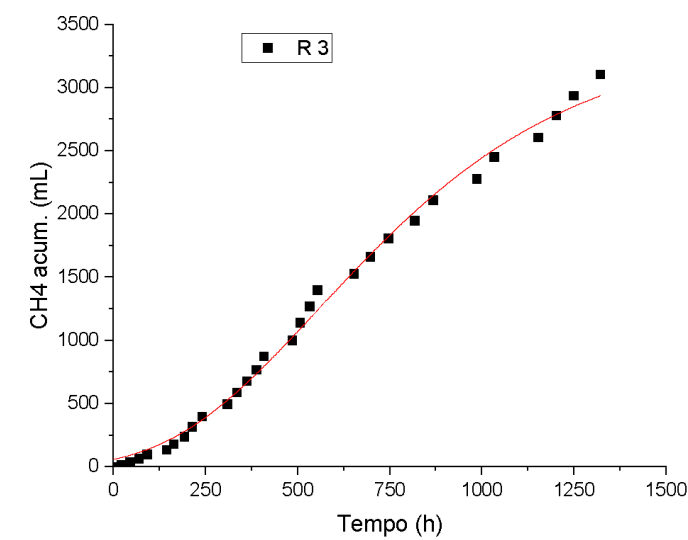
Fonte: Autora, 2022.

Figura A. 2: Produção acumulada de CH₄ e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para R2 (CC₂₀/ES₈₀).



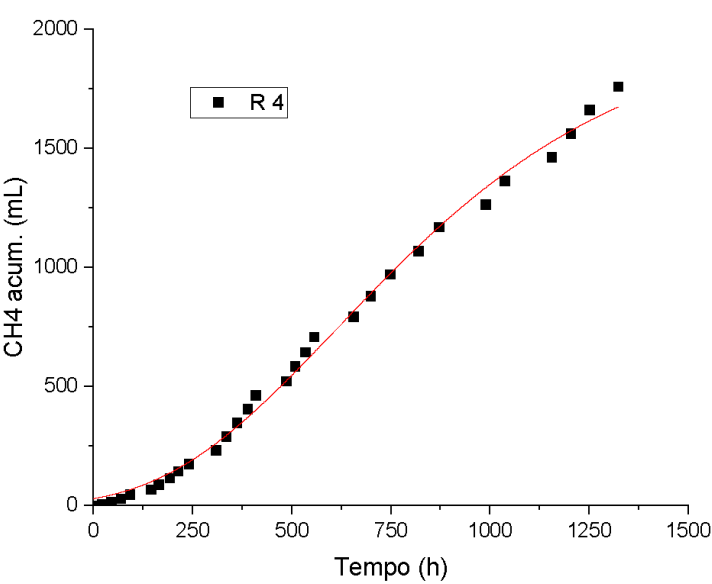
Fonte: Autora, 2022.

Figura A. 3: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para R3 (CC₄₀/ES₆₀).



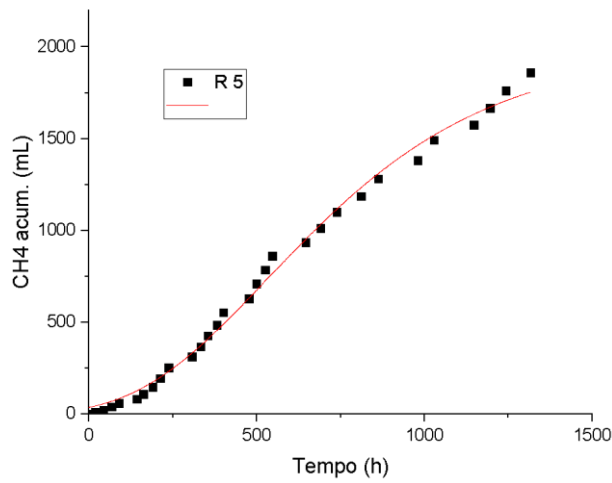
Fonte: Autora, 2022.

Figura A. 4: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para R4 (CC₆₀/ES₄₀).



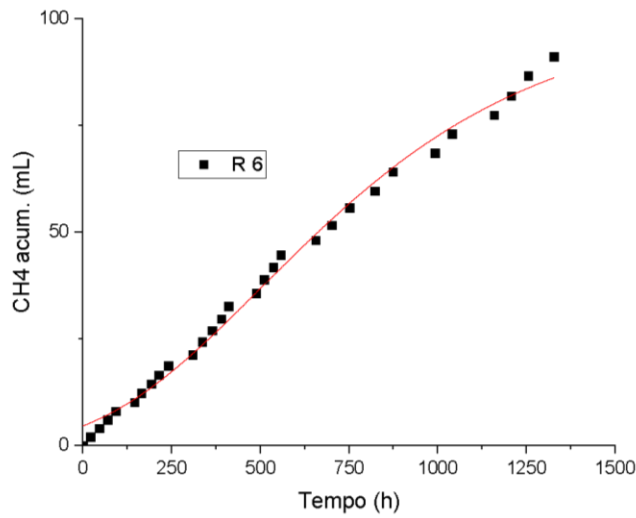
Fonte: Autora, 2022.

Figura A. 5: Produção acumulada de CH₄ e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para R5 (CC₈₀/ES₂₀).



Fonte: Autora, 2022.

Figura A. 6: Produção acumulada de CH₄ e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para R6 (CC₁₀₀/ES₀).



Fonte: Autora, 2022.

APÊNDICE II - DADOS DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE CH₄ AO LONGO DO TEMPO PARA OS REATORES E GRÁFICOS INDIVIDUAIS DE PRODUÇÃO ACUMULADA-ETAPA II

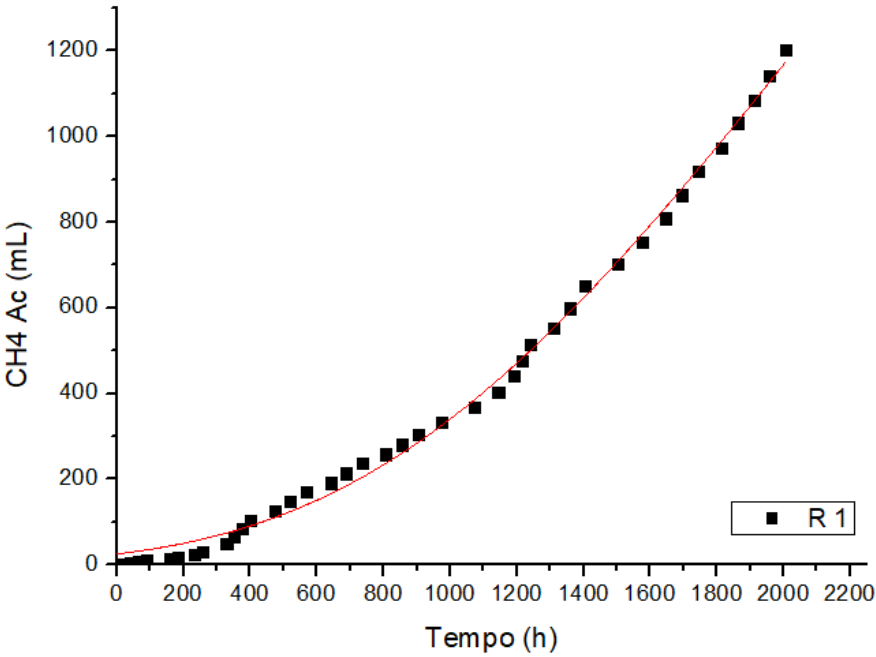
Tabela 19: Produções volumétricas diárias de CH₄ para as condições estudadas na Etapa 2.

F1		F2		F3		F4		F5		F6		F7		F8	
Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)	Tempo (h)	CH ₄ (mL)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2,40±0,35	22	2,12±0,16	23	2,58±0,47	23	2,38±0,07	24	2,03±0,06	24	1,96±0,03	25	2,40±0,14	25	3,40±0,62
41	4,85±0,24	41	4,51 ±0,27	43	6,05±0,47	43	5,85±0,11	45	4,43±0,28	45	4,03±0,03	47	5,65±0,37	47	7,40±1,03
65	7,37±0,27	65	7,42±0,06	67	10,52±0,87	67	10,24±1,30	69	7,29±0,62	69	5,99±0,11	71	9,54±0,74	71	11,31±2,18
89	10,18 ±0,45	89	10,65±0,04	91	15,28±1,02	91	14,50±2,02	93	10,39±1,28	93	7,89±0,24	95	13,67±1,36	95	15,76±3,23
161	14,14 ±0,45	161	15,16±1,25	163	21,65±1,05	163	21,05±3,67	165	14,29±2,77	165	9,92±0,36	167	20,38±1,46	167	24,45±3,52
185	18,72 ±0,17	185	19,79±2,41	187	29,02±1,73	187	29,18±5,81	189	18,79±4,74	189	11,91±0,38	191	29,51±1,32	191	35,85±3,63
233	24,50 ±0,71	233	25,91±4,85	235	38,99±1,80	235	39,80±8,31	237	23,79±7,17	237	14,30±0,60	239	45,09±1,94	239	57,49±2,48
257	32,08±0,77	257	32,97±8,07	259	51,43±2,43	259	51,54±11,72	261	28,98±9,57	261	16,92±0,67	263	66,29±3,16	263	88,09±2,63
329	48,74±4,90	329	45,57±13,10	331	71,14±4,25	331	68,40±20,36	333	35,12±12,63	333	20,66±1,21	335	104,75±3,20	335	152,64±5,28
353	66,12±12,14	353	60,58±19,58	355	94,75±6,19	355	88,95±28,89	357	41,84±16,07	357	25,14±1,76	359	146,18±9,25	359	223,03±6,22
377	84,43±17,32	377	80,32±28,97	379	122,49±7,54	379	111,71±41,52	381	49,10±19,41	381	30,82±2,75	383	190,53±17,31	383	299,43±2,69
402	104,92±20,88	402	103,16±38,40	404	152,94±9,72	404	138,57±57,54	406	57,68±23,48	406	38,13±3,74	408	236,72±22,25	408	378,52±3,99
473	126,53±25,40	473	136,25±35,97	475	192,98±11,22	475	182,77±85,81	477	66,84±27,91	477	47,54±5,20	479	290,75±34,14	479	471,57±13,36
521	149,02±28,21	521	170,26±32,68	523	234,92±13,64	523	231,90±115,08	525	76,98±31,89	525	57,17±5,78	527	350,18±48,39	527	570,04±17,88
569	170,65±29,23	569	204,09±28,88	571	277,23±15,04	571	284,88±140,46	573	88,35±35,44	573	68,69± 4,18	575	410,36±61,93	575	670,42±13,67
641	191,70±33,05	641	239,08±26,64	643	319,82±16,06	643	341,42±164,57	645	105,37±30,60	645	80,49±7,71	647	471,63±75,63	647	780,99±7,94
689	213,85±37,01	689	273,66±22,39	691	363,20±15,91	691	399,81±189,38	693	122,67±24,29	693	90,35±9,26	695	523,87±82,70	695	887,09±6,68
736	236,97±39,97	736	308,03±21,57	738	404,00±14,21	738	453,82±215,15	740	141,91±15,94	740	100,90±11,56	742	575,45±88,93	742	995,86±3,70
808	258,50±43,17	808	341,24±18,62	810	449,56±10,49	810	508,74±240,79	812	161,84±7,52	812	111,23±13,23	814	630,85±95,48	814	1098,77±7,35

857	280,85±46,43	857	375,94±15,56	859	501,20±9,53	859	563,15±265,99	861	180,95±1,52	861	121,75±15,95	863	691,42±106,06	863	1204,37±12,20
904	304,60±51,20	904	411,69±11,77	906	560,28±6,34	906	618,13±290,33	908	202,07±10,30	908	132,71±18,54	910	751,89±112,49	910	1305,75±20,69
976	334,61±60,55	976	449,85±8,00	978	627,64±5,86	978	676,04±317,71	980	224,98±19,52	980	146,21±22,95	982	815,37±113,14	982	1410,42±32,51
1072	368,53±77,52	1072	489,16±4,84	1074	705,16±3,38	1074	734,92±348,12	1076	254,84±23,24	1076	157,36±25,58	1078	888,21±122,54	1078	1516,10±41,09
1144	404,63±94,67	1144	528,17±1,34	1146	782,81±4,10	1146	798,69±379,53	1148	290,68±19,81	1148	170,05±26,62	1150	972,09±130,42	1150	1615,60±46,12
1192	441,34±111,87	1192	567,59±2,39	1194	861,85±5,58	1194	867,90±414,56	1196	326,56±17,65	1196	182,31±29,86	1198	1061,80±142,54	1198	1715,56±53,92
1215	476,62±129,53	1215	606,34±6,52	1217	940,36±8,13	1217	935,81±447,13	1219	359,37±13,63	1219	193,15±31,09	1221	1151,93±159,89	1221	1818,28±62,66
1240	514,57±142,72	1240	646,48±10,83	1242	1020,57±7,22	1242	1007,02±487,15	1244	392,52±10,93	1244	203,04±33,04	1246	1245,46±178,50	1246	1923,48±74,26
1312	552,65±160,10	1312	687,21±14,00	1314	1100,36±9,54	1314	1038,08±471,17	1316	425,06±9,94	1316	214,51±35,60	1318	1335,77±198,39	1318	2033,95±83,05
1360	599,16±174,86	1360	727,02±18,76	1362	1181,38±8,21	1362	1063,62±450,44	1364	457,29±9,83	1364	225,21±37,90	1366	1428,59±220,74	1366	2144,74±90,22
1406	650,23±180,41	1407	769,93±23,90	1408	1262,22±6,73	1409	1091,82±424,68	1410	492,44±12,25	1410	238,10±39,44	1412	1515,10±235,78	1412	2264,77±89,38
1503	701,44±185,12	1504	811,75±28,42	1505	1325,64±14,42	1506	1112,33±399,35	1507	525,68±12,12	1508	249,15±40,43	1509	1597,16±256,39	1509	2381,03±82,33
1575	754,86±190,52	1576	857,83±36,20	1577	1392,38±40,33	1578	1130,83±377,19	1579	557,37±12,61	1580	260,73±41,03	1581	1691,92±289,11	1581	2514,11±70,68
1647	809,20±198,40	1648	909,51±40,71	1649	1459,24±66,29			1651	589,57±11,19					1653	2637,39±67,78
1695	863,16±205,20	1696	963,08±53,46	1697	1524,68±91,25			1699	623,17±8,20						
1743	919,48±213,15	1744	1022,81±68,94					1747	657,07±4,78						
1815	974,19±222,41	1816	1075,38±67,24					1819	691,52±0,20						
1863	1032,31±234,20							1867	726,90±2,82						
1911	1085,06±238,78														
1959	1143,07±247,67														
2007	1203,28±257,39														

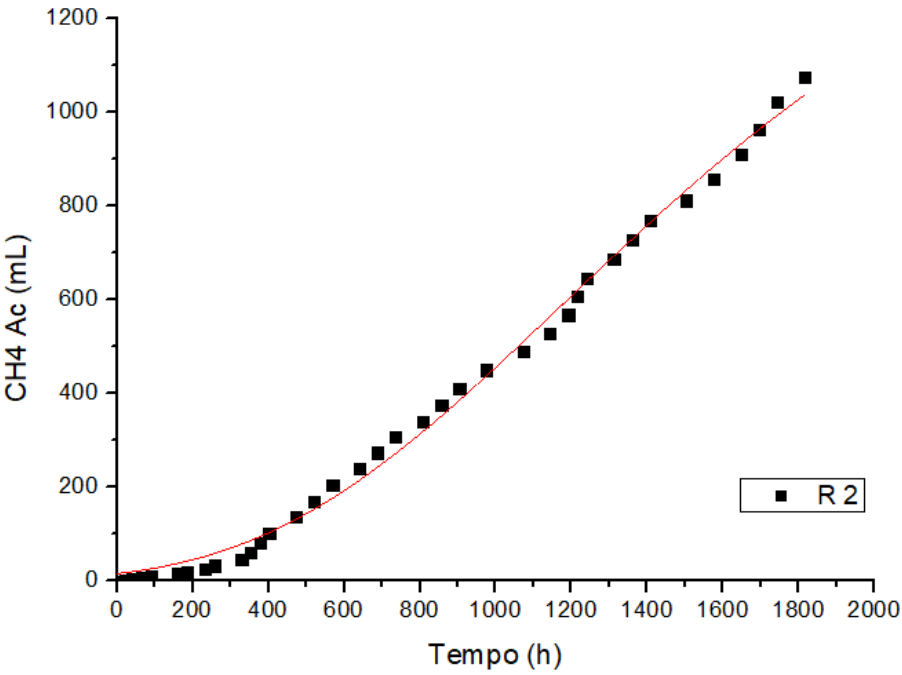
Fonte: Autora, 2023.

Figura A. 7: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F1.



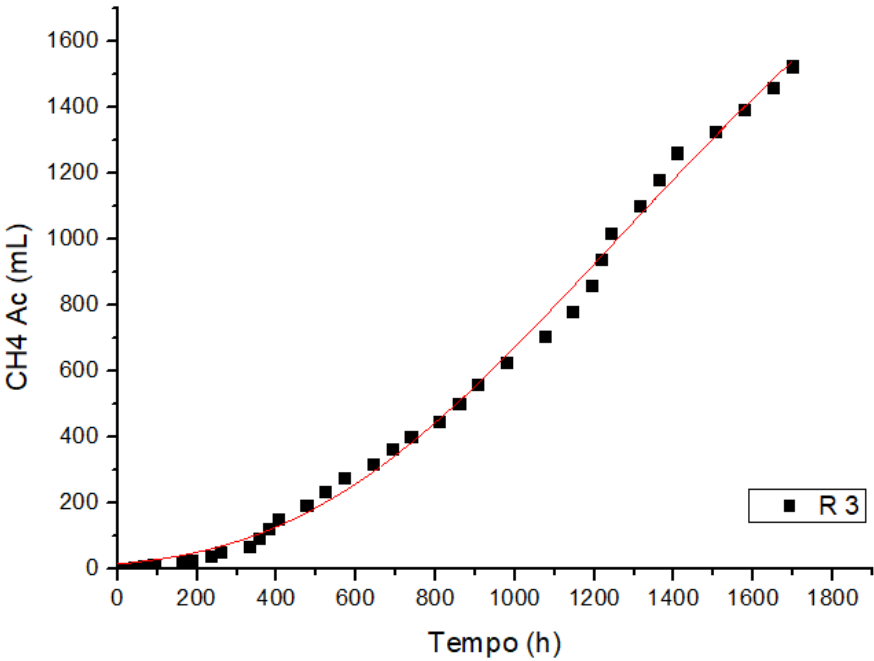
Fonte: Autora, 2023.

Figura A. 8: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F2.



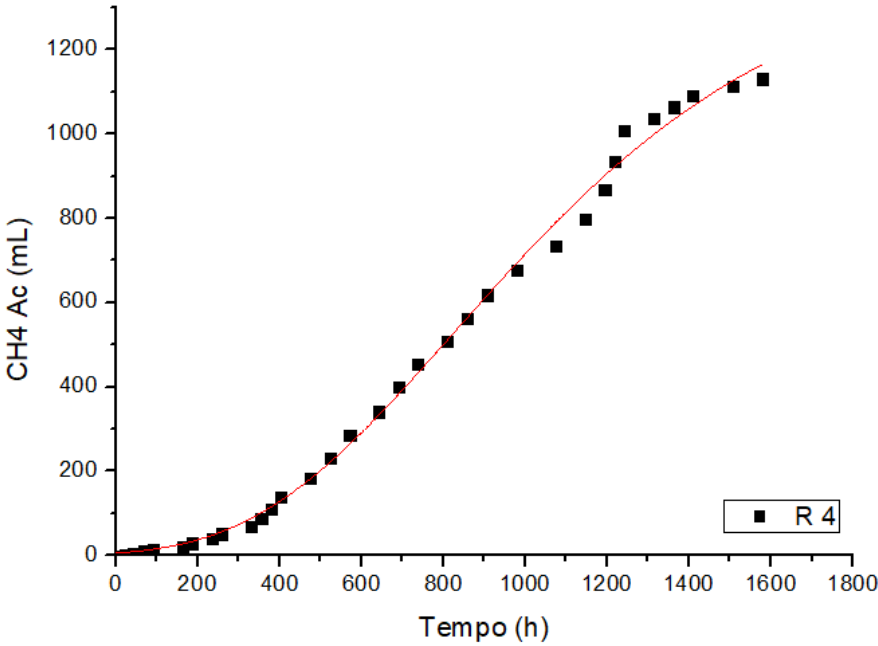
Fonte: Autora, 2023.

Figura A. 9: Produção acumulada de CH₄ e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F3.



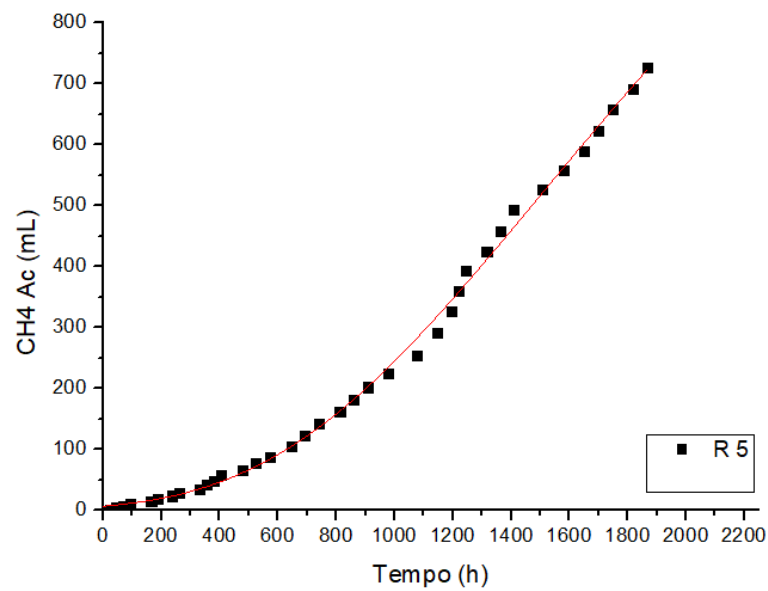
Fonte: Autora, 2023.

Figura A.10: Produção acumulada de CH₄ e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F4.



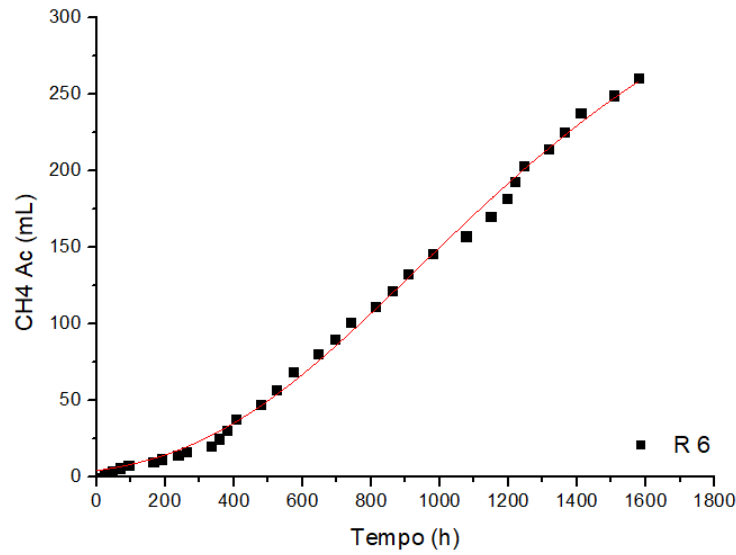
Fonte: Autora, 2023.

Figura A.11: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F5.



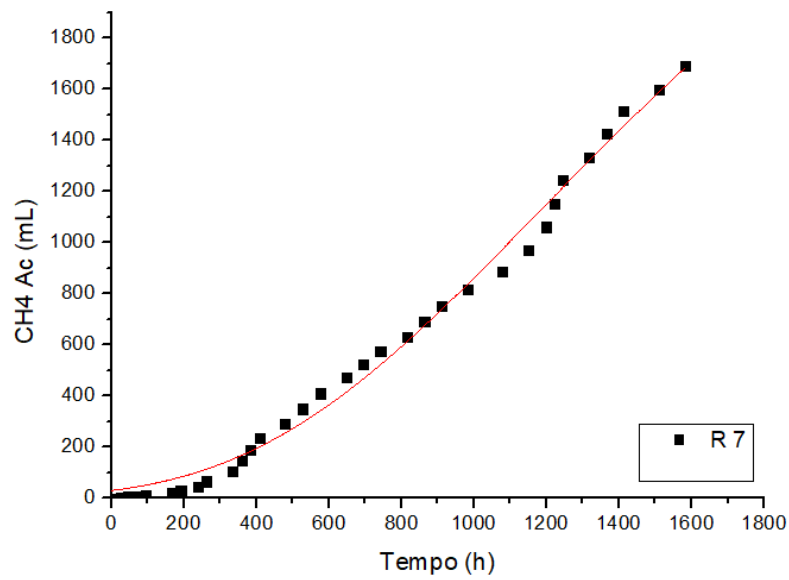
Fonte: Autora, 2023.

Figura A. 12: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F6.



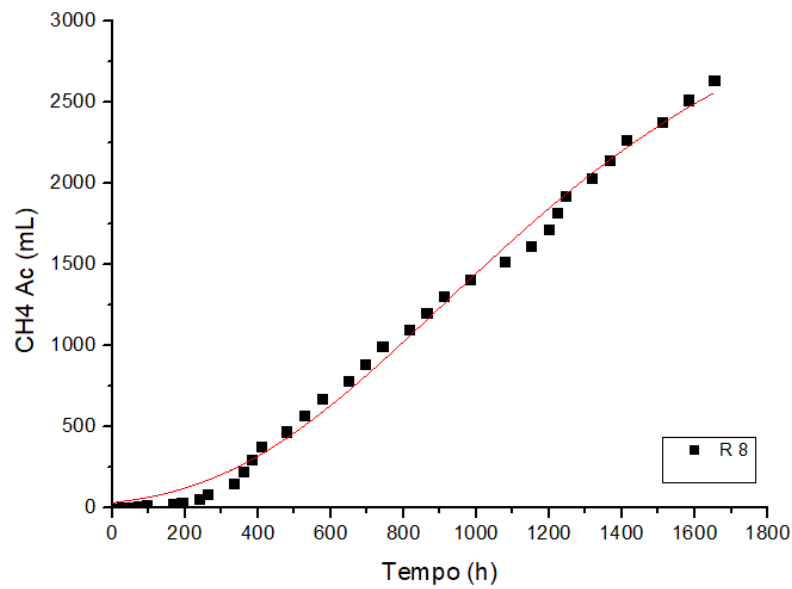
Fonte: Autora, 2023.

Figura A. 13: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F7.



Fonte: Autora, 2023.

Figura A. 14: Produção acumulada de CH4 e ajuste ao modelo de Gompertz Modificado para F8.



Fonte: Autora, 2023.