



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

DANILO HERCULANO DA SILVA

**FATORES QUE INFLUENCIAM A BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Londrina
2017

DANILO HERCULANO DA SILVA

**FATORES QUE INFLUENCIAM A BIODIGESTÃO
ANAERÓBIA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós Graduação em Bioenergia, com área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Di Mauro

Londrina
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Silva, Danilo Herculano da.

Fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia no processo de produção de biogás / Danilo Herculano da Silva. - Londrina, 2017.

76 f. : il.

Orientador: Eduardo Di Mauro.

Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Biogás - Tese. 2. Bioenergia - Tese. 3. Resíduos como combustível - Tese. I. Di Mauro, Eduardo. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. III. Título.

DANILO HERCULANO DA SILVA

**FATORES QUE INFLUENCIAM A BIODIGESTÃO ANAERÓBIA NO
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós Graduação em Bioenergia, com área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Di Mauro
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Dionisio Borsato
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Helder Rodrigues da Silva
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 22 de fevereiro de 2017.

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Alexandre e Valdenilia, a minha querida avó Clea Dourado, a minha namorada Kelly Spacino e a todos da minha família por sempre acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre me dando força para encarar essa jornada em busca dos meus objetivos e por conceder o que há de mais valioso para mim, a minha família.

Aos meus pais, a minha namorada, aos meus avós e aos meus sogros por tudo o que fazem por mim, sempre me apoiando nessa jornada.

Um agradecimento especial aos meus tios Ronie, Alessandra e a todos os outros meus familiares, que embora não citados, sempre estão ao meu lado em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Eduardo Di Mauro, pela orientação, interesse, contribuição e conhecimento para a realização do projeto de dissertação.

Ao Prof. Dr. Dionisio Borsato e a Profa. Dr. Carmen Luisa Barbosa Guedes, pela atenção e ajuda na minha dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, pelos conhecimentos transmitidos durante as disciplinas.

A Universidade Estadual de Londrina – UEL, pela oportunidade de estudo e a todos os outros funcionários da instituição (da biblioteca, da secretaria, da limpeza).

A CAPES – (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior), pela concessão de bolsa de estudo.

A todos os funcionários da CI Biogás – (Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás), especialmente, João Zank, Tatiane Souza, Rafael Gonzalez e Liciane Eckert pela ajuda e contribuição na obtenção dos dados referentes ao processo de produção de biogás no Condomínio de Agroenergia Ajuricaba.

Aos meus colegas de mestrado do LABESC – Laboratório Escola de Pós- Graduação, Caroline Rocha, Cintia Santos, Guilherme Colusse, Ivo Augusto, Jessica Barbieri, Lucas Maroubio e Simone por toda ajuda e amizade de vocês.

Agradeço também ao meu irmão acadêmico Raí Rigonatto, por ter compartilhado comigo esses momentos de aprendizado durante o mestrado.

Enfim agradeço a todos que de uma forma direta ou indireta participaram da realização deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”

Arthur Schopenhauer

SILVA, Danilo Herculano da. **Fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia no processo de produção de biogás.** 2017. 76 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

RESUMO

O biogás é uma fonte promissora na produção de energia renovável que pode contribuir para a mudança na matriz energética mais sustentável, reduzindo a demanda de geração de combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa. Trata-se de um gás composto principalmente por metano e dióxido de carbono, obtido a partir da decomposição anaeróbia da biomassa dos resíduos orgânicos. A falta de conhecimento sobre o manuseio de biodigestores e dos fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia são as principais barreiras para o não aproveitamento do biogás. No entanto, para adquirir esse conhecimento os modelos matemáticos, podem ser utilizados para otimizar e descrever os fatores que influenciam o sistema de produção. Neste estudo, o objetivo foi obter um modelo matemático para auxiliar no aumento da produção de biogás com o uso da biomassa animal de bovinos e suínos, utilizando a metodologia de superfície de resposta. Os parâmetros analisados foram afluentes, temperatura, pH, sólidos sedimentáveis, sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e efluentes em biodigestores implantados em 13 propriedades rurais (7 de bovinoculturas e 6 de suinocultura), selecionadas do Condomínio de Agroenergia Ajuricaba, na cidade de Marechal Candido Rondon na região Oeste do Paraná. O modelo matemático foi obtido por meio da análise de regressão polinomial de segunda ordem, utilizando as variáveis afluente, temperatura, $\text{pH}_{\text{afluente}}$, $\text{pH}_{\text{efluente}}$, $\text{ST}_{\text{afluente}}$ e $\text{ST}_{\text{efluente}}$, contendo os termos lineares e quadráticos, indicados pelo histograma. A análise de variância (ANOVA) mostrou que todos os termos foram significativos em nível de 5% ($0,00007 \leq p \leq 0,02045$) com exceção das variáveis $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e $\text{ST}_{\text{efluente}}$. O valor do coeficiente de determinação (R^2) foi 99,70 e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) foi 98,68, mostrando que o modelo pode ser utilizado para fins preditivos tanto para biogás gerado da biomassa bovina e suína. Através da metodologia de superfície de resposta foi possível otimizar as variáveis independentes na produção de biogás dos dejetos bovinos e suínos para obtenção de um melhor rendimento. A otimização apresentou uma produção de biogás de 20 a 40 $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ em relação a 7,8 $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ para dejetos bovinos e 160 $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ em comparação a 67,22 $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ para dejetos suínos.

Palavras-chave: Modelos matemáticos. Otimização. Biodigestores. Biomassa residual animal. Metodologia de superfície de resposta.

SILVA, Danilo Herculano da. **Study of the factors that influence anaerobic biodigestion in biogas production process.** 2017. 76 p. Dissertation (Mester's degree in bioenergy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

ABSTRACT

Biogas is a promising source for renewable energy production that can contribute to the change in more sustainable energy matrix, reducing the demand for fossil fuel generation and greenhouse emissions. It is a gas composed mainly of methane and carbon dioxide, obtained from the anaerobic decomposition of the organic waste biomass. The lack of knowledge about the handling of biodigesters and the factors that influence anaerobic biodigestion are the main barriers to the non-use of biogas. However, to acquire this knowledge the mathematical models can be used to optimize and describe the factors that influence the production system. In this study, the objective was to obtain a mathematical model to aid in the increase of biogas production with the use of bovine and swine animal biomass, using the response surface methodology. The analyzed parameters were influents, temperature, pH, settling solids, total solids, fixed solids, volatile solids and effluents in biodigesters implanted in 13 rural properties (7 of bovinocultures and 6 of swine), selected from the Condominium of Agroenergia Ajuricaba, in the city of Marechal Candido Rondon in the western region of Paraná. The mathematical model was obtained through second order polynomial regression analysis using the variables influent, temperature, $\text{pH}_{\text{influent}}$, $\text{pH}_{\text{effluent}}$, $\text{TS}_{\text{influent}}$ and $\text{TS}_{\text{effluent}}$ containing the terms linear model and quadratic indicated by the histogram. Analysis of variance (ANOVA) showed that all terms were significant level at 0.05 ($0.00007 < p < 0.02045$) with the exception of the variables $\text{pH}_{\text{influent}}$ and $\text{TS}_{\text{effluent}}$. The coefficient of determination (R^2) of polynomial equation was found at 0.9970 and the adjusted coefficient of determination (adjusted R-squared) value of 0.9868, showing that the mathematical model can be used for both predicted for biogas generated from cattle and pig's waste. Through response surface methodology, it was possible to optimize the independent variables in the biogas production from cattle and pigs waste to obtain a better yield. Optimization presented a biogas production from 20 to 40 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ in relation to 7.8 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ to cattle manure and 160 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ in comparison to 67.22 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ pigs manure.

Key words: Mathematical models. Optimization. Biodigesters. Residual animal biomass. Response surface methodology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Quantidade de animais de bovinos e suínos no Estado do Paraná entre 2010 à 2015	19
Figura 2	– Quantidade de dejetos de bovinos e suínos no Paraná entre 2010 à 2015	20
Figura 3	– Potencial energético provenientes da biomassa residual no Paraná entre 2010 à 2015	23
Figura 4	– Biodigestor do tipo vertical	26
Figura 5	– Biodigestor do tipo horizontal	27
Figura 6	– Esquema representativo do processo de degradação anaeróbia dentro do biodigestor.....	28
Figura 7	– Efeito da temperatura na biodigestão anaeróbia.....	34
Figura 8	– Fluxograma do sistema de biogás em uma unidade produtiva rural.....	40
Figura 9	– Mapa de localização das propriedades rurais e dos animais.....	43
Figure 10	– Demonstração do potencial due biogás no Ajuricaba.	44
Figura 11	– Placa de sinalização do gasoduto no Ajuricaba	44
Figura 12	– Central Termelétrica no Ajuricaba.....	45
Figura 13	– Histograma dos parâmetros da produção de biogás.....	53
Figura 14	– Gráfico de Pareto das variáveis que influenciam na produção de biogás.....	55
Figura 15	– Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e pH_{afluente} para dejetos de bovinos	57
Figura 16	– Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e temperatura para dejetos de bovinos.....	58
Figura 17	– Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos sedimentáveis _{afluente} para dejetos de bovinos.....	58
Figura 18	– Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos voláteis _{afluente} para dejetos de bovinos	59
Figura 19	– Curvas de nível da produção de biogás em função do pH_{afluente} e sólidos voláteis _{afluente} (a) e pH_{afluente} e sólidos fixos _{afluente} (b) para dejetos de bovinos.	60

Figura 20 –	Curvas de nível da produção de biogás em função do $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e sólidos voláteis _{afluente} para dejetos de suínos	62
Figura 21 –	Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e temperatura (a) e afluente e $\text{pH}_{\text{afluente}}$ (b) para dejetos de suínos	63
Figura 22 –	Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos voláteis _{afluente} para dejetos de suínos	63
Figura 23 –	Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e sólidos fixos _{afluente} para dejetos de suínos	64
Figura 24 –	Curvas de nível da produção de biogás em função dos sólidos totais _{afluente} e afluente de dejetos bovinos (a) e de dejetos suínos (b)	65
Figura 25 –	Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos voláteis _{afluente} para dejetos de bovinos (a) e para dejetos de suínos (b).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Produção diária de dejetos suínos e bovinos.....	20
Tabela 2	–	Concentração de metano após a fermentação dos dejetos suínos e bovinos	21
Tabela 3	–	Parâmetros físicos da biomassa residual animal.	22
Tabela 4	–	Parâmetros químicos da biomassa residual animal	22
Tabela 5	–	Temperatura ideal e o tempo de retenção na fermentação anaeróbia	36
Tabela 6	–	Proporção sólido: água da biomassa residual animal	36
Tabela 7	–	Composição do biogás.....	39
Tabela 8	–	Plantel de animais das propriedades selecionadas do Condomínio Ajuricaba.....	48
Tabela 9	–	Quantidade de dejetos produzidos em cada propriedade.....	49
Tabela 10	–	Rendimento da produção de dejetos bovinos e suínos.....	49
Tabela 11	–	Parâmetros físicos dos dejetos nas propriedades rurais do Ajuricaba.	50
Tabela 12	–	Parâmetros químicos dos dejetos nas propriedades rurais do Ajuricaba	51
Tabela 13	–	Parâmetros da produção de biogás nas propriedades rurais do Ajuricaba	52

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	– Tamanho do Biodigestor	25
Equação 2	– Volume do Biodigestor	25
Equação 3	– Tempo de Retenção Hidráulica.....	35
Equação 4	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos e Suínos.....	54
Equação 5	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $AFL \times pH_a$	56
Equação 6	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $AFL \times T$	56
Equação 7	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $AFL \times SS_a$	56
Equação 8	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $AFL - SV_a$	56
Equação 9	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $pH_a \times SV_a$	56
Equação 10	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $pH_a \times SF_a$	56
Equação 11	– Equação da Produção de Biogás de Suínos – $pH_a \times SV_a$	61
Equação 12	– Equação da Produção de Biogás de Suínos – $AFL \times T$	61
Equação 13	– Equação da Produção de Biogás de Suínos – $AFL \times pH_a$	61
Equação 14	– Equação da Produção de Biogás de Suínos – $AFL \times SV_a$	61
Equação 15	– Equação da Produção de Biogás de Suínos - $AFL \times SF_a$	61
Equação 16	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $AFL \times ST_a$	65
Equação 17	– Equação da Produção de Biogás de Suínos – $AFL \times ST_a$	65
Equação 18	– Equação da Produção de Biogás de Bovinos – $AFL \times SV_a$	66
Equação 19	– Equação da Produção de Biogás de Suínos – $AFL \times SV_a$	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFL	Afluente
CI Biogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EFL	Efluente
EMATER	Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural
kg	Quilograma
kVA	Quilovolt-ampère
kWh	Quilowatt-hora
Labiogás	Laboratório de Biogás
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
PEAD	Geomembrana de Polietileno de Alta Densidade
R ²	Coefficiente de Determinação
R ² _{aj}	Coefficiente de Determinação Ajustado
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SF _a	Sólidos Fixos _{afluente}
SF _e	Sólidos Fixos _{efluente}
SS _a	Sólidos Sedimentáveis _{afluente}
SS _e	Sólidos Sedimentáveis _{efluente}
ST _a	Sólidos Totais _{afluente}
ST _e	Sólidos Totais _{efluente}
SV _a	Sólidos Voláteis _{afluente}
SV _e	Sólidos Voláteis _{efluente}
T	Temperatura
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO TEÓRICA	19
3.1	BIOMASSA RESIDUAL ANIMAL DO ESTADO DO PARANÁ.....	19
3.2	BIODIGESTORES	24
3.2.1	Implantação, Dimensionamento e Alimentação	24
3.2.2	Tipos e Modelos de Biodigestores	26
3.3	BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	28
3.3.1	Hidrólise	29
3.3.2	Acidogênese	29
3.3.3	Acetogênese	30
3.3.4	Metanogênese	30
3.3.5	Sulfetogênese	31
3.3.2	Fatores que Influenciam no Processo Biológico	32
3.3.2.1	Impermeabilidade ao ar.....	32
3.3.2.2	pH.....	32
3.3.2.3	Temperatura.....	33
3.3.2.4	Tempo de retenção hidráulica (TRH)	35
3.3.2.5	Teor de água.....	36
3.3.2.6	Concentração dos sólidos	37
3.4	BIOGÁS.....	39
3.5	CONDOMÍNIO DE AGROENERGIA AJURICABA.....	42
4	METODOLOGIA	46
4.1	COLETA DE DADOS.....	46
4.2	MODELO MATEMÁTICO	47
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	47

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	PROPRIEDADES RURAIS SELECIONADAS NO CONDOMÍNIO AJURICABA.....	48
5.1.1	Quantidade de Animais	48
5.1.2	Quantidade de Dejetos.....	49
5.1.3	Parâmetros Físico-Químicos da Biomassa (Afluente e Efluente).....	50
5.1.4	Produção de Biogás	52
5.2	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	53
5.2.1	Metodologia de Superfície de Resposta.....	55
5.2.1.1	Bovinos	55
5.2.1.2	Suínos	60
6	CONCLUSÃO	67
7	REFERÊNCIAS	68
8	ANEXO	82

1 INTRODUÇÃO

A preocupação da humanidade com a utilização dos combustíveis fósseis devido ao esgotamento das reservas e aumento das emissões de gases de efeito estufa motivaram os pesquisadores a buscarem por fontes alternativas de energias renováveis, como a energia solar, eólica, hidráulica, e biomassa (CHANDRA *et al.*, 2014).

Essas energias renováveis vêm sendo pesquisadas (YANGA *et al.*, 2014), pois se encontram disponíveis na natureza de forma cíclica e são utilizadas para gerar eletricidade, calor e produzir combustível (MEDEIROS *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2009). Sua exploração pode melhorar a segurança energética e a qualidade de vida das pessoas no mundo (HAGOS *et al.*, 2016).

Entre estes tipos de energias renováveis, a utilização da biomassa para geração de eletricidade tornou-se uma das alternativas mais promissoras (HAGOS *et al.*, 2016) e tem sido estudado em diversos países em desenvolvimento e desenvolvido (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; SILVA *et al.*, 2009; CAMPOS, 2011; REFOSCO, 2011; AZEITONA, 2012). Isso se deve na busca por fontes de geração de energia mais competitivas e a necessidade de reduzir o uso de combustíveis fósseis.

Lindemeyer (2008), utilizou biomassa na geração de energia para a produção de eletricidade a partir do biogás produzido, a partir da matéria orgânica com alto poder de combustão, sendo uma fonte alternativa de grande eficiência. Atualmente, o biogás tem sido utilizado em sistemas de cogeração e no fornecimento de energia para demandas isoladas.

No setor agropecuário, o uso dos resíduos orgânicos nos biodigestores pode fornecer a energia necessária nas propriedades rurais para iluminação, aquecimento e o movimento dos motores através da exploração deste biocombustível. Além disso, o material orgânico processado no biodigestor pode ser utilizado como biofertilizante (LINDEMEYER, 2008).

Vale ressaltar que o setor agrícola gera uma grande quantidade de resíduos, entre eles, podemos destacar os dejetos de animais que são considerados a melhor matéria-prima para os biodigestores (BARBOSA; LANGER, 2011), e se o dejetos de animais não for tratado adequadamente no ambiente, causará poluição de rios e lagos e, conseqüentemente, afetará a qualidade da água para consumo

humano, disseminando doenças, mortandade de peixes, tornando-se nocivo para a saúde da população (DAGA *et al.*, 2007; PEREIRA; DEMARCHI; BUDIÑO, 2009; SILVA; FRANCISCO, 2010).

Diante disso, no setor rural, o tratamento do dejetos animal a partir da digestão anaeróbia é um processo que converte uma matéria prima que antes era vista como um resíduo, em geração de energia (SILVA *et al.*, 2014), proporcionando renda extra para os agricultores na venda de créditos de carbono, devido à redução das emissões de gases de efeito estufa (SILVA; FRANCISCO, 2010).

No entanto, Silva e colaboradores (2014) relatam a falta de conhecimento sobre o manuseio de biodigestores e os parâmetros que interferem no processo de biodigestão anaeróbia como as principais barreiras para o não aproveitamento da utilização dessa fonte energética. Deste modo, Pereira (2009) e Walker (2009) sugerem estudos de modelos matemáticos de biogás em propriedades rurais para a agregação dessa fonte de energia renovável.

Os modelos matemáticos na produção de biogás podem ser usados para expandir o conhecimento do processo anaeróbico e descrever as variáveis que influenciam no modelo de predição da geração do biogás. Atualmente, alguns autores (DACH *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2016, MATUSZEWSKA *et al.*, 2016) utilizaram em suas pesquisas modelos matemáticos com a finalidade de obter o melhor rendimento no sistema de produção do biogás.

Neste contexto, a pesquisa consiste no estudo dos fatores que influenciam na produção de biogás das propriedades rurais com biodigestores já implantados. As propriedades rurais escolhidas estão localizadas no Condomínio de Agroenergia Ajuricaba, na cidade de Marechal Candido Rondon na região Oeste do Paraná. Estas propriedades têm como principal atividade familiar nas criações de bovinos e suínos.

Portanto, a pesquisa tem como objetivo obter modelos matemáticos através do tratamento estatístico realizado na análise dos dados referentes ao sistema de geração de biogás das propriedades do Condomínio Ajuricaba para auxiliar no aumento da produção de biogás através da biomassa residual animal de bovinos e suínos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Obter modelos matemáticos a partir da análise dos dados do processo de geração de biogás das propriedades rurais do Condomínio de Agroenergia Ajuricaba para determinar os fatores que influenciam no processo e auxiliam no aumento da produção de biogás.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Coletar dados da produção de biogás a partir da biomassa animal.

Analisar os principais resultados obtidos na coleta de dados do Condomínio Ajuricaba.

Comparar os principais parâmetros da biodigestão anaeróbia com o que é dito na literatura.

Estimar a produção de biogás a partir dos modelos matemáticos obtidos por meio das variáveis analisadas.

Determinar as variáveis que influenciaram no maior rendimento na produção de biogás.

3 REVISÃO TEÓRICA

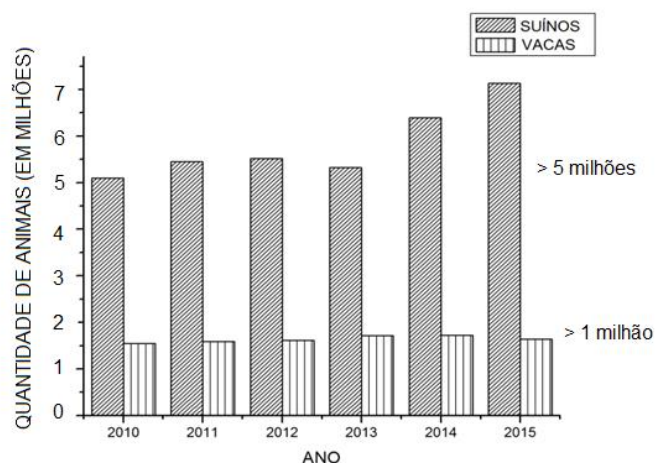
3.1 BIOMASSA RESIDUAL ANIMAL DO ESTADO DO PARANÁ

A biomassa residual é definida como efluente sólido e líquido da atividade pecuária que possam ser biodegradados (BLEY JR *et al.*, 2009), sendo constituída de dejetos, urina e água residuária do processo de criação de animais (KONZEN, 1980).

A agropecuária brasileira é um dos setores responsáveis pela geração dessa biomassa residual, pois a criação de animais vem crescendo muito nos últimos anos (SILVA *et al.*, 2011), principalmente no estado do Paraná com alta quantidade de animais na bovinocultura e suinocultura (FRIGO *et al.*, 2015). Isso se deve a sua importância socioeconômica com unidades destinadas a produção de carne e leite (BLEY JR *et al.*, 2009). Além disso, é uma atividade que apresenta muitos desafios em razão da grande concentração de animais estabelecidos no estado (MATHIAS, 2014).

Na Figura 1 pode ser visto a quantidade de rebanho de bovinos (vacas) e suínos e na atividade pecuária do Estado do Paraná entre 2010 a 2015.

Figura 1 – Quantidade de animais de bovinos e suínos no Estado do Paraná entre 2010 a 2015



Fonte: IBGE, 2016

Com o crescimento do número de animais em unidades de criações da atividade pecuarista, conseqüentemente, grande volume de dejetos são gerados nesses estabelecimentos (SILVA *et al.*, 2011; SHUCH, 2012; TOLMASQUIM, 2016).

As criações de suicultura e bovinocultura apresentam grande capacidade de produção de biomassa por dia (KUNZ; OLIVEIRA, 2006), pois recebem suplementação alimentar. Os bovinos ficam concentrados no campo de pastagem e os suínos produzem seus dejetos em galpões (SHUCH, 2012). Na Tabela 1, pode ser visto a capacidade diária de dejetos por tipo de animal.

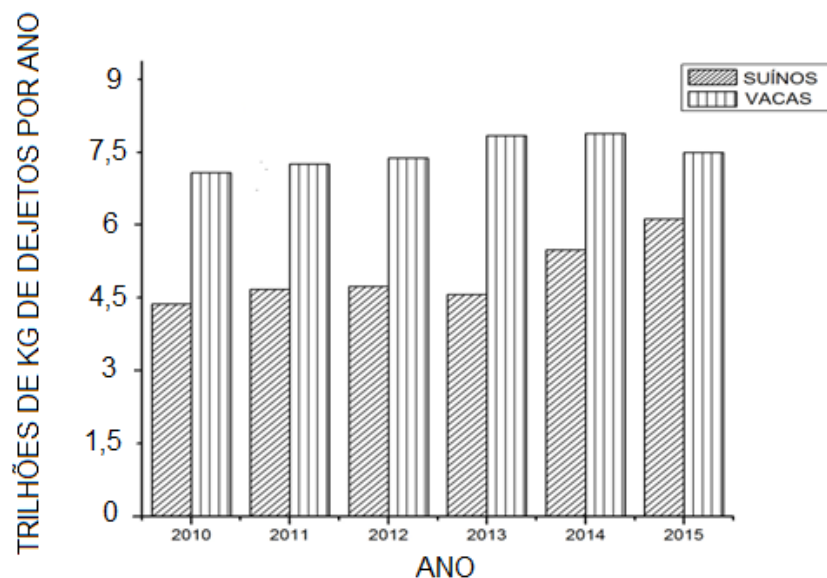
Tabela 1 – Produção diária de dejetos suínos e bovinos

Tipo de animal	Produção de dejetos (kg cabeça dia ⁻¹)
Suínos	2,35
Bovinos	12,5

Fonte: OLIVEIRA, 1993

De acordo com as informações da quantidade de animais no Paraná (IBGE, 2016) e da capacidade de produção de dejetos (Tabela 1), pode-se estimar a quantidade de dejetos produzidos no Estado do Paraná através da suinocultura e bovinocultura entre 2010 a 2015, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Quantidade de dejetos de bovinos e suínos no Paraná entre 2010 a 2015



Fonte: IBGE, 2016

Apesar da grande quantidade de dejetos, seu tratamento inadequado em propriedades rurais vem se tornando um problema ambiental, pois os resíduos ficam expostos a céu aberto (BARBOSA; LANGER, 2011).

A principal fonte de poluição da biomassa residual animal é o nitrogênio (N), liberado na forma de amônia pelo ar e solos, e na água como nitrato (QUADROS, 2009). Essa ação faz com que gere alterações nas características físicas, químicas e biológicas do corpo de água, prejudicando não somente a água e a terra, mas também o organismo dos seres vivos que ficam expostos a estes (BARBOSA; LANGER, 2011).

Os dejetos produzidos pelos animais nas propriedades podem contribuir para a emissão gases de efeito estufa por meio de suas fezes e respiração (QUADROS, 2009). Outro problema é a proliferação de insetos e outras doenças relacionadas com a falta de saneamento básico, podendo afetar a saúde dos moradores (BARBOSA; LANGER, 2011). Dessa forma, os produtores devem ter a noção dos impactos que podem acarretar com a disposição incorreta desses resíduos de origem animal, pois, trata-se de um problema que vem ocorrendo com muita frequência nas propriedades rurais (BRUNES, 2014).

Uma das alternativas que vem sendo muito estudada para o tratamento da biomassa dos resíduos orgânicos advindos do setor agropecuário é o processo da biodigestão anaeróbia de dejetos animais, por meio da implantação de biodigestores para produção de biogás (KUNZ; HIGARASHI; OLIVEIRA, 2005; FERNANDES *et al.*, 2014; SCHUCH, 2012).

Segundo Amaral e colaboradores (2004) os dejetos de animais são compostos orgânicos de alto teor energético que após serem fermentados gera-se uma grande concentração de metano para produção de biogás ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) e posteriormente em energia (kWh/m^3), visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Concentração de metano após a fermentação dos dejetos suínos e bovinos

Tipo de animal	Concentração de metano (%)	Conversão de dejetos ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	Conversão de biogás em energia (kWh/m^3)
Suínos	66	0,079	1,43
Bovinos	60	0,038	1,43

Fonte: COLLATO; LANGER, 2011; KUNZ; OLIVEIRA, 2006; SGANZERLA, 1983

Para a caracterização dos dejetos de animais é necessário avaliar alguns parâmetros como físicos (Tabela 3) e químicos (Tabela 4) a fim de descrever a matéria prima para determinar o potencial de produção de biogás.

Tabelas 3 – Parâmetros físicos da biomassa de bovinos e suínos

Variável	Definição / Importância	Método de determinação
Temperatura	O aumento da temperatura provoca também o aumento das velocidades de reações	Termômetro
Sólidos Suspensos	Determinar o acúmulo de sólidos suspensos e sedimentáveis no sistema de tratamento	Método Gravimétrico (Método 2540B APHA, 2006)
Sólidos Totais	Determinar a quantidade total de sólidos no sistema	Método Gravimétrico (Método 2540B APHA, 2006)
Sólidos Voláteis	Determinar a quantidade total de sólidos compostos com material carbonáceo no sistema passíveis de transformação biológica	Método Gravimétrico (Método 2540B APHA, 2006)
Sólidos Fixos	Determinar a quantidade total de sólidos que podem acumular no sistema de tratamento	Método Gravimétrico (Método 2540B APHA, 2006)

Fonte: FERNANDES, 2012

Tabelas 4 – Parâmetros químicos da biomassa de bovinos e suínos

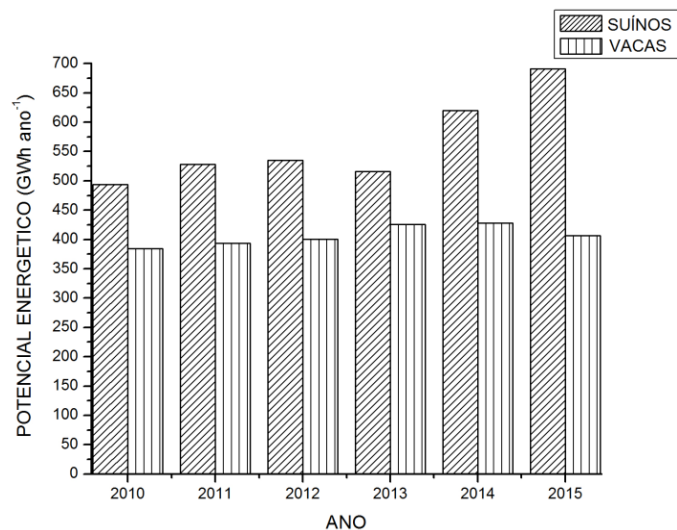
Variável	Definição / Importância	Método de Determinação
Demanda Química de Oxigênio	Quantidade de oxigênio requerida por oxidação química para estabilizar compostos orgânicos	Método do Refluxo Aberto ou Fechado (Método 5220 APHA, 2006)
Sulfeto	Pode causar corrosão em equipamentos e unidades na formação de gás sulfídrico (H ₂ S), bem como precipitação e inibição biológica em determinadas concentrações e condições ambientais	Método 45500-SO ₄ (APHA, 2006)

Fonte: FERNANDES, 2012

Os dejetos de animais usados para a produção de biogás são compostos por misturas de urina e fezes. A coleta dos dejetos deve ser realizado de modo adequado para que não influencie na quantidade gerada de biomassa. Sua caracterização pode influenciar na quantidade de biomassa que será introduzida no sistema de produção de biogás, tais como a espécie (do animal, do sexo, do tamanho, da raça e atividade), o ambiente (de temperatura e umidade) e a alimentação (digestibilidade, conteúdo e fibras) (CORTEZ; LORA e GÓMEZ, 2008).

Na Figura 3 é mostrada a quantidade de biogás que poderia ser produzido com a utilização da biomassa residual animal de suínos e bovinos (vaca leiteira) do Estado do Paraná nos últimos anos (2010 a 2015).

Figura 3 – Potencial energético proveniente da biomassa residual no Paraná entre 2010 a 2015.



Fonte: Novak *et. al.*, 2016

Segundo Novak e colaboradores (2016) o Estado do Paraná apresenta elevado potencial energético por meio da biomassa residual animal, sendo esta uma forma útil e ambientalmente correta de utilização dessa matéria prima através de biodigestores. Contudo, ainda pouco aproveitado devido a falta de regulamentação sobre o uso do biogás para a geração de energia.

3.2 BIODIGESTORES

O biodigestor é um bioreator biológico com finalidade de propiciar ambiente adequado para o desenvolvimento dos microrganismos (principalmente as bactérias metanogênicas), utilizados para o processamento da matéria orgânica

diluída em água para a produção de biogás e biofertilizante, produtos da biodigestão anaeróbia (DEUBLEN; STEINHAUSER, 2008).

Esse bioreator biológico é constituído basicamente por um tanque de carga, para introdução da matéria orgânica e água; um misturador, para melhorar a homogeneização do sólido e o líquido; uma câmara de fermentação, para ocorrer à fermentação anaeróbica; um gasômetro e válvula, para armazenamento e retirada do biogás e um tanque de saída, para retirada do biofertilizante (CASTANHO; ARRUDA, 2008).

Sua utilização é uma alternativa na destinação de vários resíduos orgânicos gerados, sendo eles advindos da pecuária, urbanos e industriais para que possam ser aproveitados como fonte de energia (elétrica, térmica e veicular) e adubo orgânico (NOVAK *et al.*, 2016).

Dessa forma, o biodigestor representa uma alternativa em busca da sustentabilidade, a fim de solucionar problemas ambientais devido a destinação incorreta dos resíduos orgânicos e gerar benefícios sociais e econômicos com sua aplicação a partir dos recursos renováveis (BARBOSA; LANGER, 2011).

No mundo existem implantados vários modelos de biodigestores, sendo que cada um deles são projetados com o objetivo de produzir um ou mais produtos para obter melhores rendimentos de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa residual disponível (ANDRADE *et al.*, 2002). Os modelos mais conhecidos e utilizados para geração de biogás são os biodigestores do tipo indiano, chinês e canadense (GASPAR, 2003).

3.2.1 Implantação, Dimensionamento e Alimentação

O biodigestor deve ser implantado em lugar estratégico para que facilite o transporte da matéria prima e dos produtos da biodigestão anaeróbia. Além disso, o local deve ser bastante arejado por motivo de segurança, maus odores e distante de árvores, pois as raízes podem perfurar a manta do reator e causar danos ao equipamento, ao processo anaeróbio e aos próprios operadores (QUADROS, 2009).

Segundo Diesel e colaboradores (2002), o dimensionamento do biodigestor deve estar de acordo com as necessidades energéticas da propriedade

rural, o volume de biogás produzido, a quantidade de animais confinados para esta finalidade e a área disponível para sua implantação.

O tamanho do biodigestor pode ser determinado através da Equação 1 (DIESEL; MIRANDA e PERDOMO, 2002).

$$TB = V \times TRH \quad \text{Eq (1)}$$

Onde TB é o tamanho do biodigestor (m^3); V é a vazão diária de dejetos diluídos em água ($m^3 \text{ dia}^{-1}$) e TRH é o tempo de retenção hidráulica necessária para a degradação da matéria orgânica (variando entre 20 a 50 dias).

O volume do biodigestor para a determinação de sua altura e diâmetro é calculado por meio da Equação 2 (BARREIRA, 2011).

$$Vd = \frac{\pi \times (Di)^2 \times h}{4} \quad \text{Eq (2)}$$

Onde Vd é o volume do biodigestor; π (Pi) é o valor aproximado de 3,14; Di é o diâmetro e h é a altura.

A introdução da matéria prima em biodigestores, pode ser realizada por três formas diferentes, abastecimento descontínua (batelada), contínua e semi-contínua (KUNZ; PALHARES, 2004). A alimentação descontínua, também conhecida como batelada, é realizada apenas uma única vez no biodigestor e no final do ciclo de fermentação anaeróbio, ocorre à retirada do efluente e biogás. Desse modo, o biodigestor pode ser aberto e receber uma nova carga orgânica (FERNANDES, 2012).

O biodigestor de alimentação contínua é um sistema adequado para as agroindústrias e propriedades rurais com confinamentos de animais, onde a geração de resíduos é constante em curtos períodos de tempo (FERNANDES, 2012). A biomassa utilizada deve ser de rápida degradação para não ocasionar lentidão no processo de biodigestão (SALOMOM; TIAGO FILHO, 2007). O sistema

contínuo tem sido o mais utilizado no país (FERNANDES, 2012), sendo aplicado principalmente em tecnologias avançadas no processo de produção de biogás (CCE, 2000).

Na alimentação semi-contínua ocorre o abastecimento do aflente diariamente, ou seja, em uma única vez a cada dia de coleta na propriedade rural (KUNZ; PALHARES, 2004; FNR, 2010).

3.2.2 Tipos e Modelos de Biodigestores

Os tipos de biodigestores são classificados de acordo com o seu posicionamento sobre o solo, podendo ser verticais e horizontais (COMASTRI FILHO, 1981). Os reatores verticais apresentam a maior parte de sua estrutura submersa ao solo (Figura 4). A matéria orgânica é introduzida na parte inferior e o biogás produzido é retirado na parte superior do reator (COMASTRI FILHO, 1981).

Figura 4 – Biodigestor do tipo vertical



*Instalado no Condomínio de Agroenergia Ajuricaba, Marechal Candido Rondon, PR.

Fonte: BLEY JR, 2015

Nos biodigestores horizontais, os modelos são mais simples, visto que possuem uma câmara de fermentação que podem ser enterrada ou não no solo. A altura ou profundidade não podem ser menores que a largura e comprimento. Em seu processo a matéria orgânica é introduzida em um dos lados do reator de acordo com sua forma de abastecimento. Por ser um biodigestor construído do tipo

horizontal (Figura 5) e não muito profundo no solo, pode ser implantado em regiões de incidência de lençóis freáticos (COMASTRI FILHO, 1981).

Figura 5 – Biodigestor do Tipo Horizontal



*Instalado na Granja São Pedro Colombari, São Miguel do Iguazu, PR.

Fonte: CIBIOGÁS, 2016

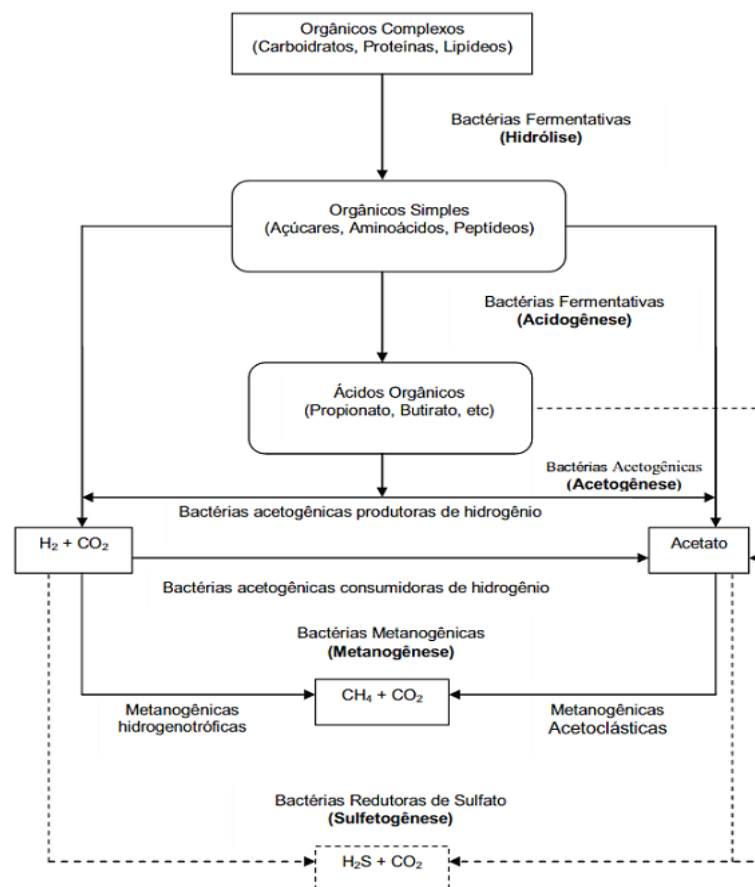
Segundo Prakasan e colaboradores (1980), o biodigestor vertical é mais eficiente do que o reator do tipo horizontal, quando comparados operando juntos sobre as mesmas condições na geração de biogás. Os próprios autores relataram que no biodigestor vertical, a matéria orgânica tem maior chance de se misturar com o inoculo (conjunto de bactérias responsável pela produção de biogás) em fermentação contida no biodigestor.

3.3 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A biodigestão anaeróbia é um processo biológico em que microrganismos se desenvolvem degradando e estabilizando a matéria orgânica para a geração do biogás e biofertilizante na ausência de oxigênio (CHERNICHARO, 1997; MATA-ALVAREZ *et al.*, 2000). Esse processo ocorre por meio de uma sequência de estágios bioquímicos e microbiológicos consecutivos (reações em cadeia), sendo realizada por diferentes grupos bacterianos específicos em cada etapa (RAJESHWARI *et al.*, 2000).

As principais reações e interações químicas que ocorrem no processo de degradação anaeróbia dentro do biodigestor (Figura 6) podem ser distinguidas em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, podendo ainda ocorrer à quinta fase, sulfetogênese (COSTA, 2009).

Figura 6 – Esquema representativo do processo de degradação anaeróbia dentro do biodigestor



Fonte: CHERNICHARO, 1997

3.3.1 Hidrólise

A hidrólise é a primeira fase do processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica. Nesta etapa ocorre a conversão das proteínas, carboidratos e lipídeos em substâncias orgânicas solúveis mais simples, tais como peptídeos, açúcares solúveis e ácidos graxos de cadeia longa, respectivamente (GONÇALVES, 2012).

A redução da biomassa ocorre pelo fato das bactérias não serem capazes de assimilarem a matéria orgânica na forma particulada (CARREIRA, 2014) sendo necessária a solubilização por meio das exoenzimas (celulase, amilase, protease e lipase) que são excretadas por bactérias hidrolíticas ou anaeróbias facultativas (TEIXEIRA, 2007).

Esses grupos de bactérias atravessam as paredes celulares das bactérias fermentativas (TEIXEIRA, 2007), aumentando o contato do substrato com as células microbianas (AQUINO; CHERNICHARO, 2005), porém, a alta complexidade do composto orgânico, resultará em baixa velocidade do processo (CARREIRA, 2014).

De modo geral, o bom funcionamento da hidrólise dependerá do contato eficiente entre a matéria orgânica e as bactérias (ROCHA, 2013), sendo esta uma etapa importante para a conversão da biomassa em biogás (AZEITONA, 2012).

3.3.2 Acidogênese

Na acidogênese, também conhecida como fermentação ácida, às substâncias orgânicas solúveis simples oriundas da fase de hidrólise pela ação de bactérias fermentativas hidrolíticas, são absorvidas e metabolizadas no interior das células das bactérias fermentativas acidogênicas (ABREU, 2007), que excretam compostos orgânicos simples como ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), alcoóis, cetonas, dióxido de carbono, hidrogênio e novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2007).

Os compostos orgânicos com alta solubilidade são produzidos em quantidades suficientes durante essa etapa, tendo os ácidos orgânicos como principais fontes de alimentos para as bactérias acetogênicas e arqueas

metanogênicas, oriundas das próximas fases da biodigestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007).

3.3.3 Acetogênese

A acetogênese é uma fase muito importante entre a acidogênese e a metanogênese, onde as bactérias sintróficas acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos compostos obtidos na fase anterior em substratos de menor peso molecular como o acetato, o dióxido de carbono e o hidrogênio, apropriados para as bactérias metanogênicas (ABREU, 2007).

Segundo Abreu (2007), a acetogênese pode ser distinguida em dois grupos de bactérias, conforme o seu metabolismo. O primeiro grupo são as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio obrigatórias, que produzem o ácido acético, o dióxido de carbono e o hidrogênio a partir das grandes variedades de substratos, incluindo os ácidos graxos intermediários (propiónico e butírico), alcoóis e ácidos orgânicos maiores (palmitato e isovalerato).

É previsto que as bactérias acetogênicas crescem somente em ambientes com baixas concentrações de hidrogênio, onde atuam microrganismos consumidores de H_2 como as arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que estimulam o seu crescimento e evitam o acúmulo de ácidos (AQUINO; CHERNICHARO, 2005) ou as bactérias redutoras de sulfato (ABREU, 2007).

O segundo grupo de bactérias presentes na acetogênese são as estritamente anaeróbias, denominadas de homoacetogênicas. Estas bactérias catalisam a formação de acetato a partir de dióxido de carbono e hidrogênio para poder contribuir com a manutenção do ambiente com baixa concentração de hidrogênio (ABREU, 2007).

3.3.4 Metanogênese

A última etapa da biodigestão anaeróbia é a metanogênese, tendo como atuadores desse processo as bactérias metanogênicas dentro do domínio *Archaea* (CHERNICHARO, 2007), como principais responsáveis pela degradação dos compostos orgânicos simples (hidrogênio, dióxido de carbono e acetato)

oriundos da acetogênese, em metano e dióxido de carbono por meio de dois grupos principais: hidrogenotróficas e acetoclásticas (ABREU, 2007).

As bactérias do grupo hidrogenotróficas são aquelas que produzem o seu próprio alimento (autotrófica) e reduzem o dióxido de carbono para formarem o metano, assim como, utilizam o hidrogênio para liberação de água (CHERNICHARO, 2007).

As bactérias do grupo acetoclásticas se alimentam de moléculas orgânicas, pois não produzem o seu próprio alimento (heterotróficas) e acabam reduzindo o acetato durante a fermentação para produzir o metano e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007; VICH, 2010).

Segundo FEY e CONRAD, (2000) e YU, LEE e HWANG, (2005) dos 60-90% do metano produzido em reatores anaeróbios são resultantes da degradação do acetato. Portanto, os microrganismos metanogênicos apresentam um papel importante na final da digestão anaeróbia, sendo a fase mais sensível do sistema de produção de biogás (OLIVEIRA, 2009).

Deste modo, Chernicharo (2007) relata que é necessária uma avaliação dos microrganismos presentes nos reatores anaeróbios a partir da caracterização da Atividade Metanogênica Específica (AME) para a classificação do potencial da biomassa na conversão de substratos solúveis em metano e dióxido de carbono em sistemas de produção de biogás.

3.3.5 Sulfetogênese

Além das fases descritas anteriormente, pode-se desenvolver ainda uma nova fase no processo anaeróbio caso a composição química da matéria orgânica a ser tratada apresente composto de enxofre (SANTOS, 2010), a chamada sulfetogênese.

A sulfetogênese tem como finalidade reduzir sulfatos a sulfetos, através das bactérias redutoras de sulfato ou sulforredutoras (CHERNICHARO, 2007) consideradas muito versáteis e podem ser divididas em dois grupos no sistema anaeróbico: um tem como característica oxidar seus substratos de forma incompleta até o acetato e o outro por oxidar seus substratos até o gás carbônico (SANTOS, 2010).

De modo geral, as bactérias sulfetogêneses têm a capacidade de utilizar uma ampla gama de substratos (ácidos graxos voláteis, açúcares, aminoácidos), onde acabam competindo com as outras bactérias (fermentativas, acetogênicas e metanogênicas) pelos substratos disponíveis no processo anaeróbico (ABREU, 2007), fazendo com que ocorra a redução da produção de metano e provoque a emissão de gás sulfídrico (H_2S), que apresenta como característica um gás corrosivo e de odor desagradável tanto na fase líquida como gasosa (BOHRZ, 2010) considerada um composto inibidor para as bactérias metanogênicas (SANTOS, 2010).

No entanto, essa fase apresenta algumas vantagens na biodigestão anaeróbia, pois remove o sulfato e sulfito do efluente e os metais pesados por precipitação com os sulfuretos para redução do seu potencial tóxico (ROCHA, 2013).

3.3.2 Fatores que Influenciam na Biodigestão Anaeróbia

O processo de biodigestão anaeróbia é influenciado por uma série de fatores, os quais podem estar relacionados com a matéria orgânica, as características do biodigestor, as bactérias presentes no processo e as condições de operação na produção de biogás (ANGELIDAKI; SANDERS, 2004; OLIVEIRA, 2009).

Dessa forma, para que se obtenha máxima eficiência no processo fermentativo e qualidade no biogás, o operador deve ter o conhecimento sobre os parâmetros que influenciam diretamente o controle e operação no processo de biodigestão anaeróbia (OLIVEIRA, 2009).

3.3.2.1 Impermeabilidade ao ar

Durante a decomposição da matéria orgânica, o biodigestor deve estar bem vedado (sem vazamento) para que o processo não seja cessado, caso ocorra presença de oxigênio, apenas produzirá o dióxido de carbono (ARRUDA. *et al.*, 2002).

3.3.2.2 PH

O pH afeta o equilíbrio ácido-base dos compostos no biodigestor. Cada grupo de microrganismo apresenta uma gama de pH ótimo durante a biodigestão. Os diferentes grupos de bactérias presentes neste processo apresentam níveis de atividades ideais em valores próximos da neutralidade (BAZARA; GALIMANY e TORRES, 2003; PECORA, 2006), dentro dos seguintes faixas:

- Bactérias fermentativas: entre 7,2 e 7,4
- Bactérias acetogênicas: entre 6,0 e 6,2
- Bactérias metanogênicas: entre 6,5 e 7,5

Para o desenvolvimento em condições de normalidade, os valores de pH não devem ser menores que 6,0 e nem maiores que 8,0. Se os valores de pH do meio não estiverem entre esses valores, o processo de biodigestão acaba reduzindo as atividades das bactérias produtoras de metano, e conseqüentemente, inibindo a produção de biogás (LEMA; MÉNDEZ, 1997; BAZARA; GALIMANY e TORRES, 2003; FARIA, 2012).

Segundo Rittmann e McCarty, (2001), essa parada de produção de gás no biodigestor é devido ao acúmulo de concentração de ácidos orgânicos, fazendo com que ocorra a redução do pH no meio. O valor de pH não só determina a produção de biogás, mas também a sua composição (RITTMANN e MCCARTY, 2001).

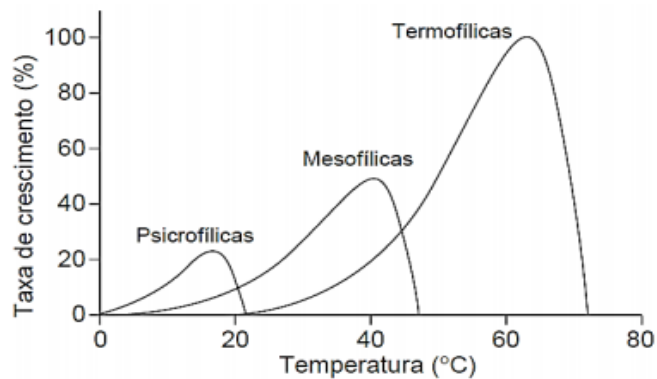
O pH também está totalmente ligado a alcalinidade total do sistema, que é a capacidade do meio para neutralizar o ácido (RITTMANN e MCCARTY, 2001). Conforme as bactérias produzem ácidos e dióxidos de carbono, o pH tende a diminuir. Assim, é necessário manter um valor de alcalinidade no biodigestor para impedir grandes flutuações de pH (ROWSE, 2011).

A alcalinidade na biodigestão anaeróbia ocorre devido à presença de sais de bicarbonato (bicarbonado de amônio) e sais de ácidos voláteis. Alguns estudos (GRADY; LIM, 1980; RAPOSO *et al.*, 2011) demonstraram que valores da alcalinidade total entre 2.500 a 5.000 mg_{CaCO₃} L⁻¹ podem garantir um bom controle do pH e uma adequada estabilidade do sistema.

3.3.2.3 Temperatura

As bactérias que atuam na biodigestão são muito sensíveis à variação de temperatura e seu controle no sistema de produção é um fator determinante para um bom funcionamento da biodigestão anaeróbia (RITTMANN e MCCARTY, 2001). Na Figura 7 pode se observar as faixas de temperaturas ideais para cada grupo de microrganismo (RITTMANN e MCCARTY, 2001; PECORA, 2006).

Figura 7 – Efeito da temperatura na biodigestão anaeróbia



Fonte: LETTINGA, REBAC E ZEEMAN, 2001

De acordo com Lettinga, Rebac e Zeeman (2011), as faixas de temperaturas ideais para a taxa crescimento dos microrganismos psicrófilas, mesófilas e termófilas são de 5-10 °C, 25-45 °C e 45-65 °C, respectivamente para cada uma delas.

Rittmann e McCarty (2001) relatam que as psicrófilas são pouco estudadas, pois apresentam baixa taxa de crescimento de microrganismos em temperaturas ideais. Ao contrario das psicrófilas, as mesófilas são as que mais atuam nos processos anaeróbios na produção de biogás em consequência de apresentar bom crescimento de microrganismos em condições de temperatura ambiente ótima de 35 °C (SALOMON, 2007). Porém, são as termófilas que apresentam maior produção de metano e costumam ser mais estáveis a qualquer mudança de condições de operação (RITTMANN; MCCARTY, 2001).

Segundo Speece (1996), a cada 5 °C de queda de temperatura há uma baixa de 34 % da atividade dos microrganismos. Dessa forma, é necessário ter

o controle da temperatura para não alterar as concentrações dos substratos e ocasionar a paralisação da produção de gás, que pode levar até três ou mais semanas para que os microrganismos se adaptem as novas condições do ambiente e iniciar sem qualquer intervenção do meio exterior (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

3.3.2.4 Tempo de retenção hidráulica (TRH)

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é um parâmetro que determina a quantidade de dias em que o afluente permanece retido dentro do biodigestor, submetido à ação dos microrganismos em contato com a biomassa, para sua degradação (KHANAL, 2009) e também para que toda a carga do biodigestor seja substituída para um novo processo de produção de biogás (LIMA, 2011).

Através dos dados do volume do biodigestor (V) e a vazão do afluente (Q), podem ser obtidos o tempo de retenção hidráulica (TRH) de um sistema de tratamento anaeróbio (METCALF; EDDY, 1991), como pode ser visto na equação [3].

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad [3]$$

Onde: TRH é o tempo de retenção hidráulica (dias), V é o volume do biodigestor (m^3) e Q é a vazão do afluente (m^3/dia).

A quantidade de matéria orgânica degradada no biodigestor aumenta conforme o TRH. Porém, a produção de biogás diminui após atingir o TRH ideal, assim, esse parâmetro nos permite controlar a vazão do efluente tratado (DE LA TORRE, 2008).

Para cada tipo de biomassa residual animal e biodigestor deve se determinar o tempo de retenção hidráulica, para que seja fermentada totalmente dentro da câmara de fermentação no biodigestor (DE LA TORRE, 2008; DONGALA, 2010).

Existem diferentes etapas do processo microbiológico influenciadas diretamente pela temperatura e inversamente pelo TRH. A Tabela 5 mostra que o TRH (dias) varia com a gama de temperatura dos grupos de bactérias fermentativas no processo de biodigestão anaeróbia (DE LA TORRE, 2008).

Tabela 5 – Temperatura ideal e o tempo de retenção na fermentação anaeróbia

Bactérias	Temperatura (°C)			TRH (dias)
	Mínimo	Ideal	Máximo	
Psicrofílica	4-10	15-18	25-30	>100
Mesofílica	20-25	28-33	35-45	30-60
Termofílica	25-45	50-60	75-80	10-16

Fonte: DE LA TORRE, 2008

3.3.2.6 Teor de água

O teor de água na biodigestão anaeróbia pode ser definido como a quantidade de água necessária para diluição da matéria orgânica dentro do biodigestor. Essa quantidade deve estar numa faixa entre 60 % a 90 % do peso do conteúdo total de biomassa (PECORA, 2006). Porém, deve-se levar em consideração o tipo de dejetos animal que será utilizado no biodigestor (OLIVER *et al.*, 2008; DONGALA, 2010), visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Proporção sólido:água da biomassa residual animal

Tipo de dejetos animal	Teor de água (%)
Bovino	1:1 – 1:2
Suíno	1:3

Fonte: OLIVER *et al.*, 2008

O excesso e a falta de água podem afetar o processo de hidrólise, onde é exigida uma elevada carga de biomassa para que a mesma possa ser processada normalmente. Além disso, a falta de água pode causar entupimentos nos canos (NEVES, 2010).

A qualidade da água pode influenciar no processo devido à presença de cloro que é prejudicial, podendo ocasionar a morte dos microrganismos responsáveis pela biodigestão anaeróbia na etapa de fermentação. Dessa forma, a água introduzida no biodigestor deve ser de fonte natural, para que não influencie diretamente no processo de fermentação dos microrganismos na matéria orgânica (DONGALA, 2010).

Portanto, o excesso, a falta de água e sua qualidade podem ser prejudiciais para o processo de biodigestão anaeróbia (ARRUDA *et al.*, 2002; PECORA, 2006).

3.3.2.7 Concentração de sólidos

A concentração de sólidos em um sistema de biogás através da biomassa residual animal é um parâmetro físico que tem como finalidade caracterizar o dejetos obtido em propriedades rurais, para determinar se a necessidade ou não de diluí-lo e analisar a presença de composto de origem orgânica (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008).

A biomassa residual animal total a ser tratada no processo de biodigestão anaeróbia é designada como (ST) sólidos totais (LEITE; POVINELLI, 1999). Os ST estão diretamente relacionados com o tempo de retenção hidráulica. Sua concentração deve estar numa faixa de 5 a 8 % (base úmida) para facilitar a movimentação da biomassa residual no interior do biodigestor (LI; PARK; ZHU, 2011; YANG *et al.*, 2015).

Uma concentração alta de ST (acima de 10 %) irá ocasionar uma camada de sólidos floculados (sedimentáveis), dificultando a saída do biogás produzido. Os sólidos sedimentáveis (SS) é o termo utilizado para substâncias que contém fragmentação grossa podendo acumula-se nos canos de entrada/saída e no fundo do biodigestor, afetando a capacidade volumétrica e também o tempo de retenção hidráulica. Os SS se separam na fase líquida por diferença de densidade, sob ação da gravidade (BLEY JR *et al.*, 2003).

Dessa forma, isso faz com que diminui a eficiência do biodigestor durante a conversão da matéria orgânica em biogás. Então, deve-se adicionar água no processo para controlar a concentração de sólidos no processo anaeróbio (LI; PARK; ZHU, 2011; YANG *et al.*, 2015).

Os ST são compostos divididos em dois tipos de sólidos: fixos e voláteis. Os sólidos fixos (SF) são considerados a matéria inorgânica presente no substrato que não é utilizada e pode dificultar o processo caso esteja em grandes quantidades. Os sólidos voláteis (SV) correspondem a matéria orgânica dos sólidos (PESSUTI *et al.*, 2015).

Os sólidos voláteis (SV) são caracterizados pela matéria orgânica biodegradável, tendo relação direta com a capacidade de produção de biogás, já que o conteúdo orgânico volatiliza (LABIOGÁS, 2013). Sua concentração nos resíduos é um parâmetro importante para indicar a potencialidade da produção de biogás, visto que quanto maior o SV de uma biomassa, maior será a produção de biogás (COMASTRI FILHO, 1981).

Os SV variam em um percentual de 80 % em relação aos ST para a biomassa residual animal (MATOS, 2005). As concentrações de SV no afluente e no efluente indicam a porcentagem de dejetos que foram biodegradados no processo anaeróbio (LABATUT; GOOCH, 2012).

3.4 BIOGÁS

O biogás é uma fonte de energia renovável promissora, que está contribuindo para a mudança de uma matriz energética mais sustentável (NOKATA; PEREIRA, 2016), reduzindo a procura de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa (SHEN *et al.*, 2015).

Trata-se de um gás incolor e sem cheiro obtido a partir da decomposição anaeróbia da biomassa de diferentes tipos de biomassa (LANTZ, *et al.*, 2007).

A sua composição é variável, dependendo das características da matéria orgânica e das condições do processo de biodigestão (PESSUTO *et al.*, 2016), sendo constituído essencialmente de metano (CH₄, 50-75%) e dióxido de carbono (CO₂, 24-45%) e com pequenas concentrações de vapor d'água (H₂O), monóxido de carbono (CO), nitrogênio, sulfeto de hidrogênio (H₂S), hidrogênio (H) e oxigênio (O₂), como mostra a Tabela 7 (AEBIOM, 2009).

Tabela 7 – Composição do biogás

Biogás	Percentual (%)
Metano (CH ₄)	50-75
Dióxido de carbono (CO ₂)	24-45
Vapor d'água (H ₂ O)	1-2
Monóxido de carbono (CO)	0-0,3
Nitrogênio (N ₂)	1-5
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	0,1-0,5
Hidrogênio (H ₂)	0-3
Oxigênio (O ₂)	Traços

Fonte: AEBIOM, 2009

O metano, composto principal do biogás (Tabela 6) apresenta grande potencial para geração de energia quando o seu teor é no mínimo de 50 % (YILMAZ; GUMUS, 2017). Assim, acima dessa concentração pode ser utilizado para fins de produção de eletricidade e aquecimento (BELTRANO *et al.*, 2016).

Além disso, a composição do biogás é um aspecto importante para a identificação do melhor sistema para a utilização na purificação, tendo em vista eliminar os contaminantes presentes no gás, como H_2S , umidade e a concentração de CO_2 (COELHO *et al.*, 2006).

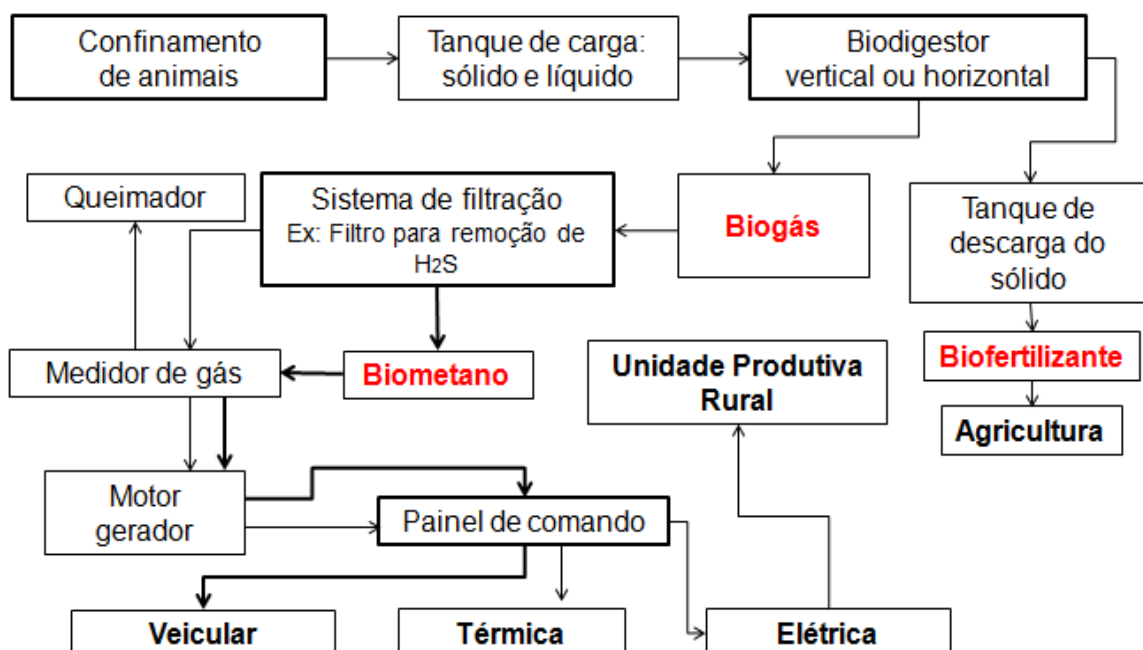
As concentrações de H_2S compostos no biogás podem prejudicar os motores e causar corrosão nos equipamentos destinados a esse sistema de produção (CHUNG; HO; TSENG, 2006), assim como, altos teores de CO_2 no biogás faz com que reduz o poder calorífico e inviabiliza o armazenamento e transporte do biogás (PORPATHAM *et al.*, 2007).

Dessa forma, o biogás deve ser purificado a fim de aumentar a sua concentração de CH_4 , removendo principalmente, o CO_2 e H_2S , e outras substâncias, para obtenção do biometano e utilizá-lo como combustível (SANTOS *et al.*, 2016).

Bley Jr (2015) relata que essa fonte de energia apresenta como desvantagem o preconceito da sociedade principalmente por sua origem ser do lixo, sendo assim, ainda visto como um subproduto sem valor econômico e apresentando uma fonte de energia de alto custo de implantação.

Na Figura 8 pode ser visto um fluxograma representativo do sistema de biogás em uma unidade produtiva rural.

Figura 8 – Fluxograma do sistema de biogás em uma unidade produtiva rural



Fonte: Próprio autor

A produção do biogás tem como vantagem aproveitar o grande volume de resíduos orgânicos produzidos para suprir as necessidades energéticas atuais, ocasionando em ganhos ambientais e econômicos ao usuário e à comunidade com o consumo de eletricidade no local (SANTOS *et al.*, 2016).

Outra vantagem, segundo Taleghani e Kia (2005) o biogás não apresenta qualquer limitações geográficas para obtenção da matéria prima e a sua tecnologia de processo é simples e de fácil operação para geração de energia. Maghanaki e colaboradores (2013) também citam que o processo de biogás além de produzir energia, tem a capacidade de produzir um resíduo líquido, o biofertilizante.

3.5 CONDOMÍNIO DE AGROENERGIA AJURICABA

As propriedades rurais escolhidas para a realização do estudo se encontram no Condomínio de Agroenergia Ajuricaba, localizada na zona rural do município de Marechal Cândido Rondon na região Oeste do Paraná. O município possui uma área de 748 km², tendo cerca de aproximadamente 50,8 mil habitantes (IBGE, 2016).

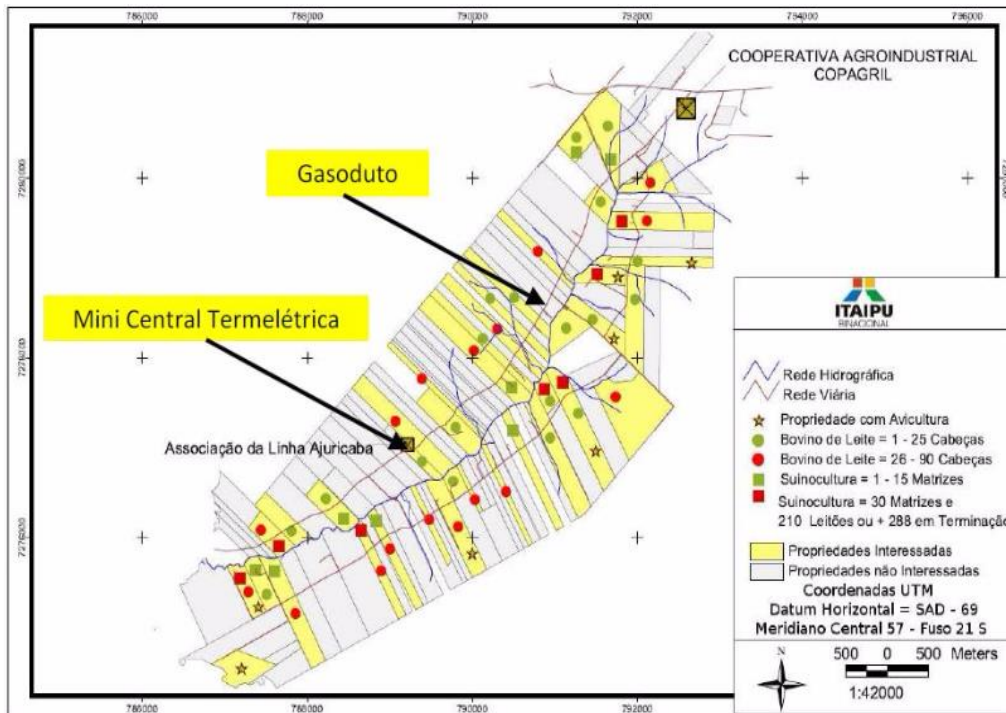
O Condomínio de Agroenergia Ajuricaba é um projeto com finalidade no aproveitamento da biomassa residual dos dejetos de animais para a produção de biogás e biofertilizante através do processamento anaeróbico (SCHUCH, 2012). Esse condomínio de agricultura familiar conta com 109 propriedades rurais, ocupando uma grande extensão com cerca de 1.681 hectares. Porém, somente 33 unidades rurais foram escolhidas para participar da implantação do projeto de biogás, pois as demais não atingiram escala para utilizar os dejetos de seus animais para produzir energia com a matéria prima do biogás (BLEY JR, 2015).

O projeto foi desenvolvido pela Itaipu Binacional por meio de uma parceria com o Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER-PR) e a Prefeitura Municipal de Marechal Cândido Rondon no Estado do Paraná em 2009, tendo um custo de implantação aproximadamente de 2,8 milhões de reais (SCHUCH, 2012).

Para a implantação do projeto houve um investimento financeiro da Itaipu Binacional, da Prefeitura de Marechal Cândido Rondon e ajuda da mão de obra dos agricultores das unidades rurais escolhidas do Condomínio Ajuricaba. Os principais itens custeados pelo investimento foram: a reforma dos estábulos, implantação de 34 biodigestores, instalação de 25 quilômetros de gasodutos, construção de uma unidade central para purificação do biogás e geração de energias, elétrica e térmica (SCHUCH, 2012).

Estas propriedades rurais têm como principais atividades na criação de bovinos e suínos, conforme pode ser visto no mapa de localização das propriedades e animais na Figura 9.

Figura 9 – Mapa de localização das propriedades rurais e dos animais



Fonte: BARICHELLO, 2015

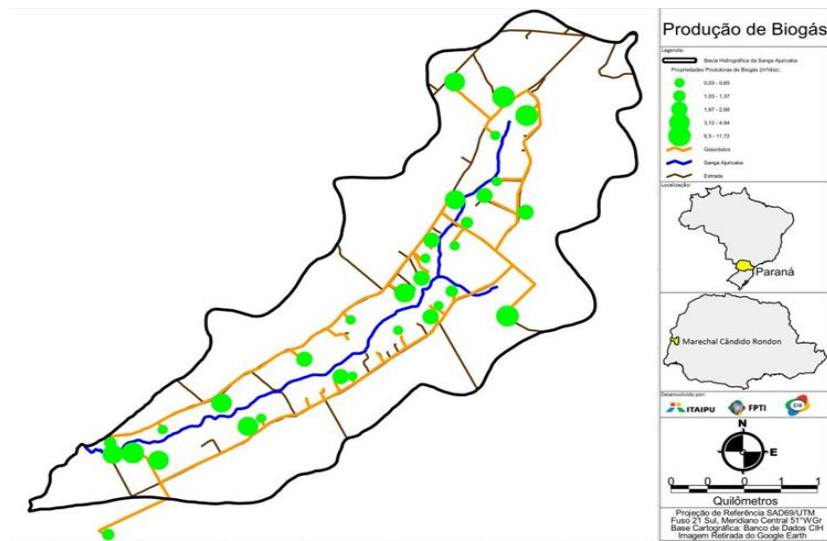
De acordo com Schuch (2012), as opções técnicas utilizadas para a implantação dos biodigestores foram na construção de dois modelos para diferentes tipos de biomassa, pois o sistema de produção do biogás depende de alguns fatores, como o tamanho do biodigestor, o tempo de retenção hidráulica, a temperatura e a carga de sólidos voláteis.

Diante disso, para a biomassa residual da bovinocultura a opção foi implantar 31 biodigestores rígidos de fluxo contínuo ascendente, construídos de fibra de vidro, de instalação vertical semi enterrada no solo, operando internamente com manta de lodo, com tempo de retenção de 30 dias e sem gasômetro para a armazenagem do gás. Para a biomassa residual da suinocultura, a opção foi implantar 3 biodigestores flexíveis de fluxo horizontal, conhecido como *plug flow* (fluxo pistão), onde foram escavados no solo e depois revestidos com manta geotêxtil de polietileno de alta densidade (PEAD), utilizando manta de lodo e com o mesmo tempo de retenção que a biomassa bovina. Porém, esses reatores foram implantados com armazenamento de biogás dentro do próprio biodigestor (SCHUCH, 2012).

O biogás produzido individualmente nas unidades rurais (Figura 10), é transportado pelo gasoduto (Figura 11) e conduzido até uma central termelétrica

de biogás na própria propriedade do condomínio (Figura 12), para a purificação do biogás e comercialização na forma de energias, térmica e elétrica. A energia elétrica produzida é aproveitada através de um grupo motogerador de 100 kVA com conexão de geração distribuída. A energia térmica gerada na central termelétrica é utilizada para a secagem de grãos comunitária (BLEY JR, 2015).

Figura 10 – Demonstração do potencial de biogás no Ajuricaba



Fonte: BARICHELLO, 2015

Figura 11 – Placa de sinalização do gasoduto no Ajuricaba



Fonte: BARICHELLO, 2015

Figura 12 – Central Termelétrica no Ajuricaba



Fonte: BARICHELLO, 2015

Os produtores rurais aproveitam também o biogás para o aquecimento na cocção de alimentos, aquecimento da água para banho e limpeza de equipamentos de ordenha. A matéria orgânica remanescente dentro do reator pode ser aproveitada como adubo orgânico (BARICHELLO, 2015). Essas aplicações do biogás podem gerar ao produtor rural um maior conforto, higiene, qualidade e produtividade em suas atividades diárias (BLEY JR, 2015).

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa foi feito em conjunto com o Centro Internacional de Energias Renováveis Biogás (CIBiogás- ER), ligado ao Parque Tecnológico de Itaipu, em Foz do Iguaçu/PR.

O CIBiogás-ER trata-se de uma sociedade sem fins lucrativos, apenas específicos no desenvolvimento da matéria-prima biogás, como fonte renovável de energia. Além disso, é responsável por projetos de implantação, monitoramento e melhorias em sistema de produção de biogás a partir de dejetos de animais ou resíduos industriais (CIBIOGÁS, 2015).

4.1 COLETA DE DADOS

Foram coletadas amostras de biomassa de 13 propriedades rurais, sendo 7 de bovinocultura e 6 de suinocultura, selecionadas do Condomínio Ajuricaba no período compreendido entre maio de 2015 a agosto de 2016.

Os dejetos de animais produzidos nas propriedades rurais foram encaminhados para o Laboratório de Biogás (Labiogás/ CIBiogás-ER), que é responsável por toda a caracterização da biomassa residual animal antes de serem introduzidos nos reatores biológicos.

Os parâmetros físico-químicos da biomassa (afluente/efluente) analisados foram pH, alcalinidade, demanda química de oxigênio (DQO), sulfatos, temperatura, sólidos sedimentáveis (SS), sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV).

a) **pH**: A determinação do pH foi realizada através do método eletrométrico (APHA, 2012).

b) **Alcalinidade**: A determinação da alcalinidade foi realizada por meio de dois métodos: o potenciométrico e o titulométrico. Os resultados foram expressos em mg CaCO₃ / L (APHA, 2012).

c) **Demanda Química de Oxigênio (DQO):** A determinação da demanda química de oxigênio foi realizada através do método colorimétrico. O resultado foi expresso em $\text{mg O}_2 / \text{L}$ (APHA, 2012).

d) **Sulfatos:** Na determinação do sulfato foram utilizados os métodos, colorimétrico e turbidimétrico. O resultado foi expresso em $\text{mg de SO}_4^{-2} / \text{L}$ (APHA, 2012).

e) **Temperatura:** Os dados de temperatura foram fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná – Simepar, tendo como base na localização da região do Condomínio Ajuricaba, que está localizada no sudoeste do centro urbano de Marechal Cândido Rondon/PR, entre as coordenadas UTM SAD69, Fuso 21, 24° 3340” de latitude sul, 54° 0412 de longitude oeste e 420 m de altitude.

f) **Sólidos Sedimentáveis (SS):** Para a determinação dos sólidos sedimentáveis utilizou-se o método volumétrico. O resultado foi expresso em mL / L (APHA, 2012).

g) **Sólidos Totais (ST), Fixos (SF) e Voláteis (SV):** As determinações dos sólidos totais, fixos e voláteis foram realizadas seguindo o método gravimétrico. Os resultados foram expressos em g / kg (APHA, 2012).

4.2 MODELO MATEMÁTICO

Para obtenção da equação preditiva, foi utilizado modelo de regressão polinomial. As variáveis independentes x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 e x_6 são afluente, temperatura, $\text{pH}_{\text{afluente}}$, $\text{pH}_{\text{efluente}}$, Sólidos Totais $_{\text{afluente}}$ e Sólidos Totais $_{\text{efluente}}$ respectivamente, β os parâmetros estimados e a produção de biogás como variável dependente.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os parâmetros estatísticos do modelo, o coeficiente de determinação (R^2) e a análise de variância (ANOVA) foram obtidos por meio do software Statistica v.10.0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PROPRIEDADES RURAIS SELECIONADAS NO CONDOMÍNIO AJURICABA

5.1.1 Quantidade de Animais

As propriedades rurais selecionadas para este estudo do Condomínio de Agroenergia Ajuricaba foram com plantéis de animais de suínos (em terminação, em ciclo completo e em creche) e bovinos (vacas de leite e bezerras), conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Plantel de animais das propriedades selecionadas do Condomínio Ajuricaba

Propriedades Rurais	Bovinos			Suínos			
	Vacas Leiteiras	Bezerros	Total	Terminação	Ciclo Completo	Creche	Total
1*	15	-	15	-	-	-	-
2*	20	20	40	-	-	-	-
3*	14	5	19	-	-	-	-
4*	20	8	28	-	-	-	-
5*	27	15	42	-	-	-	-
6*	59	-	59	-	-	-	-
7*	20	8	28	-	-	-	-
8**	-	-	-	560	-	-	560
9**	-	-	-	450	-	-	450
10**	-	-	-	680	-	-	680
11**	-	-	-	280	-	2.400	2.680
12**	-	-	-	650	-	-	650
13**	-	-	-	-	40	-	40
Total	175	56	231	2.620	40	2.400	5.060

*Bovinos, **Suínos

Fonte: Próprio autor

Na bovinocultura foram selecionadas 7 propriedades rurais (1 a 7), apresentando um plantel total de 231 animais. A propriedade 6 foi a que apresentou maior quantidade de animais nessa atividade, com 59 vacas leiteiras.

Na suinocultura, as propriedades rurais selecionadas apresentaram 6 unidades (8 a 13), tendo no total 5.060 animais. A propriedade 11 foi a que

apresentou o maior plantel na suinocultura e no Condomínio Ajuricaba, tendo 2.680 suínos nesse estabelecimento (280 suínos em terminação e 2.400 em creche).

5.1.2 Quantidade de Dejetos

A Tabela 9 mostra a quantidade de dejetos que são produzidos e foram coletados em cada propriedade por dia, possibilitando a elaboração da estimativa mensal e anual.

Tabela 9 – Quantidade de dejetos produzidos em cada propriedade

Propriedades Rurais	Dejetos (m ³ dia ⁻¹)	Dejetos (m ³ mês ⁻¹)	Dejetos (m ³ ano ⁻¹)
1*	0,16	4,8	57,6
2*	0,63	18,9	226,8
3*	0,22	6,6	79,2
4*	0,51	15,3	183,6
5*	0,63	18,9	226,8
6*	1,1	33	396
7*	0,49	14,7	176,4
8**	8,4	252	3.024
9**	8,1	243	2.916
10**	9,7	291	3.492
11**	5,2	156	1.872
12**	10,1	303	3.636
13**	0,48	14,4	172,8
Total	45,72	1.371,60	16.462,20

*Bovinos, **Suínos

Fonte: Próprio autor

No Condomínio Ajuricaba são produzidos, em média, aproximadamente 45,72 m³ dia⁻¹ de dejetos de animais, equivalendo a 1.371,6 m³ mês⁻¹ e 16.462,2 m³ ano⁻¹. As propriedades que apresentaram maior capacidade de dejetos foram as que contem somente em seu sistema de produção os suínos em terminação (8, 9, 10 e 12), pois apresentam grande quantidade de animais. Variáveis como quantidade de animais, pesos, tempo de confinamento e manejo fazem com que a quantidade de biomassa se altere entre as propriedades. Os suínos mesmo apresentando maiores quantidades de animais do que os bovinos apresentam menor rendimento da produção de dejetos por animal (Tabela 10).

Tabela 10 – Capacidade da produção de dejetos bovinos e suínos

Tipo de criação	dejetos animal m ³ dia ⁻¹
Bovinos	0,015
Suínos	0,013

Fonte: Próprio autor

5.1.3 Parâmetros Físico-Químicos da Biomassa (Afluente e Efluente)

As propriedades foram monitoradas entre maio/2015 a agosto/2016. Os dados das análises dos aspectos físicos e químicos da biomassa residual podem ser observados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Parâmetros físicos dos dejetos nas propriedades rurais do Ajuricaba

Propriedades	Mês / Ano	Temp. Média Ambiente (°C)	Sólidos Sedimentáveis (mL L ⁻¹)		Sólidos Totais (g kg ⁻¹)		Sólidos Voláteis (g kg ⁻¹)		Sólidos Fixos (g kg ⁻¹)	
			AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL
1*	Mai / 2015	19,26	1.000	1.000	54,4	36,7	771,2	705,1	228,8	294,9
	Set / 2015	24,13	1.000	1.000	49,7	50,5	743,4	700,9	256,6	299,1
	Ago / 2016	17,28	1.000	1.000	51,2	42,6	665,9	635,3	334,1	364,7
2*	Mai / 2015	19,26	550	600	30,7	20,5	707,5	603,7	292,5	396,3
	Out / 2015	24,06	1.000	950	51,4	29,1	718,6	615	281,4	385
	Abr / 2016	21,06	950	900	43,4	27,4	728,6	583,8	271,4	416,2
	Ago / 2016	17,28	-	-	29,3	29,1	672,8	643,9	327,2	356,1
3*	Jun / 2015	18,47	350	800	27,3	37,5	635,8	606,3	364,2	393,7
4*	Set / 2015	24,13	1.000	900	27,6	32,6	672,2	583,7	327,8	416,3
	Abr / 2016	21,06	1.000	1.000	37,2	25,2	731,4	640,6	268,6	359,4
5*	Out / 2015	24,06	1.000	950	61,8	50,5	732,9	691,2	267,1	308,8
	Abr / 2016	21,06	1.000	1.000	50,7	49,4	746,6	742,2	253,4	257,8
6*	Dez / 2015	25,86	1.000	975	80,3	49,9	580,1	547,7	419,9	452,3
7*	Dez / 2015	25,86	350	550	18,6	21,4	724,4	660,8	275,6	339,2
8**	Mai / 2015	19,26	1.000	950	64,4	27,5	768,5	652,5	231,5	347,5
	Jun / 2016	17,41	400	500	-	32	-	675,7	-	324,3
9**	Jun / 2015	18,47	450	100	34,5	34,9	778,8	582,1	221,2	417,9
	Set / 2015	24,13	100	90	45,5	21,2	722,3	576,7	277,7	423,3
	Jun / 2016	17,41	8	4	-	3	-	414,2	-	585,8
10**	Set / 2015	24,13	150	0	11	6	516,8	402,2	483,2	597,8
	Dez / 2015	25,86	125	21	7,3	7,1	474,2	385,9	525,8	614,1
	Jun / 2016	17,41	8	1	-	6,4	-	344,5	-	655,5
11**	Out / 2015	24,06	1.000	990	31,1	27,1	679,2	586,4	320,8	413,6
	Ago / 2016	17,28	850	1.000	37,1	35	724,3	619,7	275,7	380,3

12**	Out / 2015	24,06	1.000	990	66,4	24,4	816,2	595,6	183,8	404,4
	Abr / 2016	21,06	450	1.000	26,8	19,8	663,4	545,7	336,6	454,3
	Jun / 2016	17,41	1.000	400	-	16,9	-	586,4	-	413,6
	Ago / 2016	17,28	1.000	850	70,1	20,8	743,7	576,9	256,3	423,1
13**	Dez / 2015	25,86	125	130	12,6	10	601,9	515,1	398,1	484,9

*Bovinos, **Suínos, AFL (Afluente), EFL (Efluente).

Fonte: Próprio autor

Tabela 12 – Parâmetros químicos dos dejetos nas propriedades rurais do Ajuricaba

Propriedade	Data	pH		Alcalinidade total (mg CaCO ₃ L ⁻¹)		DQO (mg O ₂ L ⁻¹)		Sulfatos (SO ₄ ⁻² L ⁻¹)	
		AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL
1*	Mai / 2015	6,5	7	4.797	5.348	-	-	-	-
	Set / 2015	6,5	7,2	-	-	-	-	-	-
	Ago / 2016	6,6	7	-	-	27.428	16.904	-	-
2*	Mai / 2015	6,9	7	2.285	3.354	-	-	-	-
	Out / 2015	6,7	7,1	-	3.290	46.957	26.193	650	285
	Abr / 2016	6,7	7,1	2.975	2.973	35.060	16.535	493	188
	Ago / 2016	6,9	7	-	-	20.134	29.259	-	-
3*	Jun / 2015	7,1	6,7	1.058	1.569	-	-	-	-
4*	Set / 2015	6,7	6,9	-	-	-	-	-	-
	Abr / 2016	6,5	7,1	2.421	3.583	29.688	20.474	327	164
5*	Out / 2015	6,7	6,9	-	-	48.320	48.220	690	365
	Abr / 2016	7	7,1	4.139	4.253	37.161	43.338	253	468
6*	Dez / 2015	8	7	5.146	4.258	55.000	35.000	-	-
7*	Dez / 2015	6,8	7	1.412	2.342	10.000	5.000	-	-
8**	Mai / 2015	7,5	7,7	14.802	12.338	-	-	-	-
	Jun / 2016	8,5	7,2	-	9.701	-	31.284	2.062	368
9**	Jun / 2015	7,3	7,6	3.803	4.460	-	-	-	-
	Set / 2015	7,1	7,2	-	-	-	-	-	-
	Jun / 2016	7,7	7,4	-	3.702	-	1.724	192	75
10**	Set / 2015	7,5	7,5	-	-	-	-	-	-
	Dez / 2015	7,5	7,6	4.970	7.211	5.000	3.721	-	-
	Jun / 2016	7,6	7,6	-	7.397	0	3.355	190	224
11**	Out / 2015	7,2	7,6	6.971	13.852	41.360	27.960	1.527	85
	Ago / 2016	7,5	7,5	-	-	-	-	-	-
12**	Out / 2015	6,8	7,7	8.339	16.107	70.150	22.473	780	190
	Abr / 2016	7,4	7,9	8.876	18.812	44.547	12.006	720	154
	Jun / 2016	7,3	7,9	-	14.663	-	9.966	1.358	96
	Ago / 2016	7,7	7,7	-	-	-	-	-	-
13**	Dez / 2015	8,2	7,4	3.565	5.576	10.000	3.326	-	-

*Bovinos, **Suínos, AFL (Afluente), EFL (Efluente).

Fonte: Próprio autor

Durante o período de monitoramento na região do Condomínio Ajuricaba, a região apresentou variações de temperatura numa faixa mínima de 17,28 °C e máxima de 25,86 °C predominando grupo de microrganismos diferentes que apresentam grande ou pequena taxa de crescimento devido a temperatura, o que influencia diretamente na produção de biogás (RITTMANN, MCCARTY, 2001; PECORA, 2016).

Dentro dos parâmetros analisados, o pH determinou a composição e a produção do biogás, pois as amostras apresentaram um valor mínimo de pH de 6,5 a 8 para bovinos e 6,8 a 8,2 para suínos, proporcionando condições de normalidade para as bactérias durante a produção de biogás. As amostras que contem traço não foram analisadas no mês, dificultando assim os parâmetros como alcalinidade, DQO e sulfato para o tratamento estatístico.

5.1.4 Produção de Biogás

Cada propriedade rural do Condomínio Ajuricaba produz o biogás de forma individual nos biodigestores. Os sistemas de biodigestão foram escolhidos e implantados de acordo com a quantidade de dejetos produzidos por mês nas propriedades. As propriedades com menores quantidades de matéria orgânica utilizaram os biodigestores verticais B-05, B-10 e B-20 e as com maiores quantidades de matéria orgânica utilizaram os biodigestores horizontais em lona.

Na Tabela 13, são mostradas as informações sobre cada tipo de sistema de biodigestão e os dados coletados da produção de biogás por dia nas propriedades rurais monitoradas, apresentando também os dados mensais e anuais.

Tabela 13 – Produção de biogás nas propriedades rurais do Ajuricaba

Propriedades	Sistema de biodigestão	Produção de biogás (m ³ dia ⁻¹)	Produção de biogás (m ³ mês ⁻¹)	Produção de biogás (m ³ ano ⁻¹)
1*	B-05	9,6	288	3.456
2*	B-20	9,6	288	3.456
3*	B-10	2,8	84	1.008
4*	B-20	5,7	171	2.052
5*	B-10	6,8	204	2.448
6*	B-05	10	300	3.600
7*	B-20	6	180	2.160
8**	Lona 360 m ³	75	2.250	27.000
9**	Lona 269 m ³	63	1.890	22.680
10**	Lona 360 m ³	49	1.470	17.640
11**	Lona 178,32 m ³	65	1.950	23.400
12**	Lona 360 m ³	75	2.250	27.000
13**	B-20	5,7	171	2.052
Total	-	383,20	11.496,00	137.952,00

*Bovinos, **Suínos

Fonte: Próprio autor

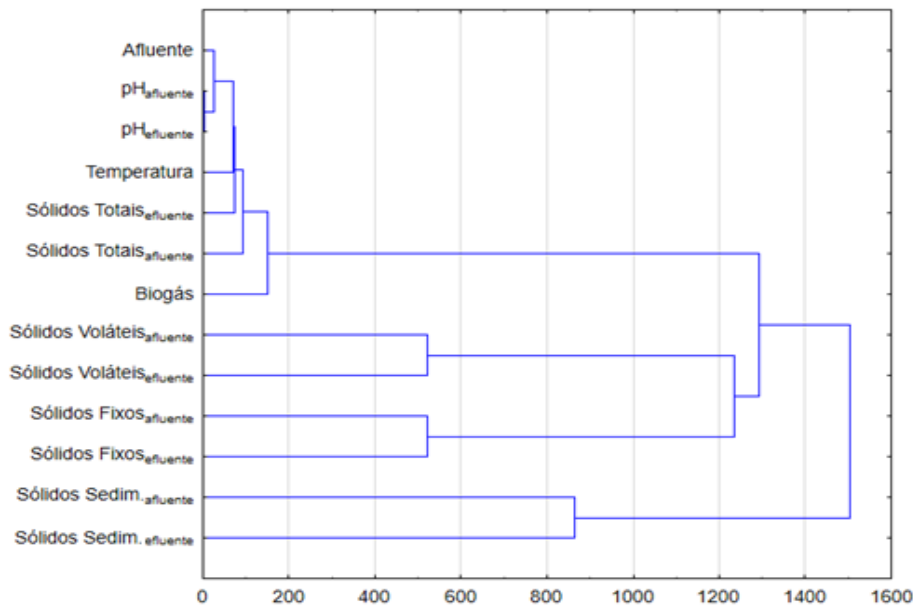
A criação de bovinos contendo vacas leiteiras e bezerros, a propriedade 2 foi a que apresentou maior produção de biogás embora apresente menor quantidade de animais em comparação com a propriedade 5. As propriedades 4 e 7 apresentaram em seu plantel a mesma quantidade de animais e obtiveram resultados diferentes em seus sistemas produtivos. Além disso, na criação de suínos, as propriedades 8 e 12 apresentaram maior produção de biogás, em relação a propriedade 10, que apresentou maior quantidade de animais e menor produção de biogás considerando somente os suínos em fase de terminação do Condomínio Ajuricaba.

Diante disso, embora algumas propriedades rurais apresentem a mesma criação e quantidade de animais, tipo de biodigestor e condições climáticas, obteve-se rendimentos diferentes no sistema de biogás, mostrando a necessidade da realização do tratamento estatístico para otimização do processo, tendo como finalidade obter condições ótimas para a produção de biogás a partir de dejetos bovinos e suínos.

5.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Em uma análise conjunta de biomassa residual de bovinos e suínos, foi construído o histograma que indica quais as variáveis independentes interagem entre si na produção do biogás (Figura 13).

Figura 13 – Histograma dos parâmetros da produção de biogás



Fonte: Próprio autor

O histograma apresenta os parâmetros que influenciam a produção de biogás provenientes da matéria orgânica de bovinos e suínos. É possível verificar a formação de três grupos de interações, o primeiro formado dos $SS_{afluente}$, $SS_{efluente}$, o segundo formado pelos $SV_{afluente}$, $SV_{efluente}$, $SF_{afluente}$ e $SF_{efluente}$ e um terceiro a partir do biogás, mostrando que as variáveis $ST_{afluente}$, $ST_{efluente}$, temperatura, $pH_{afluente}$, $pH_{efluente}$ e o afluente.

Além disso, pode ser observado no histograma o funcionamento básico da produção de biogás dentro do biodigestor. A biomassa residual animal (afluente) utilizado como matéria prima na geração do biogás, tem relação direta inicialmente com a variável do pH. O afluente ao ser introduzido no biodigestor deve ter o seu pH, condições de temperatura no meio anaeróbico e quantidade de sólidos totais controlados para que a degradação do afluente seja satisfatória, pois os sólidos totais apresentaram grande interação com os sólidos voláteis, e são consumidos pelas bactérias para produzir o biogás.

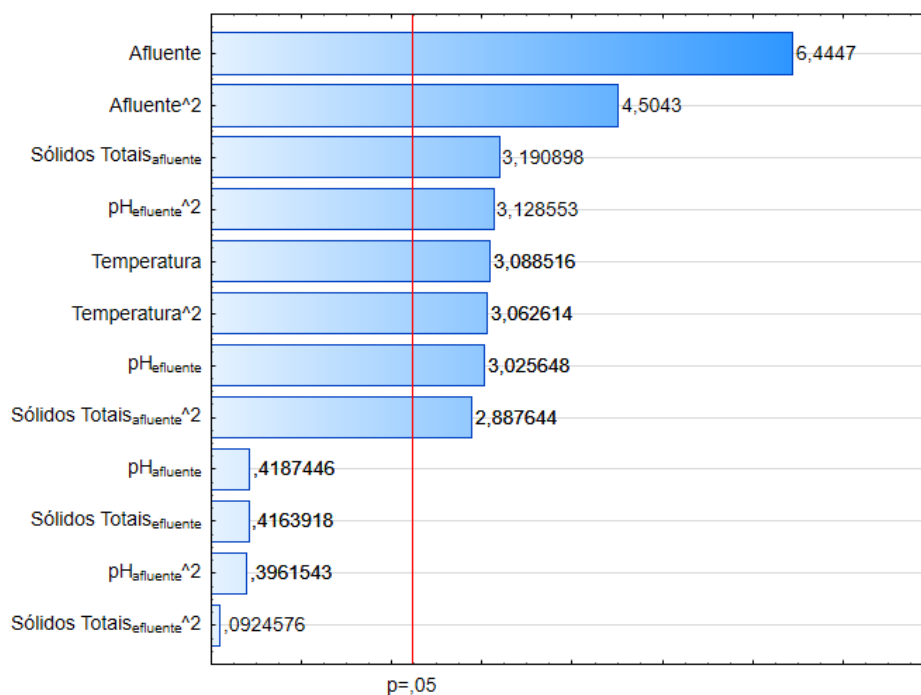
O modelo matemático representado pela equação (4) foi obtido utilizando as variáveis indicadas pelo histograma (Figura 13) contendo os termos lineares e quadráticos das variáveis da biomassa residual de bovinos e suínos.

$$Y_{\text{Biogás}} = 2809,949 + 14,661x_1 - 0,991x_1^2 - 24,221x_2 + 0,569x_2^2 - 692,809x_3 + 49,209x_3^2 - 38,409x_4 + 2,483x_4^2 + 1,614x_5 - 0,015x_5^2 - 0,294x_6 + 0,001x_6^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

As variáveis x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 e x_6 representam as variáveis independentes afluente, temperatura, $\text{pH}_{\text{afluente}}$, $\text{pH}_{\text{effluente}}$, $\text{ST}_{\text{afluente}}$ e $\text{ST}_{\text{effluente}}$ respectivamente. O valor do coeficiente de determinação (R^2) foi 99,70, o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) foi 98,68 e a análise de variância mostrou que todos os termos foram significativos em nível de 5% ($0,00007 \leq p \leq 0,02045$) com exceção dos termos x_3 , x_3^2 , x_6 e x_6^2 mostrando que o modelo pode ser utilizado para fins preditivos tanto para biogás gerado da biomassa bovina quanto da suína.

Dentre os termos lineares o afluente e os sólidos totais_{afluente} foram os únicos que tiveram coeficientes positivos e no gráfico de Pareto (Figura 14) foram os mais significativos confirmando sua importância no modelo.

Figura 14 - Gráfico de Pareto das variáveis que influenciam na produção de biogás



Fonte: Próprio autor

O gráfico de Pareto mostra os termos significativos em nível de 5% confirmando o modelo matemático obtido.

5.2.1 Metodologia de Superfície de Resposta

Através da metodologia de superfície de resposta foram obtidas equações que descrevem a interação entre as variáveis em função da resposta, e as curvas de nível mostrando o melhor rendimento no sistema de produção de biogás da biomassa proveniente de dejetos bovinos e suínos.

5.2.1.1 Bovinos

Foi realizada a análise da produção de biogás verificando o comportamento do afluente e pH_a de bovinos em relação as outras variáveis envolvidas no processo.

As equações de 5 a 10 descrevem as superfícies de respostas geradas das interações das variáveis independentes (AFL, pH_a , T, ST_a , SS_a , SV_a , SV_e e SF_a) na produção de biogás (Z).

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = & -935,6329 - 146,0367 \mathbf{AFL} + 290,9973 \mathbf{pH}_a + 63,9755 \mathbf{AFL}^2 \quad \text{Eq. (5)} \\ & - 22,2294 \mathbf{pH}_a^2 + 14,0426 \mathbf{AFL} \mathbf{pH}_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = & 14,4035 + 23,2334 \mathbf{AFL} - 1,0258 \mathbf{T} + 19,3672 \mathbf{AFL}^2 + 0,039 \mathbf{T}^2 \quad \text{Eq. (6)} \\ & - 1,8428 \mathbf{AFL} \mathbf{T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = & -12,9017 + 10,0766 \mathbf{AFL} + 0,0524 \mathbf{SS}_a + 11,9907 \mathbf{AFL}^2 \quad \text{Eq. (7)} \\ & - 2,8104 \mathbf{10}^{-5} \mathbf{SS}_a^2 - 0,0243 \mathbf{AFL} \mathbf{SS}_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = & -596,3415 - 37,7373 \mathbf{AFL} + 1,7195 \mathbf{SV}_a + 54,8565 \mathbf{AFL}^2 \quad \text{Eq. (8)} \\ & - 0,0012 \mathbf{SV}_a^2 - 0,0179 \mathbf{AFL} \mathbf{SV}_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = & 773,195 + 0,0991 \mathbf{SV}_a - 234,1495 \mathbf{pH}_a - 0,0003 \mathbf{SV}_a^2 \quad \text{Eq. (9)} \\ & + 14,3995 \mathbf{pH}_a^2 + 0,0498 \mathbf{SV}_a \mathbf{pH}_a \end{aligned}$$

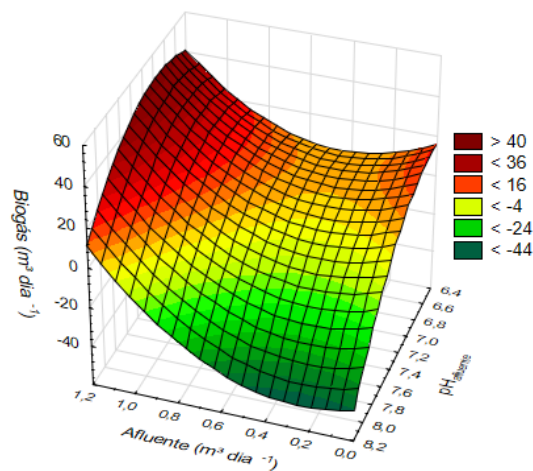
$$\begin{aligned} \text{Biogás} = & 574,2201 + 0,497 SF_a - 184,351 pH_a - 0,0003 SF_a^2 \\ & + 14,3995 pH_a^2 - 0,0498 SF_a pH_a \end{aligned} \quad \text{Eq. 10)}$$

As superfícies de respostas apresentadas a seguir, mostram o comportamento da resposta, produção de biogás, em função das variáveis independentes descritas nas equações 5-10, comparando com a média da produção real de biogás que foi de $7,48 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ para análise da melhor produção.

a) Afluente e pH_{afluente}

A Figura 15 mostra que os dejetos bovinos se comportam de forma semelhante à encontrada na literatura no que se refere ao valor de pH (7,0). Para um valor de pH entre 7,2 e 6,6 e afluente entre $1,0$ a $1,2 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ mostrou maior rendimento em relação média da produção real de biogás.

Figura 15 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e pH_{afluente} para dejetos de bovinos.



*Biogás ($\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$) = 7,8

*Média da produção real de biogás (bovinos)

Fonte: Próprio autor

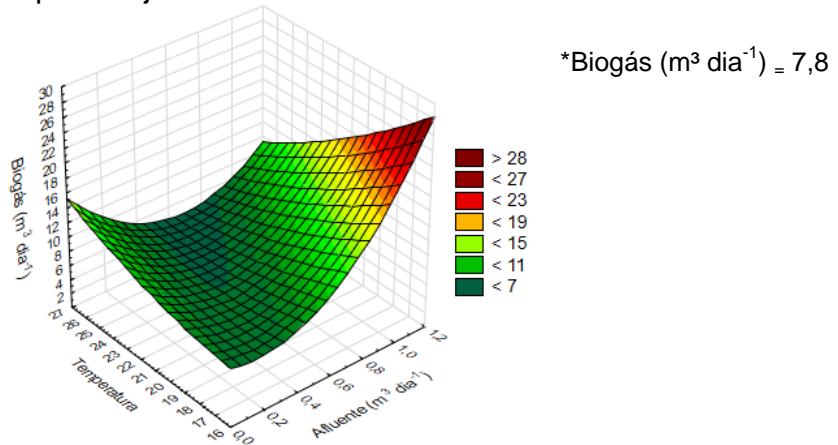
b) Afluente e Temperatura

Quando analisamos a temperatura é importante lembrar que a região de Marechal Candido Rondon onde se encontra o condomínio Ajuricaba, está localizada em regiões que apresentam temperaturas em torno de $16-18 \text{ }^\circ\text{C}$ no

inverno. No entanto para o bom funcionamento do biodigestor a temperatura adequada é 35 °C.

A Figura 16 mostra que mesmo em temperaturas mais amenas, o processo de produção não foi prejudicado, visto que cada microrganismo possui uma faixa adequada de temperatura. Mesmo em temperaturas mais baixas (16 - 19 °C), houve bom rendimento na produção de biogás (maior que 7,8 m³ dia⁻¹).

Figura 16 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e temperatura para dejetos de bovinos



*Média da produção real de biogás (bovinos)

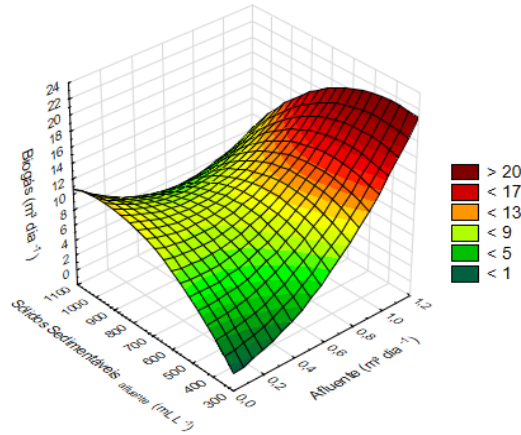
Fonte: Próprio autor

c) Afluente e Sólidos Sedimentáveis_{afluente}

A Figura 17 mostra a relação entre o afluente e os sólidos sedimentáveis do afluente. É possível verificar que a diminuição dos sólidos sedimentáveis, fração grossa da matéria orgânica que prejudica a saída do biogás do biodigestor, e o aumento de afluente, favorece a produção de biogás.

Figura 17 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos sedimentáveis_{afluente} para dejetos de bovinos

*Biogás (m³ dia⁻¹) = 7,8



*Média da produção real de biogás (bovinos)

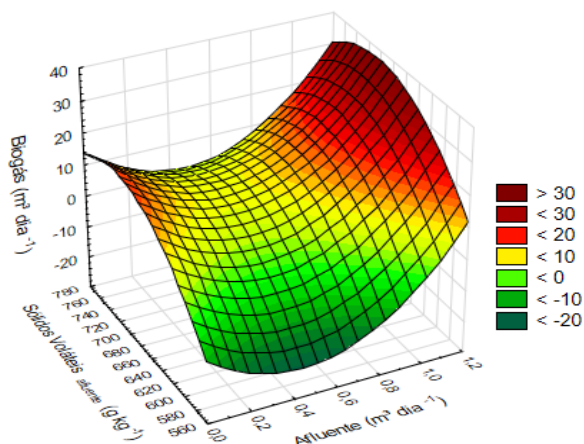
Fonte: Próprio autor

d) Afluente e Sólidos voláteis_{afluente}

A Figura 18 mostra a relação entre afluente e sólidos voláteis do afluente. Uma maior quantidade de afluente possui uma relação direta com o aumento de sólidos voláteis, gerando aumento da produção de biogás.

Figura 18 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos voláteis_{afluente} para dejetos de bovinos

*Biogás (m³ dia⁻¹) = 7,8



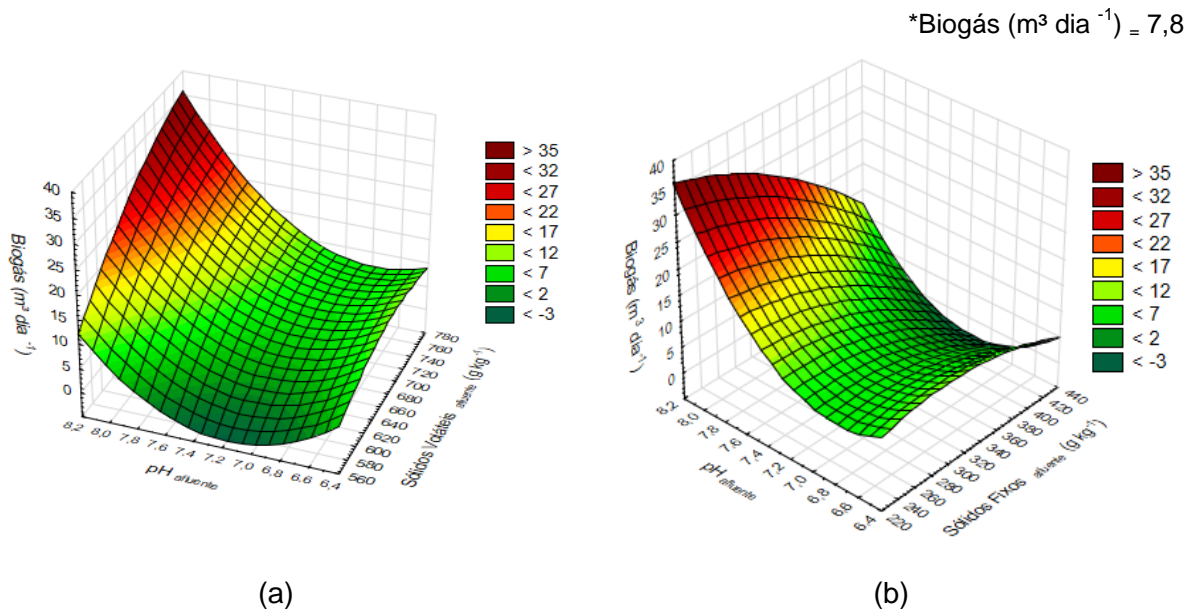
*Média da produção real de biogás (bovinos)

Fonte: Próprio autor

e) $\text{pH}_{\text{afluente}}$, Sólidos voláteis e fixos do afluente

A produção de biogás também foi analisada comparando o pH com os sólidos voláteis e fixos. A Figura 19 mostra que uma maior quantidade de SV e menor SF na mesma faixa de pH, possuem capacidade aproximada de produção de biogás.

Figura 19 – Curvas de nível da produção de biogás em função do $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e sólidos voláteis_{afluente} (a) e $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e sólidos fixos_{afluente} (b) para dejetos de bovinos



*Média da produção real de biogás (bovinos)

Fonte: Próprio autor

Através da metodologia de superfície de resposta, foi possível otimizar as variáveis independentes na produção de biogás dos dejetos bovinos para obtenção de um bom rendimento, apresentando nesta otimização alta produtividade de 20 a 40 $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$, superior ao valor da média real de 7,8 $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ nas propriedades do condomínio Ajuricaba.

5.2.1.1 Suínos

Foi realizada a análise da produção de biogás verificando o comportamento do afluente e pH_a dos dejetos suínos em relação as outras variáveis envolvidas no processo.

As equações 11 a 14 descrevem as superfícies de respostas (Figuras 20 a 25) geradas das interações das variáveis independentes (AFL, pH_a , T, ST_a , SS_a , SV_a , SV_e e SF_a) na produção de biogás (Z).

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = 2798,0483 - 385,898 pH_a - 3,5847 SV_a + 4,4891 pH_a^2 + & \text{Eq. (11)} \\ & 0,0004 SV_a^2 + 0,4225 pH_a SV_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} - 291,7428 + 7,9651 AFL + 32,5107 T - 0,5507 AFL^2 & \text{Eq. (12)} \\ - 0,8166 T^2 + 0,1042 AFL T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = 2712,9561 - 39,6613 AFL - 671,7873 pH_a - 0,7141 AFL^2 & \text{Eq. (13)} \\ + 41,5599 pH_a^2 + 6,9616 AFL pH_a \end{aligned}$$

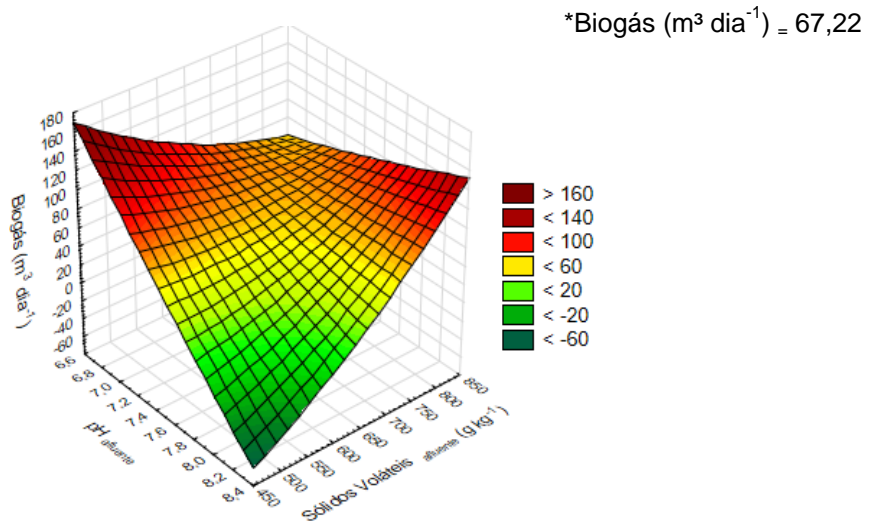
$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = -305,3046 + 20,6584 AFL + 0,7621 SV_a - 0,3877 AFL^2 & \text{Eq. (14)} \\ - 0,0004 SV_a^2 - 0,0168 AFL SV_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Biogás} = 40,6254 + 3,8636 AFL + 0,0703 SF_a - 0,3877 AFL^2 & \text{Eq. (15)} \\ - 0,0004 SF_a^2 + 0,018 AFL SF_a \end{aligned}$$

As equações 11-15 geraram curvas de nível mostrando o comportamento da resposta, produção de biogás, em função das variáveis independentes descritas nas equações, comparando com a média da produção real de biogás que foi de $67,22 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ para análise do melhor rendimento.

Analisando a variável SV_{afluente} com o pH (Figura 20), verificamos que os sólidos voláteis presentes na matéria orgânica de suínos tem melhor rendimento de produção de biogás em pH abaixo de 7,2. Porém, quando o pH está entre 7,8 a 8,4 é possível observar outro ponto de rendimento e as curvas de nível começando a se juntar.

Figura 20 – Curvas de nível da produção de biogás em função do $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e sólidos voláteis_{afluente} para dejetos de suínos



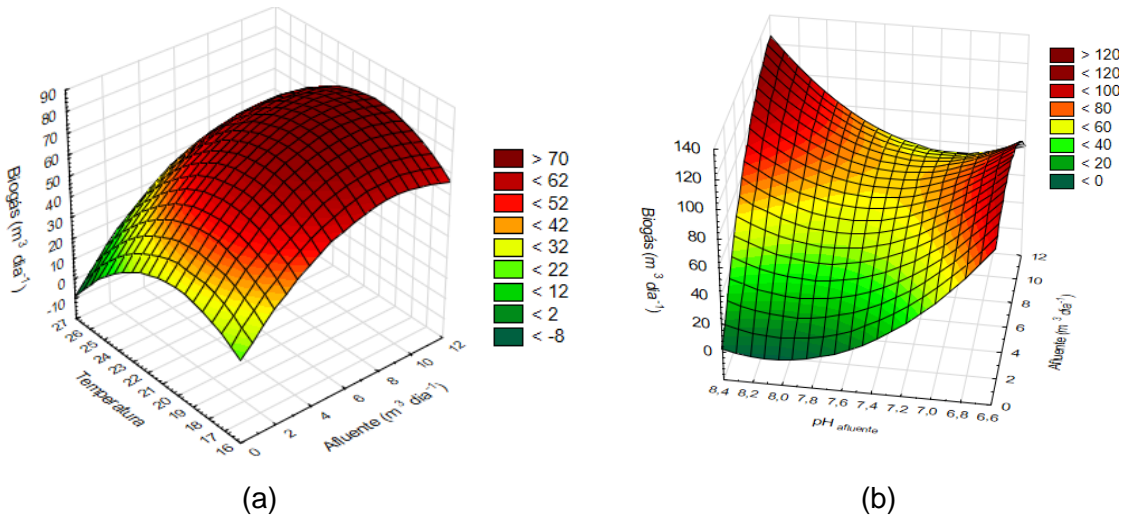
*Média da produção real de biogás (suínos)

Fonte: Próprio autor.

Outra análise foi realizada, verificando o comportamento do afluente em relação às outras variáveis envolvidas no processo.

A Figura 21 (a) mostra um maior rendimento da produção de biogás utilizando matéria orgânica proveniente de suínos, no entanto, a temperatura para maior rendimento está entre 21 e 23 °C. A influencia do pH indicado na Figura 21 (b), indica que para uma quantidade semelhante de afluente, o pH precisa ser mais elevado (8,2 - 8,4), quando comparado ao bovino.

Figura 21 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e temperatura (a) e afluente e pH_{afluente} (b) para dejetos de suínos
 *Biogás ($m^3 \text{ dia}^{-1}$) = 67,22

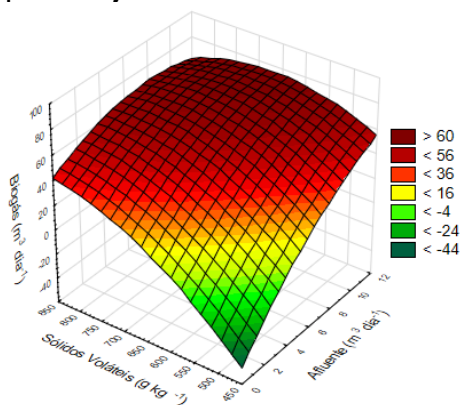


*Média da produção real de biogás (suínos)

Fonte: Próprio autor.

A Figura 22 mostra que o afluente da biomassa dos suínos possui uma grande quantidade de sólidos voláteis em sua composição. Porém quando comparado a interação pH e SV_{afluente} apresenta menor rendimento. Isso significa que um controle de pH nos sólidos se faz necessário para um maior rendimento.

Figura 22 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos voláteis_{afluente} para dejetos de suínos
 *Biogás ($m^3 \text{ dia}^{-1}$) = 67,22

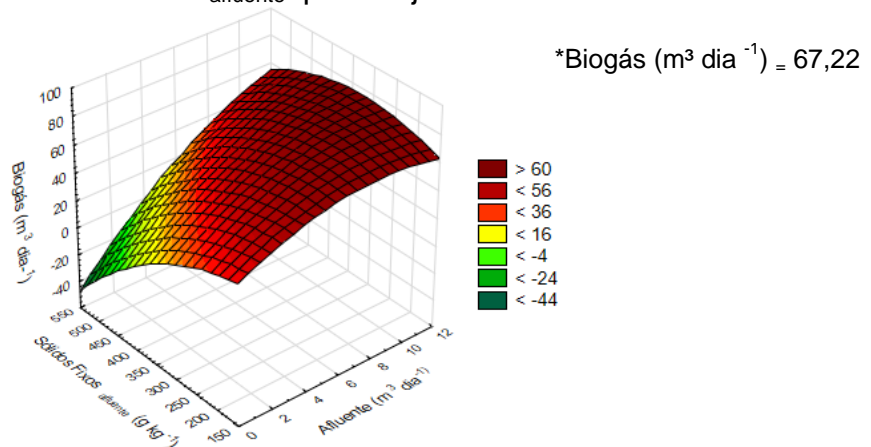


*Média da produção real de biogás (suínos)

Fonte: Próprio autor.

As curvas de nível mostradas na Figura 23 mostram que uma menor quantidade de sólidos fixos e maior quantidade de afluentes produz um rendimento de biogás superior a $60 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$.

Figura 23 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e $\text{pH}_{\text{afluente}}$ e sólidos fixos_{afluente} para dejetos de suínos



* Média da produção real de biogás (suínos)

Fonte: Próprio autor

Através da metodologia de superfície de resposta, foi possível também otimizar as variáveis independentes na produção de biogás dos dejetos suínos para obtenção de uma melhor produtividade, apresentando nesta otimização cerca de $160 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, superior ao valor da média real de $67,22 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ nas propriedades do condomínio Ajuricaba.

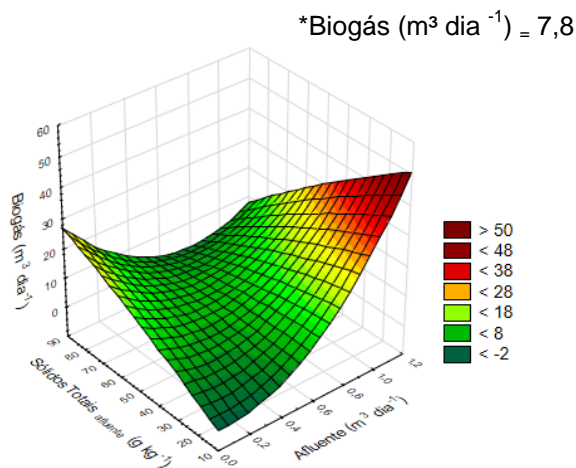
As curvas de nível que descrevem as interações entre afluente, sólidos totais_{afluente} e sólidos voláteis_{efluente} dos dejetos bovinos e suínos, serão apresentados juntamente com as equações (16-19) que as modelam, pois influenciam diferentemente o processo de biodigestão anaeróbia.

A Figura 24 mostra que para os dejetos bovinos utiliza-se menor quantidade de sólidos totais_{afluente} (base úmida) e maior quantidade de afluente, enquanto nos suínos utiliza-se maior quantidade de sólidos totais_{afluente} (base úmida) e menor de afluente. Os dejetos suínos possuem maior diluição da matéria orgânica em relação aos dejetos bovinos (OLIVER *et al.*, 2008). Isso acontece para que o processo de hidrólise não seja prejudicado e influencie o sistema de produção de biogás.

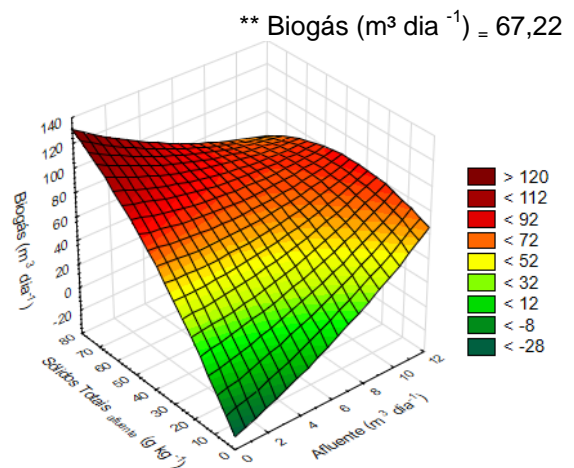
Figura 24 – Curvas de nível da produção de biogás em função dos sólidos totais_{afluente} e afluente de dejetos bovinos (a) e de dejetos suínos (b)

$$\begin{aligned} \text{Biogás} = & -7,9067 + 4,2973 \text{ AFL} + \\ & 0,4771 \text{ ST}_a + 40,0385 \text{ AFL}^2 - \\ & 0,7603 \text{ AFL ST}_a - 0,001 \text{ ST}_a^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (16)}$$

$$\begin{aligned} \text{Biogás} = & -28,9955 + 4,9256 \text{ AFL} + \\ & 2,9652 \text{ ST}_a + 0,2471 \text{ AFL}^2 - \\ & 0,1728 \text{ AFL ST}_a - 0,0121 \text{ ST}_a^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (17)}$$



(a) dejetos bovinos



(b) dejetos suínos

Média da produção real de biogás * (bovinos) e ** (suínos)

Fonte: Próprio autor.

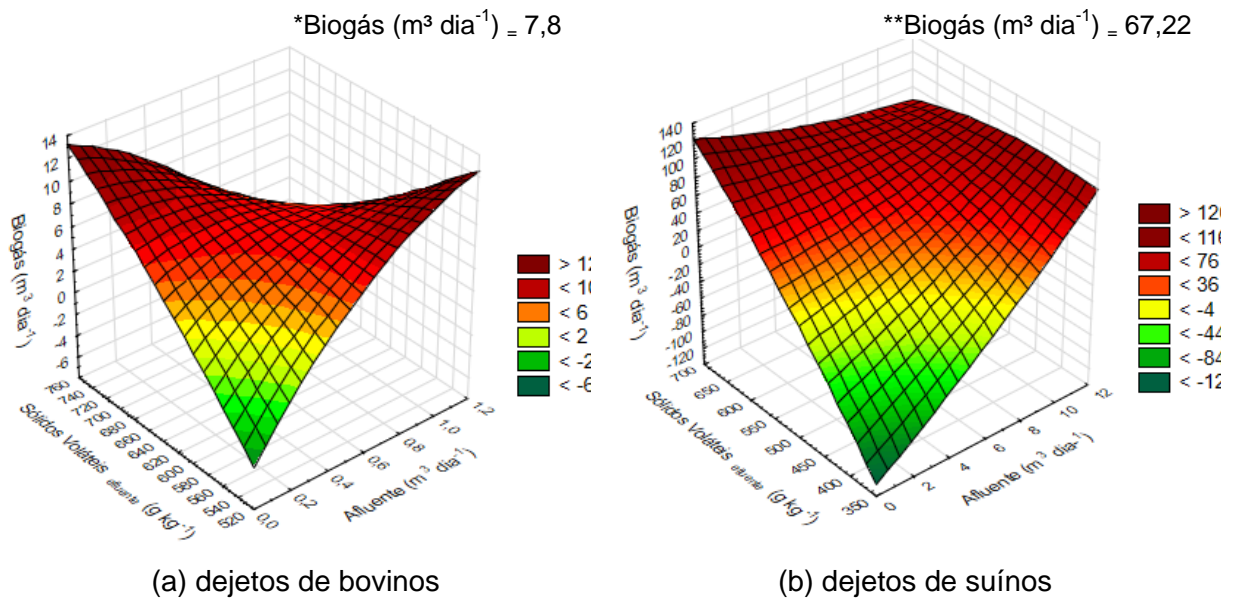
Os sólidos voláteis do efluente também possuem uma característica importante, pois podem ser utilizados como inoculo inicial para um novo biodigestor entrar em funcionamento já com microrganismos ativos, acelerando o processo de produção de biogás.

A Figura 25 mostra que para produção de biogás proveniente de matéria orgânica de bovinos ou suínos, se houver a utilização de SV_{efluente} no biodigestor, em menores ou maiores quantidades de afluentes, obtém-se maior rendimento de biogás.

Figura 25 – Curvas de nível da produção de biogás em função do afluente e sólidos voláteis_{efluente} para dejetos de bovinos (a) e para dejetos de suínos (b)

$$\begin{aligned} \text{Biogás} = & -69,6455 + 88,5411 \text{ AFL} + \\ & 0,1631 \text{ SV}_e - 7,8742 \text{ AFL}^2 - \\ & 0,1253 \text{ AFL SV}_e - 7,121 \cdot 10^{-5} \text{ SV}_e^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (18)}$$

$$\begin{aligned} \text{Biogás} = & -483,4899 + 37,7115 \text{ AFL} + \\ & 1,1717 \text{ SV}_e + 0,2304 \text{ AFL}^2 - \\ & 0,0647 \text{ AFL SV}_e - 0,0004 \text{ SV}_e^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (19)}$$



Média da produção real de biogás * (bovinos) e ** (suínos)

Fonte: Próprio autor

6 CONCLUSÃO

Apesar da biomassa residual de bovinos e suínos, apresentarem características diferentes em sua composição de acordo com os parâmetros analisados, foi obtido um modelo matemático válido para predição e aumento da produção de biogás para os dois conjuntos de dados.

A matéria orgânica de bovinos e suínos se mantiveram em condições adequadas para todas as variáveis conforme a literatura. Porém, o pH do afluente de suínos precisa ser elevado em menores temperaturas para um maior rendimento na produção de biogás, comparado com o afluente de bovinos.

Através da metodologia de superfície de resposta foi possível verificar que as variáveis das concentrações de sólidos sedimentáveis_{afluente} e sólidos fixos_{afluente} foram as que mais influenciaram para um menor rendimento na geração do biogás. Trata-se de resíduos grosseiros e inorgânicos, que se encontram acumulados no fundo do biodigestor, diminuindo o tempo de fermentação da matéria orgânica e prejudicando a saída do biogás.

As variáveis que mais influenciaram para maior rendimento na geração do biogás foram a do afluente, pH_{afluente} e sólidos voláteis_{afluente} no processo de produção do biogás através da biomassa residual de bovinos e suínos no Condomínio de Agroenergia do Ajuricaba.

O uso dos dos modelos matemáticos apresentaram grande importância para o melhoramento do sistema de produção de biogás com criação de bovinos e suínos, mostrando que as propriedades podem se tornarem mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABREU, E. F. **Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário**. 2007. 105f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da IFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- AEBIOM – Associação Europeia de Biomassa. **A biogas road map for Europe**. 2009.
- AMARAL, C. C.; AMARAL, L. A.; LUCAS JUNIOR, J.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S.; MACHADO, M. R. F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Revista Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.
- ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N.; SOUZA SILVA, L. G.; ELIAS, M. J. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. In: **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002, Campinas, SP. 2002.
- ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING, B. K. A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas. **Biotechnology and Bioengineering**, 63: 363-372.
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 nd ed., Washington, American Public Health Association Pub., 1935 p. 2012.
- AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. 10: 152-161, 2005.
- ARRUDA., M. H.; AMARAL., L. D. P.; PIRES., O. P. J.; BARUFI, C. R. V. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 2, p. 1-8, 2002.
- AZEITONA, D. C. L. **Efeitos de pré-tratamento térmicos na digestão anaeróbica termófila de resíduos de casca de batata**. 2012. 122p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Segurança Alimentar). Universidade de Nova Lisboa Monte de Caparica, Portugal.
- BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência – ACSA**. v.2, 2011.
- BARBOSA, P. T.; MOURA, L. F.; BERTINI, L. M.; SILVA, F. F. M. Construção de protótipo de biodigestor modelo indiano: Uma alternativa para estudos em escala laboratório. **VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**, Palmas, TO. 19 a 21 de out. 2012.

BARICHELO, R. **Concepção de condomínios de agroenergia**: análise e proposta de metodologia para aplicação em áreas de concentração da suinicultura. 2015. 231p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, SC.

BARREIRA, P. **Biodigestores**: energia, fertilidade e saneamento rural. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011.

BAZARA, X.; GALIMANY, F.; TORRES, R. Digestión anaerobia en el tratamiento de efluentes y lodos residuales. **Tecnología del Agua**, v. 233, p. 34-46, 2003.

BELTRANO, T.; RANZAN, C.; HINRICH, J.; HITZMANN, B. Artificial neural network prediction of the biogas flow rate optimized with an ant colony algorithm. **Biosystems Engineering**, v. 143, p. 68-78, 2016.

BLEY JÚNIOR, C. J. **Projeto de controle da contaminação ambiental decorrente da suinicultura no Estado do Paraná**. Curitiba: Ministério do Meio Ambiente, 162p. 2003.

BLEY JR, C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da biomassa residual**: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. Ed. 2. Rev. Foz do Iguaçu, PR. Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, Technopolitik Editora. 140 p. 2009.

BLEY JR, C. **Biogás**: a energia invisível. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional. 2ª ed. 2015.

BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia**: um estudo de caso em abatedouro de bovinos. 2010. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

BRUNES, L. C. **Balço de gases de efeito estufa em sistemas de produção de bovinos de corte**. Goiânia, 50 p. 2014.

CAMPOS, E. F. O. **Caracterização de propriedade bovina leiteira quanto ao potencial produtivo de biogás a partir da fermentação anaeróbia de dejetos bovinos em biodigestor canadense**. 48p. 2011.

CARREIRA, A. C. R. **Utilização de redes neuronais artificiais na gestão do processo de digestão anaeróbia**. 2014. 186f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Biológica). Universidade do Minho, Portugal.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. Biodigestores. 2008. In: **VI Semana de Tecnologia em Alimentos**, Ponta Grossa: UTFPR.

CCE - CENTRO PARA CONSERVAÇÃO E ENERGIA. **Guia Técnico de Biogás**. Amadora: Portugal, 2000.

CHANDRA, T. S.; SUVIDHA, G.; MUKHERJI, S.; CHAUHAN, V. S.; VIDYASSHANKAR, S.; KRISHNAMURTHI, K.; SARADA, R.; MUDLIAR, S. N. Statistical optimization of thermal pretreatment conditions for enhanced biomethane production from defatted algal biomass. **Bioresource Technology**, v. 16, p. 157-165, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: **Segrac**, v. 5, p. 246p. 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias**. Reatores anaeróbios, v. 5, 2ª edição, Belo Horizonte: Ed. UFMG, 380p. 2007.

CHUNG, YING-CHIEN.; HO, KUO-LING.; TSEN, CHING-PING. Treatment of high H₂S concentrations by chemical absorption and biological oxidation process. **Environmental Engineering Science**, v. 23, n. 6, 2006.

CIBIOGÁS. **Know more about our Demonstration Units**. 2015. Disponível em: < https://cibiogas.org/en/demonstration_units >. Acesso em: 24 de abr. 2016.

COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; PECORA, V. ABREU, F. C. Energy generation with landfill biogas. **Proceedings of RIO6, World Climate & Energy Event**. November, p. 17-18, 2006.

COLLATO, L.; LANGER, M. Biodigestor – resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência**, ACET. Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119 – 128, 2011.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás**: Independência energética do pantanal mato-grossense. (Circular Técnica). EMBRAPA. Corumbá, MS 1981.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp. Campinas: 2008. p. 734.

COSTA, E. S. **Proposta de protocolo para projeto de engenharia ambiental de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo**. 96f. 2009.

DACH, J.; KOSZELA, K.; BONIECKI, P.; ZABOROWICKI, M.; LEWICKI, A.; CZEKALA, W.; QUIAO, W.; PIEKARSKA-BONIECKA, H.; BIALOBRZEWSKI, I. The use of neural modeling to estimate the methane production from slurry fermentation process. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 56, p. 603-610, 2016.

DAGA, J.; CAMPOS, A. T.; FEIDEN, A.; KLOSOWSKI, E. S.; CÂMARA, R. J. Análise da adequação ambiental e manejo dos dejetos de instalações para suinocultura em propriedades na região Oeste do Paraná. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 587-595, 2007.

DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. **Biogás from waste and renewable resources**. Ed. Wiley-VCH, 2008.

DE LA TORRE, N. D. A. E. C. R. **Digestion anaerobia en comunidades rurales**. 2008. 140p. (Engenharia Térmica e de Fluídos). Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politecnica Superior.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos.** (Boletim Informativo). BIPERS, v. 10, n. 14, p. 4-28, 2002.

DONGALA, A. M. **Projeto de biodigestor para geração de bioenergia em sistemas de produção de suínos:** Um estudo de caso da região de Icolo e Bengo – Angola. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2010.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto** - Estudo de caso. 2012. 63p. (Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura)). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás da suinocultura.** 2012. 209p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR.

FEY, A.; CONRAD, R. Effect of temperature on carbon and electron flow and on the archaeal community in methanogenic Rice Field soil. **Applied and Environmental Microbiology.** 2000.

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. **Guia prático do biogás:** geração e utilização. 5. ed. Gülzow:, 2010.

FONSECA, F. S. T.; ARAÚJO, A. R. A.; HENDGES, T. L. **Análise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA:** um estudo de caso. 2009. In: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural_Porto Alegre, RS.

FRIGO, E. P.; ALVES, H. J.; FRIGO, M. S.; ARAÚJO, C. H. C.; BASTOS, R. K. Biomassa residual rural proveniente de diferentes atividades agropecuárias brasileiras. **Energia na agricultura.** v. 30, n. 1, p. 21-26, 2015.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor:** um estudo de caso na região de Toledo - PR. 2003. 106p. (Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional). Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, SC.

GRADY, C. P. L. J.; LIM, H. C. **Biological waste treatment.** Marcel Dekker. Inc., New York. 1980.

GONÇALVES, C. D. C. **Modelação do processo de digestão anaeróbia da FORSU à escala industrial.** 2012. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Técnico Lisboa, Júri, Portugal.

HAGOS, K.; ZONG, J.; LI, D.; LIU, C.; LU, X. Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Efetivo dos Rebanhos:** Paraná. 2016.

KHANAL, S. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production**: Published online: March 27, 2009. DOI: 10.1002/9780813804545. 2009.

KONZEN, E. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejados em forma líquida**. 1980. 56f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, BH.

KUNZ, A.; PALHARES, J. C. P. **A importância do correto procedimento de amostragem para avaliação das características dos dejetos suínos**. 4p. (Comunicado Técnico, 362). Concórdia: EMBRAPA-CNPISA, 2004.

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. **Caderno de Ciência e Tecnologia**, v. 22, n.3, p.652-665, 2005.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 3, p. 28-35, 2006.

LABATUT, R. A.; GOOCH, C. A. Monitoring of anaerobic digestion process to optimize a performance and prevent system failure. In: Got manure? **Enhancing Environmental and Economic Sustainability Conference**. Anais, New York.

LABIOGÁS. Documentos internos. Foz do Iguaçu: **CIBiogás** - ER, 2013.

LANTZ, M.; SVENSSON, M.; BJORNSSON, L.; BORJESSON, P. The prospects for an expansion of biogás systems in Sweden – Incentives, barriers and potentials. **Energy Policy**, v, 35, p. 1830-1843, 2007.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. **Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais**. Campina Grande, PB: DEAg/UFPB, 1999. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.

LEMA, J. M.; MÉNDEZ, R. J. **Tratamientos biológicos anaeróbios**. Oviedo, España, v. III, 1997.

LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G.; Desafio do tratamento anaeróbico de águas residuais psicrófila. **Trends Biotechnol.** 19 (9): 363-370. 2001.

LI, S., PARK, J., ZHU. Solid-state anaerobic digestion for the methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15: 821-826. 2011.

LIMA, H. Q. **Avaliação dos modelos Hashimoto e AMS-III.D para produção de metano com dejetos de suínos**. 2011. 83p. (Dissertação (Mestrado em Energia)). Universidade Federal do ABC, Santo André, SP.

LINDEMEYER, R. M. **Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica**. 2008. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.

MAGHANAKI, M. M.; GHOBADIAN, B.; NAJAFI, G.; GALOGAH, R. J. Potential of biogás production in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 702-714, 2013.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. Na overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n.1, p. 3-16, 2000.

MATHIAS, J. F. C. M. **Biogás em propriedades rurais familiares**: Uma opção de desenvolvimento local sustentável. In: Congresso Brasileiro de Sistemas. Ribeirão Preto, SP. v. 10, 2014.

MATOS, A. T. Curso sobre tratamento de resíduos agroindustriais. Viçosa: **Fundação Estadual do Meio Ambiente**, 34p. 2005.

MATUSZEWSKA, A.; OWCZUK, M.; ZAMOJKA-JAROSZEWICZ, A.; JAKUBIAK-LASOCKA, J.; LASOCKI, J.; ORLINSKI, P. Evaluation of the biological methane potential of various feedstock for the production of biogás to supply agricultural tractors. **Energy Conversion and Management**. v. 125, p. 309-319, 2016.

MEDEIROS, A. A.; TEIXEIRA, M. S. G.; OLIVEIRA, A. C. A.; SILVA, J. G.; MEDEIROS, S. A. Energia solar como estratégia para obtenção de vantagem competitiva: um estudo sobre a sua utilização nos meios de hospedagem do bairro de Ponta Negra, em Natal-RN. **XII Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, São Paulo, 2005.

METCALF, M; EDDY, J. **Wastewater engineering**: treatment, disposal, reuse. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 920p. 1979.

NEVES, V. L. V. **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino**. 2010. 56p. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, SP.

NOGUEIRA, L. U. H.; SILVA LORA, E. E.; TROSSERO, M. A. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2000. p.31-54.

NOVAK; A. C.; SCHNEIDER, A. H.; SIMÃO, C. A. F.; FROHLICH, C. A.; SYDNEY, E. B.; BOSCH, E. LOFHAGEN, J. C. P.; BAZZO, J. WILDAUER, L. D. B. S.; MAKISHI, L. M. M.; SOUZA, M.; STUMM, M. G. **Oportunidade da cadeia produtiva de biogás para o Estado do Paraná**. 144p. Curitiba: Senai/PR. 2016.

NOKATA, H. O. B.; PEREIRA, F. M. Experimental and numerical study of CO₂ content effects on the laminar burning velocity of biogás. **Fuel**, v. 182, p. 382-390, 2016.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 79f. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

OLIVER, A. P. M; SOUZA NETO, A. A; QUADROS, D. Q; VALLADARES, R. E. **Manual de treinamento em biodigestão**. Winrock International Brasil, 23p. 2008.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - Estudo de caso.** 2006. 152p. (Dissertação (Mestrado em Energia)). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE), São Paulo, SP.

PEREIRA, E. R.; DEMARCHI, J. J. A. A.; BUDIÑO, F. E. L. **A questão ambiental e os impactos causados pelos efluentes da suinocultura.** 2009. Disponível em: < http://www.infobibos.com/Artigos/2009_3/QAmbiental/index.htm >. Acesso em: 04 dez.

PEREIRA, G. **Viabilidade econômica da instalação de um biodigestor em propriedades rurais.** 2009. 78f. Dissertação (Mestre em Modelagem Matemática). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS.

PESSUTI, C. A. A.; HERMES, E.; ZENATTI, D. C.; SILVA, R. P. **Remoção de sólidos e produção de metanona digestão anaeróbia de efluente de processamento de mandioca.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, p. 110-116, 2015.

PESSUTO, J.; SCOPEL, B. S.; PERONDI, D.; GODINHO, M.; DETTMER, A. Enhancement of biogas and methane production by anaerobic digestion of swine manure with addition of microorganisms isolated from sewage sludge. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 104, p. 233-239, 2016.

PORPATHAM, E.; RAMESH, A.; NAGALINGAM, B. Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 2057-2065, 2007.

PRAKASAN, K.; PRAKASAN, G.; MEDEIROS, J. V. D. **Biogás a partir de esterco bovino:** Estudo comparativo de plantas pilotos de biodigestores no Brasil. *Agropecuária Técnica* v. 1, n. 2, 1980.

QUADROS, D. G. **Biodigestão na agricultura familiar do semiárido.** Salvador, BA: 2009.

RAJESHWARI, K. V.; BALAKRISHNAN, M.; KANSAL, A.; LATA, K.; KISHORE, V. V. N. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable Sustainable Energy**. p. 135-156. 2000.

RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M. A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. **Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode:** An overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 861-877, 2011.

REFOSCO, D. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - Estudo de caso.** 2011. 152p. (Mestrado em energia). Programa Interunidades de Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROCHA, H. T. F. **Utilização de redes neuronais artificiais na gestão de processos de digestão anaeróbia**. 2013. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Júri, Portugal.

ROWSE, L. E. **Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries**. 2011. (Thesis to obtain degree of Master). University of South Florida.

RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. **Environmental biotechnology: Principles and applications**. Singapore: McGraw Hill, 2001.

SALOMOM, K. R.; TIAGO FILHO, G. L. **Série Energias Renováveis: Biomassa**. Itajubá, MG. 1: 36p. 2007.

SANTOS, S. R. **Biodigestores como fonte renovável de energia por dejetos humanos e resíduos orgânicos**. 2010. 43f. Universidade Cândido Mendes, Rio de Janeiro, RJ.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SOARES, D. M.; ALVES, L. V. Economic and CO₂ avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small Power plant in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 17, p. 77-84, 2016.

SCHUCH, S. L.; FEIDEN, A. **Agroenergia da Biomassa Residual Animal: oportunidade de negócio e renda na região oeste do Paraná**. In: Agrener, Campinas, 2010.

SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução**. Porto Alegre: Agropecuária, 88 p. 1983.

SHEN, Y.; LINVILLE, J. L.; URGUN-DERMITAS, M.; MINTZ, M. M.; SNYDER, S. W. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 346-362, 2015.

SILVA, L. L.; ALVES, M. S.; SILVA, V. C.; ROCHA, A. L. **Princípios de termoelétricas em pequenas propriedades rurais**. In: 2^o International workshop advances in cleaner production, 2009, São Paulo.

SILVA, N. P.; FRANCISCO, A. C. Geração de energia elétrica a partir de dejetos suínos: um estudo de caso em uma propriedade rural na região oeste do estado do Paraná. **Revista Nucleus**. 7: 65-82 p. 2010.

SILVA, T. L.; NETO, J. B. S. S.; SOARES, P. F.; NETO, G. A.; ALMEIDA, V. C. **Avaliação do aproveitamento da biomassa residual gerada na criação de animais**. 2011. VII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica, Editora: CESUMAR – Centro Universitário de Maringá, Brasil.

SILVA, D. H.; ESTEVAM, C. R. N.; GANDOLFI, M. V. C.; MELO, S. M. **Análise do dimensionamento do biodigestor indiano e estimativa de produção sustentável através dos dejetos bovinos, suínos e aves**. In: 9th International Bioenergy Conference, São Paulo, SP, 2014.

SOARES, D. M.; ALVES, L. V. Economic and CO₂ avoided emissions analysis of WWTP biogás recovery and its use in a small Power plant in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 17, p. 77-84, 2016.

SPECCE, R. E. **Anaerobic biotechnology**: for industrial wastewater. Nashville: Archae, 394p. 1996.

TALEGHANI, G.; KIA, A. S. Technical-economical analysis of the Saveh biogas power plant. **Renewable Energy**, v. 30, p. 441-446, 2005.

TEIXEIRA, A. R. **Influência da alteração da distribuição do tamanho de partículas no desempenho de reatores UASB tratando esgotos domésticos**. 2007. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável**: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VICH, D. V. **Comunidade microbiana e produção de metano em reator anaeróbio em batelada com metilamina como fonte de carbono**. 2010. 148f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

WALKER, E. **Estudo da viabilidade econômica na utilização de biomassa como fonte de energia renovável na produção de biogás em propriedades rurais**. 2009. 107f. Dissertação (Mestre em Modelagem Matemática). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, RS.

YANG, L.; GE, X.; WAN, C.; YU, F.; LI, Y. Progress and perspectives in converting biogás to transportation fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1133-1152, 2014.

YANG, T., LI, Y., GAO, J., HUANG, C., CHEN, B., ZHANG, L., WANG, X. ZHAO, Y., XI, B., LI, X. Performance of dry anaerobic technology in the co-digestion of rural organic solid wastes in China. **Energy**, v. 93 (2), p. 2497-2502, 2015.

YANG, H.; DENG, L.; LIU, G.; YANG DI; LIU YI; CHEN, Z. A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater. **Water Research**. v. 102, p. 464-474, 2016.

YILMAZ, I. T.; GUMUS, M. Investigation of the effect of biogás on combustion and emission of TBC diesel engine. **Fuel**, v. 188, p. 69-78, 2017.

YU, Y.; LEE, C.; HWANG, S. Analysis of community structures in anaerobic processes using a quantitative real-time PCR method. **Water Science and Technology**, v. 52, n. 1-2, 86-91, 2005.