



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



EDMAR CÉSAR GOMES DA SILVA

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS E DEJETOS DE BOVINO LEITEIRO: OBTENÇÃO E
PROJEÇÃO DOS RESULTADOS EM UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO
DE PENÁPOLIS-SP**

Botucatu

2017

EDMAR CÉSAR GOMES DA SILVA

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS E DEJETOS DE BOVINO LEITEIRO: OBTENÇÃO E
PROJEÇÃO DOS RESULTADOS EM UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO
DE PENÁPOLIS-SP**

Tese apresentada à Faculdade
de Ciências Agrônômicas da Unesp
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia (Energia na
Agricultura)

Orientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Bibliotecária: Ana Lucia de Grava Kempinas CRB-8 7310

S586c Silva, Edmar César Gomes da, 1974-
Codigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e dejetos de bovino leiteiro: obtenção e projeção dos resultados em um estudo de caso no município de Penápolis-SP / Edmar César Gomes da Silva. - Botucatu : [s.n.], 2017

83 p. : fots. color., grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2017

Orientador: Jorge de Lucas Junior

Inclui bibliografia

1. Biogás. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Biodigestão anaeróbia. 4. Codigestão de dejetos bovinos. I. Lucas Junior, Jorge. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “CODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E DEJETOS DE BOVINO LEITEIRO: OBTENÇÃO E PROJEÇÃO DOS RESULTADOS EM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE PENÁPOLIS-SP.”


AUTOR: EDMAR CÉSAR GOMES DA SILVA

ORIENTADOR: JORGE DE LUCAS JUNIOR

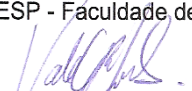
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JORGE DE LUCAS JUNIOR
Depto de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal



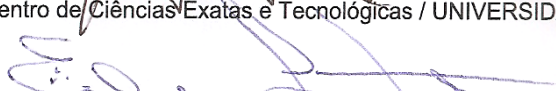
Prof. Dr. MARCO ANTONIO MARTIN BIAGGIONI
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu



Profa. Dra. VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN
Depto de Biotecnologia e Biotecnologia / UNESP - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu



Profa. Dra. MONICA SAROLLI SILVA DE MENDONÇA COSTA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas / UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ



Prof. Dr. EDER FONZAR GRANATO
/ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia

Botucatu, 23 de novembro de 2017.

DEDICATÓRIA

A minha querida e amada esposa Lucilene, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, como um porto seguro, sempre com uma palavra de carinho e motivação não deixando que desistisse do nosso sonho.

Aos meus queridos e amados filhos, Lucas, Felipe e Davi, que são a razão da minha vida, e o combustível para que eu continuasse caminhando até a conclusão de deste trabalho.

Aos meus pais que me ensinaram os valores da vida e ser persistente, principalmente nos momentos mais difíceis.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pai todo poderoso, que me permitiu chegar até aqui dando-me a graça de viver a cada dia.

Ao professor Dr. Jorge de Lucas Jr., por ter me dado a oportunidade de desenvolver este trabalho, pela orientação, ensinamentos, dedicação, apoio e amizade.

A Faculdade de Ciências Agrônômica – FCA - UNESP, campus de Botucatu e ao programa de pós-graduação do curso de Energia na Agricultura pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, FCAV – UNESP – Campus de Jaboticabal, e aos colegas de laboratório em especial Stela Basso Montoro pela ajuda nos experimentos.

Ao Departamento de Água e Esgoto de Penápolis pela presteza e disponibilização dos dados de resíduos sólidos do município de Penápolis

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo, que através de seu programa de incentivo a capacitação docente propiciou condições para que este trabalho fosse desenvolvido.

Aos amigos e companheiros de tantas viagens semanais, e as muitas madrugadas em que passamos na estrada.

A todos os amigos e familiares pelos momentos em que precisei me ausentar para que este objetivo fosse alcançado.

“Produzem-se anualmente centenas de milhões de toneladas de resíduos, muitos deles não biodegradáveis. A terra, nossa casa, parece transformar-se cada vez mais num imenso depósito de lixo. A resolução desta questão seria uma maneira de contrastar a cultura do descarte que acaba por danificar o planeta inteiro, mas nota-se que os progressos neste sentido são ainda muito escassos. ”

Papa Francisco, **Carta encíclica LAUDATO SI' sobre o cuidado da casa comum**, Paulus Editora, 1 ed., 2015.

RESUMO

Neste estudo objetivou-se analisar o potencial de produção de biogás e biofertilizante do processo de co-digestão anaeróbia do substrato composto pela fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) e dejetos de gado bovino leiteiro (DGBL) utilizando biodigestores batelada com capacidade de 2 L e biodigestores semicontínuos com capacidade de 60 L. Os resultados dos biodigestores semicontínuos foram aplicados em um estudo de caso tendo como base os dados de coleta de resíduos sólidos urbanos da cidade de Penápolis-SP co-digerido com estrume de 40 vacas e apresentou como resultado dados para dimensionamento de biodigestor com potenciais de produção de biogás e biofertilizante, e potencial de geração de energia elétrica. Para análise dos dados considerou-se um delineamento inteiramente casualizado, utilizando-se o programa SAS® ao nível de significância de 5%. Foram analisadas a produção, o potencial de produção de biogás, a redução dos sólidos totais e voláteis e os teores dos nutrientes Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK) do biofertilizante. O experimento em batelada constou de 11 tratamentos com proporções diferentes de FORSU (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%) com quatro repetições cada e apresentou potencial médio de produção de biogás de 0,38 m³/kg SV ad, com uma redução de sólido voláteis de 63,82% e biofertilizante com teores médios de NPK nos valores 3,14%, 0,87% e 1,26%, respectivamente, em um período de 192 dias para o tratamento T20. O experimento em biodigestores contínuos foi composto de 2 tratamentos, sendo um composto por 90% de FORSU, 10% DGBL e de água e outro tratamento de controle somente com DGBL e água, com 5 repetições para cada tratamento. Concluiu-se que para alimentação em batelada o limite de FORSU para geração de biogás é 30%. O biodigestor semicontínuo com uma proporção FORSU e DGBL de 90% -10%, produz 1m³ de biogás com 36,23 kg de FORSU com um potencial de produção de biogás de 0,117 m³/kg de SV ad.

Palavras-chave: biogás, resíduos sólidos urbanos, biodigestão anaeróbia, co-digestão dejetos bovinos

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the biogas and biofertilizer production potential of the anaerobic codigestion process of the substrate composed of organic fraction of urban solid waste (FORSU) and bovine milk waste (DGBL) using batch biodigesters with a capacity of 2 L and semi-continuous biodigesters with a capacity of 60 L. The results of the semicontinuous biodigesters were applied in a case study based on the data of urban solid waste collection of the city of Penápolis-SP digested with manure of 40 cows and presented as result data for dimensioning of biodigester with potential of biogas production and biofertilizer, and potential of electric energy generation. For data analysis, a completely randomized design was used, using the SAS® program at a significance level of 5%. Production, biogas production potential, total and volatile solids reduction and Nitrogen, Phosphorus and Potassium (NPK) nutrient content of the biofertilizer were analyzed. The batch experiment consisted of 11 treatments with different proportions of FORSU (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% and 100%) with four replicates each with an average biogas production potential of $0.38 \text{ m}^3 / \text{kg SV ad}$, with a reduction of 63.82% volatile solids and biofertilizer with NPK mean values of 3.14%, 0.87% and 1.26%, respectively, over a 192 day period for the T20 treatment. The experiment in continuous biodigesters was composed of 2 treatments, one composed of 90% FORSU, 10% DGBL and water and another control treatment with only DGBL and water, with 5 replicates for each treatment. The study concludes that for batch feeding the FORSU limit for biogas generation is 30%. The semi-continuous biodigester with a FORSU and DGBL ratio of 90% -10% produces 1 m^3 of biogas with 36.23 kg of FORSU with a biogas production potential of $0.117 \text{ m}^3/\text{kg}$ of SV ad.

Keywords: biogas, urban solid waste, anaerobic biodigestion, co-digestion of bovine manure

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Destinação Final de RSU coletado no Brasil	28
Figura 2 - Destinação final RSU coletados em Penápolis	29
Figura 3 - Disposição final do RSU coletado no Brasil por tipo de destinação (t/dia)	30
Figura 4 - Processo de degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbia	32
Figura 5 - Lixo Orgânico Recolhido do Restaurante.....	42
Figura 6 - Localização de Penápolis	43
Figura 7 - Entrada da Central de Tratamentos de Resíduos.....	45
Figura 8 - Balança para pesagem dos caminhões	46
Figura 9 - Foto dos Biodigestores Batelada	47
Figura 10 - Biodigestores Contínuos	49
Figura 11 - Produção de biogás diária dos tratamentos T0 a T30.....	59
Figura 12- Produção de biogás diária dos tratamentos T40 a T100.....	60
Figura 13 - Produção Total de Biogás FORSU+DGBL - Biodigestor Batelada	61
Figura 14 - Redução dos sólidos de FORSU+DGBL em biodigestores batelada.	65
Figura 15- Produção média diária de Biogás em biodigestores contínuos.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de produção de biogás e Metano de cinco espécies de animais durante a fase de produção.....	34
Tabela 2 - Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia	35
Tabela 3 - Taxas relativas de produção de biogás e produção de metano da co-digestão de resíduos sólidos orgânicos	39
Tabela 4 – Destinação do RSU coletado em Penápolis.....	46
Tabela 5 - Composição dos 11 tratamentos dos biodigestores batelada	48
Tabela 6 - Composição do tratamento dos biodigestores semicontínuos	51
Tabela 7 - Produção de Biogás de FORSU+DGBL em biodigestores batelada...	58
Tabela 8 - Médias de Potencial de Produção de Biogás - Biodigestor Batelada..	62
Tabela 9 - Percentual de Redução de ST-Biodigestores Batelada	63
Tabela 10 - Percentual de Redução de SV - Biodigestores Batelada	64
Tabela 11 – Teores de macro nutrientes nos efluentes dos biodigestores batelada	66
Tabela 12 - Produção de Biogás de FORSU+DGBL em biodigestores Semicontínuos.....	68
Tabela 13 – Medidas do Potencial de Produção de Biogás em Biodigestores semicontínuos em m ³ por kg.....	68
Tabela 14- Percentual de Redução de SV	69
Tabela 15 - Percentual de Redução de ST em Biodigestores semicontínuos.....	70
Tabela 16 – Teores de macro nutrientes nos efluentes dos biodigestores semicontínuos	70
Tabela 17 - Composição da carga diária do biodigestor	71
Tabela 18 – Volume útil do biodigestor e da lagoa de armazenamento de efluente	72
Tabela 19 - Produção diária de biogás.....	72
Tabela 20 – Produção de energia elétrica.....	73
Tabela 21 – Equivalência de NPK no efluente com fertilizantes	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ad	Adicionados
CH ₃ COOH	ácido acético
CH ₄	Metano
Cm	Centímetros
CO ₂	gás carbônico
DGBL	dejetos de gado bovino leiteiro
DIC	delineamento inteiramente casualizado
FORSU	fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos
G	Gramas
GEE	gases de efeito estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H ₂	Hidrogênio
kg	Quilograma
KVA	Quilovoltampere
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
m ³	metro cúbico
mm	Milímetros
°C	graus Celsius
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos .
PS	peso seco
Pu	peso úmido
RSU	resíduos sólidos urbanos
ST	sólido totais
STV	sólidos totais e voláteis
SV	sólidos voláteis
T	Tara
T/dia	Toneladas por dia
TRH	tempo de retenção hidráulica
TRM	tempo de retenção de microrganismos
TRS	tempo de retenção de sólidos

SUMÁRIO

1. Introdução	23
2. Revisão da Literatura	26
2.1. Resíduos sólidos Urbanos	26
2.2. Bovinocultura leiteira	30
2.3. Biodigestão anaeróbia	31
2.3.1. Biodigestores	33
2.3.2. Produção de Biogás	34
2.3.3. Co-digestão	36
2.3.4. Biofertilizante	40
3. Material e Métodos	41
3.1. Descrição do local	41
3.2. Descrição do Experimento	41
3.3. Ensaio de biodigestores bateladas	47
3.3.1. Descrição dos Biodigestores	47
3.3.2. Descrição dos tratamentos e Preparo das cargas	48
3.4. Ensaio de biodigestores semicontínuos	49
3.4.1. Descrição dos Biodigestores	49
3.4.2. Descrição dos tratamentos e preparo das cargas	50
3.5. Metodologias aplicadas	51
3.5.1. Teores de Sólidos Totais (ST)	51
3.5.2. Teores de Sólidos Voláteis (SV)	51
3.5.3. Determinação do volume de biogás e potenciais de produção	52
3.5.4. Digestão sulfúrica e determinação dos minerais	53
3.5.5. Delineamento experimental	53
3.5.6. Cálculo das dimensões do biodigestor e da lagoa de efluente	54
3.5.7. Cálculo da capacidade de produção de biogás	56
3.5.8. Cálculo de potencial de geração de energia elétrica	56
3.5.9. Cálculo de produção de Biofertilizante	56
3.5.10. Estimativa de emissão de Gás de Aterro Sanitário	57
4. Resultados e discussão	58

4.1. Ensaio bateladas	58
4.2. Ensaio semicontínuo.....	66
4.3. Estudo de Caso do município de Penápolis/SP.....	71
4.3.1. Dimensionamento do Biodigestor e da lagoa de efluente	71
4.3.2. Capacidade de produção de biogás	72
4.3.3. Capacidade de geração de energia elétrica	72
4.3.4. Capacidade de produção de Biofertilizante	74
4.3.5. Estimativa de ganho ambiental.....	74
5. Conclusões.....	76
6. Referências	77

1 Introdução

A intervenção humana na sociedade contemporânea tem causado situações que afetam diretamente a qualidade de vida das pessoas e o meio ambiente. Questões relacionadas a qualidade do ar, utilização correta dos recursos hídricos, sistemas alternativos para configuração da matriz energética, gestão adequada de resíduos sólidos, otimização de processos produtivos, e até mesmo a desigualdade financeira dos povos devem ser debatidos prioritariamente por toda a sociedade (FERREIRA, SILVA, 2009).

A gestão adequada de resíduos sólidos e a necessidade de reestruturar a matriz energética com a geração de energia limpa, são dois grandes desafios para os gestores públicos realizarem uma administração pautada no desenvolvimento de forma sustentável.

O aumento da emissão de metano e dióxido de carbono tem sido uma das causas do aumento do efeito estufa, que tem como uma das fontes emissoras, os aterros e lixões que contribuem para a poluição atmosférica e o agravamento deste efeito.

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, feito pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, em 2016, cada brasileiro produziu 1,04 quilograma de lixo em média por dia. No País, foram coletadas diariamente 195.452 toneladas de resíduos sólidos. Desse total, 41,6% tiveram destino inadequado, pois foram para os lixões ou aterros controlados que o Brasil ainda possui, totalizando 81.263 toneladas por dia (ABRELPE, 2017).

Kroeger et al. (1998), relata que 30% do lixo urbano e uma grande proporção de resíduos industriais pode ser biologicamente tratados via compostagem e biodigestão anaeróbia. A biodigestão anaeróbia é um eficiente método de tratamento de resíduos, no qual aproveitam-se os resíduos de origem orgânica, tratando-os, seja na sua forma sólida ou líquida, evitando assim, o descarte dos resíduos em lixões e aterros.

Esta forma de tratamento de resíduos produz o biogás, composto basicamente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), que são gases causadores de efeito estufa (GEEs), e podem ser utilizados na geração de energia elétrica, térmica ou mecânica.

A lei nacional de Resíduos Sólidos (lei 12305, 2/08/2010) define que as autoridades públicas são responsáveis pela gestão da limpeza urbana, da coleta e disposição final do lixo. Além disso, as autoridades municipais devem estabelecer a coleta seletiva dos recicláveis e sistemas de compostagem para resíduos orgânicos (BRASIL, 2010).

A coleta, o destino final e o tratamento de resíduos urbanos, perigosos e industriais, entre outros, são itens disciplinados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aprovada em agosto de 2010, que estabelece metas importantes para o setor, como o fechamento dos lixões até 2014, o encaminhamento dos rejeitos para aterros sanitários e a elaboração de planos municipais de resíduos.

Como parte integrante deste cenário, em que a gestão sustentável apresenta-se como um diferencial para a solução dos problemas dos resíduos sólidos, a cidade de Penápolis-SP, aparece como um exemplo de município que tem se preocupado com ações sustentáveis, contando com uma central de tratamento de resíduos, composta por uma cooperativa de recicladores de papel, aterro sanitário, aterro de inertes, lagoas de tratamento de esgoto, unidade de tratamento de resíduos de serviços de saúde, área para destinação de animais mortos, ecopontos para destinação de resíduos de entulhos, podas de árvores e materiais recicláveis, e um trabalho intenso de conscientização ambiental por meio do centro de educação ambiental. Estas ações de gestão ambiental classificaram o município em 5º lugar no ranking do Programa Município Verde Azul, para cidades entre 50 e 100 mil habitantes em 2016.

Atualmente o aterro sanitário da cidade de Penápolis possui capacidade de armazenamento para mais 7 anos e uma das soluções para aumentar o tempo de vida útil dos aterros sanitários é a redução do volume de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), na qual a biodigestão anaeróbia do RSU aparece como uma alternativa favorável a esta demanda ao converter a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos - FORSU em energia e biofertilizante (CARNEIRO, 2009).

Outro fator que tem contribuído para o aumento da emissão de GEE, é o crescimento das atividades agropecuárias, que adotando sistemas intensivos de produção, como confinamentos, tem como consequência o aumento no volume de dejetos, e que de acordo com o levantamento feito no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos de Penápolis, são resíduos que mais preocupam com relação a pecuária, devido a necessidade de tratamento adequado.

O impacto ambiental é ainda maior se os dejetos forem descartados no ambiente de forma inadequada. Para minimizar a possibilidade de contaminação de rios e pastagens, é de fundamental importância a adoção de práticas de manejo e a utilização de sistemas de reciclagem de dejetos, como biodigestão anaeróbia e compostagem.

Mediante aos pressupostos apresentados, este estudo tem como objetivo, avaliar a produção de biogás, o potencial de produção de biogás e a redução dos teores sólido voláteis (SV) e sólidos totais (ST), a partir da mistura composta pela fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos co-digeridos com dejetos de gado bovino leiteiro, utilizando inicialmente biodigestores batelada para verificação de produção de biogás e redução de sólidos, e biodigestores semicontínuos manejados com 30 dias de retenção hidráulica, para simulação de uma escala real tendo como base a demanda da FORSU do município de Penápolis.

2 Revisão da Literatura

2.1. Resíduos sólidos Urbanos

A palavra lixo tem sua origem do latim *lix*, que significa *lixívia* ou cinzas. De acordo como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, lixo é definido como:

[...] rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada [...].
[...] resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semisólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível [...].(BRASIL, 2010, Não paginado).

Segundo o manual de Resíduos Sólidos (ABRELPE,2017), os RSU apresentam um fluxo básico de resíduos para todos os países ao redor do mundo.

A disposição final do RSU pode ser feita de forma adequada, em aterros sanitários, ou de forma inadequada, em aterros controlados e lixões. Nos lixões os resíduos sólidos são depositados a céu aberto sem nenhum tratamento adequado para o lixo e traz como resultado a contaminação da água, do ar, do solo e do lençol freático, além de atrair vetores de doenças.

Segundo a norma NBR 8849 da Associação Brasileira de Normas Técnicas,

Aterro controlado é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Esse método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (ABNT,1985).

Uma definição semelhante é dada pela NBR 8419 da Associação Brasileira de Normas Técnicas ao conceito de Aterro Sanitário

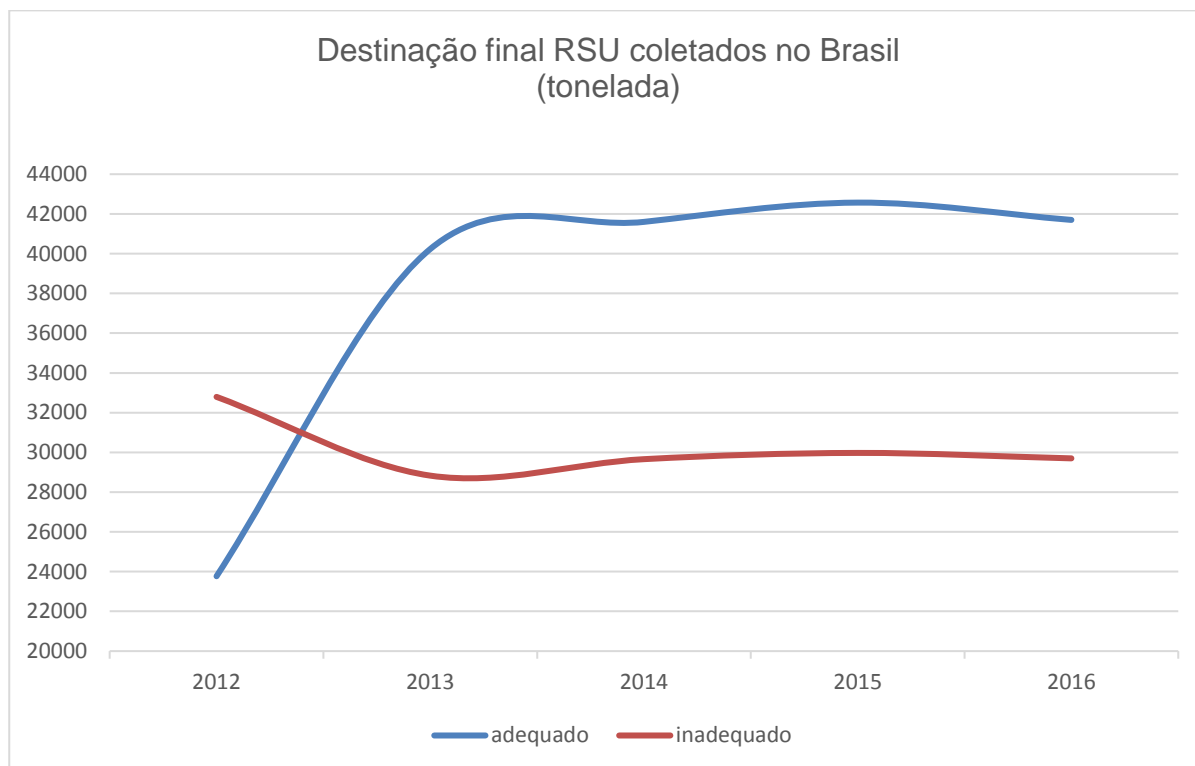
Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT,1992).

A diferença entre o aterro controlado e o aterro sanitário é que o aterro sanitário possui um controle de manipulação e depósito dos resíduos, com impermeabilização da base para proteção do solo e águas subterrâneas, controle de drenagem e tratamento de percolado (chorume mais água de infiltração), sistema de extração e queima controlada dos gases gerados e acesso restrito.

Em 2016, a geração de RSU no Brasil foi de 214.405 toneladas por dia, representando uma redução de 2% com relação a 2015. A população brasileira apresentou um crescimento de 0,8% no mesmo período, mas o valor per capita por dia passou de 1,071 kg em 2015 para 1,041 kg em 2016, totalizando uma queda de 2,9%.

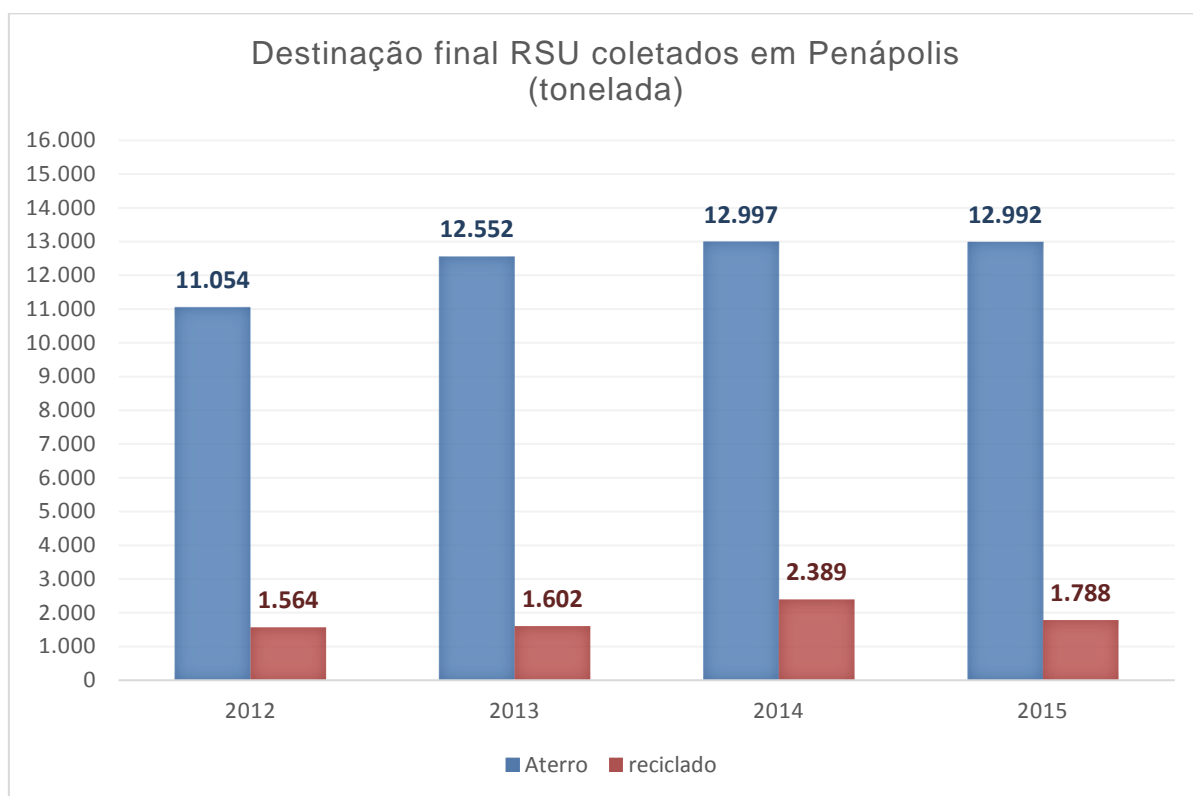
Os dados relacionados à coleta de RSU no Brasil, apresentaram um índice negativo de 1,7%, condizente com a queda na geração de RSU, com um total de 195.452 toneladas coletadas dia (t/dia). Comparando a quantidade de RSU gerada com o montante coletado em 2016, que foi de 71,3 milhões de toneladas por ano, é possível calcular um índice de cobertura de coleta de 91% para o país. Este índice mostra que cerca de 7 milhões de toneladas de resíduos não são coletados e são descartados inapropriadamente (ABRELPE,2017).

A Figura 1 mostra que de 2013 a 2016 a disposição final de RSU coletados no Brasil apresentou-se estável com valores entre 58 e 59% dos resíduos sendo encaminhados para aterros sanitários, que se constituem como unidades adequadas, e cerca de 81.000 toneladas de resíduos por dia destinadas a unidades inadequadas como lixões e aterros controlados em 2016.

Figura 1 - Destinação Final de RSU coletado no Brasil

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2017)

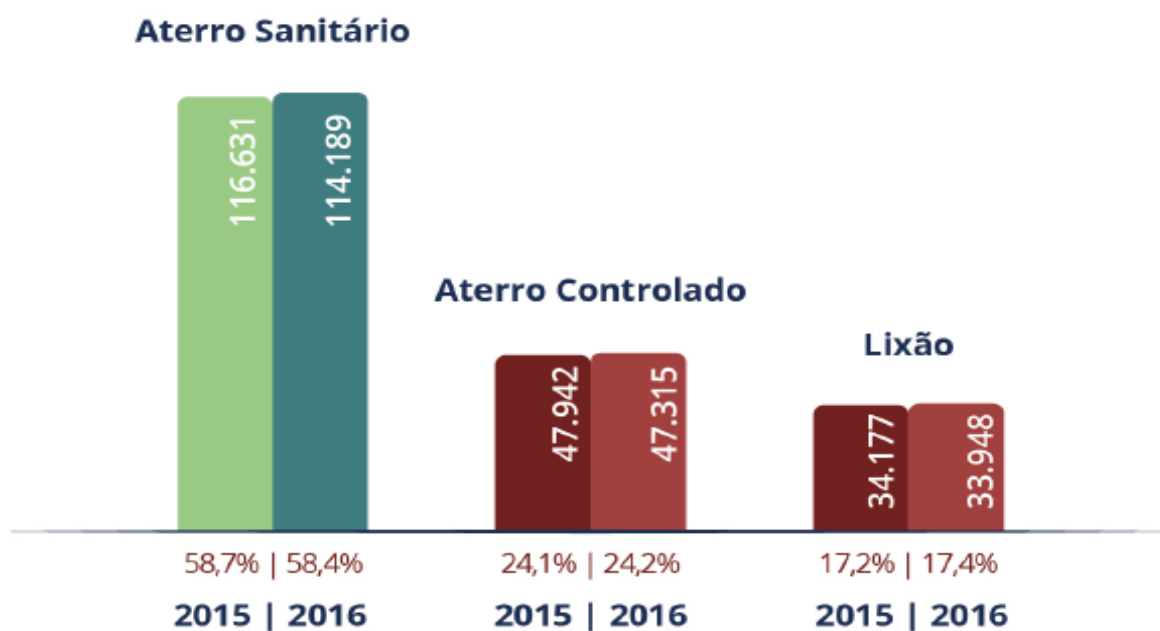
Considerando o cenário da cidade de Penápolis, os números informados pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Penápolis – DAEP, 100% do RSU coletado na cidade tem destinação adequada e, em 2015, houve uma queda de aproximadamente 3,9% na coleta de RSU, como mostra a Figura 2, ocasionando uma redução de 0,730kg de RSU por habitante por dia em 2014 para 0,702 kg por habitante por dia em 2015.

Figura 2 - Destinação final RSU coletados em Penápolis

Fonte: DAEP (2016)

Os dados sobre a disposição final de RSU no Brasil em 2016, apresentaram um retrocesso evolução no percentual dos resíduos que são adequadamente dispostos com relação a 2015, como mostra a Figura 3, que ilustra a disposição final do RSU por tipo de destinação.

Figura 3 - Disposição final do RSU coletado no Brasil por tipo de destinação (t/dia)



Fonte: ABRELPE (2017)

A decomposição da matéria orgânica do aterro tem como resultado chorume e a produção de gás, composto em maior quantidade por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), e traços de hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S),

O processo de biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos é uma alternativa para redução da emissão dos gases e redução da quantidade de matéria orgânica enviada para aterros sanitários.

2.2. Bovinocultura leiteira

De acordo com os dados do IBGE, em 2015 a produção de leite no Brasil foi de 35 bilhões de litros com um efetivo de vacas ordenhadas de 21,75 milhões de animais. A produtividade média foi de 1 609 litros/vaca/ano, com um crescimento de 5,5% em relação a 2014. Foram registradas 1,3 milhão de propriedades produzindo leite distribuídas em aproximadamente 99% dos municípios brasileiros (IBGE, 2015).

O Brasil tem como característica as criações extensivas com pequenos rebanhos, com uma baixa produção leiteira na maioria de suas propriedades, e manejo de dejetos por meio de raspagem do piso. A maior parte da produção de leite do país

concentra-se em um pequeno percentual de produtores com grandes rebanhos com criações intensivas a pasto ou confinamentos.

A cidade de Penápolis apresentou em 2015 um rebanho bovino de 21.212 cabeças de gado em 375 estabelecimentos agropecuários, com 3800 vacas ordenhadas e uma produção de 3.115.000 litros de leite (IBGE, 2015).

As vacas leiteiras produzem dejetos que representam de 8 a 11% do peso vivo do animal e 33% da energia total ingerida pelas vacas (VAN HORN, 1994). Esta energia pode se tornar uma fonte poluidora, quando não existe o manejo correto dos dejetos (LUCAS JUNIOR, 1994).

Os dejetos dos bovinos apresentam uma grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes, o que caracteriza um material de grande potencial de utilização como substrato para os processos biológicos de reciclagem. O desperdício destes dejetos causa impacto negativo ao meio ambiente e representa um prejuízo significativo para o produtor rural, pois a utilização dos produtos oriundos destes processos pode atender algumas necessidades básicas dos produtores rurais aumentar os lucros com a atividade (LUCAS JUNIOR, 1994; FERREIRA, 2013).

Segundo Matos (2010), os dejetos têm grande valor fertilizante em sua constituição, apresentam grande quantidade de macro e micronutrientes e devem ser aproveitados em cultivos agrícolas. Entretanto, quando a aplicação é feita sem que se utilizem critérios técnicos, haverá riscos de salinização do solo ou, em regiões de solo mais impermeável e, ou maiores índices pluviométricos, de poluição de águas superficiais e subterrâneas.

Os resíduos de origem orgânica podem ser tratados via compostagem ou por biodigestão anaeróbia. A biodigestão anaeróbia permite a recuperação de energia por meio da produção de biogás, e reduz o potencial poluente do efluente com o biofertilizante, que pode ser utilizado como adubo de culturas vegetais (LUCAS JR., 1994; FERREIRA, 2013).

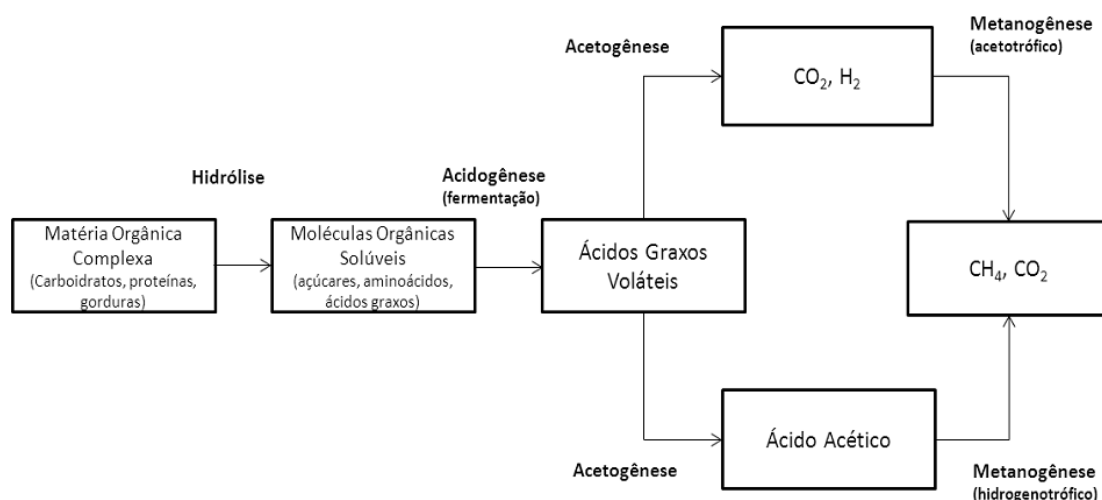
2.3. Biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é um processo biológico natural para tratamento de resíduos na forma sólida ou líquida, eficiente na redução do poder poluente do efluente e os riscos sanitários advindos dos mesmos (HILL, 1980). Este processo ocorre na ausência de oxigênio molecular, onde se tem consórcios de diferentes tipos de

microrganismos interagindo estreitamente para promover a transformação de composto orgânico complexos, em simples (STEIL, 2001).

A biodigestão anaeróbia ocorre a partir da ação de um conjunto de microrganismos anaeróbicos (RAPPORT et al., 2008), que degradam o material orgânico na ausência de oxigênio, CO_2 e CH_4 . O processo de biodigestão anaeróbia ocorre em quatro etapas, ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Processo de degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbia



Fonte: RAPPORT et al. (2008)

A hidrólise é a conversão de polímeros, que são materiais orgânicos complexos como as proteínas, gorduras e carboidratos, em materiais mais simples, monômeros, que compreendem substâncias como a glicose, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa, e assim podem passar pelas paredes celulares das bactérias fermentativas (CHERNICHARO, 1997). A acidogênese é a fermentação dos Monômeros para a formação de Ácidos Graxos de três a cinco carbonos (como o ácido butírico, o propanoico e o valérico). O processo de acetogênese gera ácido acético (CH_3COOH), hidrogênio (H_2) e CO_2 devido ao consumo dos produtos da acidogênese por bactérias. A metanogênese é a etapa onde se encontra o grupo de microrganismos fundamental nesse processo, pois caracteriza-se pelo consumo de acetato (CH_3COO), do H_2 , e de parte do CO_2 , por microrganismos metanogênicos, para a produção de CH_4 . (LUCAS JR, 1994).

Alguns fatores como temperatura, tempo de retenção hidráulica (TRH), teor de concentração dos sólidos, afetam diretamente o processo de a biodigestão anaeróbia.

A temperatura é um fator de grande influência no processo e pode ocorrer em três faixas: psicrófila (até 25°C), mesófila (de 25 a 40°C) e termófila (acima de 40°C) (BOUALLAGUI et al., 2004). Outro fator importante no processo de biodigestão é o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), que é entendido como o intervalo de tempo necessário de permanência do afluente para que ocorra o processo de biodigestão de maneira adequada. (FUKAYAMA, 2008). Tratamentos como inoculação, agitação e separação de sólidos podem ser utilizados para digestão de matérias mais difíceis, que apresentam degradação lenta (LUCAS JUNIOR et al. 1993).

2.3.1. Biodigestores

O biodigestor é uma câmara construída para produção do meio anaeróbio ideal ao desenvolvimento dos microrganismos que possuem a capacidade de digerir a matéria orgânica de esgotos domésticos, efluentes industriais ou resíduos agropecuários e transformá-la em outras substâncias mais simples, que são metabolizadas, resultando na mistura de gases (biogás) (LUCAS JR, 1994).

A utilização do biodigestor tem como benefício o aproveitamento dos dejetos de animais na produção de biogás e biofertilizante, a preservação do meio ambiente da saúde humana e animal.

Segundo Benincasa et al. (1991), existem biodigestores que são alimentados descontinuamente, chamados biodigestores descontínuos ou em batelada, são abastecidos de uma só vez, mantidos fechados por um determinado período para fermentação da matéria orgânica que será descarregada posteriormente. Biodigestores do tipo batelada são indicados para o tratamento de resíduos obtidos com uma certa periodicidade, como por exemplo a cama de frangos, que é retirada do galpão após a saída do lote, gerando uma grande quantidade de substrato em determinados períodos. Dependendo do volume de matéria prima a ser processada, podem ser instalados em tanques anaeróbios individuais ou em série.

Os biodigestores alimentados periodicamente são denominados biodigestores semicontínuos, devido ao fato de que a carga diária, corresponde uma carga de volume semelhante de material fermentado que será descarregado, com um tempo de retenção que varia de 30 a 50 dias. A biomassa no interior do biodigestor se movimenta por diferença de carga hidráulica, entre a entrada do substrato e a saída do biofertilizante no momento do carregamento (LUCAS JUNIOR, 1995).

2.3.2. Produção de Biogás

Segundo Pecora (2006), é possível produzir o biogás a partir de uma vasta variedade de resíduos orgânicos, como o lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. Para que se possa produzir um metro cúbico de biogás, Barreira (1993) ressalta que são precisos:

- a) 25 kg de esterco fresco de vaca ou;
- b) 5 kg de esterco seco de galinha ou;
- c) 12 kg de esterco de porco ou;
- d) 25 kg de plantas ou cascas de cereais ou;
- e) 20 kg de lixo.

Cada tipo de dejetos tem uma produção específica de biogás, que é dada em m³ de biogás por kg de sólidos voláteis (SV).

O estudo realizado por Orrico Júnior et al. (2011), selecionou cinco espécies de animais de interesse agropecuário durante a fase de produção e teve como objetivo comparar a produção de resíduo e potencial de emissão de metano, a partir da fermentação dos resíduos. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para potencial de produção de Biogás e Metano para cada uma das espécies.

Tabela 1 – Potencial de produção de biogás e Metano de cinco espécies de animais durante a fase de produção

Espécie	m ³ /kg de SV	
	Biogás	Metano (CH ₄)
Suíno	0,65718	0,42716
Bovino corte	0,33909	0,23736
Caprino	0,26029	0,13304
Ave postura	0,58523	0,46983
Cama de frango	0,42127	0,33870

Fonte: Adaptado de Orrico Júnior et al (2011)

A composição do biogás é basicamente de 50% a 80% de metano, 20% a 40% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, monóxido de carbono, oxigênio, nitrogênio, gás sulfídrico e amônia. Seu poder calorífico pode atingir de 5.000 a 7.000 kcal/m³ devido a variação de sua composição, que está relacionada com a eficiência do processo de biodigestão e o tipo de matéria orgânica

fermentada (GASPAR, 2003; NISHIMURA, 2009). A Tabela 2 ilustra a equivalência de 1m³ de biogás com relação a outros energéticos.

Tabela 2 - Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia

Energético	Ferraz & Mariel (1980)	Sganzerla (1983)	Nogueira (1986)	Santos (2000)
Gasolina (L)	0,61	0,61	0,61	0,60
Querosene (L)	0,58	0,58	0,62	-
Diesel (L)	0,55	0,55	0,55	0,62
GLP (kg)	0,45	0,45	1,43	-
Álcool (L)	-	0,79	0,8	-
Carvão min (kg)	-	0,73	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,54	3,5	1,64
Eletricidade (kwh)	1,43	1,43	-	6,54

Fonte: Machado (2011)

O tratamento da FORSU em biodigestores oferece melhores condições operacionais quando comparado ao tratamento em aterro sanitário, pois o biodigestor não causa problemas de maus odores e utiliza espaços físicos relativamente pequenos.

O percentual de biodegradação da FORSU foi observado nos resultados apresentados por Foster-Carneiro et al., 2008, atingindo um potencial de redução dos Sólidos Voláteis de 79,5%, no experimento que investigou a influência de diferentes frações de resíduos sólidos urbanos em um tratamento anaeróbio em condições termofílicas (55° C).

O estudo feito por Zhang et al. (2012) examinou por 284 dias o rendimento energético e as características digestivas de duas frações de resíduos urbanos que foram separadas e direcionadas para recuperação de recursos por meio do processo de biodigestão. A primeira foi a fração orgânica de resíduos recuperados por triagem mecânica pós-coleta. A segunda foi recolhida separadamente em domicílios familiares em sacos de amido de milho biodegradáveis. Os resíduos sólidos foram triturados e diluídos em água a um teor de Sólidos de 5%. Os resultados mostraram uma concordância onde a fração separada mecanicamente apresentou geração de biogás de 0,349 m³/kg⁻¹ SV ad com 61% de metano enquanto que a domiciliar apresentou 0,467 m³/kg⁻¹ SV ad com 60,4%.

A utilização de processos anaeróbios para o tratamento de RSU possui as seguintes vantagens: (SPEECE, 1996; BRABER, 1995)

- Aumento da vida útil dos aterros sanitários;
- Retirada da FORSU que é a fração que resulta em odores desagradáveis e geração de lixiviados de alta carga nos aterros;
- Minimização da emissão de gases de efeito estufa;
- Possibilidade de coleta de todo o biogás gerado;
- Poucos requisitos funcionais para a fase de fermentação;
- Baixo ou nenhum gasto de energia;
- Aplicação de Elevadas cargas orgânicas
- Não necessita de uma grande área de implantação

A utilização de biodigestores com FORSU requer um tempo maior para bioestabilização do material, e a utilização de inoculo tem mostrado resultados satisfatórios para redução deste período. O dejetos bovino apresenta-se como um bom substrato para o desenvolvimento da biodigestão anaeróbia, por conter carboidratos, proteínas, gorduras (AHRING et al., 2001) e os micro-organismos necessários para dar a partida no processo.

Sganzerla (1983) recomenda que, sempre que possível, a primeira carga de biomassa nos biodigestores, seja de esterco bovino por apresentarem característica de propiciar a rápida proliferação das bactérias metanogênicas, obtendo produção de biogás em menor espaço de tempo que os dejetos de outros animais.

2.3.3. Co-digestão

A co-digestão é o consórcio de um resíduo orgânico a outros resíduos que podem ser ricos em carboidratos ou microrganismos, como caldo de cana, vinhaça, esterco bovino e de galinha entre outros. Co-digestão é um termo utilizado para descrever o tratamento combinado de resíduos com várias características complementares, caracterizando uma das principais vantagens da tecnologia anaeróbia (FERNÁNDEZ, 2005).

A co-digestão ou utilização de inoculo na digestão anaeróbia da FORSU é uma estratégia que combina o tratamento de diferentes resíduos como o lodo de esgoto, estrume, e resíduo digerido.

A técnica de co-digestão permite a utilização de instalação existente, aumentando a produção de biogás e da energia produzidas nas unidades de co-digestão, com isso não se tem custo com novas instalações (GÓMEZ et al. 2006).

Segundo Orrico et al. (2016), os dejetos de bovinos leiteiros, quando associados a outros resíduos com acelerada taxa de degradação, podem aumentar o seu potencial de produção de biogás.

Leite et al. (2003) obtiveram como resultado a geração de biogás com cerca de 60% de gás metano utilizando reatores anaeróbios em batelada com capacidade unitária de 2200 litros. O processo de bioestabilização utilizou como substrato, resíduos sólidos orgânicos tipicamente vegetais, advindos de centrais de abastecimento, feiras livres, co-digerido com lodo de esgoto sanitário, com tempo de detenção de sólidos variando de 250 a 300 dias.

Hartmann e Ahring (2005), analisaram a influência da co-digestão utilizando dejetos, investigando a biodigestão anaeróbia de FORSU com estrume em uma proporção 1:1, em um biodigestor semicontínuo com capacidade para 3 L. O potencial de produção apresentado após 83 dias foi de 0,63 m³/kg de SV de biogás e 74% de redução dos SV.

Um estudo feito por Felizola (2006) utilizando processo de co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos com baixa concentração de sólidos, apresentou uma produção de metano no biogás gerado com valores próximos de 66% e uma eficiência de remoção média de sólidos totais e voláteis STV de 97%. O estudo utilizou um reator anaeróbio contínuo compartimentado (RAC) com capacidade de 1000 litros, operado durante um período de 330 dias, tendo como substrato a fração orgânica putrescível oriunda de resíduos sólidos urbanos, lodo de esgotos sanitários, na proporção de 80 e 20%,

A pesquisa realizada por Foster-Carneiro et al. (2007), teve como objeto de estudo a biodigestão anaeróbia termofílica seca de FORSU de um restaurante, utilizando 6 reatores do tipo batelada com capacidade de 1,1L, com substratos de inoculação diferentes. A ênfase foi o estudo comparativo do desempenho dos seis reatores em escala laboratorial durante a partida e em estado estacionário a uma temperatura de 55°C, utilizando seis diferentes fontes de inoculo (25% da inoculação): (1) de silagem

de milho (CS); (2) os resíduos restaurante digerido misturado com casca de arroz (RH_OFMSW); (3) excrementos de gado (bovinos); (4) dejetos suíno (suínos); (5) lodo municipal digerido (Lodo); e (6) suínos misturado com lodo em escala (1:1) (Suínos / lodo). A pesquisa concluiu que no final do processo, entre 30 e 60 dias, os reatores de Lodo, Suíno e Suíno/Lodo tiveram o melhor desempenho na produção de biogás produzindo respectivamente 78,9, 69,5 e 61,5 ml/dia.

Barcelos (2009) relata que em sua pesquisa realizada com FORSU, utilizou como inoculo na biodigestão anaeróbia, reatores com esterco bovino, esterco suíno, rumem bovino e um reator de controle só com FORSU. O estudo foi realizado em 167 dias, utilizou reatores com capacidade de 5 litros e mostrou que o reator com FORSU e rumem bovino teve uma eficiência maior na produção de gás, mas concluiu que a quantidade de inoculo utilizada nos biorreatores não favoreceu o equilíbrio do processo de digestão e as taxas de degradação dos reatores com inoculo foram menores do que o reator de controle.

Caramelo (2010) utilizou para a produção de biofertilizante e biogás, resíduos orgânicos compostos por lixo orgânico e esterco fresco, triturados e homogeneizados, com diluição em 8% de sólidos totais, com os tratamentos de lixo orgânico urbano (LOU), de lixo orgânico urbano + 25% de esterco bovino (EB25%) e de lixo orgânico urbano + 50% de esterco bovino (EB50%), em 9 biodigestores do tipo batelada de 6L com 90 dias de retenção hidráulica. O potencial de produção de biogás por kg de resíduo obtido no experimento foi em média 0,07; 0,08 e 0,11 m³ diários para os substratos LOU, EB25% e EB50%, mostrando que os tratamentos co-digeridos apresentaram produção superior ao tratamento somente de lixo orgânico urbano.

Um estudo de co-digestão anaeróbia por realizado por Ponsá et al. (2011), analisou a produção de metano de reatores de FORSU co-digeridos com substratos orgânicos puros, utilizando reatores com mistura de óleo vegetal, gordura animal, celulose e proteína. O experimento concluiu que os quatro co-substratos utilizados levaram a melhorias, mas o óleo vegetal foi o co-substrato mais adequado para ser digerido por via anaeróbia por ter alcançado uma produção de 450l CH₄ kg⁻¹ SV ad em 21 dias, representando um rendimento de 25% acima do apresentado pelo reator de controle.

A Tabela 3 mostra uma revisão de estudos de co-digestão utilizando misturas de resíduos agrícolas, municipais e industriais que podem ser digeridas eficientemente em conjunto.

Tabela 3 - Taxas relativas de produção de biogás e produção de metano da co-digestão de resíduos sólidos orgânicos

Substrato	Co-substrato	Taxa de Prod. de Biogás (l/dia)	Prod. de metano (l/kg SV)	Comentários	Referências
Resíduos de Frutas e vegetais	Águas residuais de abatedouro	2,53	611	A adição de águas residuais de abate à matéria-prima aumentou o Rendimento de biogás em até 51,5%	Bouallagui et al. (2009a)
Resíduos sólidos urbanos	Óleo e gordura de estação de tratamento de esgoto	13,6	350	A co-digestão resultou num aumento de 72% na produção de biogás e 46% no rendimento de metano em comparação aos resíduos sólidos urbanos	Martin-Gonzalez et al. (2010)
Resíduos de Batata	Resíduos de Beterraba	1,63	680	Co-digestão melhorou o rendimento de metano até 62% em comparação com a digestão de resíduos de batata sozinho	Parawira et al. (2004)
Lama	Resíduos de Frutas e vegetais	4,4	600	A co-digestão produziu mais biogás em comparação com a lama primária sozinha	Gomez et al. (2006)
Lodo de Esgoto	Resíduos sólidos urbanos	3,0	532	Produção de biogás das misturas aumentou com o aumento das proporções resíduos sólidos urbanos	Sosnowski et al. (2003)
Resíduos de abatedouro	Resíduos sólidos urbanos	8,6	500	Produção de biogás do Sistema co-digestão de abatedouro dobrou com relação ao Sistema de digestão de resíduos sólidos urbanos	Cuetos et al. (2008)

Fonte: Adaptado de Khalid et al (2011)

2.3.4. Biofertilizante

O Decreto 86.955, de 18 de fevereiro de 1982 da legislação brasileira apresenta as seguintes definições:

[...] fertilizante são substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes das plantas”.

“nutriente é o elemento essencial para o crescimento e produção dos vegetais” [...]

[...] “Macronutrientes Primários são o nitrogênio, fósforo e potássio, expressos nas formas de nitrogênio (N), pentóxido de fósforo (P₂O₅) e óxido de potássio (K₂O)”. [...]

[...] “Biofertilizante é o produto que contenha princípio ativo ou agente capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade” [...] (BRASIL,1982).

De acordo com a Embrapa (2006), bio significa vida e fertilizante significa adubo, que contém organismos vivos que auxiliam no controle de doenças e também minerais que irão nutrir as plantas, podendo ser produzidos com qualquer tipo de matéria orgânica fresca (fonte de organismos fermentadores).

Após o processo de obtenção de biogás no interior do biodigestor, a biomassa fermentada deixa o interior do biodigestor sob a forma líquida com grande poder de fertilização. O resíduo de biomassa utilizado no processo transforma-se em biofertilizante, rico em nutrientes, com teores significativos de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

Segundo Sganzerla (1983, p. 25), no processo de biodigestão anaeróbia,

a matéria orgânica, perde exclusivamente carbono sob a forma de CH₄ (Metano) e CO₂ (gás Carbônico) e aumenta o teor de nitrogênio e demais nutrientes, o que eleva a capacidade de fertilização do biofertilizante.

O biofertilizante líquido é absorvido com maior facilidade pelo solo, pois este penetra diretamente na raiz da planta, não necessitando de água pluvial ou irrigação para dissolvê-lo e fornecer os nutrientes necessários à planta, como o biofertilizante sólido (MAGHANAKI et al,2013).

3 Material e Métodos

3.1. Descrição do local

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Biomassa e Biodigestão Anaeróbia do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (FCAV), UNESP – Campus de Jaboticabal, situado nas coordenadas geográficas: 21°14' 05" S; 48° 17'09" W e altitude média de 613,68m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Aw com transição para Cwa. Em Jaboticabal o clima caracteriza-se por ser tropical úmido, seco no inverno e com chuvas no verão, com precipitação anual de 1.426,6 mm, temperatura média anual de 22,2° e umidade relativa média anual de 70,8%.

Os dejetos de bovinos leiteiros foram obtidos no confinamento do Setor de Bovinocultura do Departamento de Zootecnia da FCAV/UNESP – Campus de Jaboticabal.

A fração orgânica de resíduos sólidos foi recolhida em um restaurante na cidade de Jaboticabal.

3.2. Descrição do Experimento

O experimento foi dividido em três fases:

- a) Ensaio de biodigestores bateladas
- b) Ensaio de biodigestores semicontínuos
- c) Estudo de caso aplicando resultados do ensaio semicontínuo

Nos dois ensaios foram avaliados a produção de biogás, o potencial de produção do biogás, e a qualidade do biofertilizante analisando as reduções dos teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), e os teores de N, P e K.

Foi realizada a coleta de uma amostra do afluente e efluente de cada uma das repetições de cada tratamento, nos dois ensaios, para a realização das análises de ST e SV.

A temperatura ambiente foi aferida com o auxílio de termômetro digital em todas as leituras efetuadas no gasômetro, para a realização dos cálculos de produção de biogás.

Utilizou-se dejetos in natura de vacas de raça Holandesa confinadas e em lactação, alimentadas com concentrado de milho, soja grão, farelo de trigo, farelo de algodão,

núcleo de leite e fosfato bicálcico nas respectivas proporções 55%; 22%; 8%; 10%;4%, 1% e volumoso de silagem de milho.

A fração orgânica de resíduos sólidos foi composta por restos de alimentos variados sendo eles, carnes, legumes, verduras e frutas (Figura 5).

Figura 5 - Lixo Orgânico Recolhido do Restaurante



Este estudo utilizou o biodigestor Batelada como ensaio preliminar da biodigestão anaeróbia para caracterizar os quantitativos dos teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) de DGBL e FORSU, afim de se verificar o índice de produção de gás com percentuais diferentes de cada um dos substratos.

Os biodigestores semicontínuos foram utilizados neste estudo para o ensaio de biodigestão anaeróbia com tratamentos que simulam uma escala real da demanda da coleta da FORSU do município de Penápolis e o DGBL produzido por vacas que suprem a necessidade de produção de leite para abastecimento das escolas municipais.

Com os resultados obtidos no experimento semicontínuo, realizou-se um estudo de caso em uma escala de produção real, tendo como resultado dados de dimensionamento de biodigestor e lagoa de tratamento, potencial de produção de biogás e biofertilizante, e geração de energia elétrica para cidade de Penápolis-SP.

Penápolis é um município brasileiro do estado de São Paulo criado em 22 de dezembro de 1.913, através da Lei Estadual nº 1.397 Situado na região noroeste do estado de São Paulo, na Latitude 21°25'11 S e Longitude 50°04'39 W, localizando-se na margem esquerda do rio Tietê (Bacia Hidrográfica do Baixo Tietê). Penápolis está a 480 km da capital e limita-se ao sul com Alto Alegre e Braúna, ao norte com Zacarias, a leste com Avanhandava e Barbosa e a oeste com Glicério (Figura 6). A área total é de 710,4 km² e a altitude é de 416 mts. Pertence à mesorregião de Araçatuba e microrregião de Penápolis e sua população estimada em 2016 é de 62 409 habitantes (IBGE, 2010) .

Figura 6 - Localização de Penápolis



Fonte: IBGE (2015)

Segundo o censo agropecuário de 2006, Penápolis conta com uma área de 40.979 hectares em estabelecimentos agropecuários divididos em 695 unidades. De acordo com o levantamento pelo IBGE na Pesquisa Pecuária Municipal em 2015, a cidade conta com um rebanho bovino de 21.212 cabeças de gado em 375 estabelecimentos agropecuários, e 3800 vacas ordenhadas com uma produção de 3.115.000 litros de leite (IBGE,2015).

Segundo a secretaria de educação do município, em 2016 o programa de alimentação escolar de Penápolis adquiriu aproximadamente 10 mil litros de leite de vaca integral pasteurizado e 240 kg de requeijão para suprir as necessidades das escolas municipais.

O saneamento básico do município é de responsabilidade do departamento autônomo de água e esgoto (DAEP), que conta com 2 estações elevatórias de recalque, 1 estação de captação, 1 estação de tratamento, 5 reservatórios, 1 Central de tratamentos de Resíduos, além de um prédio de funcionamento do Museu e um Centro Educacional Ambiental. Além do saneamento básico, o DAEP é responsável pelo sistema de coleta e destinação final de resíduos sólidos domésticos, industriais, serviços de saúde e entulhos. Entre os tipos de resíduos coletados diariamente estão:

- lixo orgânico;
- varrição;
- resíduos de serviços de saúde;
- animais mortos;
- coleta seletiva;
- resíduos industriais classe II-B;
- pneus inservíveis;
- resíduos dos Ecopontos.

A Figura 7 mostra a entrada da Central de Tratamento de Resíduos, que é um complexo onde se encontram as Lagoas de Tratamento de Esgoto, Aterro Sanitário, Aterro de Inertes, Unidade de Tratamento de Resíduos de Serviços de Saúde, destinação de animais mortos e a Cooperativa de Trabalho dos Recicladores de Lixo de Penápolis (CORPE), com adequação de portaria em uma área total de aproximadamente 90.000 m². Possui também 5 unidades de Ecopontos, que são unidades para destinação de resíduos de entulhos de pequeno volume, podas de árvores e materiais recicláveis e 3 estações elevatórias de esgoto. (DAEP, 2017)

Figura 7 - Entrada da Central de Tratamentos de Resíduos



Fonte: DAEP (2017)

O destino final do lixo do município é feito no Aterro Sanitário do DAEP, com área total de 45.000m², onde o lixo depositado é esparramado em camadas, alternadas com terra. A vida útil do Aterro Sanitário está estimada até o ano 2024, mas o complexo de tratamento de resíduos dispõe de uma área disponível para expansão de mais 60 mil m², que não pode ser utilizada para ampliação do aterro devido a lei nº 12.725, de 16 de outubro de 2012, que dispõe sobre o controle da fauna nas imediações de aeródromos e estabelece uma distância mínima 13 a 20 km de distância entre aeroportos e aterros sanitários (BRASIL, 2012).

De acordo com o levantamento feito no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos de Penápolis, os resíduos de origem da pecuária, principalmente os de sistema de confinamento, que precisam passar por tratamento adequado, ainda não tem o destino correto. Atualmente o DAEP não recolhe nenhum tipo de resíduos de pecuária, e quando é necessário, os dejetos são depositados no aterro sanitário na área reservada para animais mortos, oriundos de propriedades rurais ou que foram atropelados em rodovias.

O DAEP possui um controle efetivo dos resíduos sólidos gerados no município e conta com um sistema de balança informatizada de pesagem do material que é realizado através de uma balança rodoviária. Todos os veículos que transportam os resíduos são pesados e discriminados a cada entrada e saída da Central de Tratamento de Resíduos como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Balança para pesagem dos caminhões



Fonte: DAEP (2017)

Na Tabela 4 constam as quantidades de resíduos enviadas ao aterro, resíduos recicláveis e rejeitos gerados na triagem dos resíduos recicláveis.

Tabela 4 – Destinação do RSU coletado em Penápolis

Ano	RSU enviados ao Aterro Sanitário - coleta domiciliar e comercial (kg)	RSU Recicláveis (kg)	Total no Ano
2012	11.053.562	1.563.525	12.617.087
2013	12.552.347	1.601.989	14.154.336
2014	12.996.578	2.389.075	15.385.653
2015	12.991.537	1.788.217	14.779.754

Fonte: DAEP (2017)

3.3. Ensaio de biodigestores bateladas

O objetivo do experimento em batelada foi verificar os potenciais de produção de biogás, de redução dos sólidos e os teores NPK com diferentes proporções de FORSU e DGBL. O ensaio dos biodigestores bateladas iniciou-se em 05/8/2015 e terminou em 12/02/2016, com a duração de 192 dias, e para a realização das cargas foram coletados uma única vez 5 kg de dejetos de bovinos leiteiros e 50 kg de restos de alimento e transportados até o departamento de Engenharia Rural.

3.3.1. Descrição dos Biodigestores

O experimento utilizou na primeira fase 44 biodigestores do tipo batelada e gasômetros constituídos, basicamente, por três cilindros retos de PVC com diâmetros de 50, 100 e 150 mm, acoplados sobre uma CAP e caracterizados como biodigestores de bancada, com volume total de 2 litros cada como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Foto dos Biodigestores Batelada



Foto: Edmar César Gomes da Silva, 2015

Os cilindros de 50 e 150 mm estão inseridos um no interior do outro, de tal forma que o espaço existente entre a parede externa do cilindro interior e a parede interna do cilindro exterior comporta um volume de água (“selo de água”), atingindo profundidade de 50 cm. O cilindro de diâmetro intermediário tem uma das extremidades vedadas, conservando-se apenas uma abertura para descarga do biogás, e permanece inserido no selo de água, para propiciar condições anaeróbias e armazenar o gás produzido.

3.3.2. Descrição dos tratamentos e Preparo das cargas

A primeira fase foi composta por 11 tratamentos com 4 repetições utilizando biodigestores tipo batelada, abastecidos com substrato composto por resíduos de DGBL e FORSU, calculados em kg baseados na matéria seca do dejetos bovino leiteiro utilizado no experimento, considerando 6% de sólidos totais (ST) e diluídos em água.

Após a coleta da FORSU, os resíduos foram transportados para o laboratório e submetidos ao processo de trituração e diluição com água na proporção definida para cada um dos tratamentos. Após a diluição foi acrescentado o DGBL respectivo de cada um dos tratamentos e homogeneizados manualmente com auxílio de pás em baldes, a fim de propiciar melhores condições de fermentação. Esta operação foi repetida por quatro vezes em cada um dos tratamentos. Os valores da composição de cada tratamento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição dos 11 tratamentos dos biodigestores batelada

Tratamentos	FORSU(kg)	DGBL(kg)	ÁGUA(kg)
T0	0,000	0,600	1,200
T10	0,159	0,540	1,101
T20	0,317	0,480	1,003
T30	0,475	0,420	0,905
T40	0,633	0,360	0,807
T50	0,792	0,300	0,708
T60	0,950	0,240	0,610
T70	1,108	0,180	0,512
T80	1,267	0,120	0,413
T90	1,425	0,060	0,315
T100	1,583	0,000	0,217

Fonte: Dados da Pesquisa

O primeiro tratamento (T0) foi o de controle DGBL, no qual os quatro reatores receberam 1,8kg cada um da mistura composta por 0,600 kg DGBL e 1,2kg de Água.

O último tratamento (T100) foi o de controle FORSU, no qual os quatro reatores receberam 1,8kg da mistura composta por 1,583kg de inoculo de FORSU e 0,217kg de Água.

3.4. Ensaio de biodigestores semicontínuos

O objetivo do experimento em biodigestores semicontínuos foi analisar os valores dos potenciais de produção de biogás e geração de energia elétrica, e os percentuais de redução dos sólidos voláteis e sólidos totais, e dos teores NPK do efluente, baseando-se no percentual da FORSU coletada na cidade de Penápolis. O ensaio de biodigestores semicontínuos iniciou-se em 26/02/2016 e terminou em 19/05/2016, com a duração de 82 dias e após a estabilização do biodigestor, utilizou-se para análise os 45 dias finais. Para a realização das cargas foram coletados semanalmente 4 kg de dejetos de bovinos leiteiros e 25 kg de restos de alimento e transportados até o departamento de Engenharia Rural.

3.4.1. Descrição dos Biodigestores

O experimento utilizou biodigestores semicontínuos tubulares de bancada com capacidade para 60 litros, construídos com tubo de PVC com diâmetro de 300mm e com 1m de comprimento, tendo suas extremidades vedadas por CAP de fibra de vidro denominados de contínuos como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Biodigestores Contínuos



Em uma das extremidades está acoplado um cano de entrada do afluente de 60mm e na extremidade oposta um cano de 60mm com registro de 75mm para saída do efluente. Os gases gerados nos biodigestores foram armazenados em gasômetros de 250mm de diâmetros e 60cm de comprimento, ligados aos biodigestores por meio de mangueiras plásticas para condução do biogás.

3.4.2. Descrição dos tratamentos e preparo das cargas

A segunda fase do experimento foi composta por 2 tratamentos com 5 repetições cada um, totalizando 10 biodigestores do tipo semicontínuo com capacidade de armazenamento de 60L e uma carga diária de substrato de 2L com TRH de 30 dias.

A coleta da FORSU foi realizada semanalmente, onde resíduos foram transportados para o laboratório e submetidos ao processo de trituração e diluição com água na proporção definida para o tratamento T1 para as cinco repetições totalizando 2 litros de substrato para carga diária. A adição do DGBL para os dois tratamentos foi homogeneizada manualmente com auxílio de pás em baldes, a fim de propiciar melhores condições de fermentação.

Para definir as proporções diárias de cada um dos resíduos que compuseram os tratamentos para o abastecimento dos biodigestores, simulou-se valores em escala laboratorial tendo como base a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Penápolis e o estrume de gado bovino leiteiro de um rebanho de 40 vacas, cuja produção de 1200 l de leite supre as necessidades de consumo mensal de leite das escolas municipais. A FORSU foi calculada em 30% do lixo coletado diariamente e para o DGBL, adotou-se geração média diária de 30 kg/vaca, resultando em uma relação DGBL/FORSU no valor de 11,11%. Para diluição considerou-se 3 partes de água para 1 parte de resíduo FORSU+DGBL.

Com base nos valores dos resíduos de Penápolis, e considerando carga diária de 2 L, o tratamento T1 foi composto por 0,450kg de FORSU, 0,050kg de DGBL e 1,5 kg de água com 5 repetições. O tratamento T0 foi o biodigestor de controle de DGBL composto por 0,450 kg de DGBL e 1550 kg de água. A Tabela 6 apresenta os valores de carga para os biodigestores contínuos.

Tabela 6 - Composição do tratamento dos biodigestores semicontínuos

Tratamentos	FORSU(kg)	DGBL(kg)	ÁGUA(kg)
T0	0	0,450	1,550
T1	0,450	0,050	1,500

Fonte: Dados da Pesquisa

3.5. Metodologias aplicadas

3.5.1. Teores de Sólidos Totais (ST)

Para determinação de ST, as amostras dos afluentes e efluentes foram acondicionadas em triplicata em recipientes de alumínio, previamente tarados e pesados para obtenção do peso úmido (Pu) do material em balança com precisão de 0,01g. Posteriormente, levados à estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 65°C até atingirem peso constante, após foram retirados da estufa para atingir temperatura ambiente foram novamente pesadas, obtendo-se então o peso seco (Ps). O teor de ST foi determinado semanalmente segundo metodologia descrita por APHA (2005). O teor e ST, em porcentagem, foi determinado por meio da equação 1:

$$ST = \left[1 - \left(\frac{Pu - Ps}{Pu} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

Onde ST = teor de ST, em porcentagem;

PU = peso úmido da amostra, em g;

PS = peso seco da amostra, em g.

3.5.2. Teores de Sólidos Voláteis (SV)

Para a determinação dos SV, o material seco em estufa, resultante da determinação dos ST, foi levado à mufla, em cadinhos de porcelana previamente tarados em balança analítica com precisão de 0,0001g, e mantidos a uma temperatura de 575° C por um período de 2 horas. Após o resfriamento em dessecadores, o material resultante foi pesado, obtendo-se o peso das cinzas ou matéria mineral. Os teores de SV foram determinados semanalmente e expressos em porcentagem de matéria seca segundo metodologia descrita por APHA (2005), como mostra a equação 2.

No qual:

$$SV = \left[1 - \left(\frac{Pf - T}{Pi - T} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

sendo:

SV = teor de SV, em porcentagem;

Pi = peso inicial da amostra, em g;

Pf = peso obtido após queima em mufla, em g;

T = tara do cadinho, em g.

3.5.3. Determinação do volume de biogás e potenciais de produção

O volume de biogás produzido de cada biodigestor foi mensurado pela medição do deslocamento vertical dos gasômetros através de régua graduada, multiplicado o dado registrado pela área da seção transversal interna dos gasômetros. Após cada leitura, o registro de descarga de biogás era aberto até que os gasômetros fossem zerados e em seguida eram fechados. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20°C foi efetuada com base no trabalho de Caetano (1985), no qual verificou-se que, pelo fator de compressibilidade (Z), o biogás apresentou comportamento próximo ao ideal. Conforme descrito por Santos (2001), para a correção do volume de biogás, utilizou-se a expressão resultante da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac, equação 3, onde:

$$\frac{V_0 P_0}{T_0} = \frac{V_1 P_1}{T_1} \quad (3)$$

Sendo que:

V0 = volume de biogás corrigido, m³;

P0 = pressão corrigida do biogás, 10322,72 mm de água;

T0 = temperatura corrigida do biogás, 293,15 K;

V1 = volume do gás no gasômetro;

P1 = pressão do biogás no instante da leitura, 9652,10 mm de água;

T1 = temperatura do biogás, em K, no instante da leitura.

Os potenciais de produção de biogás foram calculados utilizando-se os dados de produção diária e as quantidades de substrato de ST e SV adicionados nos biodigestores, além das quantidades de SV reduzidos durante o processo de

biodigestão anaeróbia. Os valores são expressos em m³ de biogás por Kg de substrato, de dejetos ou de ST e SV.

3.5.4. Digestão sulfúrica e determinação dos minerais

Posteriormente a secagem em estufa a 65 °C, as amostras dos ensaios de biodigestão anaeróbia (afluentes e efluentes) foram trituradas em moinho de bola com câmara fechada. Em seguida realizou-se a digestão sulfúrica, a fim de avaliar a composição química referente à P e K. Para tanto, as amostras colhidas foram digeridas semanalmente utilizando-se o digestor Digesdahl Hach, que promove a digestão total da matéria orgânica à base de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e Peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 50%. Com o extrato obtido desta digestão foi possível determinar os teores de Fósforo e Potássio segundo Bataglia et al. (1983).

O nitrogênio total foi determinado por meio da utilização do destilador de micro-Kjedahl, cujo princípio baseia-se na transformação do nitrogênio amoniacal ((NH₄)₂SO₄) em amônia (NH₃), a qual é fixada pelo ácido bórico e posteriormente titulada com H₂SO₄ até nova formação de (NH₄)₂SO₄, na presença do indicador ácido/base, conforme metodologia descrita por Silva (1981).

Os teores de fósforo foram determinados pelo método colorimétrico utilizando-se espectrofotômetro HACH modelo DR-2000. O método baseia-se na formação de um composto amarelo do sistema vanadomolibdofosfórico em acidez de 0,2 a 1,6 N, onde a cor desenvolvida será medida em espectrofotômetro, determinando-se assim a concentração de fósforo das amostras, por meio de uma reta padrão traçada previamente a partir de concentrações conhecidas, entre 0 e 52 µg de P/ml. Os padrões foram preparados conforme metodologia descrita por Malavolta (1991).

As concentrações de potássio foram determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica modelo GBC 932 AA.

3.5.5. Delineamento experimental

As variáveis de potencial de produção e produção total de biogás do experimento foram analisadas utilizando o modelo de delineamento inteiramente casualizado (DIC), com onze tratamentos e quatro repetições para o ensaio de biodigestão

anaeróbia com biodigestores batelada, e dois tratamentos e cinco repetições, para o ensaio de biodigestão anaeróbia com biodigestores semicontínuos.

Os resultados gerados pelo experimento foram submetidos a análise de variância ANOVA e comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade pelo procedimento ANOVA do pacote estatístico SAS.

3.5.6. Cálculo das dimensões do biodigestor e da lagoa de efluente

Para determinar o dimensionamento do biodigestor e da lagoa de armazenamento do biofertilizante, utilizou-se para os cálculos o volume de dejetos gerados diariamente, o volume da carga diária composta pela FORSU e o volume de água necessário para diluição. A quantidade média de dejetos produzida por dia e o volume de carga diária de DGBL são calculados pelas Equações 4 e 5.

$$\text{PMDGBL} = \text{PVM} \times \text{PE}/100 \quad (4)$$

Onde PMDGBL é a produção média de esterco por vaca (*kg vaca⁻¹ dia⁻¹*);

PVM é o peso vivo médio das vacas (kg) e

PE é a produção de estrume em porcentagem do peso vivo.

$$\text{VCDGBL} = \text{PMDGBL} \times \text{N} \quad (5)$$

Onde VCDGBL = volume de carga diária de DGBL (kg)

PMDGBL = produção média de esterco por vaca (*kg vaca⁻¹ dia⁻¹*);

PVM = peso vivo médio das vacas (kg) e

N = número total de animais

A quantidade média resíduos sólidos coletados por dia e a FORSU correspondente são calculadas por meio das Equações 6 e 7.

$$\text{PDRES} = (\text{COLANO}/\text{DIASCOL}) \quad (6)$$

Onde PDRES = produção diária de resíduos em Penápolis (kg);

COLANO = coleta de resíduos sólidos de Penápolis no ano (kg);

DIASCOL = número de dias de coleta no ano.

$$\text{VCFORSU} = \text{PDRES} \times (\text{PF}/100) \quad (7)$$

Onde VCFORSU = volume de carga diária da FORSU (kg);

PDRES = produção diária de resíduos em Penápolis (kg);

PF = fração orgânica dos resíduos sólidos coletados.

A quantidade de água para uma diluição a 6% ST foi calculada em um proporção FORSU+DGBL / água de 1:3. O volume de carga diária de água e o volume total de carga diária do biodigestor são calculados pelas Equações 8 e 9.

$$VCAGUA = (VCDGBL + VCFORSU) \times 3 \quad (8)$$

Onde VCAGUA = volume de carga diária de AGUA (l)

VCDGBL = volume de carga diária de DGBL (kg)

VCFORSU = volume de carga diária da FORSU (kg);

$$VCD = (VCDGBL + VCFORSU + VCAGUA) \quad (9)$$

Onde VCD = Volume de carga diária (l)

VCAGUA = volume de carga diária de AGUA (l)

VCDGBL = volume de carga diária de DGBL (kg)

VCFORSU = volume de carga diária da FORSU (kg);

O cálculo do volume útil do biodigestor e da lagoa de armazenamento de biofertilizante utiliza o volume de carga diária e do tempo de retenção hidráulica conforme a Equação 10:

$$VUB = (VCD \times TRH) / 1000 \quad (10)$$

Onde VUB = volume útil do biodigestor (m³);

VCD = Volume de carga diária (l)

TRH = tempo de retenção hidráulica (30 para biodigestor e 15 para lagoa)

3.5.7. Cálculo da capacidade de produção de biogás

Para estimar a produção de biogás, utilizou-se a carga diária do substrato, o potencial de produção de biogás por kg de sólidos voláteis adicionados, e a quantidade de Sólidos voláteis adicionados por dia. A produção diária de biogás é calculada pela equação 11.

$$PDB = CD \times KGSVAD \times PPB \quad (11)$$

Onde PDB = produção diária de biogás (m³)

CD = carga diária (kg);

KGSVAD = kg sólidos voláteis adicionados por dia

PPB = potencial de produção de biogás

3.5.8. Cálculo de potencial de geração de energia elétrica

O cálculo de potencial de geração de energia elétrica inclui a escolha do grupo gerador necessário para atender a demanda de biogás produzida pelo biodigestor, e considera a produção diária de biogás, o consumo de biogás e o potencial de geração de energia do gerador. O cálculo de geração de energia elétrica é obtido pela equação 12:

$$PEE = PDB / CBH \times PGH \quad (12)$$

Onde PEE = produção de energia elétrica (kwh)

PDB = produção diária de biogás (m³)

CHB = consumo de biogás por hora (m³/h)

PGH = potencial de geração por hora (kw/h)

3.5.9. Cálculo de produção de Biofertilizante

O cálculo do valor fertilizante do afluente da biodigestão anaeróbia FORSU+DGBL, considerou-se como base o volume de biofertilizante gerado e a concentração dos teores dos nutrientes N, P e K. Para calcular a equivalência do fertilizante utilizado como fonte de nitrogênio utilizou-se a equação 13:

$$FN = MS \times PNMS / PNF \quad (13)$$

Onde FN = Fonte Nitrogênio (kg)

MS = matéria seca do efluente (kg)

PNMS = percentual de Nitrogênio na matéria seca do efluente

PNF = percentual de Nitrogênio no fertilizante

Para calcular a equivalência do fertilizante utilizado como fonte de fósforo utilizou-se a equação 14:

$$FP = MS \times PPMS / PPF \times 2,29 \quad (14)$$

Onde FP = Fonte Fósforo (kg)

MS = matéria seca do efluente (kg)

PPMS = percentual de Fósforo na matéria seca do efluente

PPF = percentual de Fósforo no fertilizante

Para calcular a equivalência do fertilizante utilizado como fonte de potássio utilizou-se a equação 15:

$$FK = MS \times PKMS / PKF \times 1,20 \quad (15)$$

Onde FK = Fonte Potássio (kg)

MS = matéria seca do efluente (kg)

PKMS = percentual de Potássio na matéria seca do efluente

PKF = percentual de Potássio no fertilizante

3.5.10. Estimativa de emissão de Gás de Aterro Sanitário

Existem diversos modelos para calcular a quantidade de gás emitido pelo aterro de RSU, dentre eles, o modelo proposto pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), e o modelo apresentado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Considerando que a metodologia do IPCC exige algumas variáveis das quais não foram levantadas por este estudo e, o aterro de RSU de Penápolis não possui controle de emissão de gases, utilizou-se para estimativa de cálculo das emissões de CH₄ a metodologia cinética de primeira ordem, por ser a metodologia recomendada pela (EPA) em aterros que não possuem dispositivos para o controle de gases. O cálculo da estimativa é descrito pela equação 16:(EPA, 2008)

$$QCH_4 = Lo \times QRD \times (e^{-kC} - e^{-kT}) \quad (16)$$

QCH₄: quantidade de CH₄ gerado no ano atual (m³/ano)

Lo: potencial da geração de CH₄ por tonelada de lixo (m³/t)

QRD: quantidade de resíduos depositada no ano aterro (t/ano)

k: constante da geração de CH₄ (1/ano)

C: tempo desde o encerramento do aterro (anos), c=0 para aterros ativos

T: ano atual

4 Resultados e discussão

4.1. Ensaio bateladas

O experimento com os biodigestores batelada atingiu diferentes índices de produção de biogás. A tabela 7 mostra a produção de biogás dos 11 tratamentos, e pode-se observar que os tratamentos T10 e T20, com 10% e 20% de FORSU respectivamente, obtiveram maiores rendimentos atingindo 0,0340 m³ e 0,0318 m³ de biogás no período analisado, se comparado aos demais.

Tabela 7 - Produção de Biogás de FORSU+DGBL em biodigestores batelada

Tratamentos	Produção total de biogás (m³)
T0	0,0330 a
T10	0,0340 a
T20	0,0318 a
T30	0,0165 b
T40	0,0022 c
T50	0,0024 c
T60	0,0038 bc
T70	0,0027 c
T80	0,0031 c
T90	0,0049 bc
T100	0,0078 bc
F	25,21
p-valor	<0,0001
CV%	41,54

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

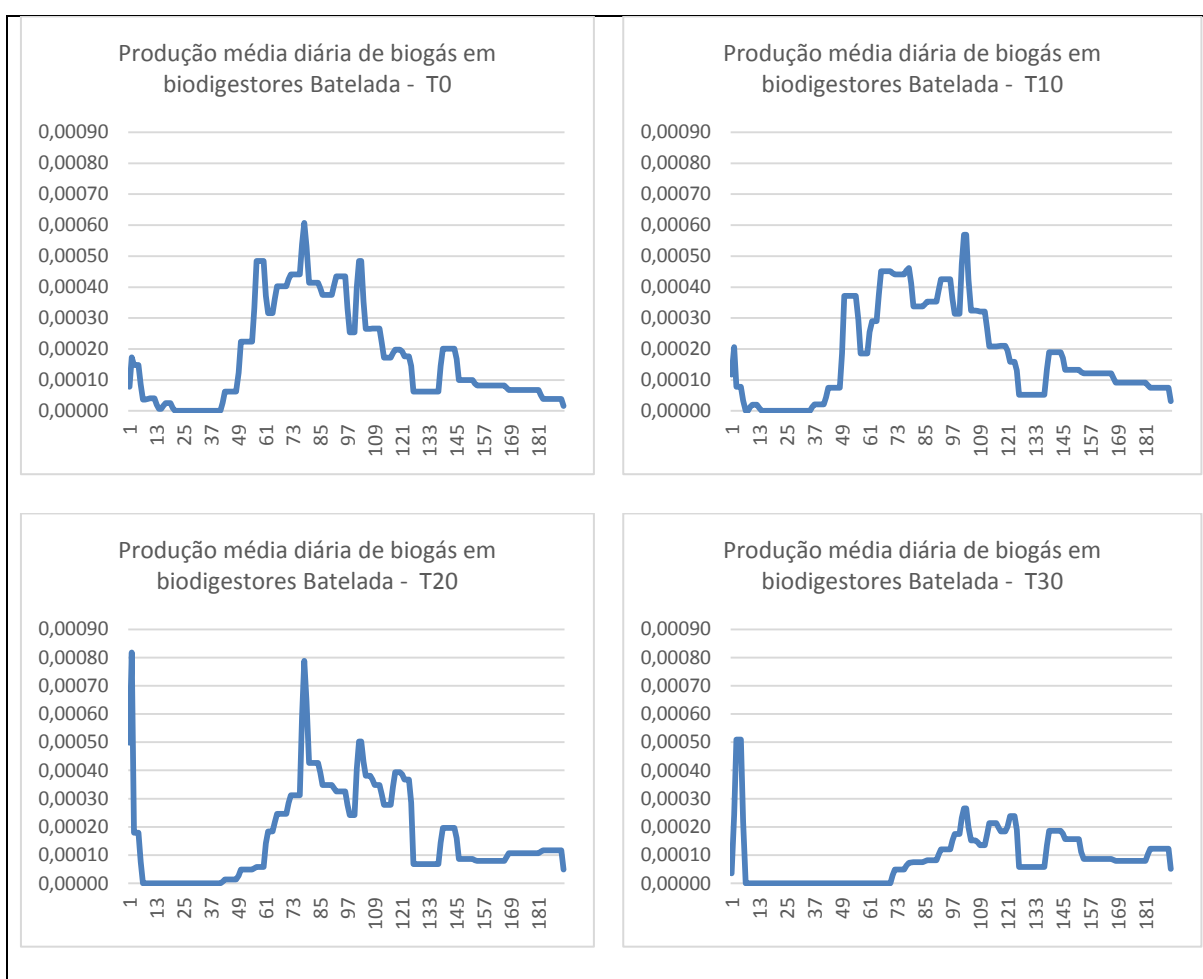
Fonte: Dados da Pesquisa

O resultado é similar ao tratamento T0 de controle DGBL, composto apenas por dejetos bovinos leiteiros e água, o que permite-nos perceber que a adição de 10% e 20% de FORSU não desfavorece a produção de biogás pelas bactérias no processo. Também é possível notar que, o tratamento T100 de controle FORSU, composto somente por FORSU e água apresentou um resultado de 0,0078 m³ de biogás no período analisado, o que equivale a menos de 25% de produção na comparação com os tratamentos T10 e T20, que mais produziram, mostrando que a co-digestão

FORSU+DGBL tem um impacto significativo na produção de biogás em relação a digestão apenas de FORSU.

A figura 11 mostra a distribuição da produção diária de biogás dos tratamentos T0, T10, T20 e T30. Pode-se observar que nos 10 primeiros dias há um pico de produção de biogás e que nos tratamentos onde há a adição de FORSU, verificou-se que a produção neste início do tratamento foi maior. Após os 10 dias iniciais, os biodigestores ficaram inativos por cerca de 25 dias e entre o 35º e 37º, voltaram a produzir até o último dia do experimento.

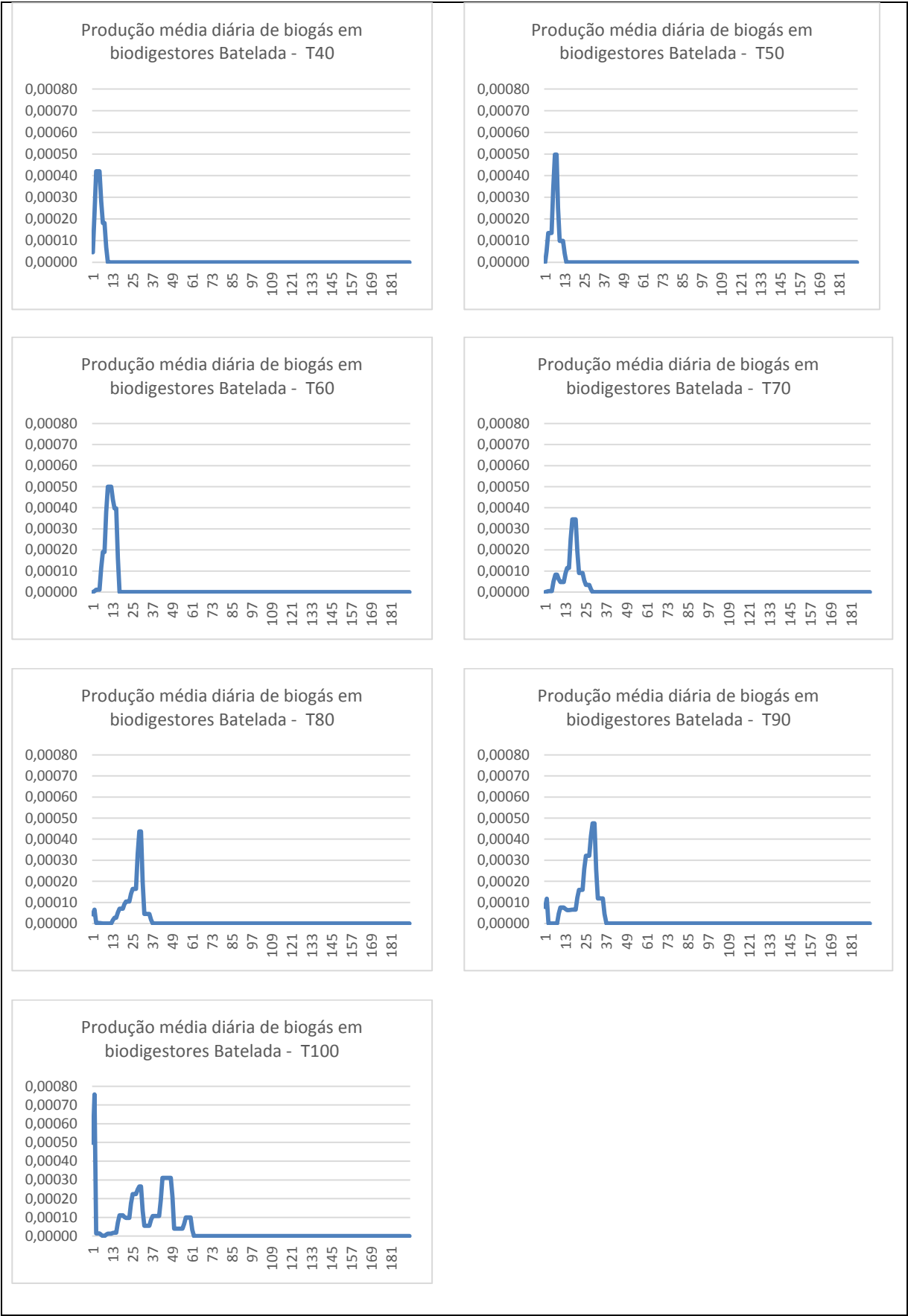
Figura 11 - Produção de biogás diária dos tratamentos T0 a T30



Fonte: Dados da Pesquisa

Os tratamentos de T40 a T100, também apresentaram um pico de produção nos 20 dias iniciais, mas verificou-se que o a mistura acidificou, provocando a destruição do microrganismos que propiciam a produção do biogás e consequentemente fez com que os biodigestores entrassem em inatividade (Figura 12).

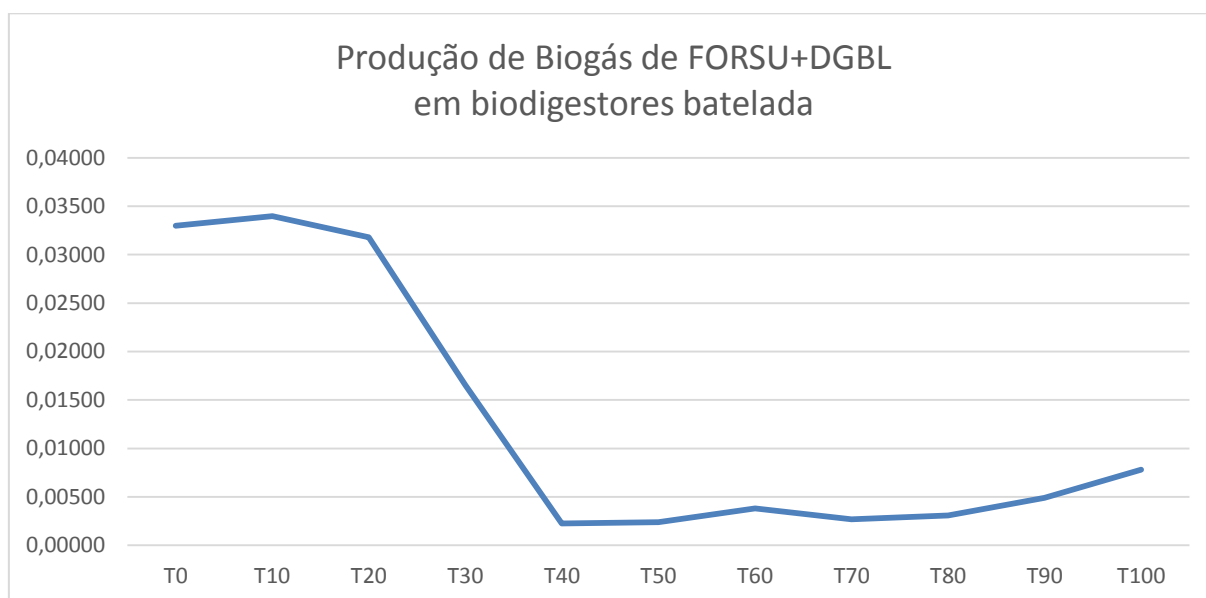
Figura 12- Produção de biogás diária dos tratamentos T40 a T100



Fonte: Dados da Pesquisa

Analisando os dados de produção total dos 11 tratamentos, na figura 13, é possível notar que o aumento da proporção de FORSU e a redução do DGBL impacta diretamente na redução de produção de gás. O mesmo efeito foi constatado por Souza (2012) que utilizou biodigestores batelada de 200 litros por 90 dias com 3 tratamentos compostos por DGBL e FORSU, nas proporções 0:100, 25:75 e 50:50, onde verificou-se que a proporção do substrato 50% FORSU + 50% DGBL teve produção acumulada superior aos demais, enquanto o FORSU 100% apresentou produção inferior.

Figura 13 - Produção Total de Biogás FORSU+DGBL - Biodigestor Batelada



Fonte: Dados da Pesquisa

Os potenciais de produção de biogás por kg de SV adicionados, por kg de ST adicionados, por kg de FORSU e por Kg de DGBL, apresentados na Tabela 8, reafirmam o exposto anteriormente demonstrando que houve uma produção maior de biogás nos tratamentos T0, T10 e T20 por kg de sólidos voláteis adicionados, se comparados aos demais.

Tabela 8 - Médias de Potencial de Produção de Biogás - Biodigestor Batelada

Tratamentos	m ³ de biogás por			
	kg de SV ad	kg de ST ad	kg de FORSU	kg de DGBL
T0	0,348 a	0,291 a	0 d	0,055 abc
T10	0,337 a	0,285 a	0,213 a	0,063 ab
T20	0,381 a	0,328 a	0,100 b	0,066 ab
T30	0,133 b	0,115 b	0,034 c	0,039 bcd
T40	0,026 b	0,022 b	0,003 d	0,006 de
T50	0,027 b	0,024 b	0,003 d	0,008 de
T60	0,042 b	0,037 b	0,004 cd	0,016 de
T70	0,030 b	0,027 b	0,002 d	0,015 de
T80	0,043 b	0,039 b	0,002 d	0,026 cde
T90	0,067 b	0,061 b	0,003 d	0,081 a
T100	0,066 b	0,059 b	0,004 cd	0,006 de
F	36,28	35,47	109,67	14,86
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
CV%	35,08	34,88	37,58	42,92

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

O potencial de produção de biogás da mistura T20 composta por 20% de FORSU e 80% de DGBL, apresentou um índice de 0,381 m³/kg SV. O potencial de produção de biogás por kg de SV obtido no experimento realizado por Schulz (2015), alcançou um valor de 0,097 m³/kg SV para os substratos com 11,4 kg de FORSU triturado com 42% de inoculo de batelada de RSU anterior. O tratamento T100, com 100% de FORSU apresentou o valor 0,066 m³/kg SV sem a utilização de inoculo, mostrando que a utilização de inoculo aumenta o potencial de produção.

Um estudo realizado por El-Mashad e Zhang (2010), utilizando 100 ml de inoculo (cultura bacteriana de sementes), avaliou o potencial de produção de biogás de duas misturas com DGBL E FORSU nas proporções 68:32 e 52:48 com base nos sólidos voláteis. O experimento apresentou como resultado respectivamente 0,455 e 0,531 m³/kg SV, utilizando biodigestores batelada com capacidade de 1 litro sob condições mesofílicas (35°C).

O tratamento T10 apresentou um rendimento de 0,213 m³/kg FORSU, o que apresenta aproximadamente a metade do rendimento apresentado pelo estudo de digestão anaeróbia em biodigestor batelada realizado por Macias-Corral et al.(2008),

que teve como substrato 18 kg de esterco de vaca leiteira, 182 kg da fração orgânica de resíduos sólidos municipais (70% de papel, 20% de restos de alimentos e 10% de recortes de gramas) e 450 l de água, com um rendimento de biogás no valor de 0,53 m³/kg de FORSU em 140 dias de duração.

Para a diluição dos materiais introduzidos nos biodigestores, foram determinados os valores referentes aos sólidos totais, no início e ao término do experimento, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Percentual de Redução de ST-Biodigestores Batelada

Tratamentos	% Afluente	% Efluente	kg Afluente	kg Efluente	% de Redução
T0	6,31 bcd	3,12 ab	0,114 bcd	0,056 ab	50,39 b
T10	6,62 bc	2,79 abc	0,120 bc	0,050 abc	57,90 ab
T20	5,41 cde	2,17 c	0,097 cde	0,039 c	59,70 ab
T30	8,21 a	2,28 c	0,147 a	0,040 c	72,21 a
T40	5,90 cd	2,88 abc	0,106 cd	0,051 abc	50,17 b
T50	5,60 cde	2,49 bc	0,100 cde	0,045 bc	55,28 ab
T60	5,71 cd	2,55 bc	0,102 cd	0,046 bc	55,36 ab
T70	5,19 de	2,25 c	0,094 de	0,041 c	55,89 ab
T80	4,40 e	2,20 c	0,079 e	0,039 c	49,94 b
T90	4,43 e	2,06 c	0,080 e	0,037 c	53,55 b
T100	7,36 ab	3,54 a	0,132 ab	0,063 a	51,80 b
F	20,50	7,47	20,50	7,47	3,30
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	>0,0046
CV%	8,65	13,14	8,65	13,14	12,58

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

Os dados de redução de sólidos totais adicionados mostram uma taxa de redução de sólidos que varia de 49,94 a 59,90, excetuando o tratamento T30 que apresentou um teor de sólidos totais no afluente acima dos demais tratamentos e consequentemente um percentual de redução maior. Os tratamentos T10 e T20 apresentaram respectivamente uma redução de 57,9% e 59,7%. Os resultados encontrados por Caramelo (2010) para os dois tratamentos com FORSU +DGBL nas proporções 75:25 e 50:50, apresentaram índices de redução de ST de 49,85% e 48,75%, e 50,10% e 40,16% de redução de SV.

A tabela 10 ilustra o percentual de redução dos SV na biodigestão anaeróbia de FORSU + DGBL com biodigestores batelada que atingiu um índice 62,22% e 63,83% para os tratamentos T10 e T20, que apresentaram o melhor rendimento na produção de biogás, demonstrando a eficiência no processo de degradação dos resíduos FORSU+DGBL e diminuição da concentração de carga orgânica adicionada.

Tabela 10 - Percentual de Redução de SV - Biodigestores Batelada

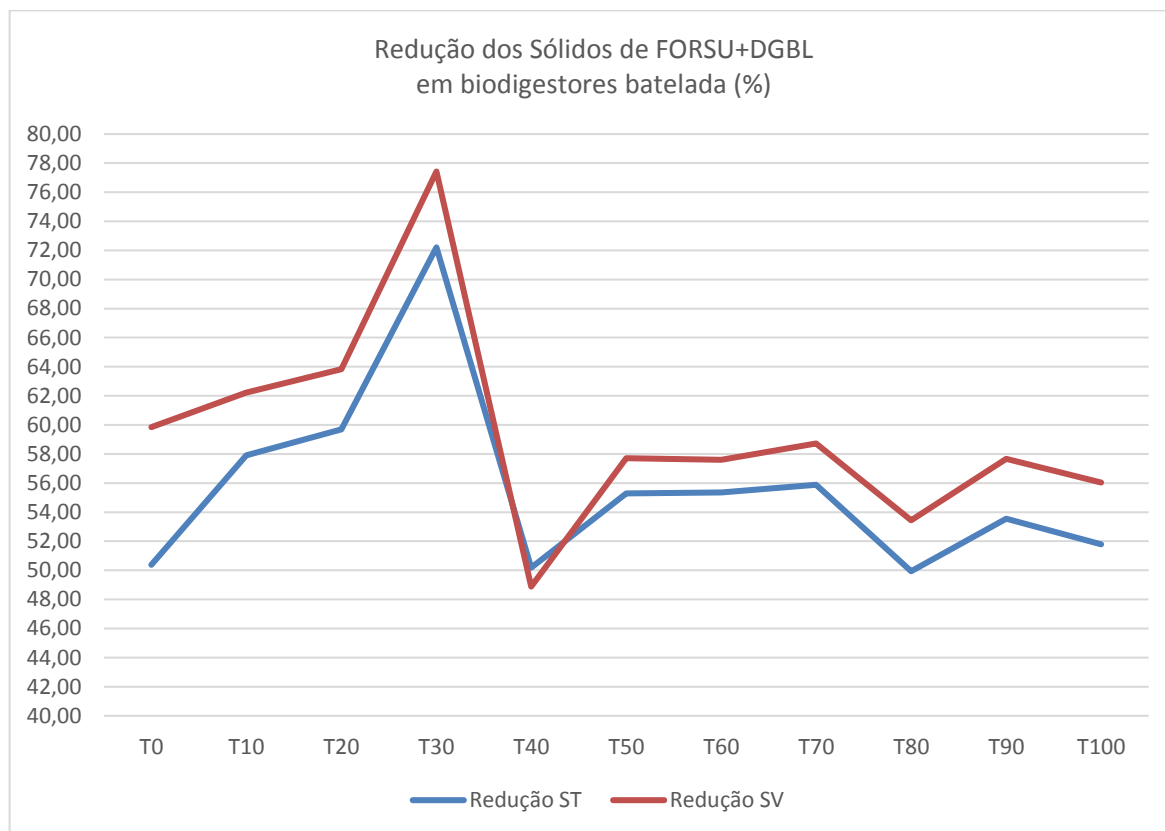
Tratamentos	% Afluente	% Efluente	kg Afluente	kg Efluente	% de Redução
T0	5,28 cd	2,11 ab	0,095 cd	0,038 ab	59,84 ab
T10	5,60 bc	2,12 ab	0,1 bc	0,038 ab	62,22 ab
T20	4,65 cd	1,68 b	0,084 cd	0,030 b	63,83 ab
T30	7,11 a	1,61 b	0,128 a	0,029 b	77,42 a
T40	5,01 cd	2,43 ab	0,090 cd	0,044 ab	48,88 b
T50	4,93 cd	2,07 ab	0,088 cd	0,037 ab	57,71 ab
T60	5,07 cd	2,15 ab	0,091 cd	0,038 ab	57,59 ab
T70	4,68 cd	1,90 ab	0,084 cd	0,034 ab	58,72 ab
T80	4,02 d	1,87 ab	0,072 d	0,034 ab	53,44 b
T90	4,05 d	1,71 b	0,072 d	0,031b	57,68 ab
T100	6,58 ab	2,88 a	0,118 ab	0,051 a	56,03 ab
F	13,16	3,1	13,13	3,11	2,42
p-valor	<0,0001	>0,0068	<0,0001	0,0067	>0,0277
CV%	10,18	20,35	10,18	20,35	15,61

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

Diferentemente do que se observa na produção de biogás, o aumento da proporção de FORSU não determina a diminuição do percentual de redução dos sólidos. Excetuando o tratamento T30, pode-se observar uma redução de ST dentre os tratamentos com uma variação entre 50,17% e 59,7%, e valores de redução de SV entre 56,03% e 63,83%, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Redução dos sólidos de FORSU+DGBL em biodigestores batelada



Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 11 apresenta os teores dos minerais (NPK) encontrados na matéria seca do efluente dos 11 tratamentos em biodigestores batelada.

Os resultados de Nitrogênio, Fósforo e Potássio apresentam diferenças significativas ($p < 0,0001$). Os teores de nutrientes dos tratamentos T10 E T20 são respectivamente 2,66 e 2,15 para nitrogênio, 0,78 e 0,74 para fósforo, e 1,37 e 1,01 para Potássio.

Caramelo (2010) obteve em biodigestores batelada, biofertilizantes de FORSU + DGBL em tratamento 50:50, teores de N, P, K nos valores de 0,03, 0,29 e 2,88% respectivamente, e com a mesma proporção, Souza (2012) apresentou valores 1,88, 0,61 e 2,96 para os teores de N, P e K respectivamente. Utilizando a mesma proporção, o tratamento T50 apresentou teores de N, P e K de 2,76, 0,90 e 1,53% respectivamente, índices superiores de N e P comparando com os trabalhos acima citados.

Tabela 11 – Teores de macro nutrientes nos efluentes dos biodigestores batelada

Tratamento	N	P g/100g	K
T0	4,22 b	0,54 cd	1,34 abc
T10	2,66 ef	0,78 cd	1,37 ab
T20	2,15 fg	0,74 cd	1,01 cd
T30	2,78 e	0,87 bcd	1,22 bcd
T40	4,86 a	1,20 b	1,61 a
T50	2,76 e	0,90 bc	1,53 ab
T60	1,82 g	0,50 d	0,93 d
T70	3,52 cd	0,69 cd	1,10 bcd
T80	2,93 e	0,66 cd	1,34 abc
T90	3,70 bc	0,53cd	1,37 ab
T100	3,13 de	2,24 a	1,12 bcd
F	66,56	41,18	8,40
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001
CV%	6,0	15,15	9,60

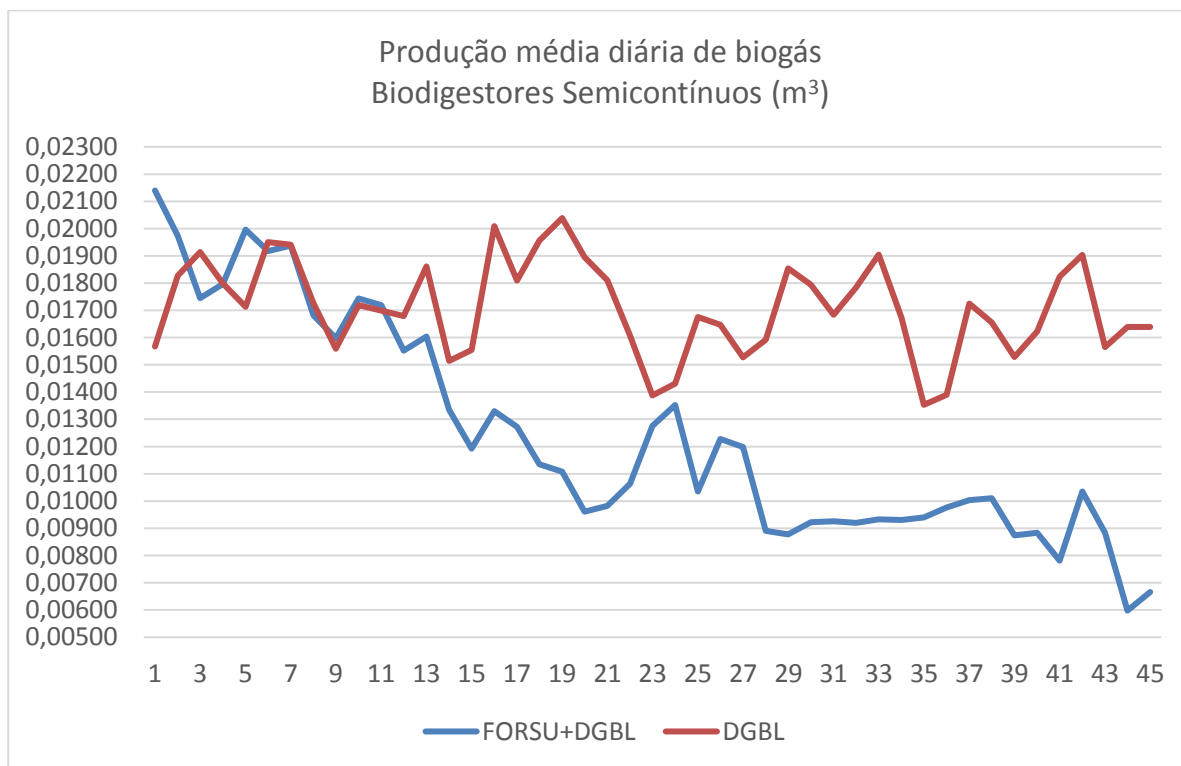
Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

4.2. Ensaio semicontínuo

A Figura 15 mostra os índices de média diária de produção de biogás nos 45 dias de análise de dados. Pode-se observar que no início do processo o tratamento com co-digestão FORSU+DGBL obteve um melhor desempenho frente ao controle, demonstrando que a adição do FORSU facilita o início do processo de degradação, talvez por apresentar em sua composição resíduos de mais fácil degradação se comparado aos dejetos. No entanto, nota-se que ao longo do período ocorre uma diminuição na produção de biogás no tratamento FORSU+DGBL em relação DGBL.

Figura 15- Produção média diária de Biogás em biodigestores contínuos



Fonte: Dados da Pesquisa.

Analisando os resultados do experimento, pode-se observar que embora o tratamento composto por FORSU+DGBL tenha apresentado um rendimento inferior ao biodigestor de controle, somente DGBL, o desempenho é considerado satisfatório, considerando que objetivo do experimento é aumentar a produção de biogás de FORSU utilizando DGBL como inoculo.

A análise estatística dos totais de produção de biogás é apresentada na Tabela 12 e observou-se diferenças significativas ($p < 0,009$) nos dois tratamentos e coeficiente de variação de 9,75.

Tabela 12 - Produção de Biogás de FORSU+DGBL em biodigestores Semicontínuos

Tratamentos	Produção total de biogás (m³)
FORSU+DGBL	0,559 b
DGBL	0,769 a
F	26,33
p-valor	<0,0009
CV%	9,75

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

O biodigestor com substrato co-digerido apresentou um rendimento total de 0,559 m³ de biogás no final do período, o que representa aproximadamente 72% da produção apresentada pelo biodigestor de controle DGBL com rendimento de 0,769 m³ de biogás.

A partir dos resultados de potencial de biogás por kg de SV adicionados, por kg de ST adicionados, por Kg de FORSU e por Kg de DGBL, apresentados na Tabela 13, nota-se que houve diferença significativa entre os tratamentos, podendo observar que o tratamento DGBL apresenta um maior rendimento em todas as características analisadas.

Tabela 13 – Medidas do Potencial de Produção de Biogás em Biodigestores semicontínuos em m³ por kg

Tratamento	m³/kg de ST ad	m³/kg de SV ad	m³/kg de FORSU	m³/kg de DGBL
FORSU+DGBL	0,106 b	0,117 b	0,027	0,248 a
DGBL	0,238 a	0,283 a	0,0	0,038 b
F	160,46	185,43	354,5	251,58
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
CV%	9,55	9,56	16,79	14,64

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

Em estudo feito por Hartmann e Ahring (2005), analisou-se a influência da co-digestão utilizando estrume, e FORSU com estrume em uma proporção 50:50, em um biodigestor semicontínuo com capacidade para 3L em condições termofílicas e com

utilização de líquido do processo recirculado. O potencial de produção apresentado após 83 dias foi de 0,63 m³/kg de SV de biogás e 74% de redução dos SV.

Os resultados de potencial de produção de 0,117 m³/kg de SV ad apresentados neste estudo são inferiores, entretanto deve-se considerar que a proporção utilizada de FORSU+DGBL foi de 90:10 sem utilização de tecnologias de recirculação e aquecimento.

Observando a tabela 14, nota-se que a FORSU+ DGBL é um material que contém maior quantidade de matéria orgânica em sua composição em relação ao DGBL, pois apresenta uma maior porcentagem de SV. Percebe-se também que o tratamento FORSU+DGBL apresenta um percentual maior redução de SV em relação ao tratamento DGBL, permitindo demonstrar que o sistema de biodigestão anaeróbia é eficiente para o tratamento de FORSU+DGBL, diminuindo a concentração de carga orgânica em cerca de 85,57%.

Tabela 14- Percentual de Redução de SV

Tratamento	% Afluente	% Efluente	kg Afluente	kg Efluente	% de Redução
FORSU+DGBL	5,27a	0,76 b	0,105 a	0,015 b	85,57 a
DGBL	3,02 b	1,86 a	0,060 b	0,037 a	38,28 b
F	0	166,94	0	168,09	343,98
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
CV%	0	10,29	0	10,26	6,51

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

O resultado apresentado foi semelhante ao obtido por Reis (2012) com eficiência média de remoção de 82 % para SV. O estudo avaliou a eficiência do processo de remoção de matéria orgânica e produção de biogás utilizando um biodigestor anaeróbio com recirculação do efluente, com substrato constituído de 2kg de resíduos orgânicos triturados e diluídos em 10 L de água, provenientes da cozinha de um restaurante universitário.

A Tabela 15 apresenta os percentuais de sólidos totais do afluente e efluente, e o percentual de redução de sólidos totais dos tratamentos FORSU+DGBL e DGBL em biodigestores semicontínuos.

Tabela 15 - Percentual de Redução de ST em Biodigestores semicontínuos

Tratamento	% Afluente	% Efluente	kg Afluente	kg Efluente	% de Redução
FORSU+DGBL	5,84 a	1,05 b	0,117 a	0,021 b	81,89 a
DGBL	3,59 b	2,28 a	0,071 b	0,045 a	36,36 b
F	0	149,20	0	149,34	300,62
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
CV%	0	9,53	0	9,49	7,02

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

O percentual de redução dos sólidos totais de 81,89%, reafirma a eficiência de degradação do sistema de biodigestão anaeróbia para o tratamento FORSU+DGBL.

Os teores de nutrientes presentes no efluente dos biodigestores para os dois tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Teores de macro nutrientes nos efluentes dos biodigestores semicontínuos

Tratamento	N	P g/100g	K
FORSU+DGBL	2,02 b	2,29 b	2,80 a
DGBL	2,74 a	2,42 a	2,74 a
F	334,72	5,54	0,03
p-valor	<0,0001	0,0464	0,8579
CV%	2,63	3,76	19,12

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si (Teste Tukey)

Fonte: Dados da Pesquisa

Pode-se observar que as concentrações de Nitrogênio e Fósforo são maiores para o tratamento DGBL, havendo uma diferença significativa entre eles. As proporções de potássio não apresentaram diferenças significativas por apresentarem valores médios muito próximos. Montoro (2017) apresentou os índices de 5,58%, 1,88% e 2,1% para os teores de N, P e K em biodigestores semicontínuos com batata doce co-digeridos com dejetos bovinos leiteiros na proporção 50:50. Xavier (2009) obteve em biodigestores semicontínuos, biofertilizante a partir de dejetos de vacas em lactação co-digeridos com cana-de-açúcar teores de N, P e K de 3,38%, 3,03% e 2,5%, respectivamente.

4.3. Estudo de Caso do município de Penápolis/SP

O estudo de caso aplica os resultados obtidos no experimento semicontínuo, em uma escala de produção real, tendo como base os dados do município de Penápolis. Como resultados são apresentados os dados de dimensionamento de biodigestor e lagoa de tratamento, potencial de produção de biogás e biofertilizante, e potencial de geração de energia.

4.3.1. Dimensionamento do Biodigestor e da lagoa de efluente

Para determinar o dimensionamento do biodigestor e da lagoa de armazenamento do biofertilizante, calculou-se o volume de dejetos gerados diariamente por 40 vacas, cuja produção de 1200 l de leite supre as necessidades de consumo mensal de leite das escolas municipais, o volume da carga diária composta pela FORSU da cidade de Penápolis e o volume de água necessário para diluição.

As quantidades de dejetos diários, excretados por uma vaca de leite, segundo Santos e Nogueira (2012) é cerca de 7% do peso vivo do animal. Portanto, considerando que os animais utilizados neste experimento pesam em média cerca de 430 kg é possível estimar por meio das Equações 4 e 5, a quantidade média de dejetos produzida por dia e o volume de carga diária de DGBL.

Para cálculo da FORSU este estudo adotou os resultados de Kroeger et al (1998), onde relatam que 30% do lixo urbano pode ser biologicamente tratado via compostagem e biodigestão anaeróbia. Considerando que a coleta de lixo na cidade de Penápolis nos anos de 2014 e 2015 atingiu uma média de aproximadamente 13.000t é possível estimar por meio das Equações 6 e 7, a quantidade média resíduos sólidos coletados por dia e a FORSU correspondente.

Para cálculo do volume de água para uma diluição a 6% ST, este estudo utilizou a proporção FORSU+DGBL / água de 1:3, onde se é possível estimar por meio da Equações 8 e 9, a quantidade de água necessária e o volume total de carga diária do biodigestor. A tabela 17 mostra os valores de composição da carga diária para o biodigestor.

Tabela 17 - Composição da carga diária do biodigestor

FORSU(kg)	DGBL(kg)	ÁGUA(kg)	TOTAL(kg)
10.700	1.190	35.670	47.560

Fonte: Dados da Pesquisa

Para estimar o volume útil do biodigestor e da lagoa de armazenamento de biofertilizante, foi calculado produto da carga diária e do tempo de retenção hidráulica de 30 dias para o biodigestor e 15 dias para lagoa, conforme a Equação 10. Os dados são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Volume útil do biodigestor e da lagoa de armazenamento de efluente

	Carga diária (l)	TRH	Volume útil (m³)
Biodigestor	47.560	30	1.426,80
Lagoa de efluente	47.560	15	713,40

Fonte: Dados da Pesquisa

Considerando os resultados apresentados, para o processamento de 30% dos resíduos sólidos urbanos coletados no município será necessário um biodigestor de 1500 m³.

4.3.2. Capacidade de produção de biogás

O estudo feito por Hardoim (2003) apresentou como resultado um volume de 118 m³ de biogás em um confinamento de 100 vacas.

Para estimar a produção de biogás, utilizou-se 47.560 kg de carga diária de substrato. Os valores de 0,105 kg de SV no afluente diário e o potencial de produção de biogás por kg de sólidos voláteis adicionados de 0,117 m³/kg, foram determinados no ensaio de biodigestão anaeróbia. A produção diária de biogás é calculada pela equação 11 e a Tabela 19 apresenta o valor de produção diária de biogás baseado no potencial de produção de biogás por kg de sólidos voláteis adicionados.

Tabela 19 - Produção diária de biogás

Carga diária (kg)	SV adicionados (kg)	Produção e biogás (m³)
47.560	4.993,80	584,27

Fonte: Dados da Pesquisa

4.3.3. Capacidade de geração de energia elétrica

A geração de eletricidade a partir do biogás é realizada por meio de combustão, onde a queima do biogás resulta em energia mecânica que por sua vez ativa os

pistões de um grupo gerador, e após essa movimentação transforma-se em energia elétrica.

Um estudo realizado por Coldebella (2009) avalia a viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado por dejetos da bovinocultura de leite, utilizando um motor de combustão interna convertido para o biogás e acoplado a um gerador elétrico e registrou 2,1 kWh por m³ de biogás.

O volume de 1 m³ de biogás (com 60% de CH₄) pode ser aplicado para gerar 1,43 kwh de eletricidade (SGANZERLA,1983).

Segundo Santos (2000), a eficiência dos sistemas de cogeração varia em função da composição do biogás e do equipamento utilizado para conversão, podendo chegar a 38%, que equivale a 2,0 a 2,5 kWh por m³ de biogás.

De acordo com o manual de grupos geradores a gás da ER-BR (ERBR,2017), o grupo gerador necessário para atender a demanda de biogás produzida pelo biodigestor é o conjunto motogerador a biogás de 120KVA, modelo GMWM120 com 47m³/h de consumo de biogás (65% de CH₄) e potencial de geração de 77 kw/h. O cálculo de geração de energia elétrica é obtido pela equação 12 e a tabela 20 apresenta a produção diária e mensal de energia elétrica, e o período de funcionamento do motogerador.

Tabela 20 – Produção de energia elétrica

Período	Produção de Biogás	Horas de funcionamento	Total (kwh)
Diário	584,27	12,5	957,20
Mensal	17.528,10	375	28.716,00

Fonte: Dados da Pesquisa

Considerando a produção diária de biogás de 584,27 m³, o potencial de geração de energia elétrica será 957,20 kwh, e o moto-gerador funcionará por aproximadamente 12 horas e meia por dia.

Para manter o funcionamento do Complexo de tratamento de resíduos juntamente com o prédio da central de atendimento ao consumidor, o museu e o centro de educação ambiental, registrou-se uma média mensal de consumo de energia elétrica de 8902 kwh, em 2016, o que gera um valor de aproximadamente 20.000 kwh para distribuição na rede elétrica, podendo ser utilizada em abatimento da iluminação pública de pessoas de baixa renda, ou em outros imóveis do DAEP.

4.3.4. Capacidade de produção de Biofertilizante

Para estimar o valor fertilizante do afluente da biodigestão anaeróbia FORSU+DGBL, considerou-se como base o volume de biofertilizante gerado e a concentração dos teores dos nutrientes N, P e K. A Ureia (45% N) foi o fertilizante mineral adotado como fonte de nitrogênio, o superfosfato simples (18% de P_2O_5) como fonte de fósforo, e o cloreto de potássio (58% K_2O) como fonte de potássio.

Tendo como base o valor encontrado no experimento semicontínuo para os sólidos totais do efluente, o biofertilizante da biodigestão anaeróbia da FORSU de Penápolis apresentou 500kg de matéria seca. Para calcular a equivalência do fertilizante foram utilizadas as equações 13, 14 e 15, e a tabela 21 mostra a equivalência da concentração de NPK no afluente com a fonte de Fertilizante.

Tabela 21 – Equivalência de NPK no efluente com fertilizantes

N(%)	Ureia (kg)	P(%)	Superfosfato simples (kg)	K(%)	Cloreto de Potássio (kg)
2,02	22,44	2,29	145,67	2,8	28,96

Fonte: Dados da Pesquisa

Parte do efluente pode ser utilizado como reciclo no biodigestor para atuar como um agente tamponante e inoculante, mantendo a estabilidade e aumentando a produção de biogás. O biofertilizante pode ser utilizado como mistura no adubo gerado pelo serviço de podas de árvores para distribuição em hortas comunitárias.

4.3.5. Estimativa de ganho ambiental

Para se estimar um valor de ganho ambiental tomou-se como base a redução da emissão de metano para a atmosfera e o aumento do tempo de vida útil do aterro sanitário. Para cálculo da emissão de CH_4 do aterro sanitário de Penápolis em 2015 utilizou-se a equação 16. Considerando que o valor de carga diária é de 10700 kg, a quantidade retirada do aterro por ano é de 3905,5 t de resíduos. Os parâmetros da constante da geração de CH_4 (K) e do potencial da geração de CH_4 por tonelada de lixo (Lo) são os valores recomendados pela EPA (EPA, 2008). Para o potencial da geração de CH_4 (Lo), o valor recomendado pela EPA é de $100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ de resíduo. A Constante da geração de CH_4 (k) depende da pluviometria no aterro, e de acordo com o DAEP, o índice pluviométrico de Penápolis em 2015 foi de 1614,6 mm. DAEP

(2016) Para pluviometria maior do que 635 mm/ano, o valor de k recomendado pela EPA é de 0,04.

O valor estimado de redução de emissão de CH₄ foi de 15.622 m³ CH₄ no ano, e considerando que 1m³ de metano tem o peso de 0,72kg, e 1kg de metano equivale a 6,27 kg de carbono equivalente, estima-se que a redução da emissão de metano para atmosfera é equivalente a 70,5 créditos de carbono por ano.

A carga diária de FORSU retirada do aterro e processada pelo biodigestor, corresponde a 30% do RSU coletado, onde pode-se calcular uma estimativa de ganho de vida útil para o aterro sanitário nas mesmas proporções, ou seja, uma sobrevida de 25 meses.

5 Conclusões

A inserção de até 30% da FORSU é o limite para o melhor desempenho do processo em alimentação batelada.

O experimento em biodigestores semicontínuos em uma proporção FORSU e DGBL de 90% -10% apresentou um potencial de produção de biogás de 0,117 m³/kg de SV ad e um valor de 36,23 kg de FORSU para produção de 1m³ de biogás.

O estudo de caso aplicando os resultados baseando-se em dados da cidade de Penápolis, apresentou uma produção de um 500kg de biofertilizante diariamente e um potencial de geração de energia elétrica de 1,63 kWh por m³ de biogás.

A biodigestão anaeróbia é um processo que se apresenta como uma alternativa ao tratamento do lixo orgânico, a redução da emissão de gases de efeito estufa em aterros e lixões e geração de energia limpa, além de aumentar a vida útil do aterro sanitário, pois o percentual de lixo orgânico coletado e não destinado ao aterro é diretamente proporcional ao aumento do período de sua utilização.

6 Referências

- ABRELPE, **Panorama dos resíduos Sólidos no Brasil**. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: dez. de 2016.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8849**: apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Abril, 1985.
- AHRING, B. K.; IBRAHIM, A. A.; MLADENOVSKA. **Effect of temperature increase from 55 to 65° C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure**. Water Research, v 35, n. 10, p. 2246-2452, 2001.
- APHA. AWWA. WPCF. - American Public Health Association. **Standart methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington, 2005.
- BARCELOS, B.R. **Avaliação de diferentes inoculos na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domésticos**. Orientador Prof^a Ariuska Karla Barbosa Amorim. Brasília: [s.n], 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e recursos Hídricos)- Faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília.
- BARRERA, P. **Biodigestores**: Energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. São Paulo: Ícone, 1993. 106 p.
- BATAGLIA, O. G. et.al. **Métodos de análises químicas de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico).
- BENINCASA, M.; ORTOLANI, A. F.; LUCAS Jr, J. **Biodigestores rurais modelo indiano, chinês e batelada**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. UNESP, 1991. 34p (Boletim Técnico, 8).
- BOUALLAGUI, H.; TORRIJOS, A.; GODON, J.J.; MOLETTA, R.; BEN CHEIKH, R.; TOUHAMI, Y.; DELGENES, J.P.; DI, A. H. **Two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactor performance**. Biochemical Engineering Journal, 21 (2004), pp. 193-197. 2004.
- BRABER, K. **Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option on de verge of breakthrough**. *Biomass and Bioenergy*, 9 (1-5):365-376, 1995.
- Brasil. Presidência da República. **Decreto nº 86.955, de 18 de Fevereiro de 1982** Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-86955-18-fevereiro-1982-436919-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 10 jul., 2017.
- BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 7.404/10. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Disponível: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 11 mar. de 2013.

BRASIL. Presidência da República. **Lei Federal nº 11.107/05, de 06 de abril de 2005**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 03 mai., 2012.

Brasil. **LEI Nº 12.725, DE 16 DE OUTUBRO DE 2012. Dispõe sobre o controle da fauna nas imediações de aeródromos**. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12725.htm>. Acesso em 20 de julho de 2017.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. 1985. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.

CARAMELO, A. D. **Uso da fração orgânica de lixo urbano como substrato de biodigestor e como matéria-prima para formação de mudas de quaresmeira (Tibouchina granulosa) com duas lâminas de irrigação**. 2010. 53f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2010.

CARNEIRO, P. A. **Análise das tecnologias para gestão e reaproveitamento energético dos resíduos urbanos para reciclagem de plásticos**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha. Itajubá: [s. n.], 2009. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)- Universidade Federal de Itajubá.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico em águas residuárias**. Belo Horizonte: DESA; UFMG, 1997. 246 p.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C. **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200053&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: set. de 2014.

DAEP, **Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Penápolis**. Disponível em: <<https://www.daep.com.br/servicos>>. Acesso em: jul. de 2017.

Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Penápolis, DAEP. **Índice Pluviométrico 2015**. Disponível em: <https://www.daep.com.br/ws/upload/arquivos/indicepluviometrico/indicepluviometrico2015.pdf>. Acesso em: jul. de 2016

EL-MASHAD, H. M.; ZHANG, R. **Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste**. Bioresource Technology, v. 101, p. 4021–4028, 2010.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Práticas Agroecológicas. Caldas e biofertilizantes**. 2006. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/clima-temperado/busca-de-publicacoes/-publicacao/903764/caldas-e-biofertilizantes>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

ER-BR. **Grupo geradores a gás**. Disponível em: <http://www.erbr.com.br/produtos/folder_geral_2017.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2017.

FELIZOLA, C. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S. **Estudo do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Revista Agropecuária Técnica, v.27, n.1, p.53–62, 2006.

FERNÁNDEZ, A.; SÁNCHEZ, A.; FONT, X. **Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin.** Biochemical Engineering Journal, Amsterdam, v. 26, p. 22-28, 2005.

FERREIRA, J.C.B.; SILVA J. N. **Biodigestor:** aplicações e potencialidades. Um estudo de caso do IFMG campus Bambuí. In: II Semana de Ciência e Tecnologia do IFMG. Bambuí, 2009.

FERREIRA, L. M. S. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros com e sem separação da fração sólida.** 2013. xiv, 67 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/96527>>.

FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.I.; SALES, D. **Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste:** Focusing on the inoculum sources. Bioresource Technology, v. 98, 2007

FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.I.; **Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste.** Bioresource Technology, v. 99, 2008

FUKAYAMA, E. H., **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante.** 2008. 110f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestor em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor:** Um estudo de caso na região de Toledo -PR, 2003. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

GÓMEZ, X. et al. **Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes:** conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. Renewable Energy, Schenectady, v. 31, n. 2, p. 2017-2024, 2006.

HARDOIM, P. C., GONCALVES, A., DICESAR, M. A., **Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100053&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: julho. 2017.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. **Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure.** Water Research vol. 39, p. 1543–1552, 2005.

HILL, D. T. **Methane gas production from dairy manure at high solids concentration.** Transactions of the ASAE. Saint Joseph, v. 23, n. 1, p. 122-126, 1980.

IBGE.. **Censo Demográfico 2010.** <Disponível em <https://censo2010.ibge.gov.br/>> Acesso em 10 de ago de 2015.

IBGE. **Produção Pecuária Municipal 2015.** Rio de Janeiro, RJ, v. 43, p.1-49, 2015.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** V.5., 2006. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol5.pdf>. Acesso em: 10 jul 2017, 13:09.

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON L. **The anaerobic digestion of solid organic waste.** Waste Management, vol. 31, p 1737–1744, 2011.

KROEGER, B. ; BARTH, J. **Composting process in Europe.** Biocycle, 65-68,Abril 1998.

LEITE, V. D. et al. **Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbico de batelada.** Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 7, n. 2, p. 318-322, Aug. 2003 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-como-produ43662003000200022&lng=en&nrm=iso>. access on 22 Jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662003000200022>.

LUCAS JUNIOR., J. et al. **Avaliação do uso de inoculo no desempenho de biodigestores abastecidos com estrume de frangos de corte com cama de maravalha.** In: Congresso brasileiro de engenharia agrícola, 22, Ilhéus. Anais... Ilhéus: SBEA/CEPLAC, 1993. p. [915-930. 1993](#)

LUCAS JUNIOR, J. **Algumas considerações sobre o uso do dejetos de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios.** 1994. 137f. Tese (Livre-Docência em Construções Rurais) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores para o meio rural.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. Palestra... UFV: SBEA, 1995.

MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar.** 2011. vi, 51 f. Dissertação (mestrado) - Unversidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2011.

MACIAS-CORRAL M.; SAMANI Z.; HANSON A.; SMITH G.; FUNK P.; YU H.; LONGWORTH J. **Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure**. Bioresource Technology, vol.99, p 8288–8293, 2008.

MAGHANAKI, M.; GHOBADIANA, B.; NAJAFIA, G.; JANZADEH GALOGAH, R. **Potential of biogas production in Iran**. Bioresource Technology, v. 101, p. 1153-1158, 2013.

MALAVOLTA, E. et al. **Micronutrientes, uma visão geral**. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. Micronutrientes na Agricultura. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1991. p. 1-33.

MATOS, A. T. **Poluição ambiental. Impactos no meio físico**. 1ª edição. Viçosa, MG: ed. UFV, 2010, 260 p.

MONTORO, S. B. **Co-digestão de batata doce com dejetos de bovinos leiteiros: uma avaliação técnica e econômica para produção de energia e biofertilizante**. 91p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2017.

NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de Sistema de produção de biogas em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

ORRICO, A. C. A.; LOPES, W. R. T.; MANARELLI, D. M.; ORRICO JUNIOR, M. A. P.; SUNADA, N. S. **Co-digestão anaeróbia dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte**. Engenharia Agrícola., Jaboticabal, v.36, n.3, p.537-545, maio./jun. 2016.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. **Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.2, p.399-410, mar./abr. 2011

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 (Mestre em Energia). Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PONSÁ, S.; GEA, T.; SÁNCHEZ, A. **Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates**. Biosystems Engineering, 108: 352–360. 2011.

RAPPORT, J.; ZHANG, R.; JENKINGS, B. M, et al. **Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste**. California Integrated, Waste Management Board, March 2008.

REIS, A.S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 2012. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

SANTOS, P. **Guia técnico de biogás**. Lisboa: Centro para a Conservação de Energia, 2000.

SANTOS, T.M.B. dos. **Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frangos de corte**. Jaboticabal. Tese (Doutorado em Zootecnia/ Produção Animal). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista. 2001. 171p.

SANTOS, I. A; NOGUEIRA, L. G. H. **Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia**. Revista Agroambiental. Pouso Alegre, v. 4, n. 1, p. 41-49, abr. 2012.

SAS. **User's guide: statistics**. 5th ed Cary: SAS Institute, 1990. 956p

SCHULZ, F. **Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos São Leopoldo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2015.

SGANZERLA, E. **Biodigestores: Uma solução**. Porto Alegre: Agropecuária, 1983

SILVA, D. J. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Viçosa: UFV, 1981. 166 p.

SOUZA, J.R. **Influência da utilização do lixo orgânico urbano como fonte de biofertilizante e composto para o desenvolvimento de ipê mirim (*tecoma stans*) com duas lâminas de irrigação**. Jaboticabal. Tese (Doutorado em Agronomia/ Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista. 2012. 59p.

SPEECE, R. E. **Anaerobic Biothecnology for industrial wastewaters**. Nashville, Tennessee: Vanderbilt University, 393p. 1996.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inoculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia)-Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2001.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA, **Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions form Municipal Solid Waste Landfills**, Washington, 2008. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/draft/db02s04.pdf>. Acesso em: 10 jul 2017, 11:47.

VAN HORN, H. H. et al. **Components of dairy manure management systems**. Journal Dairy Science, Champaign, v. 77, n. 7. p. 2008-2030. 1994.

XAVIER, C.A.N. **Caldo de cana-de-açúcar na biodigestão anaeróbia com dejetos de vacas em lactação sob diferentes dietas**. 104f. Tese (Doutorado

em Zootecnia- Área de Concentração em Produção Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

ZHANG, Y., BANKS, C. J., HEAVEN, S., **Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams**. Journal of Environmental Management, vol. 104, p. 166 -174, 2012.