

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE
MESQUITA FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS
AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS CAMPUS DE
JABOTICABAL**

**CANA-DE-AÇÚCAR E SILAGEM DE CANA EM
CODIGESTÃO COM ESTERCO BOVINO NA
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Silvana Lourença de Meneses

**Orientadores: Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior
Prof^a. Dr^a. Ana Claudia Ruggieri**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para a
obtenção do título de Doutor em Zootecnia.

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Agosto de 2011

M543c Meneses, Silvana Lourença de
Cana-de-açúcar e silagem de cana em codigestão com esterco
bovino na produção de biogás / Silvana Lourença de Meneses. –
Jaboticabal, 2011
xx, 101 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011

Orientadores: Jorge de Lucas Junior; Ana Claudia Ruggieri

Banca examinadora: Adélia Pereira Miranda, Tânia Mara Baptista
dos Santos, José Ricardo Soares Telles de Souza, Mauro Dal Secco
de Oliveira

Bibliografia

1. Biodigestão anaeróbia. 2. Biomassa. 3. Energia Renovável. 4.
Potencial energético. 5. Produção de metano. I. Título. II. Jaboticabal-
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 662.767.2

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES

SILVANA LOURENÇA DE MENESES – filha de Gentil Alves de Meneses e Ana Lourença do Carmo de Meneses, nascida em Caxias – MA, no dia 22 de março de 1958. Concluiu o curso de graduação em Química Industrial na Universidade Federal do Ceará (UFCE) em 1985. Obteve o título de Mestre em Educação, em 2000, pelo programa de Pós-graduação em Educação da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Ingressou no curso de Doutorado em Zootecnia em março de 2008 pelo programa de Pós-graduação de Zootecnia da Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, campus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior. É professora assistente IV do Departamento de Química e Biologia da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Deus, na ciência te encontrei,
me fortaleci e confirmei que todo
conhecimento vem de Ti!

DEDICO

Ao meu pai, Gentil Meneses (in memoriam),

À minha mãe Ana Lourença,

Ao meu companheiro Jales,

À minha filha Luiza,

À Juliana Bega,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus, que nos revela, mostrando o nosso “tamanho” e capacidade.

Ao professor Jorge, pela oportunidade, confiança, orientação tranquila e segura e sobretudo, pelo exemplo de profissional e ser humano.

À professora Ana Claudia Ruggieri pela co-orientação.

Aos professores Pablo Iturrino, Ademar Pitelli, Marcelo Armoa, João Galbiati, Ricardo Telles, Mauro Dal Secco, Adélia Miranda e Tania Mara, que tanto contribuíram com sugestões e correções para melhoria do trabalho.

À CAPES, pela bolsa de doutorado.

Ao Departamento de Química e Biologia da Universidade Estadual do Maranhão.

Ao meu companheiro Jales, pela paciência, compreensão, amizade e amor, principalmente nos momentos mais difíceis.

À minha filha Luiza, que me inspira a ser uma pessoa cada vez melhor.

À minha família, ausência sempre presente, esteio e porto seguro.

À Juliana Bega “meu anjo da guarda” em Jaboticabal.

Aos companheiros do DINTER de São Luís, em especial, Socorro, Roberto, Gonçalo, João e Sebastião pelos bons momentos desfrutados juntos e pelo apoio recebido durante minha estadia em Jaboticabal.

Ao Francisco, Eleuza e Hélder.

Aos colegas de laboratório, pela ajuda e companheirismo, Laura, Alex, Joseli, Airon, Maria Fernanda, Paula, Estela, Marcelo, Bernardo, Carol, Natasha, Gilvânia, Cristiane, Silvia, Rose, Max, Samanta e Estevão.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Luizinho, Sr. Francisco, Ailton e Davi.

À Laurinete, secretária do Departamento de Química e Biologia da UEMA.

À Sheila Polyanna, secretária do Departamento de Zootecnia da UEMA.

Aos irmãos do Centro Espírita UDV, pela confiança e torcida pelo meu sucesso.

"A vida é combate / que aos fracos abate / que os fortes, os bravos só pode
exaltar".

Gonçalves Dias

"Nosso maior medo não é sermos inadequados.
Nosso maior medo é não saber que nós somos poderosos,
Além do que podemos imaginar.
É a nossa luz, não nossa escuridão que mais nos assusta".

Do filme Prova de Fogo

"Aprendi com as primaveras a me deixar cortar e voltar inteira".

Cecília Meireles

SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE ABREVIACÕES.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
RESUMO.....	xix
SUMMARY.....	xx
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. OBJETIVOS.....	5
III. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
3.1. Escassez de Energia.....	6
3.2. Biomassa.....	9
3.3. Energia da Biomassa.....	10
3.4. Cana-de-açúcar.....	14
3.5. Silagem de Cana.....	18
3.6. Biodigestão Anaeróbia na Produção de Energia.....	20
3.7. A Biodigestão no Brasil.....	24
3.8. Microbiologia e Bioquímica da Digestão Anaeróbia.....	25
3.9. Termodinâmica da Digestão Anaeróbia.....	29
3.10. Cinética da Digestão Anaeróbia.....	32
3.11. Fatores que Influenciam a Atividade Anaeróbia.....	34
3.11.1. Influência da Temperatura.....	34
3.11.2. Influência do pH.....	35
3.11.3. Alcalinidade e Ácidos Voláteis.....	36
3.11.4. Necessidades Nutricionais.....	38
3.11.5. Tempo de Retenção.....	39
3.11.6. Toxicidade na Digestão Anaeróbia.....	40
3.12. Codigestão Anaeróbia de Substratos Orgânicos.....	41
3.13. Biogás.....	44
3.14. Utilização do Biogás.....	46

3.15. Biogás no Mundo.....	49
IV. MATERIAL E MÉTODOS.....	51
V. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
VI. CONSIDERAÇÕES.....	87
VII. CONCLUSÕES.....	88
VIII. REFERÊNCIAS.....	89

LISTA DE ABREVIACÕES

a = ano

Al = alcalinidade intermediária

AP = alcalinidade parcial

AT = alcalinidade total

atm= atmosfera

AV = ácido volátil

AVT = ácidos voláteis totais

Ca = cálcio

CaCO₃ = carbonato de cálcio

CH₄ = metano

Cl = cloro

cm = centímetros

CO₂ = dióxido de Carbono

CO₃²⁻ = íon carbonato

Cu = cobre

CV = coeficiente de variação

d = dia

DBO = demanda bioquímica de oxigênio

ETARs = estação de tratamento de águas residuárias

FCAV = Faculdade de ciências agrárias e veterinárias

FDA = fibra em detergente ácido

FDN = fibra em detergente neutro

Fe = ferro

GJ = gigajoule

GLP = gás liquefeito de petróleo

Gtep = giga toneladas equivalentes de petróleo

GWh = gigawatt hora

H⁺ = íon hidrogênio

H₂O = água

H_2S = sulfeto de hidrogênio

ha = hectare

HCl = ácido acético

HCO_3^- = íon bicarbonato

IEB = Energia Elétrica Brasileira

J = joule

K = potássio

Kcal = quilo caloria

kg = quilo

km^2 = quilômetro quadrado

Kw = quilowatt

kWh = quilowatt - hora

L = litro

LA = lodo ativado

$\ln$ = logaritmo neperiano

m^3 = metro cúbico

MDL = mecanismo de desenvolvimento limpo

Mg = magnésio

mg = miligramas

MJ = mega joule

mm = milímetros

mM = milimol

Mn = manganês

MO = matéria orgânica

Mo = molibdênio

MS = matéria seca

MWh = megawatt hora

N_2 = nitrogênio

Na = sódio

NH_3 = amônia

Ni = níquel

Nm³ = normal metro cúbico

°C = graus Celsius

OH⁻ = íon hidroxila

P = fósforo

PCI = poder calorífico inferior

PET = politereftalato de etileno

pH = potencial hidrogeniônico

ppm = partes por milhão

PVC = poli cloreto de vinila

R = constante dos gases

RFV = resíduos de frutas e verduras

RNA = ácido ribonucleico

RSU = resíduos sólidos urbanos

S = enxofre

Se = selênio

SO₄²⁻ = íon Sulfato

ST = sólidos totais

SV = sólidos voláteis

T = temperatura

t = tonelada

TRH = tempo de retenção hidráulica

UASB = Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UNESP = Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita filho”

Zn = zinco

% = percentual

ΔG = variação de energia

ΔG° = variação de energia livre padrão

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Balanço de energia na produção de etanol, com diversas matérias-primas.....	17
Tabela 2. Produção de metano originada de diversos tipos de biomassa.....	20
Tabela 3. Variação da energia livre (ΔG^0) para reações da digestão anaeróbia, a 298 K, 1 atm e pH = 7.....	31
Tabela 4. Faixas de temperatura para o desenvolvimento ótimo das bactérias	34
Tabela 5. Concentrações estimuladoras e inibidoras de alguns compostos.....	41
Tabela 6. Propriedades dos principais constituintes do biogás.....	45
Tabela 7. Comparativo energético do biogás com outros combustíveis.....	46
Tabela 8. Número de instalações para a produção de biogás e a energia produzida e contabilizada no final do ano de 2006, nos principais países europeus.....	48
Tabela 9. Massa (g) e % de sólidos totais (ST) do esterco e vegetal utilizados na composição dos substratos para abastecimento dos biodigestores do ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal.....	55
Tabela 10. Parâmetros analisados e métodos utilizados nas análises dos substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal.....	58
Tabela 11. Valores de pH encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal em um período de 50 dias.....	61
Tabela 12. Valores de alcalinidade total (AT), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade parcial (AP), relação AI/AP e acidez total em mg de CaCO_3/L dos tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de	

vegetal e somente esterco, do ensaio de monitoramento em um período de 50 dias.....	65
Tabela 13. Produção média de biogás, em m ³ , sob forma de totais acumulados de sete em sete, para os tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	73
Tabela 14. Potenciais de produção do biogás, em m ³ , por kg de sólidos totais adicionados e reduzidos e por kg de sólidos voláteis adicionados e reduzidos, dos tratamentos em codigestão cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino em biodigestão anaeróbia.....	75
Tabela 15. Produção e potenciais de produção do metano, em m ³ , por kg de sólidos totais adicionados e reduzidos e por kg de sólidos voláteis adicionados e reduzidos, dos tratamentos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	77
Tabela 16. Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) em porcentagem e em massa e a redução de sólidos totais e voláteis em porcentagem, dos biodigestores abastecidos com esterco bovino e cana-de-açúcar nas proporções 5 e 10%, esterco bovino e silagem de cana nas proporções 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	80
Tabela 17. Massa (kg) e porcentagem de redução (%) da fração fibrosa (FDN, FDA, hemicelulose, celulose) e lignina contidas nos afluentes e efluentes dos biodigestores abastecidos com cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	83

Tabela 18. Valores médios dos teores de N, P, K, Mg, Ca, Fe, Cu, Mn e Zn no afluente e efluente dos biodigestores abastecidos com esterco bovino e cana-de-açúcar nas proporções 5 e 10%, esterco bovino e silagem de cana nas proporções 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	86
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta Mundial de Energia Primária.....	13
Figura 2. Exemplo de cana-de-açúcar <i>in natura</i> e seu respectivo bagaço.....	14
Figura 3. Digestão anaeróbia da matéria orgânica.....	28
Figura 4. Efeito da pressão parcial de hidrogênio na variação de energia livre para a degradação de propionato, butirato e etanol e formação de metano.....	32
Figura 5. Curva típica do crescimento bacteriano.....	33
Figura 6. Balanço da codigestão anaeróbia.....	42
Figura 7. Fluxograma de desenvolvimento do experimento.....	52
Figura 8. Vista parcial dos biodigestores batelada de bancada utilizados no ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal.....	53
Figura 9. Vista parcial dos silos na operação de ensilagem da cana-de-açúcar utilizada no ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal.....	54
Figura 10. Abastecimento dos biodigestores com substratos utilizados no ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal.....	55
Figura 11. Valores de pH encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco em um período de 50 dias.....	63
Figura 12. Valores de alcalinidade encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal	68

e somente esterco em um período de 50 dias.....	
Figura 13. Valores de acidez encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco em um período de 50.....	70
Figura 14. Distribuição da produção de biogás, em m ³ , ao longo do tempo para os tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	74
Figura 15. Concentração de metano no biogás produzido nos biodigestores abastecidos com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia.....	78

CANA-DE-AÇÚCAR E SILAGEM DE CANA EM CODIGESTÃO COM ESTERCO BOVINO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

RESUMO - O aproveitamento energético do biogás oriundo da codigestão cana-de-açúcar e silagem de cana com esterco bovino é uma iniciativa desenvolvida visando mitigar o efeito estufa e dar mais sustentabilidade à matriz energética. Objetivou-se avaliar a viabilidade da codigestão anaeróbia do esterco bovino com cana de açúcar e esterco bovino com silagem de cana no potencial de produção de biogás e metano. O trabalho foi realizado no Laboratório de Biomassa e Biodigestão Anaeróbia da Unesp, campus de Jaboticabal. Foram utilizados biodigestores de bancada, tipo batelada com capacidade de 2 litros. Foram analisados pH, alcalinidade, acidez volátil, macro e micronutrientes, fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, celulose, hemicelulose, teores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV). O pH com 10 dias após abastecimento variou de 5,62 à 5,98 para cana 10% e somente esterco, respectivamente. A alcalinidade e acidez foram satisfatórios para todos os tratamentos analisados. A produção total acumulada de biogás variou de 0,01597m³ à 0,1916m³ para silagem 10% e cana 5%, respectivamente. O potencial de produção de biogás por kg de SV reduzidos variou de 0,54 à 7,05 m³/kg para os tratamentos silagem 10% e cana 5%, respectivamente. O potencial de produção de metano por kg de SV reduzidos foi respectivamente, 0,35 à 4,12m³/kg para silagem 10% e cana 5%. As reduções de ST, SV e fração fibrosa hemicelulose foram mais efetivas no tratamento com esterco. No tratamento cana 5% as maiores reduções ocorreram nas frações FDN, FDA e celulose. Conclui-se que a codigestão de esterco bovino com cana de açúcar na proporção 5% teve melhor rendimento em relação aos outros tratamentos avaliados.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestão anaeróbia; biomassa; energia renovável; potencial energético; produção de metano;

SUGAR CANE AND SUGAR CANE SILAGE IN CO-DIGESTION WITH CATTLE MANURE IN ORDER TO PRODUCE BIOGAS.

ABSTRACT - The energetic use of biogas that is a result of the co-digestion of sugar cane and sugar cane silage with cattle manure is one of the alternatives that may be developed in order to reduce the greenhouse effect and give more sustainability to the energetic matrix. The aim of the study was to evaluate the viability of the anaerobic co-digestion of sugar cane and cattle manure and sugar cane silage and cattle manure to produce biogas and methane. The study was done in the Biodigestion Anaerobic Laboratory from São Paulo State University, Jaboticabal-SP, two liters stand biodigestors of the batch type were used. The parameters used were pH, alkalinity, acidity, macro and micronutrients, NDF, ADF, lignin, celluloses, total solids and volatile solids. After 10 days, the pH varied from 5.62 to 5.98 for sugar cane (10%) and only cattle manure treatments, respectively. The alkalinity and acidity had satisfactory results for all the period. The biogas production varied from 0.01597 m³ to 0.1916 m³ to silage (10%) and sugar cane (5%) treatments, respectively. The biogas production by kg of VS reduced varied from 0.54 to 7.05 m³/kg for silage (10%) and sugar cane (5%) treatments, respectively. The methane production by kg of VS varied from 0.35 m³ to 4.12 m³ for silage (10%) and sugar cane (5%) treatments. The reduction of TS, VS and fibrous fraction were more effective in the treatment sugar (5%). The co-digestion with cattle manure with sugar cane at 5% has better efficiency related to the others.

KEY-WORDS: Anaerobic digestion, biomass, renewable energy, methane production, energetic potential.

I. INTRODUÇÃO

Diversos fatores justificam a importância dos atuais estudos sobre energia, dentre eles, o anunciado esgotamento das fontes energéticas à base de combustíveis fósseis, a expansão da demanda industrial e a maior eficiência energética aliada a menores índices de poluição. Estima-se que quanto maior o crescimento da população mundial, maior será a demanda por energia, e maiores terão de ser os esforços para ampliar a oferta das diversas fontes energéticas, fazendo-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para assegurar o suprimento energético das populações. Nessa perspectiva, destaca-se a energia da biomassa ou agroenergia que oferece tal oportunidade e vantagens por ser renovável, segura, limpa e socialmente aceitável.

O Brasil desponta como importante fornecedor de biocombustíveis e essa participação, cada vez mais efetiva, decorre principalmente da combinação entre disponibilidade de recursos naturais e capacidade técnica para transformação de materiais biológicos em energia.

Levando-se em conta o potencial agrícola brasileiro, o uso de combustíveis como o etanol e o biodiesel obtidos da agricultura de plantas oleaginosas, biomassa florestal, cana de açúcar, apresenta crescente interesse, ganhando espaço na realidade mundial com grandes possibilidades de obter vantagens. Nesse contexto, ressalta-se a importância da indústria da cana que mantém o maior sistema de energia comercial de biomassa no mundo através da produção de etanol e do uso quase total de bagaço para geração de eletricidade.

Os estudos em curso indicam que a contribuição da cana para o suprimento de energia poderá ser muito superior que a atual mediante o desenvolvimento de tecnologias para o melhor uso de biomassa residual da cana.

O Brasil é hoje o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. A área

cultivada atinge aproximadamente 5,5 milhões de hectares, apresentando destaque na alimentação de bovinos, em razão da pequena taxa de risco em sua utilização, do baixo custo por unidade de matéria seca produzida, da maior disponibilidade no período de escassez de forragens nas pastagens e do melhor desempenho econômico em comparação a outras forragens, dependendo da categoria do animal (NUSSIO, 2003).

A utilização da silagem na conservação da cana vem despertando nos últimos anos grande atenção por parte dos produtores e pesquisadores, em face das vantagens em logística e operacionalidade que este volumoso oferece, suprimindo o período da seca em que as forragens diminuem ou cessam o seu crescimento vegetativo e iniciam seu crescimento reprodutivo. Citam-se como vantagens do método, produção de 30% a 50% mais de nutrientes em comparação à produção de grãos, manutenção do valor nutritivo, quando ensilado adequadamente, alta aceitabilidade e menor dependência das condições climáticas.

A crescente preocupação da sociedade mundial com o meio ambiente envolve também a expressiva quantidade de dejetos produzida diariamente em área reduzida, tornando-se uma grande carga poluidora, assumindo grandes proporções em que as questões de manejo e disposição desse material tornam-se de fundamental importância.

Os prejuízos ambientais causados pela falta de tratamento e manejo adequado dos resíduos da produção animal são incalculáveis. Os esterco de bovinos são compostos orgânicos de alto teor energético, contendo macro e micro nutrientes e estes dejetos quando adicionados aos resíduos sólidos orgânicos modificam as características do processo por possuir alta quantidade de microrganismos, umidade, pH próximo da neutralidade e elevada proporção da biomassa. Sua utilização em sistemas de reciclagem é de extrema importância, sob aspectos econômicos e ambientais, portanto, suas características são

complementares às dos resíduos sólidos, que, no geral, possuem pH baixo e pouca quantidade de microrganismos.

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e de culturas energéticas tem atraído muito interesse nos últimos anos. Esta tecnologia oferece um grande potencial para desintegrar rapidamente a matéria orgânica complexa em compostos mais simples, tendo como produtos finais metano e dióxido de carbono, principais componentes do biogás.

A produção de metano pela digestão anaeróbia dos dejetos e/ou de biomassa para gerar calor/eletricidade tem se expandido muito na Alemanha, após a introdução de subsídios elevados em 2004. Devido ao seu grande potencial de rendimento de metano, a silagem de milho é de longe o substrato dominante fornecedor e, nesse país, tornou-se uma prática comum, onde mais de 600 usinas estão instaladas para a produção de biogás, em que são utilizadas silagens de milho, capim e erva, culturas energéticas especialmente cultivadas como substratos de fermentação em cofermentação com os dejetos do gado.

A utilização de dois ou mais tipos de resíduos para preparação do substrato usados na biodigestão caracteriza-se como codigestão. A ideia de juntar estes dois resíduos num digestor anaeróbio começou na década de 1970 (ADNEY et al, 1989). Vários países europeus vêm utilizando a codigestão de diferentes resíduos orgânicos como estratégia para aumentar a eficiência energética da biomassa (BUTT et al., 1998).

A implementação de processos de codigestão anaeróbia tem-se revelado como uma opção vantajosa para aumentar o rendimento do tratamento de resíduos orgânicos biodegradáveis, além de suplementar o meio de digestão com nutrientes que podem estar em falta em um dos substratos, permitir equilibrar melhor as cargas orgânicas, o tempo de retenção hidráulica e os níveis de umidade no reator, resultando num melhor desempenho do processo.

Com base no exposto acima, a codigestão anaeróbia esterco bovino-cana-

de-açúcar e esterco bovino- silagem de cana se constituem em alternativas viáveis para obtenção de energia e também sustentabilidade aos setores produtivos e ao consumidor comum.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade da codigestão anaeróbia do esterco bovino com cana de açúcar triturada e com silagem de cana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar os valores de pH e análises de alcalinidade e acidez como parâmetros indicadores da bioestabilização da matéria orgânica.

Verificar a produção e potencial de produção de biogás e metano nos biodigestores abastecidos com esterco bovino em codigestão com cana de açúcar e silagem de cana nas proporções 0%, 5% e 10%.

Analisar a qualidade do biofertilizante.

III. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. ESCASSEZ DE ENERGIA

Nenhuma das transições energéticas do passado se fez por causa do esgotamento físico de uma fonte de energia. A história da humanidade pode ser sintetizada como a história da produção e alocação do excedente econômico, ritmada por revoluções energéticas sucessivas. Todas elas ocorreram graças à identificação de uma nova fonte de energia com qualidades superiores e custos inferiores. Assim aconteceu com a passagem da energia de biomassa ao carvão e deste ao petróleo e gás natural.

A nossa matriz energética reúne ainda hoje todas essas energias, embora os 150 anos da ascendência fulgurante do petróleo tenham transformado de uma maneira radical os estilos de vida e de consumo, imprimindo à nossa civilização feições perversas caracterizadas por um desperdício monumental de energia, sobretudo no transporte, mas também no aquecimento e na climatização residencial. O rei automóvel, os caminhões gigantes e os aviões são as suas peças centrais (SACHS *et al*, 2003).

Segundo LAPONCHE (2007), o desenvolvimento sustentável não é compatível com o paradigma energético atual. Ademais, na busca das soluções, não devemos perder de vista que a crise energética mais grave é a da lenha, porque ela afeta os dois bilhões dos habitantes mais pobres do planeta, que não dispõem de outra fonte de energia para cozinhar e aquecer-se. Devemos, portanto, considerar como um imperativo a conservação da energia (DESSUS, 2007). Tanto mais que, segundo LOVINS (2007), a generalização do uso das tecnologias mais eficazes conhecidas neste momento permitiria aos Estados Unidos reduzir pela metade o petróleo consumido por dólar do PIB a um custo médio de US\$ 12 por barril de petróleo poupado.

Segundo SCHEER (2007), no começo do ano 2000, foram fornecidos na Alemanha mais de 18 mil megawatts de eletricidade produzida por fontes renováveis. Para que os investimentos sejam rentáveis, todos os produtores têm acesso à rede com tarifa assegurada por vinte anos. O sobrecusto é repartido entre todos os consumidores e não passa de 5 euros por pessoa ao ano. O novo setor industrial já criou 170 mil empregos. Nenhum programa político de apoio à indústria custou tão pouco e teve um resultado tão positivo. Em seis anos, os custos de investimentos baixaram de 40% graças à construção em série, e a emissão do gás carbônico foi reduzida de sete milhões de toneladas ao ano. Frisa que a lei como instrumento de política ambiental teve um efeito bem superior ao mercado de créditos de carbono e conclui que, ao continuar esse desenvolvimento no mesmo ritmo, toda a produção de eletricidade de origem fóssil ou nuclear será totalmente substituída.

É por isso que urge pôr em marcha um ambicioso programa de pesquisas sobre os diferentes aspectos da agroenergia. Em boa hora, a Embrapa criou uma unidade que se dedicará a essa temática, embora com recursos extremamente limitados quando comparados com a abrangência e a importância do tema e os recursos que o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos investe na pesquisa agroenergética (SACHS, 2007).

O Brasil, aliás, poderá perder rapidamente a enorme vantagem competitiva de que desfruta hoje o seu etanol de cana-de-açúcar ante o avanço do etanol celulósico, que disporá de uma base de matéria-prima extremamente abundante e barata (GAZZONI, 2007).

A agrossilvicultura e o adensamento das florestas nativas com espécies úteis despontam como uma grande promessa, sobretudo no Brasil, que tem condições para decuplicar as áreas de reflorestamento econômico consorciado para fins diversos: energia (carvão vegetal, etanol celulósico, cogeração de energia elétrica e calor), papel e celulose, materiais de construção, matéria-prima para as in-

dústrias de derivado de madeira e para a química verde. O Brasil está começando a identificação de espécies úteis por meio do estudo sistemático da biodiversidade (SACHS *et al*, 2007). É nesse contexto que se situa o debate fundamental sobre o modelo social que dará a expansão da bioenergia. Os anos de 2004 e 2005 foram marcados por um intenso debate sobre o futuro do setor de energia elétrica nacional e a capacidade do novo modelo institucional garantir a expansão da oferta, evitando uma nova crise de suprimento em 2009 ou 2010. De fato, o racionamento de 2001 e a subsequente crise financeira da indústria de Energia Elétrica Brasileira de 2002 demonstraram que o primeiro movimento de reforma setorial, iniciado na segunda metade da década de 1990, não conseguiu adequar a estrutura produtiva majoritariamente hidrelétrica do país a um modelo de mercado liberalizado (sem planejamento integrado) com forte crescimento de demanda (ARAÚJO 2001).

A demanda por energia possui algumas peculiaridades. Os consumidores não a compram como um produto final, mas sim para fazer funcionar aparelhos, iluminar suas residências, movimentar indústrias, dentre vários usos domésticos, comunitários e produtivos. Portanto, “a energia em si não é uma necessidade humana básica” (WEC, 1999), mas apesar de não ser reconhecida explicitamente como tal, a energia é fundamentalmente necessária para sustentar o desenvolvimento, inclusive rural.

As comunidades sem aporte energético permanecem condenadas ao subdesenvolvimento, constituindo um enorme contingente de pessoas cuja integração econômica, social e cultural tende a se processar pela migração para os centros urbanos mais desenvolvidos. A presença de energia nessas comunidades cumpre, assim, uma função social relevante, indispensável à sustentação do desenvolvimento nacional e à melhoria da qualidade de vida de todos os brasileiros (SCHELEDER, 1998).

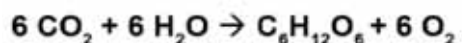
Diante deste cenário, as fontes de energia renovável devem ser aproveitadas como soluções locais descentralizadas que podem reduzir o custo da universalização para o conjunto de consumidores, fazendo com que a expansão do atendimento não seja interrompida por falta de financiamento. Além disso, CORREA *et al* (2002) chamam a atenção para a inevitável vinculação do uso das energias renováveis ao arcabouço regulatório do setor elétrico brasileiro para a universalização da eletrificação rural.

A exploração local das fontes de energia renovável próximas do consumidor constitui, talvez, a principal vantagem da utilização desses tipos de recursos, pois permite tanto conectar os consumidores a pequenas redes isoladas como criar sistemas individuais de atendimento energético. Os recursos renováveis mais propícios para a geração de energia elétrica por meio de projetos de pequena escala, visando o setor residencial rural, são a biomassa e os recursos solar, eólico e hidroelétrico.

3.2. BIOMASSA

A biomassa, em sentido amplo, é qualquer tipo de matéria orgânica renovável de origem vegetal, animal ou procedente da transformação natural ou artificial da mesma. Estes materiais têm em comum a origem direta ou indireta do processo de fotossíntese e por esta razão se apresentam de maneira periódica e não limitada no tempo, quer dizer, de forma renovável. A energia da biomassa é proveniente da luz solar no processo de fotossíntese (VIANNA *et al*, 2000).

A Equação 1 ilustra, de forma simplificada, a produção de biomassa partindo-se das substâncias clássicas da natureza, gás carbônico e água (CO₂ e H₂O) e da energia solar.



Equação 1

A transformação de gás carbônico e água em carboidrato e oxigênio ocorre, na verdade, segundo caminhos sofisticados e diversas etapas intermediárias, permitindo a vida na Terra. De fato, as plantas e os animais, inclusive o homem, vivem em uma “simbiose”, consumindo e trocando recursos em complexas cadeias de onde fluem alimentos e energia, sempre a partir da energia solar sintetizada quimicamente nas plantas (NOGUEIRA & LORA, 2003).

De acordo com VIANNA *et al*, (2000) a biomassa pode ser classificada segundo sua origem como, natural: produzida pela natureza sem a intervenção humana, por exemplo, as árvores das florestas. Este tipo de biomassa parece ser a mais adequada para um aproveitamento energético em grande escala e rápida degradação através dos ecossistemas naturais. Residual: gerada por qualquer tipo de atividade humana, principalmente nos processos produtivos dos setores agrícola e florestal, assim como a produzida nos núcleos urbanos. Produzida em plantações energéticas: neste caso os cultivos energéticos são realizados com a finalidade de produzir biomassa capaz de ser transformada em combustível.

NOGUEIRA & LORA (2003) afirmam que a energia disponível na biomassa apresenta-se sempre na forma de energia química, impondo reações para sua liberação e consequente execução de alguma ação de interesse, como pode ser o cozimento de alimentos, a geração de vapor ou outras aplicações. Em todos os casos pode-se dizer que a utilização da energia da biomassa é a fotossíntese inversa, pois se busca resgatar a energia solar armazenada pelo vegetal, consumindo oxigênio atmosférico e restituindo ao ar o dióxido de carbono.

3.3. ENERGIA DA BIOMASSA

No ano de 2004, foi realizada a Conferência Mundial sobre Energias Renováveis, em Bonn (Alemanha). Os 154 países participantes ratificaram a importância da utilização das energias renováveis como forma de garantir o desenvolvimento sustentável, aumentar o acesso à energia principalmente pelos pobres, re-

duzir as emissões de gases de efeito estufa e a poluição do ar (INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES, 2005).

A biomassa é usada desde os tempos antigos como fonte de energia (lenha) das sociedades sem, no entanto, apoiar-se em produção sustentável. Por este motivo, durante muito tempo o termo biomassa foi associado à ideia de desmatamento. Somente no século XX teve início o uso da biomassa moderna, com o programa do álcool no Brasil e a prática do reflorestamento para produção de madeira. A biomassa tradicional é utilizada como fonte de energia primária para cerca de 2,4 bilhões de pessoas em países em desenvolvimento (IEA, 2002).

Em 1850, biomassa representava 85% do consumo mundial de energia e, mais ainda, antes disso era praticamente a única forma de energia usada pelo homem, além da força dos ventos (para navegação), animais domesticados (na agricultura) e pequenas quantidades de carvão para aquecimento residencial (IEA, 2002).

A questão da sustentabilidade da biomassa é de especial importância nos países em desenvolvimento. Em muitos países a biomassa tradicional é a fonte de energia mais utilizada para cocção e aquecimento de ambientes, principalmente por questões econômicas, porém da maneira como é utilizada causa impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (IEA, 2002).

Entretanto existem oportunidades para o desenvolvimento e utilização de biomassa moderna, com benefícios em termos de qualidade dos serviços de energia e impactos na saúde humana e no meio ambiente (KAREKESI et al, 2005).

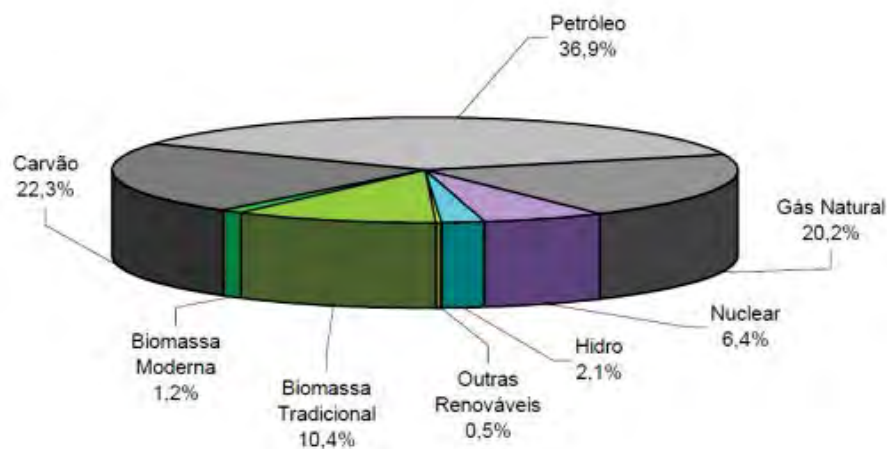
Existem diversas experiências com o uso de biomassa moderna, dentre os quais, citam-se os biocombustíveis. No Brasil o Programa do Álcool, por meio da obrigatoriedade da utilização do etanol de cana-de-açúcar em todos os veículos leves do país, foi responsável pelo crescimento do setor sucroalcooleiro que promoveu o desenvolvimento tecnológico de processos industriais e da agroindústria

e atualmente é responsável por 700 mil empregos diretos e mais 3,5 milhões de empregos indiretos (COELHO, 2005a).

Outro exemplo de uso de biomassa moderna acontece nas ilhas Maurício, onde a cogeração de energia a partir de resíduos de cana-de-açúcar foi responsável em 2002, pelo atendimento de 40% da demanda nacional de eletricidade. Neste país a utilização de biomassa foi responsável pela redução da dependência externa de petróleo, a diversificação da matriz energética e a melhoria da eficiência de geração no setor energético como um todo (VERAGOO, 2003).

Diante deste cenário, a agricultura energética desponta como uma grande oportunidade de atender as necessidades de fontes de energia renovável, principalmente a biomassa (AGROANALYSIS, 2005). Segundo o Balanço Energético Nacional (2003), a participação da biomassa na matriz energética brasileira é de 27%, a partir da utilização de lenha de carvão vegetal (11,9%), bagaço de cana-de-açúcar (12,6%) e outros (2,5%). Conforme PARIKKA (2004), cerca de dois quintos do potencial de biomassa existente no mundo é usada e, em muitos locais, a biomassa corrente é usada abaixo do potencial disponível.

Conforme pode ser observado na Figura 1, os combustíveis fósseis são responsáveis por 79% da demanda mundial de energia primária, enquanto as energias renováveis (biomassa, solar, eólica e geotérmica) representam apenas 12% e a hidroeletricidade 2,1%.



Fonte: IEA (2005)

Figura 1. Oferta Mundial de Energia Primária, 2002.

Atualmente a indústria de biocombustíveis é baseada essencialmente na produção de etanol através da fermentação de açúcares ou amidos e na produção de biodiesel derivado de óleos vegetais. O uso de materiais de biomassa de ligno-celulose (de madeira ou fibroso) – em contraste aos açúcares e amidos – tem, entretanto, maior potencial para maximização da eficiência de conversão de luz solar, água e nutrientes em biocombustíveis (GOLDEMBERG, 2009).

Plantas perenes, como as gramíneas ou árvores de rápido crescimento são particularmente atrativas para a produção em larga-escala de biocombustíveis sustentáveis, por diversas razões: não requerem lavra por aproximadamente 10-15 anos após o primeiro plantio; raízes de longa vida podem ser desenvolvidas para estabelecer interações simbióticas com bactérias para fixar nitrogênio e nutrientes minerais, resultando em uma menor perda de nitratos e erosão do solo (GOLDEMBERG, 2009).

3.4. CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (Figura 2) é tida como a cultura agrícola mais importante da história da humanidade, pois provocou alterações nos planos econômicos, ecológicos e comerciais. Além disso, tal produção também gerou grandes exigências em termos de mão-de-obra, sendo responsável pelo tráfico de escravos. A cana foi introduzida inicialmente na China, antes do início da era Cristã (KIRCHHOFF, 1991).



Figura 2. Exemplo de cana-de-açúcar *in natura* e seu respectivo bagaço

Na Europa, foi introduzida pelos árabes e, com a insuficiência da produção, aliada ao descobrimento da América, a expansão das áreas cultivadas de cana-de-açúcar foi extraordinária. As primeiras mudas plantadas no Brasil foram trazidas da Ilha da Madeira, em 1502, e, já em 1550, os numerosos engenhos espalhados pelo litoral brasileiro produziam um açúcar de qualidade equivalente ao da Índia (KIRCHHOFF, 1991).

A produção canavieira brasileira teve início em São Vicente, trazida por Martim Afonso de Souza à sua capitania. Nos últimos 500 anos, a produção da cana-de-açúcar foi alterada para larga escala, o que a torna autofágica, conforme denominado por CASTRO (1952). Prova disso é o processo que acompanha seu

plantio, com a derrubada ou queima de toda a vegetação local. Para se ter uma ideia entre 1985 e 1990, a reserva florestal brasileira perdeu 5.330 km², reduzindo-se a 83.500 km² (ROCHA & GONÇALVES, 2005).

KIRCHHOFF (1991) afirma que, a queima das plantações de cana implica danos irreparáveis à humanidade, decorrentes da poluição atmosférica. Assim, num país em que se têm, aproximadamente, 2.300 hectares de cana-de-açúcar cultivada, faz-se necessário o desenvolvimento de novas pesquisas e técnicas que deem um destino sustentável ao montante dos resíduos oriundos dessa plantação.

Apesar de o Brasil ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o bagaço da cana é, ainda, um resíduo de baixa exploração. Segundo SANTANA & TEIXEIRA (1993), o bagaço *in natura* é composto, aproximadamente, por 44,5% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2,5% de sólidos solúveis em água e 3% de teor de cinza.

Para estimar o potencial de geração do biogás, a composição química dos resíduos é considerada um fator de extrema importância. Conforme PERCORA (2006), quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano e vazão de biogás.

De acordo com MACEDO (2006), os constituintes químicos que irão degradar com maior facilidade e que, portanto, determinam o potencial de produção do biogás são os carboidratos (celulose, hemicelulose, pectina e amido), as proteínas e os lipídios.

Atualmente, esse rejeito é basicamente utilizado na queima, no interior das próprias usinas, para a produção de energia, o que tornam as usinas praticamente autossuficientes quanto ao seu abastecimento. Vários resíduos gerados no processamento do álcool combustível são, também, reaproveitados pelas próprias usinas, como é o caso da denominada torta de filtro e vinhaça. A torta de filtro é um lodo que advém da clarificação do caldo e bagacilho, sendo uma substância rica em fósforo e, por isso, utilizada como adubo. Já a vinhaça, também subprodu-

to da produção do álcool, contém significativa quantidade de potássio e outros nutrientes e, portanto, é utilizada para irrigação e fertilização no cultivo de uma nova produção (SILVA, 2006).

No ano de 2006, 425 milhões de toneladas de cana foram processadas em 310 usinas no Brasil, produzindo 30 milhões de toneladas de açúcar e 17 milhões de metros cúbicos de etanol. Estimativas recentes (CARVALHO, 2006) indicam que os mercados potenciais (externo e interno) para o etanol e açúcar brasileiros usariam em 2012-2013 cerca de 685 milhões de toneladas de cana, produzidas em 6,4 milhões de hectares; para isso, no Centro-Sul seriam usadas 77 novas unidades de produção, com investimentos de US\$ 14,6 bilhões. Em 2012-2013, cerca de 60% da cana seria destinada ao mercado interno; no total, além do açúcar seriam produzidos 35,7 milhões de metros cúbicos de etanol (7 milhões de metros cúbicos para exportação).

Para os países industrializados comprometidos com as metas do Protocolo de Kyoto, o uso de biocombustíveis representa uma das formas mais efetivas de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa associadas ao consumo energético no setor de transporte. No entanto, os desenvolvimentos nos últimos anos mostram claramente uma diferença muito grande na capacidade de redução de emissões entre os diversos biocombustíveis, indicando grande vantagem para o etanol de cana produzido no Brasil (Tabela 1) (MACEDO, 2006).

Tabela 1. Balanço de energia na produção de etanol, com diversas matérias-primas

Matérias- primas	Energia renovável / energia fóssil usada
Etanol de milho (USA)	1,3
Etanol de cana (Brasil)	8,9
Etanol de beterraba (Alemanha)	2,0
Etanol de sorgo sacarino (África)	4,0
Etanol de trigo (Europa)	2,0
Etanol de mandioca (Brasil)	1,0

Fonte: MACEDO, 2006

Inicialmente, é preciso considerar que a produção conjugada de açúcar e etanol deve continuar, entre outros fatores, pela posição atual do Brasil como o maior (e crescente) exportador mundial de açúcar, pela sinergia positiva nessa produção, e porque o etanol tem sido o grande agente na elevação do patamar de preços internacionais do açúcar, na medida em que proporciona uma alternativa competitiva para a industrialização da cana-de-açúcar. As opções tecnológicas para os produtos da cana-de-açúcar devem considerá-los em conjunto, porque os efeitos nos custos finais de cada um (incluindo o etanol) são relacionados (MACEDO, 2006).

As perspectivas de utilização eficiente dos resíduos lignocelulósicos da cana devem considerar seu enorme potencial para produzir energia ou materiais. Por exemplo, a cana-de-açúcar no Brasil correspondeu, em 2006, a cerca de 60 milhões de toneladas de sacarose (usadas para açúcar e etanol, em porções aproximadamente iguais) e a 120 milhões de toneladas de material lignocelulósico, bagaço e palha da cana. Assumindo que 30% do bagaço produzido estejam disponíveis como excedente (o restante corresponderia ao consumo da agroindústria, com alguma geração de excedentes de eletricidade, dependendo da tecnologia adotada) e recuperando 50% da palha da cana, poderiam ser disponibilizados 48 milhões de toneladas de material lignocelulósico (em base seca), já coletado e

com certo preparo, com custo aproximado de 1 € /GJ (giga joule). Custos médios de biomassa nessas condições para os países industrializados situam-se entre 2 e 3 € /GJ , com planos para atingir 1,5 € / GJ , no futuro. Claramente, a agroindústria da cana, processando um recurso altamente competitivo, em razão de seu elevado desempenho fotossintético, poderá promover uma grande diversificação com o uso eficiente desses dois terços de sua matéria-prima (MACEDO, 2006).

No Brasil, o álcool hidratado foi o mais produzido durante todo o período de 1982 e 2000. A partir daquele ano, o álcool anidro foi mais produzido do que o hidratado. No entanto, entre 2005/2006, a produção de álcool hidratado voltou a ser levemente superior que a produção do álcool anidro, devido ao crescimento no número de veículos *flex*. Esta inovação tecnológica trouxe interessantes novidades, e com grande aceitação por parte dos consumidores para se aproveitar das diferenças de preços. (FERREIRA *et al.*, 2007).

Uma tonelada de cana gera cerca de 320 kg de bagaço, do quais 90% são usados na produção de energia. A importância da cogeração de energia utilizando o bagaço reside no fato de que ela coincide com o período de seca dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, dessa forma, possui importante caráter complementar (FERREIRA *et al.*, 2007).

3.5. SILAGEM DE CANA

O uso de silagens de forrageiras tropicais ou de restos de culturas tem se tornado cada vez maior na produção animal, notadamente de ruminantes, como forma de utilização do excedente da produção de forragem do período favorável do ano para minimizar a questão de escassez de alimento no período seco.

A ensilagem é um método de conservação que compreende o armazenamento da forragem em condições de anaerobiose, objetivando o desenvolvimento de bactérias produtoras de ácido lático a partir de substratos como açúcares solú-

veis, ácidos orgânicos e compostos nitrogenados solúveis. Durante o processo ocorre diminuição do pH da massa ensilada e aumento de temperatura e nitrogênio amoniacal (SANTOS, *et al*, 2001).

Os sistemas integrados de valorização energética e ambiental dos resíduos com base na digestão anaeróbia associada à práticas agrícolas, podem constituir uma oportunidade de negócios e de desenvolvimento do meio rural, existindo soluções inovadoras que poderão permitir maiores rendimentos.

De acordo com DE BAERE (2007) existem numerosos digestores em escala real em operação que são alimentados com substrato misto constituído por milho, sorgo, derivados do milho, cereais, rações integrais e misturas de outras culturas energéticas, e que a digestão anaeróbia (milho) fornece pelo menos 75GJ/há (giga joule-hectare) de energia líquida, correspondentes a pelo menos duas vezes mais rendimento de energia obtido pela fermentação alcoólica e três vezes mais energia líquida que os biocombustíveis líquidos produzidos com cevada e beterraba, tornando o biogás um combustível muito favorável para o transporte.

Na Suécia foi proposto o cultivo de uma planta herbácea “Ley” para fins energéticos. Um hectare de terreno cultivado com esta erva produz cerca de 16ton/ano de biomassa com 35% de matéria seca. Conforme NORDBERG (2001), a digestão de 11 hectares de terreno cultivado com este substrato pode produzir metano suficiente para obter 20MWh (megawatt-hora) por ano de energia. A Tabela 2 apresenta vários tipos de biomassa agrícola e sua produção de metano e energia.

Tabela 2. Produção de metano originada de diversos tipos de biomassa

Biomassa	Colheita por hectare (t/ha/a)	Produção metano (Nm ³ /kgMO)	Metano %	Produção de metano (Nm ³ /d)
Alfa alfa erva medica	30	290	56	7,15
Cereais grãos	1	365	53	0,84
Silagem cereais – toda a planta	35	260	52,5	8,81
Silagem erva de cobertura	25	330	56	6,80
Milho – grãos secos	11	365	52,8	9,38
Milho – grão úmido	15	372	53	8,99
Silagem de milho	45	330	52,5	12,89
Stelo do milho	1	468	52	0,79
Ensilado de feijões	30	265	54,6	0,19
Silagem de beterraba	90	468	53	11,54
Silagem de ervilhas	30	294	55,8	7,25
Silagem de beterraba açucareira	50	400	53	11,23
Silagem de forragens	35	330	54	10,70
Podas de verdes	15	80	53	1,81
Segala não madura	25	310	54	4,72
Culturas intercalares gerais	5	300	54	1,32
Aveia – grãos	6	330	54,1	4,43
Silagem de aveia	18	320	53,5	4,69
Colza	3,5	500	65,7	4,01
Silagem de colza	11	380	55,5	1,50

Fonte: Adaptado de Di Berardino (2009).

3.6. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA

O processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica é anterior à existência do homem na Terra e a quantidade de microrganismos e a intensidade de sua ação no ambiente primitivo colaboraram na determinação da composição da atmosfera, propiciando as condições de desenvolvimento da vida. Mais recentemente, em países limitados pela falta ou distribuição inadequada de energia, aliado às crises energéticas da década de 70, a digestão anaeróbia foi adaptada para aten-

der às necessidades rurais, caso clássico, são os biodigestores da Índia e China (ARRIETA & CANTERA, 1999).

No processo de digestão anaeróbia, a matéria orgânica presente nos efluentes é transformada pela ação dos microrganismos em aproximadamente 78 % de biogás, sendo uma mistura de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), 20 % de material orgânico que continua em dissolução, e entre 1 a 2 % de novos microrganismos (ARRIETA e CANTERA, 1999).

Existem hoje diversas alternativas tecnológicas de aproveitamento da biomassa para geração de energia, tecnicamente viáveis para a agricultura familiar. Uma das alternativas que vem despertando grande interesse é a tecnologia de biodigestão anaeróbia de resíduos animais, e particularmente de resíduos gerados com a criação animal, pela implantação de biodigestores (GASPAR, 2003).

Conforme apontado pela literatura, a tecnologia de biodigestão anaeróbia de dejetos animais, principalmente de suínos, apresenta diversas vantagens. Uma delas é a produção de biogás e biofertilizantes, produtos de elevado valor agregado, redução da poluição dos recursos hídricos, facilidade de implantação e operação e redução da pressão sobre as matas pelo consumo de lenha (GASPAR, 2003). De outro lado, verifica-se que são ainda escassos os estudos com ênfase nos aspectos econômicos da implantação de biodigestores em pequenas escalas de produção, embora essa tecnologia seja encontrada em regiões com forte presença de atividade de suinocultura, em especial nos estados da região Sul do Brasil.

A biodigestão anaeróbia representa importante papel, pois além de permitir a redução significativa do potencial poluidor, trata-se de um processo no qual não há geração de calor, e a volatilização dos gases, considerando-se pH próximo da neutralidade, é mínima, além de se considerar a recuperação da energia na forma de biogás e a reciclagem do efluente (FISHER et al., 1979; LUCAS JÚNIOR, 1998).

O biogás, formado principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), gás amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e nitrogênio (N_2), obtido a partir do esterco, tem sido usado com frequência, principalmente na Europa, em substituição ao gás natural que tem se tornado de difícil obtenção. A execução do projeto das estruturas necessárias para produzir energia do esterco, os biodigestores anaeróbios, são de custo elevado, mas a durabilidade e eficiência dos mesmos tornam o empreendimento econômico.

O desenvolvimento do conhecimento sobre a digestão anaeróbia é um dos mais promissores no campo da biotecnologia, uma vez que é fundamental para promover, com grande eficiência, a degradação dos resíduos orgânicos que são gerados em grandes quantidades nas modernas atividades rurais e industriais. À medida que os sistemas de produção animal se intensificam e se modernizam, também se intensificam as necessidades energéticas e de tratamento dos resíduos (LUCAS JÚNIOR et al, 1987) .

A digestão anaeróbia apresenta-se como um processo vantajoso, pois reduz a matéria orgânica poluente e os microrganismos patogênicos, gerando o biogás e produzindo um material digerido bastante estável. O biogás, por sua vez, pode ser aproveitado para a produção de energia e o material digerido (com redução de 40-60% em peso), como condicionador do solo (PICANÇO, 2004).

Face à crescente dependência Europeia dos combustíveis fósseis, a utilização de biomassa é uma das soluções-chave para garantir a segurança do fornecimento energético, assim como o incentivo à utilização de energias sustentáveis na Europa. Um aumento da ordem do descrito poderá trazer benefícios tão distintos como a diversificação do fornecimento energético europeu, uma significativa redução da emissão de gases com efeito estufa (como tecnologia a digestão anaeróbia pode ser encarada como “neutra em CO_2 ” uma vez que não é emitido qualquer CO_2 adicional para a atmosfera), a obtenção de um digerido ótimo para muitos dos solos (45% dos solos europeus possuem um reduzido teor de matéria orgânica e

fertilidade reduzida), uma redução do preço do petróleo como resultado de uma menor procura por esta fonte energética e a criação de novos postos de trabalho (PICANÇO, 2004).

Embora no século XIX, antes da descoberta do petróleo, várias experiências da utilização do biogás como fonte de energia para a geração de calor e de luz tenham sido feitas na Europa e na Índia, a tecnologia da biodigestão teve sua aplicação mais divulgada no tratamento anaeróbio de lodos de estações de tratamento de águas residuais municipais. Alguns anos após a Segunda Guerra Mundial, a tecnologia foi estendida também à agricultura, onde se utilizava os dejetos de bovinos e de suínos, além de outros resíduos orgânicos disponíveis nas fazendas, para a geração do biogás (NOACK, 1955). Nos anos 1960, o petróleo, por oferecer um combustível imbatível quanto ao preço e à disponibilidade, acabou com a maior parte das iniciativas, que depois só foram retomadas em épocas com escassez nas décadas de 1970 e 1980, como consequência da crise do petróleo (BISCHOFBERGER et al. 2005).

Entretanto, a geração do biogás já foi amplamente disseminada em países em desenvolvimento, desde os anos 50 do século passado, em escala pequena e com tecnologia simples e em ambiente rural descentralizado. Apesar de nas décadas de 1970 a 1990 terem sido implantadas algumas centenas de pequenos biodigestores rurais na África, na Ásia e na América Latina, a tecnologia não avançou em escala desejada em razão de falhas na tecnologia, no treinamento dos agricultores e pela falta de iniciativas governamentais em conjunto com custos elevados (BHATIA, 1990; MARAWANYIKA, 1993; BIANCHI, 1994). No início da década de 1990, a preocupação com a mudança climática por causa da emissão de CO₂ de fontes fósseis na atmosfera e a futura escassez do petróleo motivou a retomada das pesquisas sobre a utilização do biogás em vários países, estimuladas também por diversos programas de fomento, em nível nacional e internacional. Especialmente na Alemanha, medidas governamentais estimularam um forte desenvolvimento da tecnologia, garantindo aos agricultores preços para a eletricidade gerada

por biogás a partir de dejetos animais e biomassa cultivada superiores aos da eletricidade gerada por termelétricas (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, 2008).

3.7. A BIODIGESTÃO NO BRASIL

No Brasil, a biodigestão, especificamente para a geração de energia na forma de biogás, ainda está em desenvolvimento, embora o uso da tecnologia anaeróbia para o tratamento de águas residuais esteja crescendo constantemente. O sistema mais utilizado para o tratamento de águas residuais domésticas e industriais é o reator UASB (digestor anaeróbio de fluxo ascendente) (JORDÃO & SOBRINHO, 2004). O tratamento anaeróbio em sistema de lagoa com lona impermeável, também chamado de “sistema canadense”, a princípio, é utilizado para o tratamento de dejetos animais, especialmente de suínos, no Sul e no Centro-oeste do país, em regiões com alto índice de produção de suínos e aves. O biogás produzido nestes biodigestores é queimado, sendo utilizado para a venda de créditos de carbono, ou também para a geração de energia térmica e elétrica (EMBRAPA, 2005).

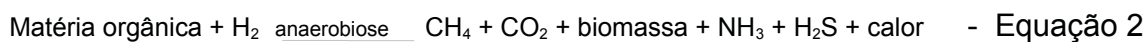
O sistema de reator de mistura completa ainda se apresenta como uma novidade no Brasil, por causa dos custos de instalação deste sistema e dos baixos preços de energia elétrica. Porém, com a expectativa do aumento do preço do gás natural e a implementação de uma base legal para o estímulo de energias renováveis, espera-se um aumento na utilização deste tipo de reator, também em escala industrial, pela abundância e versatilidade de substratos disponíveis para sua alimentação (JORDÃO & SOBRINHO, 2004).

O biogás proveniente de aterros já está sendo tratado e utilizado no Brasil, por exemplo, no aterro Bandeirantes, em São Paulo, e no Aterro do Centro, em Salvador. O biogás pode ser queimado através de um *flare*, ou, após remoção do gás sulfídrico, pode ser utilizado para a geração de energia elétrica por geradores

acoplados a motores de combustão interna ciclo Otto ou ciclo Diesel, ou em turbinas a gás (JORDÃO & SOBRINHO, 2004).

3.8. MICROBIOLOGIA E BIOQUÍMICA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica, levando à formação de metano e produtos inorgânicos incluindo, o dióxido de carbono. Segundo KELLEHER et al. (2002), a digestão anaeróbia pode ser representada de um modo geral pela Equação 2.



Os processos anaeróbios têm sido propostos como uma alternativa viável para o tratamento de resíduos líquidos com alta ou média concentração de cargas orgânicas (HICKEY et al., 1992). Diversos resíduos orgânicos têm sido tratados com sucesso mediante digestão anaeróbia, como esgoto doméstico, resíduos industriais, de abatedouros, de frutas, vegetais, esterco e biomassa agrícola (GUNASELAN, 1997; KELLEHER et al., 2002).

A digestão anaeróbia de resíduos apresenta algumas finalidades como: remoção da carga orgânica poluente, redução dos microrganismos patogênicos, produção de biogás e produção de biofertilizantes mais estáveis, mais ricos em nutrientes assimiláveis e com melhores qualidades sanitárias em relação ao material original (KELLEHER et al., 2002; SOUZA, 1984).

A decomposição anaeróbia da matéria orgânica a metano é um processo biológico conduzido em diferentes fases por vários tipos de microrganismos que agem simbioticamente (VIÑAS et al 1993).

A degradação de substratos orgânicos pelo processo de digestão anaeróbia tem início com a ação das bactérias fermentativas, que hidrolisam as moléculas complexas em monômeros simples, como açúcares, aminoácidos e peptídeos (METCALF & EDDY, 2003).

Bactérias anaeróbias facultativas ou obrigatórias são os microrganismos responsáveis pela hidrólise e fermentação. Organismos isolados de reatores anaeróbios incluem *Clostridium* sp., *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium* sp., *Desulphovibrio* sp., *Corynebacterium* sp., *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus*, e *Escherichia coli* (METCALF; EDDY, 2003).

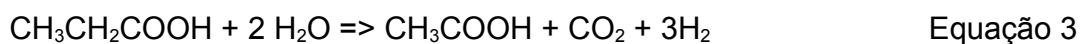
Os monômeros simples são convertidos a dióxido de carbono, hidrogênio e ácidos graxos voláteis, tais como acético, propiônico e butírico pela ação das bactérias acidogênicas, sendo os ácidos voláteis (AV) os principais produtos intermediários (SACHS et al., 2003; SOLERA et al, 2002; SOUZA, 1984).

Um grupo de bactérias denominado acetogênicas é responsável pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as *arqueas* metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Na etapa final do processo de digestão anaeróbia, as *arqueas* metanogênicas convertem os substratos fornecidos pelas bactérias fermentativas em metano e dióxido de carbono. Dois grupos principais de *arqueas* estão envolvidos na produção de metano. O primeiro, as metanogênicas acetoclásticas que produzem metano a partir do acetato, e o segundo as hidrogenotróficas que utilizam o hidrogênio como doador de elétrons e o dióxido de carbono como aceptor na produção de metano (CHERNICHARO, 1997; METCALF; EDDY, 2003).

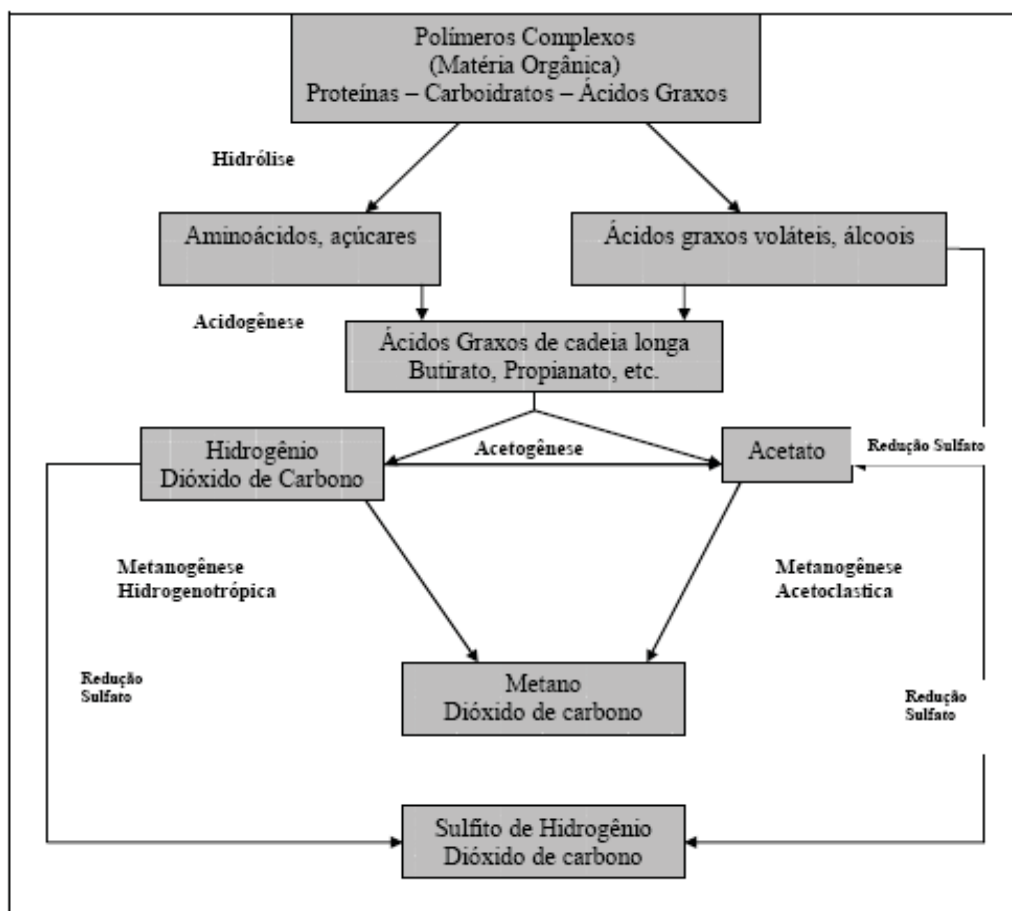
Os microrganismos responsáveis pela produção de metano, classificados como *arqueas*, são anaeróbios estritos obrigatórios, denominados metanogênicos. São células procarióticas, que apresentam sequência de RNA (ácido ribonucleico) e propriedades fenotípicas diferentes das bactérias. Essas diferenças são encontradas na parede celular, na composição lipídica da membrana celular e da RNA polimerase e no mecanismo de síntese proteica no ribossomo. Muitos dos organismos metanogênicos identificados em digestores anaeróbios são similares àqueles encontrados no estômago de animais ruminantes e em sedimentos orgânicos dei-

xados em lagos e rios. *Methanobacterium* e *Methanobacillus* na forma de bastonetes e os *Methanococcus*, *Methanothrix*, e *Methanosarcina* na forma de cocos, são os principais gêneros de microrganismos que têm sido identificados em condições mesofílicas (GARCIA *et al*, 2000; METCALF & EDDY, 2003).

Segundo SACHS *et al.* (2003), as principais reações para formação do metano são descritas nas equações de 3 a 6. Aproximadamente 70% de todo o metano produzido no processo de digestão anaeróbia provém da Equação 5, onde o grupo metil é reduzido a metano e o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico (McCARTY & MOSEY, 1991).



A digestão anaeróbia é dependente de um controle rigoroso das condições ambientais, uma vez que o processo requer uma interação dos microrganismos fermentativos e metanogênicos. As *arqueas* metanogênicas se reproduzem mais lentamente e são mais sensíveis a condições adversas ou alterações das condições do ambiente, em relação às bactérias acidogênicas (SOUZA, 1984). A Figura 3 apresenta o balanço da digestão anaeróbia da matéria orgânica. (reproduzido de LETTINGA & RINZEMA, 1985).



Fonte: Adaptado de LETTINGA & RINZEMA, 1985

Figura 3. Digestão anaeróbica da matéria orgânica

3.9. TERMODINÂMICA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA.

O conhecimento da acetogênese foi significativamente ampliado pelo entendimento dos aspectos termodinâmicos envolvidos, tendo resultado na elucidação de alguns mecanismos de autocontrole do processo. O estudo das trocas de energia que ocorrem em reatores anaeróbios é difícil não apenas por ser um processo complexo, mas também, pela dificuldade de se medirem os produtos finais e intermediários que se apresentam em concentrações muito baixas. Assim, as conside-

reações sobre a termodinâmica do processo se restringem à análise da variação da energia livre padrão das principais reações (McCARTY, 1964b).

Uma técnica para se medir a espontaneidade das reações é a variação da energia livre padrão (ΔG^0), ou seja, quanto menor o valor de ΔG^0 , mais exergônica será a reação, ocorrendo de forma mais espontânea. Nos casos em que ΔG^0 for maior que zero, em condições ambientais, os processos metabólicos só serão termodinamicamente favoráveis se os produtos das reações forem mantidos em baixas concentrações, conforme pode ser deduzido a partir da Equação 7 (McCARTY, 1964b).

$$\Delta G = \Delta G^0 + R.T.\ln \frac{[Produtos]}{[Reagentes]} \quad (7)$$

Onde:

ΔG : Variação de energia livre (J);

ΔG^0 : Variação de energia livre padrão (J);

R : Constante dos gases (8,316 J.mol⁻¹.K⁻¹);

T : Temperatura (Kelvins);

$\ln$: Logaritmo Neperiano;

[*Produtos*]: Concentração dos produtos da reação;

[*Reagentes*]: Concentração dos reagentes da reação.

Segundo ECKE & LAGERKVIST (2000), as mais importantes reações bioquímicas desenvolvidas no processo de digestão anaeróbia e suas respectivas

variações de energia livre, a 298 K, 1 atm e pH=7,0 são apresentadas na Tabela 3, onde pode ser visto claramente que, em sua maioria, as reações bioquímicas acetogênicas são termodinamicamente desfavoráveis ($\Delta G^0 > 0$) nas condições padrão.

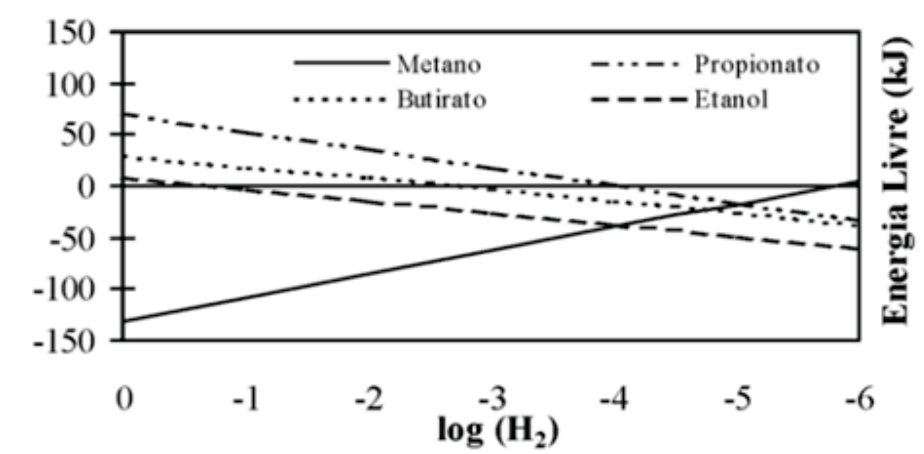
No entanto, elas ocorrem naturalmente em biodigestores anaeróbios. Este fato só é possível devido à interação entre microrganismos acetogênicos e metanogênicos, interagindo mutuamente. Microrganismos acetogênicos convertem compostos orgânicos intermediários como propionato e butirato em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono e são assim denominados porque sua existência depende da atividade de microrganismos consumidores de hidrogênio (ECKE & LAGERKVIST, 2000).

Tabela 3. Variação da energia livre (ΔG^0) para reações da digestão anaeróbia, a 298 K, 1 atm e pH = 7

Etapas	Substratos	Produtos	ΔG^0 (KJ)
Acidogênese	$C_6H_{12}O_6 + 4H_2O \longrightarrow$	$2CH_3COO^- + 2HCO_3^- + 4H^+ + 4H_2$	-207
	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow$	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2HCO_3^- + 3H^+ + 2H_2$	-135
	$3 C_6H_{12}O_6 \longrightarrow$	$4CH_3CH_2COO^- + 2CH_3COO^- + 2CO_2 +$ $+ 2H_2O + 2H^+ + H_2$	-922
Acetogênese	$CH_3CH_2OH + H_2O \longrightarrow$	$CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+10
	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \longrightarrow$	$CH_3COO^- + H^+ + 3H_2 + HCO_3^-$	+76
	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \longrightarrow$	$2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	+48
	$2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \longrightarrow$	$CH_3COO^- + 4H_2O$	-105
Metanogênese	$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow$	$CH_4 + 2H_2O$	-130
	$4HCOO^- + 4H^+ \longrightarrow$	$CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$	-120
	$4CO + 2H_2O \longrightarrow$	$CH_4 + 3CO_2$	-186
	$CH_3COO^- + H^+ \longrightarrow$	$CH_4 + CO_2$	-33
	$4CH_3OH \longrightarrow$	$3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$	-309
	$4CH_3CH_2CH_2NH^+ + 6H_2O \longrightarrow$	$9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_4^+$	-666

Fonte: ECKE & LAGERKVIST (2000).

McCARTY (1981) definiu graficamente os limites termodinâmicos do hidrogênio para as reações acetogênicas (Figura 4), e mostrou que a coexistência de microrganismos produtores e consumidores só é possível se a pressão parcial de hidrogênio for mantida na região em que a energia livre de Gibbs (G) é negativa para ambos organismos. Desta forma, a oxidação de propionato só é termodinamicamente possível se a pressão parcial de hidrogênio for mantida entre 10^{-6} e 10^{-4} atm.



Fonte: McCARTY, 1981

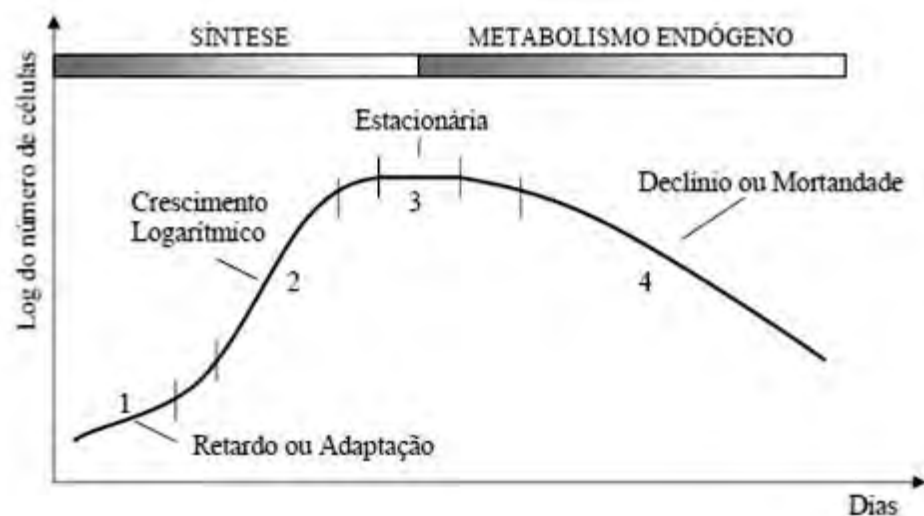
Figura 4. Efeito da pressão parcial de hidrogênio na variação de energia livre para a degradação de propionato, butirato e etanol e formação de metano

3.10. CINÉTICA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Cinética bioquímica estuda as velocidades de crescimento dos microrganismos acompanhado da utilização do substrato e da formação de produtos. Grande parte das reações que ocorrem no tratamento do esgoto são lentas, sendo necessário considerar o estudo da sua cinética. Conforme METCALF & EDDY (2003), o tempo para ocorrer a reprodução da bactéria pela fissão binária pode variar de 20 minutos a até alguns dias, dependendo do tipo de bactéria. As divisões das bacté-

rias são influenciadas por limitações ambientais, como a concentração de substratos e nutrientes e, ainda, a disponibilidade de espaço físico.

O crescimento de uma população única de microrganismo em função de um único substrato está representado na Figura 5. Inicialmente é inoculado um pequeno número de microrganismos e o número viável de indivíduos é alcançado em função do tempo, em que ocorre o esgotamento do substrato e com isso o decréscimo da população. O crescimento padrão baseado no número de células tem 4 fases bem distintas (TCHOBANOGLOUS et al, 1993; McKINNEY, 1962; METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING, 1996b). A primeira fase – retardo ou adaptação – é um período de aclimação das bactérias ao novo substrato fornecido, para que possa iniciar o processo de divisão. A segunda fase – crescimento logarítmico – ocorre a divisão das células a uma taxa determinada pelo seu tempo de geração e sua habilidade ao processo de digestão do substrato. A terceira fase – estacionária – a população permanece inalterada e ocorre por duas razões: houve o esgotamento do substrato ou nutriente necessário ao seu crescimento, ou a mortalidade é igual ao crescimento de novas células. Quarta fase - declínio ou mortandade – a disponibilidade de substrato ou nutriente no meio é escassa. A taxa de morte bacteriana excede a produção de novas células. Prevaecem características da respiração endógena, situação em que as bactérias são forçadas a utilizar o seu próprio protoplasma celular como fonte de alimento. Em alguns casos essa fase pode se comportar como o inverso da fase de crescimento logarítmico.



Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY, 2003 e VON SPERLING, 1996b

Figura 5. Curva típica do crescimento bacteriano

3.11. FATORES QUE INFLUENCIAM A ATIVIDADE ANAERÓBIA

3.11.1. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A temperatura é um fator ambiental de extrema importância em qualquer processo biológico, tendo influência nas atividades metabólicas da população microbiana, inibindo ou favorecendo seu crescimento.

Em função da faixa de temperatura, as bactérias podem ser classificadas como psicrófilas, mesófilas ou termófilas. As faixas de temperaturas para cada uma dessas categorias estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Faixas de temperatura para o desenvolvimento ótimo das bactérias

Tipo da bactéria	Temperatura (°C)	
	Faixa	Ótimo
Psicrofílicas	-10 a 30	12 a 18
Mesofílicas	20 a 50	25 a 40
Termofílicas	35 a 75	55 a 65

Fonte: (METCALF & EDDY, 2003)

Segundo SOARES (1990), o processo apresenta uma maior instabilidade nos seus parâmetros de controle, quando operado na faixa termofílica, e quando ocorre variação da temperatura, esse problema se agrava podendo afetar mais seriamente o processo. O grupo de bactérias metanogênicas são os que mais sofrem com a influência da temperatura, pois apresentam um intervalo de temperatura muito restrito de operação, podendo causar o aumento de ácidos voláteis através de baixas temperaturas, e consequentemente uma queda de pH.

A digestão anaeróbia é possível à temperatura baixa (10°C), mas a eficiência e a carga orgânica diminuem muito com a diminuição da temperatura (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Segundo SPEECE (1996) para cada 5°C de queda de temperatura há um declínio de 34% da atividade dos microrganismos. O mesmo autor considera a temperatura ótima na faixa de 25 a 30 °C para processos mesofílicos.

3.11.2. INFLUÊNCIA DO pH

O pH se manifesta sob diferentes formas e expressa as condições de acidez e alcalinidade de um meio através da medida da concentração de íons H^+ e é um fator de importância na dinâmica do crescimento bacteriano. O controle de pH nos reatores anaeróbios serve para evitar o risco de inibição das bactérias metanogênicas e consequentemente, das demais bactérias (HENN, 2005).

Conforme HENN (2005), o pH adquire, automaticamente, um valor de faixa ótima no biodigestor, sem que haja necessidade de um alcalinizante e isto se deve à capacidade de tamponamento do sistema. No entanto, há situações em que ocorre um decréscimo no valor do pH sem sua posterior estabilização, ou a água residuária já apresenta naturalmente, um valor de pH baixo, sendo necessária sua correção, fator que pode afetar economicamente o tratamento anaeróbio em relação ao aeróbio (PIEROTTI, 2007).

Segundo LEMA (1997) o pH ótimo depende do consórcio de microrganismos envolvidos no processo. Normalmente os microrganismos têm o seu pH ótimo perto da neutralidade como é o caso das *arqueas* metanogênicas, com uma faixa ótima de 6,5 a 8,2. Em condições acima ou abaixo desta faixa decresce a taxa de produção de metano. As bactérias produtoras de ácidos têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 5 e 6, tendo uma tolerância maior a valores mais baixos de pH que as *arqueas* metanogênicas.

Em sistemas onde existe uma série de microrganismos atuando em forma de consórcios, deve-se buscar a faixa de pH onde se propicia o crescimento máximo da maior parte dos microrganismos envolvidos (SOARES, 1990). Relata ainda que, o pH está intimamente ligado a concentrações de ácidos orgânicos voláteis no meio, resultante do equilíbrio entre populações de microrganismos e a alcalinidade total do sistema. Portanto, qualquer desequilíbrio no sistema provoca o acúmulo de ácidos orgânicos no meio e conseqüentemente queda do pH. Segundo o autor os valores de pH abaixo de 6 e acima de 8, praticamente fazem cessar a produção de metano.

A produção do metano é o gargalo na operação de reatores anaeróbios e deve-se adotar a faixa operacional da digestão entre 6,8 e 7,2, controlada pelo valor da alcalinidade, que atua neutralizando os ácidos voláteis produzidos nas etapas acidogênicas e acetogênicas (NIELSEN et al, 2009).

3.11.3. ALCALINIDADE E ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV)

Os parâmetros alcalinidade e ácidos voláteis estão intimamente relacionados, sendo importantes para o controle e operação adequados do reator anaeróbio. Durante o processo de fermentação há uma diminuição do pH no meio, devido à produção de compostos ácidos. Essa variação do valor de pH no interior do reator é indesejada, uma vez que as bactérias mais sensíveis teriam sua dinâmica comprometida (LETTINGA, 1985).

A alcalinidade de um sistema, ou seja, a capacidade que ele tem de neutralizar ácidos é o resultado da presença de espécies químicas de caráter alcalino, indicando a capacidade de tamponamento do sistema. A alcalinidade elevada não é sinônimo de pH elevado, significa que o sistema tem elevada concentração de espécies alcalinas e que, em função disso tem elevada resistência à queda de pH quando um ácido é nele introduzido (HIRATA, 1990; CHERNICHARO, 1997).

Análises de alcalinidade e acidez são importantes para o controle dos reatores. Segundo CHERNICHARO (1997), o monitoramento da alcalinidade nos reatores anaeróbios torna-se mais importante que a avaliação do pH; isso se deve à escala logarítmica do pH, significando que pequenos abaixamentos de pH implicam no consumo de elevada quantidade de alcalinidade, diminuindo o tamponamento do meio. Um parâmetro importante para determinar o desempenho dos reatores é a relação AV/AL (Acidez Volátil/Alcalinidade), pois permite prever e evitar a queda de pH.

De acordo com METCALF & EDDY (2003), quando o processo de digestão está ocorrendo de forma satisfatória, a alcalinidade terá valores entre 1000 e 5000mg.L⁻¹ e a concentração de ácidos voláteis deverá ser menor que 250mg.L⁻¹.

Os AV são os principais produtos intermediários formados durante o processo de digestão anaeróbia. Para valores baixos de pH, os AV tornam-se tóxicos devido ao aumento da fração não dissociada. A fração não dissociada possui a capacidade de atravessar as membranas celulares, dissociando-se no interior, provo-

cando uma redução do pH intracelular (CHEN et al., 2008). Além do pH, a concentração inibitória de AV depende também do poder tampão no reator (BJORNSSON et al., 2000).

Tanto a alcalinidade como os ácidos voláteis derivam primariamente da decomposição da matéria orgânica durante a digestão. Na digestão anaeróbia são produzidos sais e ácidos fracos como o ácido acético, ácido propiônico e o sulfato de hidrogênio, possibilitando desta forma o agrupamento de íons H^+ e OH^- que contribuem para o aumento da alcalinidade no sistema (SAWYER, 1994).

A medida dos ácidos voláteis é o parâmetro que fornece a indicação mais imediata do funcionamento do processo. Caso ocorra uma elevada concentração de ácidos voláteis, devido à variação das características hidráulicas ou problemas com as bactérias produtoras de metano, as substâncias que exercem um poder tampão impedirão a queda do pH. Portanto, somente quando toda a alcalinidade do meio for neutralizada pelos ácidos voláteis é que ocorrerá a queda do pH (SAWYER, 1994).

Quando a concentração de ácido volátil é baixa a concentração do íon carbonato é aproximadamente equivalente a alcalinidade total. Quando a concentração de ácido volátil começa a aumentar ela é neutralizada pelo bicarbonato alcalino e em seu lugar forma alcalinidade de ácido volátil. Com essas condições, a alcalinidade total é composta pela alcalinidade relativa ao bicarbonato e a alcalinidade relativa ao ácido volátil (McCARTY, 1964b).

MECHICHI e SAYADI (2005) estudaram a toxicidade provocada por AV durante a digestão de um efluente resultante da trituração da azeitona, num reator de filtro anaeróbio de fluxo ascendente, a 35°C. Estes autores registraram os primeiros indícios de inibição (diminuição na produção de metano), para uma concentração de acetato > 125 mM, (milimol) de propionato e butirato > 100 mM e de valerato > 50 mM.

NIELSEN et al. (2009), efetuaram um estudo de codigestão de excrementos de bovinos e de suínos em conjunto com farinha de carne e ossos, em reatores

completamente agitados a uma temperatura de 53°C e pH = 7,87. Estes autores verificaram uma diminuição na produção de biogás devido a acumulação de AV associada a aplicação de um choque de carga orgânica no digestor. A inibição verificou-se a partir de uma concentração de acetato > 45mM, propionato > 15 mM, iso-valerato > 2,0 mM, iso-butirato > 1,0 mM, butirato > 0,75 mM, e valerato > 0,5 mM.

3.11.4. NECESSIDADES NUTRICIONAIS

Segundo LEMA *et al* (1997), uma das principais vantagens do processo anaeróbio é a sua baixa necessidade de nutrientes, devido logicamente a baixa produção celular. As necessidades nutricionais dos microrganismos presentes no sistema anaeróbio são estabelecidas de acordo com a composição química das células microbianas. Este dado exato é raramente conhecido, sendo esta informação determinada com base na composição empírica das células.

Os elementos químicos em maior quantidade na composição dos microrganismos são: carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. Outros nutrientes são necessários para a biossíntese dos componentes celulares, como cátions (Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^{+1} , K^{+1} , Fe^{++}), ânions (Cl^- , SO_4^{-2}), e traços de elementos considerados como micronutrientes (Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni, Se,) servindo como elementos auxiliares para várias enzimas. Os microrganismos precisam de uma fonte de carbono para o seu crescimento e muitos utilizam CO_2 e outros, carbono orgânico. A classificação dos microrganismos em seres autotróficos e heterotróficos está relacionada à fonte de carbono utilizada pelos mesmos, onde os autotróficos sintetizam suas moléculas carbônicas a partir do CO_2 , e os heterotróficos utilizam como fonte de carbono compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

3.11.5. TEMPO DE RETENÇÃO

É o tempo necessário para a mistura ser totalmente digerida no digestor e ocorre quando a produção de gás é máxima, definindo a melhor qualidade digestora. Seu valor depende entre outros fatores, do substrato e tipo de digestor, podendo variar de 50 dias, em alguns tipos de digestores rurais, a apenas algumas horas, em certos digestores industriais (CHERNICHARO, 1997).

O tempo de retenção combinado com a taxa de decomposição dos sólidos voláteis é responsável pela eficiência do digestor. O menor tempo de retenção e o maior de decomposição são resultados dos melhores digestores. O tempo de retenção é definido pela relação entre o volume do digestor e o volume da carga diária, e pode variar em função da adição de nutrientes, ou pela agitação e variação da temperatura da mistura no digestor.

3.11.6. TOXICIDADE NA DIGESTÃO ANAERÓBIA

O termo toxicidade é relativo a concentração de um material orgânico ou inorgânico encontrado no efluente que pode causar a mortandade ou inibição dos microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia.

Segundo CHERNICHARO (1997), a degradação adequada dos efluentes por qualquer processo biológico depende da manutenção de um ambiente favorável para os microrganismos, incluindo o controle e a eliminação de constituintes tóxicos. A toxicidade tem sido considerada uma das principais razões para a não aplicação de processos anaeróbios, pois as bactérias metanogênicas são facilmente inibidas por toxinas, devido a sua pequena fração de substratos sintetizados em células e ao elevado tempo de geração dessas bactérias. Os microrganismos possuem um grau de adaptação a concentrações inibitórias, desde que certas condições do meio sejam favorecidas como elevados tempos de residência de sólidos e minimização do tempo de residência das toxinas no sistema.

Grupos de substâncias químicas como metais pesados e substâncias organocloradas têm uma influência tóxica, mesmo em concentrações muito baixas. (POL *et al.*, 1998).

Os microrganismos podem ser capazes de biotransformar compostos como clorofórmio e tricloroetano, desde que seja usada uma metodologia apropriada, na qual o aumento da concentração do composto tóxico seja feito vagarosamente e com a prevenção de perda de biomassa do sistema (SPEECE, 1996).

A adição de compostos orgânicos e inorgânicos pode variar de efeito estimulante à tóxico. A estimulação da atividade bacteriana é usualmente conseguida em baixas concentrações. Caso ocorra um aumento na concentração de certos compostos, maior a chance de inibição e paralisação das atividades bacterianas. A tabela 5 indica as concentrações estimuladoras e inibidoras de alguns compostos.

Tabela 5. Concentrações estimuladoras e inibidoras de alguns compostos

Composto	Concentração mg.L ⁻¹		
	Estimuladora ou sem efeito	Moderadamente inibidora	Fortemente inibidora
Sódio	100 – 200	3500 – 5500	8000
Potássio	200 – 400	2500 - 4500	12000
Cálcio	100 – 200	2500 - 4500	8000
Magnésio	75 – 150	1000 – 1500	3000
Nitrogênio	50 – 200	1500 – 3000	3000
Gás Sulfídrico	50 - 100	100 - 200	200

Fonte: adaptado de CHERNICHARO, 1997 e McCARTY, 1964a

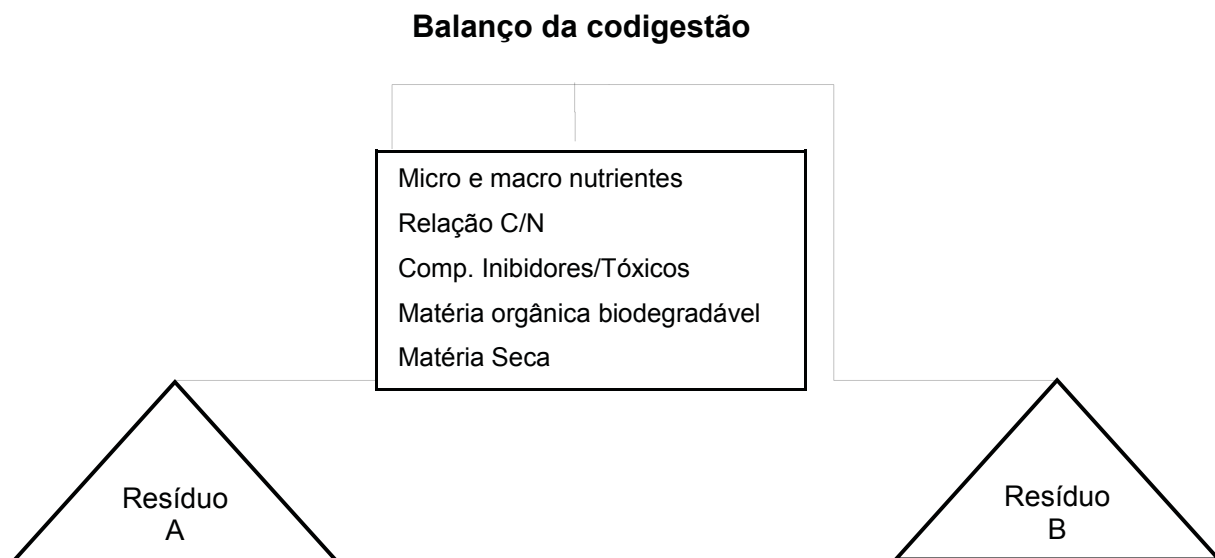
3.12. CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBSTRATOS ORGÂNICOS

Foi estudado a possibilidade de aperfeiçoar a digestão anaeróbia com a co-digestão anaeróbia, ou seja, consorciando resíduos orgânicos a outros resíduos

mais ricos em microrganismos, como lodo de esgoto sanitário, esterco bovino, de galinha, entre outros.

O conceito de codigestão anaeróbia, não é mais do que um processo de tratamento/valorização conjunto, através da digestão anaeróbia, de diferentes tipos de substratos, os quais compensam-se, quanto às suas características físico-químicas, mas permitem sobretudo quando combinados, aumentar a produção de biogás por volume de digestor ocupado.

A codigestão anaeróbia, segundo ALVAREZ & LIDÉN (2008), é a decomposição de dois ou mais tipos de substratos orgânicos tratados simultaneamente. Pode apresentar diversos benefícios comparativamente a digestão de substratos isolados, tais como: aumento do custo-benefício das unidades de tratamento derivada do tratamento de maior variedade de resíduos; maior eficiência de degradação do substrato derivado da ocorrência de efeitos sinérgicos e do fato do conteúdo em nutrientes e umidade estar mais próximo de valores ótimos, diluição de compostos inibitórios (como amônia e AV) e aumento da produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2000). Conforme os mesmos autores, um balanço da codigestão está demonstrado na Figura 6, que apresentam requisitos importantes para um bom desempenho do processo de codigestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Di BERARDINO, 2009

Figura 6. Balanço da codigestão anaeróbia

A codigestão de resíduos em conjunto com esgoto doméstico tem sido aplicada frequentemente com sucesso em estações de tratamento de águas residuárias (ETARs). O fato de muitas ETARs se encontrarem muitas vezes subexploradas, apresentando uma capacidade de tratamento muito superior comparativamente ao volume de lamas domésticas que aí são tratadas, tem servido de incentivo a aplicação da codigestão (WEILAND, 2000).

MATA-ALVAREZ et al. (2000) mencionam que o uso de co-substrato pode ajudar a estabelecer a umidade requerida para o processo de digestão. No entanto, o desempenho do processo de codigestão anaeróbia é muito dependente dos tipos e da composição do material orgânico a ser degradado (SOSNOWSKI *et al.* 2003). Esta técnica permite o uso de instalações existentes reduzindo, sobretudo, os custos de implantação (GÓMEZ *et al.* 2006). SOSNOWSKI *et al.* (2008) relatam que a digestão anaeróbia é estabilizada por uma variedade de substratos, propi-

ciando simultaneamente o aproveitamento energético e a proteção do meio ambiente.

A digestão anaeróbia, conjugada com práticas agrícolas, é uma solução para o destino final dos resíduos, permite fechar o ciclo dos nutrientes, evita tratamentos adicionais para adequação aos outros meios receptores e produz mais biomassa para a produção de biogás (DI BERARDINO, 2009).

Em alguns países europeus (Alemanha, Suécia, Áustria, Dinamarca), este conceito teve fácil aceitação e posto rapidamente em operação (BAROMETRE DU BIOGAZ 2006), promovido pelo excesso de produção de restos de alimentos, pelo elevado preço dos combustíveis e pelas favoráveis tarifas de venda da energia elétrica nas redes.

Nos últimos anos a produção de biogás a partir dos mais diversos resíduos (industriais, agrícolas, resíduos sólidos urbanos (RSU), misturas de resíduos, sistemas coletivos) tem evoluído fortemente e constituirá a maior fonte de produção (DI BERARDINO, 2009).

De acordo com DE BAERE (2007) a digestão anaeróbia de culturas energéticas (milho) fornece pelo menos 75 GJ/ha (giga joule-hectare) de energia líquida, correspondentes a pelo menos duas vezes mais rendimento de energia obtido pela fermentação alcoólica e três vezes mais energia líquida que os biocombustíveis líquidos produzidos com cevada e beterraba, tornando o biogás um combustível muito favorável para o transporte. Existem numerosos digestores em escala real em operação que são alimentados com substrato misto, constituídos por milho, sorgo, derivados do milho, cereais, rações integrais e misturas de outras culturas energéticas.

Segundo HABIBA *et al.* (2008), um dos maiores problemas encontrados no tratamento de resíduos de frutas e verduras está associado à alta relação C/N (carbono/nitrogênio) encontrada neste tipo de resíduo. O consórcio dos resíduos de frutas e verduras (RFV) por exemplo, com resíduos provenientes de sistema de

lodos ativados (LA), possibilita uma alternativa atraente para o tratamento conjugado, uma vez que a alta relação C/N dos RFV compensa a baixa relação C/N dos resíduos de lodo ativado e a deficiência de nutrientes.

3.13. BIOGÁS

O biogás é uma mistura dos gases metano, dióxido de carbono e de traços de outros gases, oriundos da decomposição bacteriana de matéria orgânica em ambiente anaeróbio, como encontrado em pântanos, lavouras de arroz, no trato digestório de ruminantes, mas também em lagoas de estabilização e lixões, podendo ser utilizado para fins energéticos se gerado de maneira controlada, em biodigestores, ou captado em aterros sanitários. Ele depende do substrato de que é gerado, o que lhe confere características diferenciadas e a principal delas é a quantidade de metano produzido, componente principal do biogás, o qual é um hidrocarboneto inflamável, com valor calorífico de $35,89 \text{ MJ m}^{-3}$ (Mega Joule), que dá ao biogás seu valor como combustível e que, quando emitido pela atmosfera, tem um potencial de efeito estufa 21 vezes maior que o dióxido de carbono (US EPA, 2009).

Segundo FIGUEIREDO (2007), podemos verificar na Tabela 6 as informações sobre os principais constituintes desta mistura de gases, o biogás. O metano (que é proveniente de toda e qualquer matéria orgânica degradada) uma vez gerado e liberado na atmosfera acaba sendo oxidado. Essa oxidação troposférica produz grande quantidade de dióxido de carbono e dióxido de nitrogênio, gases nocivos ao meio ambiente e à saúde. Os mesmos são responsáveis por diversas reações (BAIRD, 2002). Ainda conforme o autor esses gases podem causar o aumento de sintomas em doenças respiratórias e alterar os mecanismos de defesa de patógenos, apresentando-se como um gás incolor, inflamável, não tóxico, com um odor semelhante ao do óleo. É o primeiro membro da série dos hidrocarbonetos parafínicos e é considerado um combustível “limpo”

por não apresentar impurezas e resíduos da sua combustão, não ser corrosivo nem produzir depósitos de carbono nas câmaras de combustão. A mistura ar-combustível é perfeita com qualquer temperatura e a sua combustão é mantida por mais tempo do que os demais combustíveis (LEITE, *et al.*, 2003).

Tabela 6. Propriedades dos principais constituintes do biogás

Propriedades	Metano (CH ₄)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Gás Sulfídrico (H ₂ S)
Massa Molecular	16,04	44,01	34,08
Massa Específico	0,555	1,52	1,189
Volume Específico	1473,3cm ³ /g	543,1cm ³ /g	699,2cm ³ /g
Capacidade Calorífica a 1 ATM	0,775kcal/kg	0,298kcal/kg	0,372kcal/kg
Relação CP/CV	1,307	1,303	1,320
Poder Calorífico	13,26kcal/kg	0kcal/kg	4,633kcal/kg
Limite de Inflamabilidade	5-15% por volume	Nenhum	4-46% por volume

Fonte: Adaptado de FIGUEIREDO, 2007

Existem duas situações possíveis para o aproveitamento do biogás. A queima direta e a conversão do biogás em eletricidade. O biogás, então pode produzir tanto energia elétrica quanto térmica (NOGUEIRA, 1992; PLÖCHL & HEIERMANN, 2006).

Pelo menos 25% do total de bioenergia no futuro, poderão ser originadas a partir do biogás obtido na biodigestão de resíduos orgânicos (NIELSEN *et al.*, 2009). A Tabela 7 compara, em termos energéticos, o biogás com outros combustíveis existentes no país, segundo SOUZA (2000).

Tabela 7. Comparativo energético do biogás com outros combustíveis

Combustível	PCI (kcal/kg)	Densidade (kg/m ³)	Equivalência (1m ³ de CH ₄)
Metano	11.350	0,775	-
Álcool	7.090	0,789	1,57 l
Diesel	10.000	830	1,00 l
Gasolina	10.600	735	1,10 l
GLP	10.000	585	1,50 l
Óleo Combustível	10.500	880	0,95 l
Gás Natural	11.440	0,775	0,96 m ³

Fonte: Souza, 2000

3.14. UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

A energia contida no biogás pode ser aproveitada em várias formas. Na Alemanha e na Dinamarca, por exemplo, o uso principal é na geração de energia elétrica para a rede nacional. Nos últimos anos, a purificação do biogás e a injeção aos gasodutos do gás natural também estão ganhando cada vez mais importância. Os biodigestores rurais na Índia e na China produzem biogás principalmente para iluminação, cocção, aquecimento, secagem de produtos agrícolas e também geração de energia elétrica em pequena escala. A utilização do biogás é uma realidade bastante presente na Índia, contabilizando-se cerca de 4 milhões de digestores familiares de biogás (CHANAKYA *et al*, 2009) e prevê-se que este número venha a aumentar consideravelmente. Por exemplo, YADVIKA *et al*, (2004) se refere a possibilidade de construção de mais de 12 milhões de plantas de biogás se utilizar apenas 1/3 do chorume proveniente da criação de gado, ou recentemente

URBAN *et al*, (2009), que analisa diferentes cenários para o sistema de eletrificação rural na Índia para o período 2005-2030, conclui que os sistemas de eletrificação rural, com base na adoção de sistemas de energia renovável (forno de biogás, forno solar, etc.) podem reduzir cerca de 99% das emissões totais de CO₂ das habitações que utilizam a lenha normalmente como combustível. KATUWAL & BOHARA (2009) dá ênfase ao benefício na saúde humana e os impactos econômicos com essa mesma substituição. Situações idênticas verificam-se também pelo continente africano em particular na África do Sul onde aproximadamente 310 mil casas rurais entre 2007 e 2008 começaram a utilizar energia proveniente do biogás (AUSTIN, 2007).

Na Europa a produção de biogás está localizada, sobretudo em quatro países: Alemanha, Suécia, Dinamarca e Áustria, contudo verifica-se a sua produção um pouco por toda a Europa. Na Tabela 8 é apresentado o número de instalações e a energia produzida e contabilizada no final do ano de 2006, nos principais países europeus (BAROMÉTRE DU BIOGAZ, 2006).

Tabela 8. Número de instalações para a produção de biogás e a energia produzida e contabilizada no final do ano de 2006, nos principais países europeus

Países	Nº de Instalações em operação	Energia produzida (GWh)
Alemanha	3500	> 5564
Reino Unido	1052	> 4783
Itália	>67	> 1313
Dinamarca	80	> 911
Áustria	524	> 1706
Suécia	163	> 1300
França	203	≈ 657
Holanda	40	> 281

Fonte: adaptado IEA, 2003; BAROMÉTRE DU BIOGAZ, 2006

No caso da Alemanha a digestão anaeróbia ocupa de momento 10,9% da produção de energia renovável, contra 4,2% da fotovoltaica e 11,5 % relativa as centrais de biomassa e a maior quota provem de energia eólica 45,2% (WEILAND, 2000). Segundo ainda o mesmo autor, em 2009, contabilizam-se 4000 instalações de biogás com uma capacidade elétrica de 1400 MW (megawatt). Entre os anos de 2005-2006 foram construídas 1450 instalações de biogás, contudo de momento verifica-se um forte investimento no tratamento do biogás e a respectiva injeção na rede de gás natural. Em 2009 cerca de 16 instalações de tratamento do biogás estão em operação existindo ainda em fase de projeto ou em fase de construção mais 20.

Na Suécia o biogás é utilizado na sua maioria para aquecimento (56%), combustível para veículos (19%) e o restante é utilizado nas necessidades energéticas das centrais. Em 2009 totalizaram-se cerca de 120 estações de combustível com biometano e um pouco mais de 16 mil veículos movidos a biometano na sua maioria (mais de 15 mil) veículos particulares. Prevê-se um investimento entre 2009-2013 para a produção descentralizada (em centrais agrícolas) utilizando pelo menos 50 % de chorume como substrato (PETERSSON, 2009).

3.15. BIOGÁS NO MUNDO

A China é líder mundial em termos de biodigestores instalados, seguida pela Índia, Egito e Peru. A China, que aprovou uma lei sobre o fomento de energias renováveis no ano 2005, possui o maior número de biodigestores rurais, com 5 milhões de unidades instaladas, e segundo os planos do governo, cerca de 50 milhões famílias serão beneficiadas com esta tecnologia até o ano 2010 (INWENT, 2009).

Através do Programa Nacional sobre o Desenvolvimento do Biogás (*National Project on Biogas Development*), lançado nos anos 1981-82, a Índia começou a promover a instalação de pequenos biodigestores com tecnologia simples no meio rural, principalmente para o suprimento de energia para cozinhar. O objetivo para o período de 2008-2009 é a implantação de 116.500 biodigestores rurais em escala familiar, com capacidade de 1 a 4 m³ (INDIA, 2009). Segundo informações do governo indiano, foram instalados, até agora, aproximadamente três milhões de biodigestores em escala familiar (PRESS INFORMATION BUREAU OF THE GOVERNMENT OF INDIA, 2009).

Na Europa, especialmente na Alemanha, foi observado um crescimento rápido do número de usinas para a produção do biogás no meio rural depois que o governo lançou um programa para estimular este tipo de energia renovável. Hoje existem neste país usinas de biodigestão de médio e grande porte, com capacidade média instalada entre 150 e 350 kW (kilowatt). O biogás é transformado em energia elétrica para a rede nacional ou, recentemente, purificado para atingir a qualidade do gás natural e injetado nos gasodutos. Na Alemanha, onde estavam em funcionamento, no fim do ano 2008, perto de 4.000 usinas de biogás (ASSOCIAÇÃO ALEMÃ DE BIOGÁS, 2009), o objetivo é a produção de 25 a 30% de energia elétrica e 14% da demanda de calor proveniente de energias renováveis, até o ano 2020 (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, 2008).

É importante destacar que, na Europa, a produção da biomassa como matéria-prima é responsável por aproximadamente 50% dos custos totais da geração dessa forma de energia. No inverno, a vegetação permanece em estado de dormência por quase seis meses, portanto é preciso estocar a maior parte dos substratos previstos para a alimentação dos reatores, em forma de silagem (RAUSSEN, 2008). Mesmo assim, nos últimos dez anos, a geração de bioenergia se tornou mais uma atividade agrícola na Alemanha e muitos agricultores, hoje proprietários de uma usina de biogás, se tornaram também “energicultores”.

IV. MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do local

O trabalho foi realizado no Laboratório de Biomassa e Biodigestão Anaeróbia do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista / Unesp – Campus de Jaboticabal, situado nas coordenadas geográficas: 21°14'05" S; 48°17'09" W e altitude média de 613,68 metros. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Aw com transição para Cwa. De acordo com as normais (1971-2000) observadas em Jaboticabal, o clima caracteriza-se por ser subtropical úmido, seco no inverno e com chuvas no verão, com precipitação anual de 1.424,6 mm, temperatura média anual de 22,2° C e umidade relativa média anual de 70,8%.

Definição do experimento

O trabalho experimental consistiu na investigação do potencial de produção de biogás levando-se em consideração as características físico-químicas das fibras presentes nos substratos utilizados. Para tanto, realizou-se a codigestão anaeróbia de esterco bovino com diferentes proporções de cana-de-açúcar e silagem de cana. O experimento foi iniciado em 22/10/2010 e finalizado em 18/04/2011. O desenvolvimento do trabalho envolveu seis etapas descritas na Figura 7.

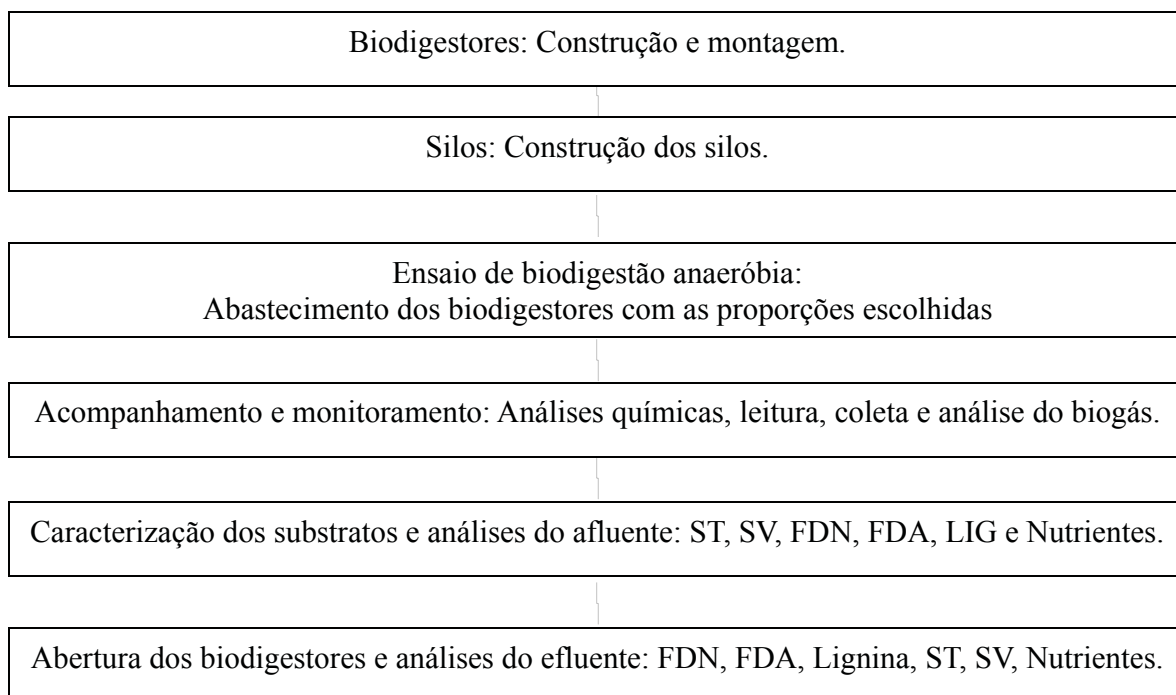


Figura 7. Fluxograma de desenvolvimento do experimento

A seguir estão detalhadas as etapas do experimento, ou seja, procedimentos de construção, abastecimento, monitoramento e os métodos analíticos empregados.

Caracterização dos biodigestores utilizados

Os biodigestores utilizados foram constituídos por três cilindros retos de PVC, com diâmetros de 75, 100 e 150 mm, caracterizados como biodigestores batelada de bancada, com capacidade de 2000 mL de substrato em fermentação. Os cilindros de 75 e 150 mm encontravam-se um inserido no outro, de modo que o espaço existente entre a parede externa do cilindro interior e a parede interna do cilindro exterior comportava um volume de água denominado selo de água. O cilindro de diâmetro intermediário tinha uma das extremidades vedadas, conservando apenas uma abertura para descarga do biogás e emborcado no selo

de água para propiciar condições anaeróbias e armazenar o gás produzido.

Os biodigestores foram dispostos sobre uma bancada em condições de temperatura ambiente, abrigados de luz solar e de chuvas, conforme Figura 8.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 8. Vista parcial dos biodigestores batelada de bancada utilizados no ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal

Caracterização dos silos

Foram utilizados como silos três biodigestores batelada de alvenaria, com profundidade de 60 cm e largura de 38 cm, revestidos na parte interna com sacos plásticos, nos quais foi armazenado o material (cana-de açúcar) devidamente compactado para expulsão do ar, cobertos com sacos plásticos escuros e vedados com gasômetro, por um período de três meses, conforme Figura 9.

A variedade da cana utilizada na ensilagem foi IAC-86-2480. A planta foi picada em tamanho de aproximadamente 3 cm.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 9. Vista parcial dos silos na operação de ensilagem da cana-de-açúcar utilizada no ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal

Ensaio de biodigestão anaeróbia

Foram abastecidos 20 biodigestores batelada de bancada, sendo 5 tratamentos com quatro repetições cada, conforme Figura 10. Os substratos utilizados foram esterco bovino e cana de açúcar e esterco bovino e silagem de cana nas proporções de 0%, 5% e 10% do vegetal. Preparou-se 1700 mL de substrato com 6% de sólidos totais.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 10. Abastecimento dos biodigestores com substratos utilizados no ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal

Os valores de massa e porcentagem de sólidos totais (ST) do esterco e vegetal utilizados na composição dos substratos para abastecimento dos biodigestores do ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9. Massa (g) e % de sólidos totais (ST) do esterco e vegetal utilizados na composição dos substratos para abastecimento dos biodigestores do ensaio de biodigestão anaeróbia com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal

Tratamento	Esterco (g)	Vegetal (g)	ST Esterco (%)	ST Vegetal (%)
Cana 5%	445	17,30	21,78	29,53
Cana 10%	421	34,50	21,78	29,53
Silagem de Cana 5%	445	23,35	21,78	21,84
Silagem Cana 10%	421	46,70	21,78	21,84
Esterco	468	0,00	21,78	0,00

Acompanhamento e monitoramento

Para acompanhamento e monitoramento do ensaio de biodigestão anaeróbia, foram abastecidos mais 20 biodigestores batelada, construídos de garrafas PET, com as mesmas proporções utilizadas no ensaio de biodigestão anaeróbia, ou seja, 0%, 5% e 10% de vegetal em codigestão com esterco bovino, conforme descrito na Tabela 9.

Com os substratos presentes nesses biodigestores, realizou-se leituras de pH e análises de alcalinidade e acidez para avaliação desses parâmetros químicos e observação do estabelecimento da estabilização do processo de biodigestão anaeróbia.

Foram formados quatro conjuntos com os 20 biodigestores, contendo um representante de cada tratamento (esterco, 5% e 10% de cana, 5% e 10% silagem de cana). A cada 10 dias, utilizou-se um tratamento de cada conjunto nas análises mencionadas acima por um período de 50 dias. Os biodigestores possuíam mangueiras acopladas na tampa, coladas com silicone, cujas extremidades foram submersas em água.

Concomitantemente ao monitoramento dos parâmetros químicos foram realizadas as leituras de duas a três vezes na semana de acordo com a produção de biogás e coletas para avaliação de produção e qualidade nos biodigestores batelada de PVC, pertencentes ao ensaio de biodigestão anaeróbia.

Caracterização dos substratos e análise do afluente

O esterco utilizado foi coletado na sala de ordenha, por raspagem, sendo proveniente de vacas Holandesas em lactação mantidas em sistemas de produção semi-intensivo e ordenhadas duas vezes ao dia. Foram sempre de um mesmo lote de coleta e alimentadas com silagem de cana e no fim da tarde liberadas para pastejo.

Para a caracterização do esterco, cana, silagem de cana e do afluente foram efetuadas análises de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), celulose, hemicelulose, lignina e determinação dos conteúdos de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe) e Manganês (Mn).

Abertura dos biodigestores e análises do efluente

Após seis meses do abastecimento dos biodigestores do ensaio de biodigestão anaeróbia foi feita a abertura dos mesmos e realizadas análises de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), celulose, hemicelulose, lignina e determinação dos conteúdos de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) no efluente.

Métodos analíticos empregados

A Tabela 10 resume os métodos utilizados na determinação das análises dos substratos, afluente e efluente.

Os teores de ST e SV foram determinados segundo metodologia descrita no APHA (2005). Para as determinações de FDN, FDA, celulose, lignina e N utilizaram-se metodologia descrita por SILVA & QUEIROZ (2002). Os teores de fósforo foram determinados pelo método colorimétrico utilizando-se espectrofotômetro HACH modelo DR-2000, conforme SARRUGE e HAAG (1974) e MALAVOLTA *et al.* (1989). O Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) em espectrofotômetro de absorção atômica modelo GBC 932 AA, após digestão nítrico perclórica. A determinação do pH foi feita segundo metodologia descrita APHA (2005),

utilizando peagâmetro da marca Hanna Instrumentos HI8424 Digimed. A alcalinidade e acidez foram determinadas segundo metodologia descrita por SILVA & OLIVEIRA, (1985).

Tabela 10. Parâmetros analisados e métodos utilizados nas análises dos substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal

Parâmetros	Métodos	Citação
pH	Peagâmetro digital	APHA, 2005
Alcalinidade e Ácidos voláteis	Titulometria	SILVA & OLIVEIRA, 1985
Sólidos totais e Sólidos voláteis	Gravimetria	APHA, 2005
Fibras	FDN, FDA e lignina	SILVA & QUEIROZ, 2002
Nutrientes	Espectrofotometria e Micro Kjeldahl	SARRUGE & HAAG, 1974 MALAVOLTA <i>et al</i> , 1989
Produção de biogás	Deslocamento de volume	----
Composição do biogás	Cromatografia a gás	----

Para a determinação do volume de biogás produzido, o deslocamento vertical do gasômetro foi medido e multiplicado pela área da seção transversal interna do gasômetro, ou seja 0,00785 m². Com auxílio de termômetro digital, media-se a temperatura ambiente. Após as leituras, efetuava-se a descarga do biogás, zerando-se os gasômetros. A correção do volume de biogás para condições de 1 atm e 20°C foi efetuada com base no trabalho de CAETANO (1985). 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, onde:

$$\frac{V_o P_o}{T_o} = \frac{V_1 P_1}{T_1}$$

sendo:

V_o = volume de biogás corrigido, m³;

P_o = pressão corrigida do biogás, para 1 atm, 10332,27 mm de H₂O;

T_o = temperatura corrigida do biogás, 293,15 °K;

V_1 = volume do gás no gasômetro;

P_1 = pressão do biogás no instante da leitura, 9621,9239 mm de H₂O;

T_1 = temperatura do biogás , em graus K, no instante da leitura.

Substituindo os valores obtém-se como resultado a seguinte expressão, para correção do volume de biogás:

$$V_o = \frac{V_1}{T_1} \times 273,26023$$

O teste de queima do biogás produzido foi efetuado durante a primeira semana do experimento, indicando a predominância de metano no biogás após um dia de abastecimento.

Os potenciais de produção de biogás e de metano foram calculados utilizando-se os dados de produção diária e as quantidades de ST e SV adicionados e reduzidos nos biodigestores. Os valores foram expressos em m³ de biogás por kg de ST e SV adicionados e reduzidos.

As análises de qualidade do biogás produzido foram feitas semanalmente para determinação dos teores de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). A

amostras do biogás foram colhidas, com auxílio de seringas e posteriormente analisadas em cromatógrafo de fase gasosa Finigan GC-2001, equipado com as colunas Porapack Q, Peneira Molecular e detector de condutividade térmica.

Análise estatística dos dados

Para os ensaios de biodigestão anaeróbia utilizou-se delineamento inteiramente casualizado, onde foram instituídos 5 tratamentos com 4 repetições. As pressuposições para análise de variância foram verificadas e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (SAS, 1990).

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

pH

Como pode ser visto na Tabela 11 os valores de pH para os tratamentos 5 e 10% de cana situaram-se entre 5,72 e 5,62 respectivamente, no início do processo correspondente à solubilização da matéria orgânica. Este fato ocorreu devido à predominância das etapas de hidrólise e acidogênese, o que levou à formação dos ácidos voláteis refletindo nos valores do pH, os quais estão associados a alguns tipos de resíduos sólidos vegetais que apresentam características ácidas, fato este observado por LUNA (2003), quando tratava substrato de resíduos sólidos vegetais em biodigestor anaeróbio compartimentado sem homogeneização.

Tabela 11. Valores de pH encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal em um período de 50 dias

Período Dias	Cana 5%	Cana 10%	Sil.cana 5%	Sil.cana 10%	Esterco
10	5,72	5,62	5,64	5,63	5,98
20	5,64	5,57	5,78	5,63	6,18
30	6,50	5,50	5,75	5,53	6,04
40	7,16	6,43	6,70	6,18	6,20
50	7,10	7,02	7,00	7,05	7,11

O pH expressa as condições de alcalinidade e acidez de um meio através da medida da concentração de íons H^+ , sendo um importante parâmetro a ser observado para evitar que exista risco de inibição, principalmente das bactérias metanogênicas. Portanto, pode-se entender que os biodigestores não sofreram variação de pH a ponto de comprometer seu desempenho, favorecendo desta forma o desenvolvimento das bactérias metanogênicas que de acordo com VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), CHERNICHARO (1997), FORESTI (1997),

METCALF & EDDY (2003), tem um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4.

Segundo SOUSA (1996), a instabilidade do processo de biodigestão anaeróbia ocorre quando há predominância da fermentação ácida sobre a metanogênica, refletindo em variações de parâmetros como pH, concentração de ácidos voláteis e alcalinidade, indicando a importância do monitoramento destes. Conforme a Tabela 11, percebeu-se que a partir do 50º dia de operação, os valores de pH indicaram uma clara tendência à estabilização atingindo a neutralidade, ou seja, 7,1 e 7,02 para cana 5% e cana 10% respectivamente, tornando-se favorável ao processo de bioestabilização anaeróbia demonstrando a presença do equilíbrio nas diferentes vias metabólicas, o que contribuiu positivamente para a aclimatização dos microrganismos anaeróbios. A quantificação dos valores de pH em processos de tratamento biológico, expressa geralmente, a concentração de espécies ácidas ou alcalinas, contribuindo para uma avaliação preliminar do desempenho do processo.

ANDERSON & YANG (1992) recomendaram pH entre 6,4 à 7,6 e afirmaram que em condições normais, o pH permanece próximo ao neutro, com o sistema funcionando em equilíbrio de bicarbonato e ácidos voláteis.

A Figura 11 demonstra o comportamento das curvas dos tratamentos Cana 5 e 10%, Silagem de cana 5 e 10% e Esterco. O pH dos substratos com 100% de esterco permaneceu próximo a 6 nos primeiros quarenta dias, aumentando após este período. Os tratamentos onde se teve codigestão do vegetal com o esterco, demonstraram melhor desempenho em relação a esse parâmetro, embora com pH inicial mais baixo estes tratamentos apresentaram elevação em seus valores com uma velocidade maior, a partir de então, operando de forma estável atingindo a neutralidade em uma faixa adequada de pH para atividade das *arqueas* metanogênicas.

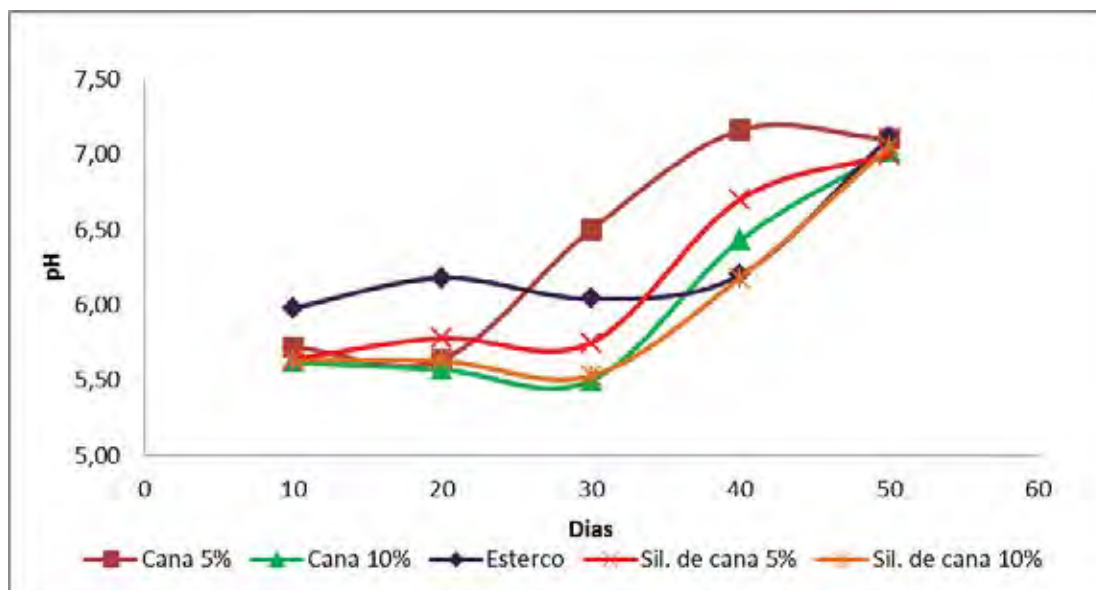


Figura 11. Valores de pH encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco em um período de 50 dias

Para os tratamentos que utilizaram silagem de cana 5 e 10%, os valores iniciais de pH foram 5,64 e 5,63 respectivamente, abaixo do valor observado para o tratamento com 100% de esterco. Tal fato pode ser explicado pela presença de ácido láctico e acético contido na silagem. Conforme pode ser observado na Figura 10, após quarenta dias, o sistema em codigestão começou a se equilibrar atingindo pH próximo à neutralidade, eliminando o risco de inibição das bactérias metanogênicas pelos baixos valores de pH, evitando assim a falha do processo anaeróbio.

Alcalinidade e ácidos voláteis

Na Tabela 12 estão demonstrados os valores de alcalinidade e ácidos voláteis dos tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e

silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco, do ensaio de monitoramento em um período de 50 dias.

Conforme pode-se observar na Tabela 12 nos tratamentos cana e silagem de cana nas proporções 5 e 10%, no 20º dia, a alcalinidade total (AT) apresentou 3686 e 3324 mg CaCO_3/L (carbonato de cálcio), respectivamente. Esses valores correspondem justamente ao período de maior concentração de ácidos voláteis (AV) e menores valores de pH, pois na fase fermentativa a população microbiana tolera pH ácido e alcalino. A partir do 30º dia, para o tratamento cana 5% e 40 dia para os demais percebeu-se uma diminuição nos valores desse parâmetro sinalizando o uso da alcalinidade para manter a digestão anaeróbia, proporcionada pelos íons bicarbonatos em quantidade suficiente que neutralizaram os AV, favorecendo o equilíbrio entre estes e a alcalinidade do sistema, aumento do pH e fermentação metanogênica.

Tanto a alcalinidade como os ácidos voláteis derivam primariamente da decomposição da matéria orgânica durante a digestão e estão intimamente relacionados entre si, sendo igualmente importantes para o controle e operação adequada dos processos anaeróbios. A alcalinidade total é função da alcalinidade devido a bicarbonato e ácidos voláteis. No início do processo de bioestabilização, os resíduos orgânicos produzem material com baixa alcalinidade à bicarbonato e elevada alcalinidade à ácidos voláteis. À medida que o processo entra na fase de equilíbrio dinâmico, a alcalinidade à bicarbonato passa a ser mais representativa quantitativamente, o que ocorreu nos tratamentos cana 5% e 10% a partir do 30º e 40º dias respectivamente, com consumo de AV e produção de HCO_3^- (íon bicarbonato) mostrando que a diminuição no valor de AT não resultou do consumo de HCO_3^- mas da menor concentração de AV presentes.

Tabela 12. Valores de alcalinidade total (AT), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade parcial (AP), relação AI/AP e acidez total em mg de CaCO_3/L dos tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco, do ensaio de monitoramento em um período de 50 dias

Período Dias	AT	AI	AP	AI/AP	Acidez total
Cana 5%					
10	3176	3176	—	—	210
20	3686	3686	—	—	210
30	2798	1978	820	2,4	120
40	2584	648	1936	0,3	90
50	2768	940	1828	0,5	100
Cana 10%					
10	2852	2852	—	—	220
20	3324	3324	—	—	230
30	3000	3000	—	—	210
40	2746	1986	760	2,6	150
50	2516	1036	1480	0,7	120
Silagem de cana 5%					
10	3016	3016	—	—	230
20	3448	3448	—	—	200
30	3174	3174	—	—	220
40	2852	1646	1206	1,3	110
50	2480	356	2124	0,1	80
Silagem de cana 10%					
10	2310	2310	—	—	220
20	3624	3624	—	—	240
30	3104	3104	—	—	260
40	3010	2494	516	4,8	160
50	2440	288	2152	0,1	80
Esterco					
10	1240	812	428	1,89	180
20	3598	2866	732	3,90	210
30	2982	2612	370	7,00	200
40	3634	2904	730	3,90	160
50	2592	768	1824	0,40	80

Segundo SILVA (2006), o acúmulo de AV indica o desbalanceamento entre velocidades de consumo da matéria orgânica dos diferentes tipos de bactérias responsáveis pelo desempenho adequado do sistema de tratamento anaeróbio, ou seja, quando não existe mais efeito tampão devido à ausência da alcalinidade à bicarbonato, há probabilidade de ocorrência de problemas graves devido a diminuição do pH.

Para JENKINS & ZHANG (1991) a AP inferior a 1200mg CaCO₃/L indica estresse no biodigestor, podendo ser um limite mínimo operacional para um bom funcionamento do processo.

Ressalta-se a importância do significado da quantificação de alcalinidade total, parcial e intermediária. Alcalinidade parcial está relacionada à presença de íons HCO₃⁻, responsáveis pelo tamponamento do sistema no valor de pH desejado para as atividades biológicas. A alcalinidade total, por sua vez, se correlaciona com todos os compostos capazes de neutralizar ácidos, incluindo entre outros, os íons CO₃⁻ (carbonatos), HCO₃⁻ e ácidos voláteis e a alcalinidade intermediária é calculada com a subtração de alcalinidade parcial (AP) da AT. Esse dado expressa a quantidade de AT formada pela alcalinidade de carbonatos e bicarbonatos e a quantidade de alcalinidade formada a partir da alcalinidade de AV, gerando a relação AI/AP a qual é análoga a ácidos voláteis/alcalinidade, tendo-se uma avaliação mais consistente do processo, pois a quantificação dos valores de pH em tratamentos biológicos de resíduos sólidos ou líquidos indicam preliminarmente o desempenho do processo.

Ambos os tratamentos onde foram utilizados cana 5% e 10%, aos 20 dias de monitoramento, apresentaram alcalinidade total elevada em relação aos AV, conforme Tabela 12, demonstrando que não existia ainda uma forte relação simbiótica das diversas espécies de microrganismos presentes no sistema. A partir do 30º dia, o processo favoreceu os agentes tamponantes, haja vista a relação AI/AP atingir 0,5 e 0,7 respectivamente, o que manteve os valores de AT dentro do

intervalo proposto, indicando que houve geração de alcalinidade à bicarbonato propiciando capacidade tampão nos biodigestores. Isto colaborou para a otimização do processo de metanificação, já que a relação AI/AP observada nos tratamentos, a partir do 40º dia teve uma redução expressiva, atingindo valores de 0,5 e 0,7 no 50º dia, a qual mostrou que o sistema tampão gerado foi devido principalmente aos íons bicarbonatos, com valores de AP maiores que da AI.

Um reator anaeróbio opera adequadamente enquanto a relação acidez volátil e alcalinidade mantiver-se abaixo de 0,4 (RIPLEY et al.1986, SEGHEZZO et al.,1998; LEITÃO et al. 2006). Segundo FORESTI (1997, apud CHERNICHARO 1997), dependendo do caso, a estabilidade nos processos de digestão anaeróbia pode ocorrer para valores da relação AI/AP maiores que 0,3.

A Figura 12 demonstra os valores de alcalinidade total para os tratamentos Cana 5 e 10%, Silagem de cana 5 e 10% e Esterco. Em ambos os tratamentos onde se utilizou silagem de cana, observou-se comportamento semelhante em relação ao parâmetro alcalinidade. Valores de alcalinidade de 2500 à 5000mg de CaCO_3/L , são desejáveis, pois conferem um bom tamponamento ao meio em digestão (SOUZA, 1984). ANDERSON & YANG (1992), referiram-se a valores de 1000 à 1500 mg CaCO_3/L como bons em reatores anaeróbios.

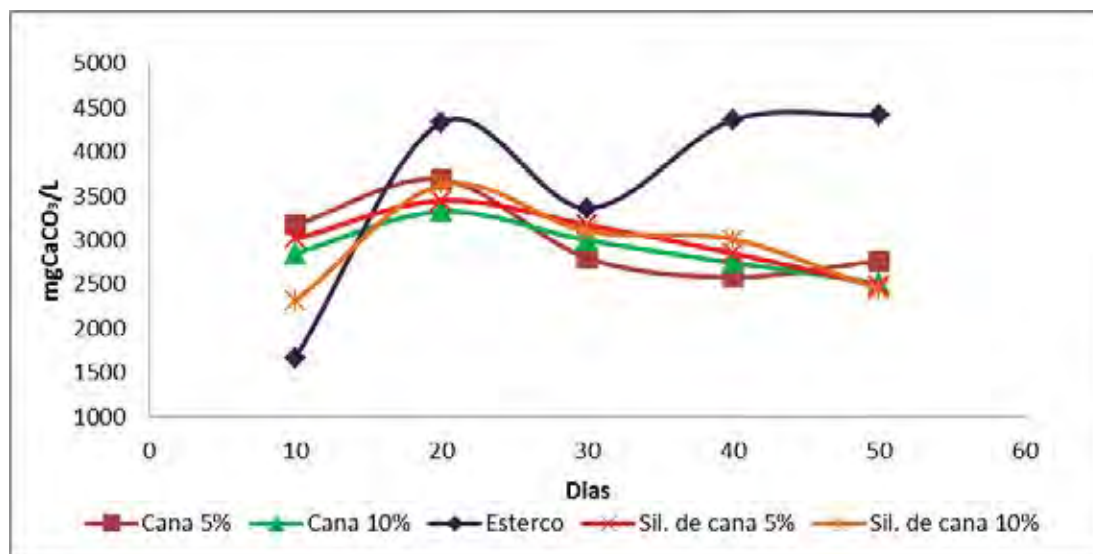


Figura 12. Valores de alcalinidade encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco em um período de 50 dias

Conforme pode-se observar na Tabela 12 nos tratamentos silagem de cana 5 e 10% no início do período experimental (10 dias) a alcalinidade total apresentou 3016 e 2310 mg CaCO₃/L respectivamente. No decorrer do processo, com 50 dias de experimento estes valores foram para 2480 e 2440 mg de CaCO₃/L, respectivamente.

Quanto aos valores da relação Al/AP, nos sistemas anaeróbios ela fornece indicação sobre o estado de equilíbrio dinâmico no conteúdo do biodigestor. Para valores situados em torno de 0,5 o estado de equilíbrio é atingido e o biogás produzido passa a conter em média 60% (porcentagem em volume) de gás metano (LEITE et al. 2003). No 40º dia os valores da relação Al/AP situaram-se em torno de 1,3 e 4,8 para os tratamentos silagem de cana 5 e 10%, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 12, valor superior ao ideal para

o processo de tratamento anaeróbio, conforme RIPLEY *et al*, (1986) que é de 0,1 à 0,3. Este fato pode ter ocasionado uma situação de instabilidade ao conteúdo do biodigestor, no decorrer dos primeiros quarenta dias, haja vista não ser verificada produção de metano no ensaio de produção de biogás. Este problema foi verificado por RIZK *et al*, (2007), quando operava um reator anaeróbio tratando resíduos sólidos vegetais (resíduos de frutas e verduras) sob condições semelhantes, exceto a mistura mecanizada. Na última etapa monitorada (50 dias), o valor da relação foi para 0,1 em ambos os tratamentos, corroborando com LEITE *et al*. (2003), que recomendam relação AI/AP situada em torno de 0,5.

Acidez total

Aos dez dias os valores encontrados em ambos tratamentos, cana 5% e 10% para acidez total foram 210 e 220 mg CaCO₃/L, respectivamente, conforme a Tabela 12. A partir do 20º dia até os 50º dia houve redução nesses valores para 100 e 120 mg CaCO₃/L, respectivamente, mostrando que o sistema se estabilizou, corroborado pelos valores da relação AI/AP que foram de 0,5 e 0,7 respectivamente. O comportamento da curva de acidez total nos tratamentos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e Esterco estão apresentados na Figura 13.

O equilíbrio dos ácidos voláteis totais (AVT) é importante no estudo dos biodigestores anaeróbios. Altas concentrações podem afetar o processo bioquímico e, eventualmente, causar distúrbios no tratamento anaeróbio, podendo levar até mesmo ao colapso. A geração de grandes concentrações de AVT acelera a atuação de bactérias acidogênicas, porém é inibitória aos microrganismos metanogênicos, uma vez que não consomem os ácidos resultantes da acidogênese com a mesma rapidez que são produzidos (LETTINGA, 1985).

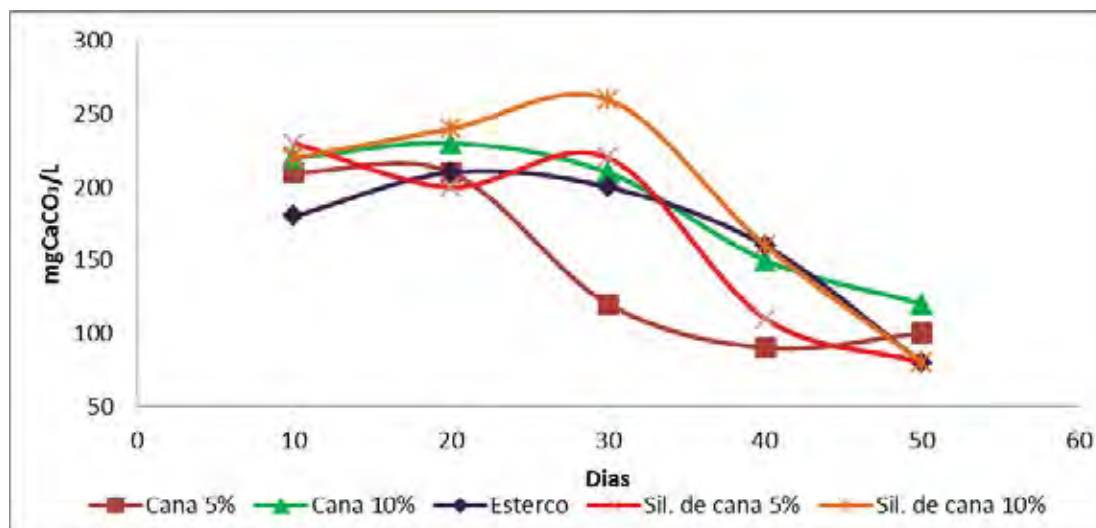


Figura 13. Valores de acidez encontrados no ensaio de monitoramento para os substratos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco em um período de 50

Os ácidos voláteis advêm da solubilização do material orgânico e passam a ser substratos ou material tóxico para determinadas espécies bacterianas responsáveis pela bioestabilização. Segundo KROEKER (1979) os AV são tóxicos para bactérias metanogênicas a concentração em torno de 2000 mgHacL.

Conforme pode-se observar na Tabela 14, no tratamento silagem de cana 5%, esses valores oscilaram até os trinta dias de monitoramento, mas permaneceram abaixo de 250 mg CaCO_3/L que, segundo METCALF & EDDY (2003) é ideal para manter a estabilidade da fase metanogênica. No tratamento silagem de cana 10%, nos primeiros trinta dias de monitoramento esse valor sofreu acréscimo, ultrapassando o que recomenda a literatura e nos últimos 20 dias decresceu, atingindo 80 mg CaCO_3/L . O período de acidez mais elevada (260 mg CaCO_3/L) demonstra maior atividade das bactérias acidogênicas, acelerando a atuação mas inibindo as *arqueas* metanogênicas, influenciando na produção de metano, mas a partir do 40º observou-se redução nos valores desse parâmetro,

atingindo 80 mg/L no 50º dia, situando-se dentro da faixa estabelecida como ótima para o processo anaeróbio. O desenvolvimento do processo pode ser observado pelo comportamento das curvas na Figura 12.

De acordo com GERARDI (2003) os valores de AVT recomendados devem situar-se na faixa de 50 a 500 mg/L, para que ocorra estabilidade no processo anaeróbio.

Nos resultados do tratamento que utilizou somente esterco bovino em sua composição, percebeu-se uma relação inversamente proporcional entre valores de Al/AP e pH, ou seja, menores valores da relação e maiores de pH, ideais para atuação das bactérias metanogênicas, conforme Tabela 15, observados no 50º dia da análise, mostrando maior eficiência e interação entre as populações bacterianas que compõem a biomassa, indicando que este consórcio de bactérias se desenvolveu de maneira satisfatória, pois quando há redução de pH, pode-se associar à decomposição de compostos facilmente degradáveis, como açúcares e amido, produzindo ácidos orgânicos com acidificação excessiva.

BARANA (2001), afirma que o pH é uma medida importante para se avaliar rapidamente as condições dos biodigestores já que as bactérias acidogênicas e metanogênicas apresentam valores ótimos de crescimento em uma faixa determinada. Notou-se também que a relação Al/AP apresentou valores variáveis, predominantemente acima de 1,0 (Tabela 12). Segundo SOUZA (1984) citado por RIBAS (2000), a relação entre Al/AP seria importante na indicação de que o biodigestor estaria estável ou não. Verificou-se então, que o tratamento se estabilizou quando atingiu valor recomendado pela literatura, situando-se em 0,4 no período final da análise.

Determinação do volume de biogás

Os dados relativos à produção média de biogás, apresentados sob a forma de totais acumulados de sete em sete dias, em m³, para os substratos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino estão apresentados na Tabela 13.

Os totais de produção de biogás variaram de 0,19138 a 0,01597 m³, sendo respectivamente, cana 5% e silagem 10%. A distribuição dos totais produzidos ao longo do tempo, para cada tratamento avaliado está apresentada na Figura 13.

Com base nos resultados obtidos de distribuição de biogás, em m³, ao longo do período, verificou-se que os biodigestores abastecidos com cana 5 e 10%, apresentaram um pico de produção de biogás bastante acentuado por volta de 49 e 42 dias após abastecimento, respectivamente, mantendo um comportamento uniforme em relação à produção de biogás após este período. Vale ressaltar que, o tratamento cana 10%, embora tenha apresentado comportamento similar ao cana 5%, sua produção total foi inferior.

Com base nos resultados obtidos de distribuição de biogás, em m³, ao longo do período, verificou-se que os biodigestores abastecidos com silagem de cana 5%, apresentaram um primeiro pico de produção de biogás com 49 dias de abastecimento, sendo que aproximadamente aos 98 dias, um novo pico pôde ser observado (Figura 14). Tal comportamento, evidencia que o substrato utilizado não foi totalmente degradado no período inicial (60 dias), restando matéria orgânica a ser degradada, iniciando um novo pico de produção de biogás. O tratamento silagem de cana 10%, iniciou a produção de biogás após 28 dias de abastecimento, tendo pico de produção menos acentuado, aos 56 dias.

Tabela 13. Produção média de biogás, em m³, sob forma de totais acumulados de sete em sete, para os tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco do ensaio de biodigestão anaeróbia

Dias	Cana 5%	Cana 10%	Silagem 5%	Silagem 10%	Esterco
7	0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004
14	0,00031	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004
21	0,00031	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004
28	0,00143	0,00000	0,00000	0,00000	0,00055
35	0,00931	0,00883	0,00649	0,00061	0,00188
42	0,02155	0,02049	0,01482	0,00151	0,00239
49	0,03011	0,01993	0,01499	0,00177	0,00167
56	0,02694	0,00975	0,01114	0,00180	0,00257
63	0,01901	0,00634	0,00799	0,00142	0,00251
70	0,01147	0,00502	0,00503	0,00090	0,00252
77	0,00975	0,00479	0,00419	0,00069	0,00198
84	0,00997	0,00402	0,00420	0,00055	0,00118
91	0,00808	0,00466	0,00691	0,00079	0,00095
98	0,00737	0,00617	0,00852	0,00116	0,00109
105	0,00759	0,00636	0,00675	0,00119	0,00096
112	0,00601	0,00377	0,00390	0,00102	0,00059
119	0,00465	0,00213	0,00219	0,00061	0,00024
126	0,00453	0,00222	0,00192	0,00071	0,00019
133	0,00498	0,00210	0,00181	0,00031	0,00015
140	0,00372	0,00125	0,00111	0,00022	0,00008
147	0,00193	0,00148	0,00137	0,00025	0,00005
154	0,00165	0,00180	0,00189	0,00031	0,00003
161	0,00069	0,00091	0,00107	0,00017	0,00005
Total	0,19138a	0,11202b	0,10628c	0,01597e	0,02175d

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,0001)

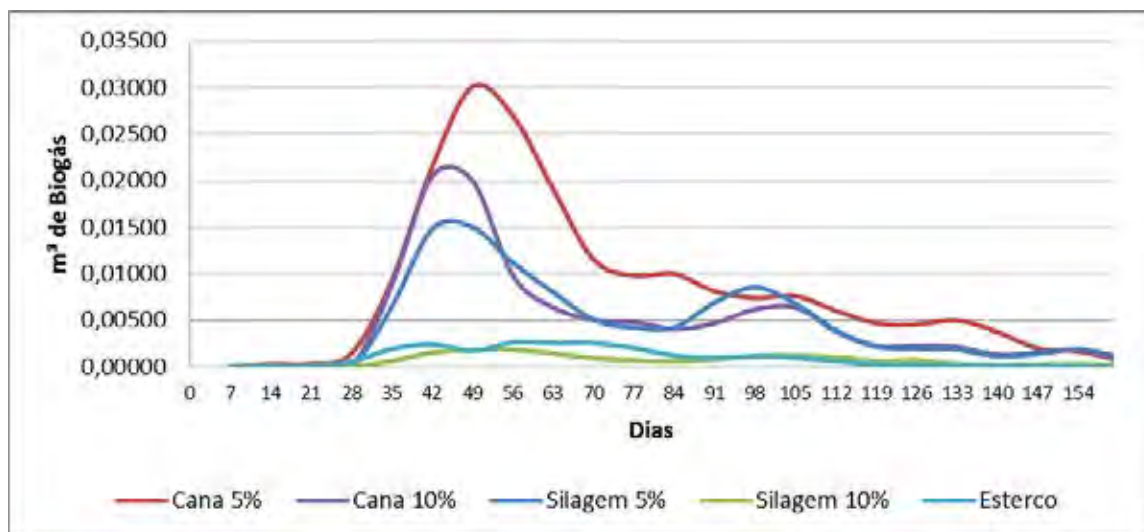


Figura 14. Distribuição da produção de biogás, em m³, ao longo do tempo para os tratamentos esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco do ensaio de biodigestão anaeróbia

A distribuição da produção de biogás para o tratamento somente esterco bovino apresentou vários picos em sua produção, sendo o primeiro por volta de 42 dias após o abastecimento, evidenciando que a degradação da matéria orgânica ocorreu mais lentamente quando comparada com os tratamentos em codigestão, já que o período de maior produção de biogás durou até os 98 dias. Tal afirmação pode ser confirmada quando se analisa o parâmetro pH dos tratamentos estudados (Tabela 11). Para os substratos em codigestão do vegetal com o esterco, embora com pH inicial mais baixo, estes tratamentos apresentaram elevação em seus valores com uma velocidade maior, a partir de então, operando de forma estável atingindo a neutralidade em uma faixa adequada de pH para atividade das *arqueas* metanogênicas, sendo que o tratamento somente esterco bovino demorou mais para apresentar tal estabilização.

Potencial de produção de biogás e de metano

Os resultados dos potenciais de produção do biogás quando corrigidos para 20°C e 1 atm são apresentados, em m³, por kg de sólidos totais adicionados e reduzidos e por kg de sólidos voláteis adicionados e reduzidos, para os tratamentos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino estão descritos na Tabela 14. O melhor fator utilizado para refletir o potencial de determinada biomassa é aquele que expressa a produção de biogás por kg de ST adicionados, pois elimina a interferência do teor de água presente na biomassa. Considerando as produções de biogás por kg de ST adicionados e por kg de SV adicionados, observa-se que os substratos preparados com cana 5 e 10% produziram mais biogás, indicando que a codigestão com esse vegetal proporcionou aumento no potencial energético expresso em produção de biogás.

Tabela 14. Potenciais de produção do biogás, em m³, por kg de sólidos totais adicionados e reduzidos e por kg de sólidos voláteis adicionados e reduzidos, dos tratamentos em codigestão cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino em biodigestão anaeróbia

Tratamento	Produção (m ³)	m ³ /kg ST ad.	m ³ /kg ST red	m ³ /kg SV ad.	m ³ /kg SV red
Cana 5%	0,19138a	2,4758a	7,3325a	2,9443a	7,0360a
Cana 10%	0,11202b	1,3863b	4,1862c	1,6179b	3,7799c
Sil.Cana 5%	0,10628c	1,3892b	4,4703b	1,6507b	4,2148b
Sil. Cana 10%	0,01597e	0,2031d	0,5223d	0,2375d	0,5377d
Esterco	0,02175d	0,2865c	0,6352d	0,3464c	0,7040d
CV %	5,52	5,65	32,27	7,02	24,41

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,0001)

*CV%: coeficiente de variação

O maior potencial alcançado em biodigestores abastecidos com cana 5%, em m³ de biogás/kg de SV reduzido, pode ser atribuído aos benefícios da codigestão, que combina as características físico-químicas dos diferentes componentes utilizados (esterco + cana) e sobretudo aumentando a produção de

biogás por volume de digestor ocupado (Tabela 14). A codigestão anaeróbia pode apresentar diversos benefícios comparativamente a digestão de substratos isoladamente, tais como: aumento do custo-benefício das unidades de tratamento derivada do tratamento de maior variedade de resíduos; maior eficiência de degradação do substrato derivado da ocorrência de efeitos sinérgicos e do fato do conteúdo em nutrientes e umidade estar mais próximo de valores ótimos; diluição de compostos inibitórios (como amônia e AV), e aumento da produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2000).

Segundo LUCAS JR. (1994), muitos experimentos ainda são desenvolvidos com base nos teores de sólidos totais ou voláteis contidos nos dejetos, que por serem parâmetros quantitativos e não qualitativos, podem resultar em substratos com semelhantes quantidades de ST ou SV, no entanto com rendimentos de produção de biogás divergentes.

A produção e potenciais de produção do metano, em m³, por kg de sólidos totais adicionados e reduzidos e por kg de sólidos voláteis adicionados e reduzidos, dos tratamentos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino estão apresentadas na Tabela 15. A maior produção e potenciais de produção de metano foram observadas nos biodigestores abastecidos com cana 5%, em comparação aos demais. Tal fato justifica que as proporções desse vegetal e esterco refletiram na eficiência do processo de biodigestão, ou seja, a codigestão utilizando 5% de cana proporcionou melhor equilíbrio entre as quantidades e qualidade das fibras (em termos de FDN e FDA, conforme Tabela 17) e nutrientes presentes no substrato.

Tabela 15. Produção e potenciais de produção do metano, em m³, por kg de sólidos totais adicionados e reduzidos e por kg de sólidos voláteis adicionados e reduzidos, dos tratamentos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia

Tratamento	Produção (m ³)	m ³ /kg ST ad.	m ³ /kgST red	m ³ /kg SV ad.	m ³ /kgSV red
Cana 5%	0,15540a	2,0100a	3,0332a	2,3924a	4,1170 ^a
Cana 10%	0,09042b	1,1233b	1,8094b	1,3062b	2,4369b
Sil.Cana 5%	0,08647c	1,1296b	1,7172c	1,3429b	2,2971b
Sil. Cana 10%	0,01304e	0,1663d	0,2734e	0,1940d	0,3502d
Esterco	0,01748d	0,2304c	0,4200d	0,2784c	0,5486c
CV	0,98	8,89	7,15	9,55	0,98

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,0001)

*CV%: coeficiente de variação

Proporção de metano no biogás

A distribuição ao longo do tempo das proporções de metano no biogás, produzido pelos biodigestores abastecidos com substratos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e esterco bovino estão apresentadas na Figura 15.

No que diz respeito à produção específica de metano, os resultados obtidos aproximam-se dos valores reportados na generalidade da bibliografia para cargas semelhantes, embora este parâmetro seja sempre muito dependente do tipo de substrato utilizado. A tendência de produção de metano em biodigestor anaeróbio tratando resíduos sólidos orgânicos é aumentar com o passar do tempo. Isto em decorrência da presença de compostos carbonáceos, de nutrientes e de condições ambientais favoráveis. Ao longo do período de bioestabilização ocorrem redução das fontes de carbono e nutrientes, ocasionando o maior percentual de metano no biogás.

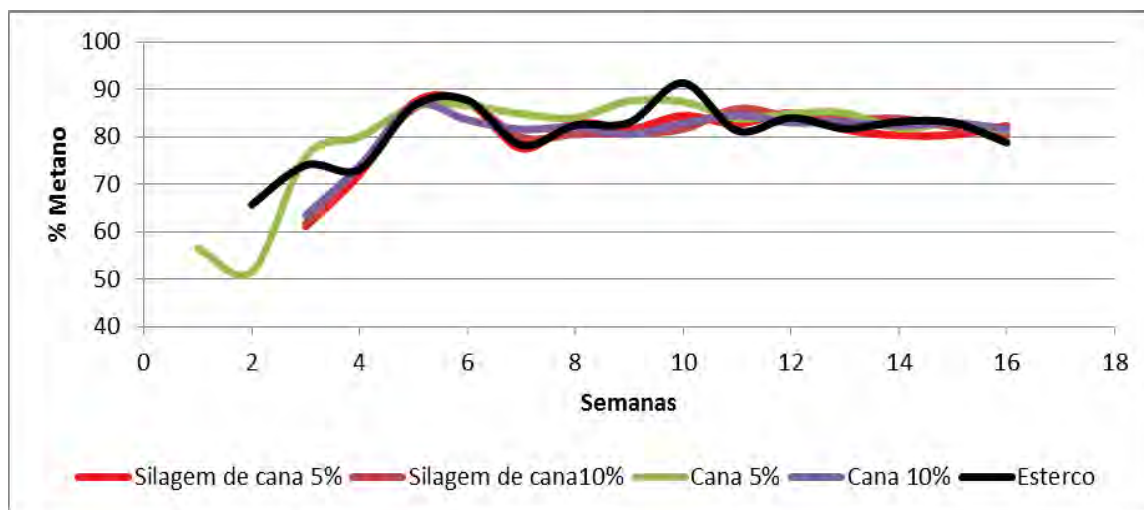


Figura 15. Concentração de metano no biogás produzido nos biodigestores abastecidos com esterco de bovinos em codigestão com cana-de-açúcar e silagem de cana nas proporções 5 e 10% de vegetal e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia

O tratamento cana 5% apresentou maior concentração de metano ao longo do tempo e o início da produção (51,6% de metano) ocorreu na segunda semana após abastecimento. Esse fato pode estar associado à adaptação dos microrganismos aos substratos ou à instalação de microrganismos mais efetivos na produção de biogás após microrganismos específicos metabolizarem os ácidos graxos voláteis (AV) produzidos em grande quantidade no início do processo tornando o meio mais favorável.

Para o tratamento cana 10%, a queima do biogás ocorreu na terceira semana, quando a concentração de metano foi igual a 63,5%. Ambos os tratamentos (cana 5 e 10%) apresentaram estabilização no processo de biodigestão anaeróbia após a quinta semana, evidenciado pela composição constante de metano, sugerindo que na matéria orgânica em degradação prevaleceu atividade das bactérias metanogênicas, em consonância com os

valores de pH mais elevados , menor concentração de AV e maior de alcalinidade à bicarbonato referentes ao período mencionado.

UMETSU *et al* (2006) realizaram a codigestão de dejetos de vacas e beterraba açucareira, em biodigestores batelada e verificaram paralisação na produção de metano quando utilizaram 30 e 40% da planta inteira e 15% de raízes na codigestão.

A codigestão do esterco com silagem de cana nas duas proporções testadas apresentaram comportamento semelhante quanto à proporção de metano no biogás e distribuição da produção de metano ao longo do tempo como pode ser visto na Figura 14. Ambos os tratamentos apresentaram queima do biogás a partir da quarta semana, com proporção de metano em torno de 61%. Pode-se observar que nas primeiras cinco semanas o processo foi caracterizado por uma fase metanogênica instável (presença de metano e acetato) evoluindo para o processo de bioestabilização (fase metanogênica estável), sendo que um dos parâmetros que indica o equilíbrio da digestão anaeróbia é a produção alta e estável de metano, correlacionada com valores mais elevados de pH e alcalinidade à bicarbonato.

A produção de metano nos biodigestores abastecidos somente com esterco bovino teve início na segunda semana de abastecimento, evidenciada pela queima do biogás, sendo que a concentração de metano encontrada foi de 65,7%. Em comparação aos outros tratamentos, verificou-se antecipação na produção de metano, entretanto no decorrer do tempo maiores instabilidades foram percebidas, devido a variações nas concentrações de metano do biogás, conforme Figura 14, coincidindo com as variações nas concentrações de AI e AP para o mesmo período.

Redução de sólidos totais e voláteis

Os teores de sólidos totais e voláteis, em porcentagem e massa, no início e final do processo, bem como a redução de sólidos totais e sólidos voláteis na biodigestão anaeróbia de esterco bovino e cana-de-açúcar nas proporções 5 e 10%, esterco bovino e silagem de cana nas proporções 5 e 10% e somente esterco bovino estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) em porcentagem e em massa e a redução de sólidos totais e voláteis em porcentagem, dos biodigestores abastecidos com esterco bovino e cana-de-açúcar nas proporções 5 e 10%, esterco bovino e silagem de cana nas proporções 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia

Tratamentos	Inicial (%)	Inicial (kg)	Final (%)	Final (kg)	Redução (%)
Sólidos Totais					
Cana 5%	4,55a	0,0773a	3,01a	0,0512a	33,73b
Cana 10%	4,75a	0,0808a	2,99a	0,0509a	37,02c
Sil. 5%	4,50a	0,0765a	2,99a	0,0509a	33,52d
Sil. 10%	4,62a	0,0786a	2,82a	0,0480a	38,90b
Esterco	4,46a	0,0759a	2,45b	0,0416b	45,14a
CV%	0,98	0,98	0,99	0,99	7,54
Sólidos Voláteis					
Cana 5%	3,82b	0,0650a	2,22a	0,0378a	41,88d
Cana 10%	4,09a	0,0695a	2,22a	0,0378a	45,11b
Sil. 5%	3,79b	0,0644a	2,23a	0,0380a	41,00d
Sil. 10%	3,96a	0,0673a	2,21a	0,0376a	44,12c
Esterco	3,69b	0,0629a	1,87b	0,0319a	49,30 ^a
CV%	3,54	0,98	0,99	0,99	7,54

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,0001$); *CV%: coeficiente de variação

Nos processos de tratamentos biológicos a eficiência de transformação de material orgânico está associada a uma equilibrada massa bacteriana, que seja capaz de suportar a presença de materiais com características tóxicas no substrato e às variações das condições ambientais. Neste trabalho foi constatada uma boa eficiência de transformação de material carbonáceo, principalmente sólidos voláteis. Esta eficiência de redução foi função das propriedades físicas e

químicas dos substratos, da carga orgânica aplicada e do tempo de retenção hidráulica. No geral observou-se eficiente desempenho dos tratamentos utilizados no experimento na remoção e solubilização de ST e SV. O parâmetro SV é responsável por caracterizar a fração orgânica contida na amostra (JORDÃO, 1995).

O tratamento contendo somente esterco apresentou maior redução de sólidos totais e voláteis, 45,14 e 49,3%, respectivamente (Tabelas 16). Tal parâmetro está associado a resistência da matéria orgânica contida no substrato, em comparação aos demais tratamentos que apresentaram maior fração fibrosa em sua composição, devido a maior proporção de vegetal na mistura.

Os resultados apresentaram diferenças entre as reduções ocorridas nos teores de sólidos totais e voláteis desde o início até o final do processo, quando se compararam os tratamentos que sofreram codigestão, demonstrando que o aumento na proporção de vegetal permitiu substratos com maior degradabilidade. Os tratamentos que continham 5% de vegetal apresentaram redução, 33,7 e 33,5% nos teores de sólidos totais, enquanto os tratamentos que continham 10% de vegetal em sua composição tiveram reduções de 37,02 e 38,9%.

BOUALLAGUI (2003), trabalhando com resíduos sólidos vegetais em biodigestor tubular, com concentração de sólidos totais de 6% (percentagem em peso), obteve eficiência de remoção de sólidos totais voláteis de 74,4 % produzindo biogás com 65 % de gás metano.

Análises bromatológicas

Na Tabela 17 estão apresentadas as frações fibrosas (FDN, FDA, hemicelulose, celulose) e lignina, contidas nos afluentes utilizados nos biodigestores e nos efluentes (biofertilizantes), para os tratamentos cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino. De forma geral, os tratamentos que continham vegetal em sua composição apresentaram melhor

desempenho em relação à redução da fração fibrosa e tal fato pode estar associado à qualidade da fibra presente nos substratos, ou seja, as fibras estavam na forma *in natura*, com suas frações fibrosas preservadas de qualquer degradação e a fibra do esterco já passou por uma digestão (degradação) no rúmen do animal. Dentre os fatores que atuam no processo de biodigestão anaeróbia, a composição do substrato influencia diretamente o potencial de degradação do material, por isso a extensão da produção de biogás a partir dos dejetos é dependente da alimentação dos animais.

Vale ressaltar que a fração fibrosa no processo de biodigestão anaeróbia não deve ser avaliada isoladamente, pois os resultados (produção de biogás e metano) serão influenciados pela combinação entre qualidade das fibras, nutrientes e teores de ST e SV presentes nos substratos.

Os biodigestores abastecidos com cana 5% apresentaram reduções mais altas em seus teores de FDN, FDA e celulose, quando comparado aos demais tratamentos, sugerindo que a codigestão proporcionou substratos mais assimiláveis e melhores condições para o desenvolvimento da população de microrganismos anaeróbios, o que pode ter facilitado a redução de matéria orgânica e produção de biogás favorecendo a superioridade desse tratamento, já que a composição do substrato é o principal fator a afetar o rendimento específico de metano. A cana de açúcar *in natura* é material de alto teor lignocelulósico. O aumento na digestibilidade de FDA pode ser atribuído à quebra das ligações lignocelulósicas, permitindo o ataque microbiano e consequentemente, à melhor digestão da fração fibrosa da cana de açúcar (VAN SOEST, 1982).

Tabela 17. Massa (kg) e porcentagem de redução (%) da fração fibrosa (FDN, FDA, hemicelulose, celulose) e lignina contidas nos afluentes e efluentes dos biodigestores abastecidos com cana 5 e 10%, silagem de cana 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia

		FDN	FDA	HEM	CEL	LIG
Cana5%	Inicial	0,0518	0,0332	0,0186	0,0249	0,0084
	Final	0,0283	0,0187	0,0096	0,0104	0,0084
	Redução (%)	45,38a	43,62a	48,53d	58,30a	0,00c
Cana10%	Inicial	0,0477	0,0299	0,0178	0,0212	0,0087
	Final	0,0271	0,0185	0,0086	0,0098	0,0086
	Redução (%)	43,15b	38,22b	51,44c	53,78b	1,15a
Sil.5%	Inicial	0,0421	0,0282	0,0139	0,0197	0,0084
	Final	0,0244	0,0179	0,0066	0,0094	0,0085
	Redução (%)	41,97c	36,61c	52,80b	52,22c	-1,19b
Sil.10%	Inicial	0,0431	0,0275	0,0156	0,0192	0,0083
	Final	0,0263	0,0186	0,0076	0,0104	0,0083
	Redução (%)	39,15d	32,30d	51,21c	46,18d	0,00c
100%esterco	Inicial	0,0314	0,0175	0,0139	0,0109	0,0066
	Final	0,0192	0,0144	0,0048	0,0078	0,0066
	Redução (%)	38,82d	17,54e	65,58a	28,08e	0,00c
CV%		3,22	9,51	4,12	8,32	1,99

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,0001)

*CV%: coeficiente de variação

Nos tratamentos de silagem, observou-se que silagem 5% apresentou maiores reduções em termos de FDN e hemicelulose em relação ao tratamento silagem 10%. A hemicelulose é um parâmetro importante na avaliação da fermentação da silagem de cana, por ser um componente da parede celular, sua solubilização implica redução da FDN. MCDONALD (1991) avaliando diversas silagens verificou que quando os carboidratos solúveis se esgotam, a hemicelulose pode servir de substrato para as bactérias fermentadoras.

Em relação à FDA, o tratamento silagem 5% também apresentou maior redução. Segundo MERTENS (1982) este componente da parede celular é diretamente correlacionado à digestibilidade da matéria seca, ou seja, nos

biodigestores essa referida digestibilidade influenciou diretamente no rendimento dos produtos finais do processo de biodigestão anaeróbia, comprovado nos resultados superiores, para produção de gás, do tratamento silagem 5% em relação ao silagem 10%.

A celulose é reconhecidamente um carboidrato insolúvel, refratário mesmo depois de severas hidrólises e deslignificações oxidativas. A disponibilidade nutricional da celulose varia da indigestibilidade total a completa digestibilidade, dependendo enormemente da lignificação (VAN SOEST,1982). O tratamento que apresentou maior redução nessa fração foi o cana 5%.

Em relação à lignina, em quase todos os tratamentos não houve variação. Este fato pode estar ligado à maior complexidade entre as ligações das moléculas que compõem esta fração dificultando sua solubilização. Nos tratamentos cana 10% e silagem 5% foram observadas pequenas variações entre os conteúdos inicial e final de lignina, as quais podem ser atribuídas à manipulações laboratoriais das amostras.

Segundo VAN SOEST (1982), evidências circunstanciais indicam que os polissacarídeos hemicelulósicos sejam retidos em determinados sítios pelas ligações cruzadas com a lignina, porque quando ocorre a deslignificação grande parte da hemicelulose torna-se solúvel. Tal afirmação pode ser verificada para o tratamento 100% esterco, onde encontra-se a maior redução para hemicelulose (65,58%) e menores teores de lignina (0,0066 kg). Os bovinos em geral se alimentam com grandes quantidades de alimento volumoso que será responsável pela geração de dejetos com maiores quantidades de componentes fibrosos (componentes da parede celular), implicando em maior lentidão na produção de biogás e menor eficiência no processo de biodigestão.

Nutrientes no afluente e no efluente

Os teores de nutrientes na MS, presentes no afluente e no efluente dos biodigestores abastecidos com esterco bovino e cana-de-açúcar nas proporções 5 e 10%, esterco bovino e silagem de cana nas proporções 5 e 10% e 100% esterco bovino estão apresentados na Tabela 18.

O carbono, nitrogênio e fósforo são essenciais para todos os processos biológicos. As quantidades de N e P necessárias para a degradação da matéria orgânica presente dependem da eficiência dos microrganismos em obter energia para a síntese, a partir de reações bioquímicas de oxidação do substrato orgânico (FORESTI et al., 1999).

Nos tratamentos testados, o biofertilizante produzido apresentou maiores teores que no afluente dos nutrientes N, K, Mg, Ca, Cu, Mn e Zn, durante o processo de biodigestão anaeróbia, porém este fato deve ser analisado com cautela, pois um aumento nos teores dos nutrientes não significa ganho durante o processo, devendo-se considerar que ocorreram reduções nos sólidos totais, o que implica em perdas de nutrientes.

Já as quantidades de P sofreram redução em seus teores. A incorporação microbiana de fósforo na digestão anaeróbia tem sido reportada como sendo de aproximadamente 1/5 a 1/7 daquela estabelecida para o nitrogênio. A maioria dos microrganismos é capaz de utilizar o ortofosfato inorgânico, que pode ser incorporado pelas células em crescimento, através da mediação de enzimas denominadas fosfatases (CHERNICHARO, 1997).

As altas reduções de fósforo, se devem às reações de hidrólise que ocorrem nas primeiras fases do processo de bioestabilização, na qual grande quantidade de nutrientes é solubilizada no interior dos biodigestores. Segundo FORESTI (1997), os nutrientes mais requeridos pelos microrganismos para sua eficiência são N, P, K e S. Este autor considera normal perda de fósforo entre afluente e efluente.

Tabela 18. Valores médios dos teores de N, P, K, Mg, Ca, Fe, Cu, Mn e Zn no

afluente e efluente dos biodigestores abastecidos com esterco bovino e cana-de-açúcar nas proporções 5 e 10%, esterco bovino e silagem de cana nas proporções 5 e 10% e somente esterco bovino do ensaio de biodigestão anaeróbia

		N	P	K	Mg	Ca	Fe	Cu	Mn	Zn
		-----g/100g-----					-----mg/kg-----			
Cana 5%	Início	1,90	1,15	1,12	0,42	0,71	41,25	25,00	132,75	83,00
	Final	2,37	0,71	2,57	0,73	3,59	48,75	89,25	354,75	400,00
	Concentração	24,67b	-38,17d	130,72a	76,51a	404,21a	18,18a	257,00c	167,23b	381,93c
Cana 10%	Início	1,70	1,15	1,20	0,44	0,69	44,00	22,00	122,00	78,25
	Final	2,06	0,63	2,72	0,75	3,21	45,50	95,00	362,50	425,00
	Concentração	20,98d	-45,00b	127,41b	68,93b	364,49b	3,41b	331,82a	197,13a	443,13a
Sil. 5%	Início	1,87	1,14	1,24	0,46	0,75	42,75	23,25	128,25	84,00
	Final	2,29	0,68	2,57	0,71	3,10	43,50	83,50	313,75	412,50
	Concentração	22,22c	-40,55c	107,06c	54,64d	316,44c	1,75c	259,14b	144,64c	391,07b
Sil. 10%	Início	1,81	1,14	1,26	0,45	0,73	48,50	22,00	132,75	79,50
	Final	2,26	0,73	2,46	0,65	2,65	38,25	75,75	263,25	349,50
	Concentração	24,83b	-35,86e	94,46d	46,63e	262,33d	-21,13e	244,32d	98,31e	339,62d
Esterco	Início	1,98	1,10	1,29	0,49	0,79	60,25	25,25	137,00	91,00
	Final	3,15	0,58	1,76	0,79	3,26	58,75	83,00	330,00	362,50
	Concentração	59,41a	-47,64a	35,78e	60,41c	313,65c	-2,49d	228,71e	140,88d	298,35e
*CV%		22,78	13,76	25,61	15,44	11,29	32,84	9,50	10,22	9,50

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,0001$); *CV%: coeficiente de variação;

LETTINGA (1985) em estudos sobre requerimentos nutricionais para o tratamento anaeróbio apontam para um importante papel de íons inorgânicos, especialmente metais traços para a estimulação do metabolismo microbiano anaeróbio, sendo que, o carbono, nitrogênio e fósforo são essenciais para todos os processos biológicos.

VI. CONSIDERAÇÕES

Os sistemas integrados de valorização energética e ambiental dos resíduos com base na digestão anaeróbia associada a produtos agrícolas podem constituir uma oportunidade de negócios e de desenvolvimento rural. No caso específico deste estudo, o processo de biodigestão anaeróbia, conjugada com a cana de açúcar e esterco bovino, é uma solução energética permitindo a produção de biogás, combustível muito versátil, que pode alimentar os dispositivos mais diversos e que tem sido a força motriz da investigação científica da digestão anaeróbia, além da valorização das características e potencialidades regionais, aumentando a importância da utilização de matéria orgânica como fonte de energia, contribuindo para a diversificação da matriz energética brasileira.

A geração de eletricidade a partir de matéria orgânica poderá emergir, em menor escala, associada ao consumidor, adequando-se às necessidades locais procurando melhorar a eficiência dos recursos energéticos disponíveis e reduzir os impactos ambientais.

Neste trabalho avaliou-se perspectivas com o uso de biomassa para fins energéticos, na produção de biogás, utilizando esterco bovino, cana de açúcar e silagem de cana, configurando-se como mais uma alternativa de potencialidade que pode ser explorada, pois o estudo demonstrou que a codigestão dispõe de um grande potencial de biomassa com aptidão para ser convertida em biogás, onde as análises e discussões realizadas poderão despertar novas pesquisas em torno desta questão.

De modo geral, o tratamento biológico dos substratos utilizados neste experimento mostrou-se favorável e corroborado pelos resultados das análises ao qual foi submetido, atingindo a bioestabilização, já que a biodegradação anaeróbia depende de uma população de microrganismos diversificada e estável, que refletiu na produção de biogás e rendimento de metano obtidos, com os substratos cana de açúcar 5 e 10% e silagem de cana 5% com esterco bovino.

VII. CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos, a análise dos resultados permitiu apresentar as seguintes conclusões:

- Foi comprovada a potencialidade do processo de codigestão com os substratos cana nas proporções 5 e 10% e silagem de cana 5% com esterco bovino caracterizada por produção superior de biogás e metano em relação ao esterco bovino
- Foi comprovada a eficiência do processo de biodigestão, com bioestabilização da matéria orgânica, monitorado pelos parâmetros pH, alcalinidade e acidez;
- Os tratamentos que apresentaram maiores reduções nas frações fibrosas (FDN, FDA e celulose) apresentaram maior produção de biogás em relação ao tratamento somente esterco bovino.
- O efluente dos biodigestores em processo de codigestão apresentaram concentrações nos teores de nutrientes, com exceção para o fósforo e ferro para o tratamento silagem 10% e esterco.

VIII. REFERÊNCIAS

AGROANALYSIS. Governo lança Plano Nacional de Agroenergia. Revista de Agronegócios da FGV, v. 25, n.10, out. 2005, p. 34-35.

ADNEY, W. S., RIVARD, C. J., GROHMANN, K. & HIMMEL, M. E. (1989). Characterization of polysaccharidase activity optima in the anerobic digestion of municipal solid waste. Biotechnology Letters, 11, (3), 207.

ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable wast. Renewable energy, 33:726, 2008.

ANDERSON, G. K.; YANG, G. Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration. Water Environment Research, Alexandria, v. 64, n.1, p. 53-59, 1992.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. Washington, 2005.

ARAUJO, J. L. A questão do investimento no setor elétrico brasileiro: Reforma e crise. Nova economia, 11(1): 77-96. 2001.

ARRIETA, J.; CANTERA, E. Recuperación biológica y reaprovechamiento de aguas de proceso, El Papel, n. 79, pp.56-61, Sept/Octubre, 1999.

ASSOCIAÇÃO ALEMÃ DE BIOGÁS. Disponível em: <<http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/medien/BGA%20Entwick%2092-07.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2009.

AUSTIN, G., BLIGNAUT, J. South African National Rural Domestic Biogas Feasibility Assessment, AGAMA Energy (Pty) Ltd, Prepared for Minister for Development Co-Operation The State of Netherlands, 8 November 2007.

BAIRD, C. – Química Ambiental – Editora Bookman, 2a. Edição – Porto Alegre – 622 pág. – 2002.

BARANA, A. C. Avaliação de tratamento de manipueira em biodigestores fase acidogênica e metanogênica. Botucatu, 2001. 82 p. Tese em Agronomia – area de concentração em energia na agricultura. Faculdade de Ciências Agronomicas, Faculdade Estadual Paulista.

BAROMETRE DU BIOGAZ - 5 MTEO Produits en 2005 -EurObserv'er , 2006: -<http://www.energies-renouvelables.org> (pdf).

BHATIA, R. Diffusion of renewable energy technologies in developing countries: A case study of biogas engines in India. *World Development*, v. 18, n 4, p. 575-590, 1990.

BISCHOFBERGER, W. et al. Anaerobtechnik. 2., vollständig überarbeitete Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2005.

BJORNSSON, L., MURTO, M. e MATTIASSON, B. Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54, pp. 844-849.2000.

BOUALLAGUI, H.; HAOUARI, O.; TOUHAMI, Y.; BEN CHEIKH, R.; MAROUANI, L.; HANDI, M. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*, London, v. 39, n. 12, p. 2143-2148, 2003.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT - BMU. *Biogas und Umwelt – ein Überblick*. Berlin: Referat Öffentlichkeitsarbeit, 2008. Disponível em: <http://www.erneuerbare-energien.de/files/broschueren/faltblaetter/application/pdf/broschuere_biogas.pdf> Acesso em: 23 fev. 2009.

BUTT, E.P., MORSE, G.K., GUY, J.A. & Lester, J.N. . Co-recycling of sludge and municipal solid waste: A cost-benefit analysis. *Environmental Technology*, 19, (12), 1163.1998.

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.

CARVALHO, E. P. Formulação de uma estratégia para garantir o aumento da produção. In: Seminário “Uma estratégia para o etanol brasileiro”. Rio de Janeiro: Casa do Brasil, nov. 2006.

CASTRO, J.de. Geografia da fome. Rio de Janeiro, 1952. 322p.

CHANAKYA, H., REDDY, B., MODAK, J. Biomethanation of herbaceous biomass residues using 3-zone plug flow like digesters - A case study from India, *Renewable Energy*, 34, pp. 416-420.2009.

CHEN, Y., CHENG, J. J., Creamer K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource Technology*, 99, pp. 4044–4064.2008.

CHERNICHARO, C. A. L. “Princípios do tratamento biológico de águas residuárias”, volume 5, 10 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. Belo Horizonte.1997.

CHERNICHARO, C.A.L. Reatores anaérobios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 1997. 246p.

COELHO, S.T. Biofuels - Advantages and Trade Barriers - Background Paper to the Expert Meeting for Sectoral Trade Review of Developing Country Participation in New and Dynamic Sectors Session on Biofuels - Genebra, Fevereiro, 2005a.

CORREA, C. E. S; PEREIRA, M.N.; OLIVEIRA, S.G. et al. Performance of Holstein cows fed sugarcane or corn silages of different grain textures. *Scientia Agricola*, v. 60, p.221-229. 2002.

DE BAERE, L. . Start-up of continuous dry digestion plant energy crops. International Conference: Renewable resources and biorefineries, Ghent, Belgium, June 4-6, 2007.

DESSUS, B. Economiser l'énergie: un impératif. Dossier pour la Science, p. 79-81, jan-mar. 2007.

DI BERARDINO, SANTINO. Novas tendências nos sistemas de digestão anaeróbica e produção de biogás. In: *Indústria & Ambiente*, Nov./Dez., 2009, nº 59, p. 28-31.

ECKE, H.; LAGERKVIST, A. Anaerobic treatment of putrescible refuse (ATPR). Luleå: The Division of *Waste Science & Technology* of Luleå University of Technology (LTU), 2000, p.47. Report 2000:01. Disponível em: <<http://pure.ltu.se/ws/files/pretrieve/850245>>.

EMBRAPA *Biodigestores*: opção tecnológica para a redução dos impactos ambientais da suinocultura. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/impressa/noticias/2005/janeiro/noticia.2005-01-4.0938856711/>>. Acesso em: 10 fev. 2009.

FERREIRA, A. L. ; PRADO, F. P. A. ; SILVEIRA, J. J. The alcohol price and flex cars. In: International Conference on Policy Modeling. *Ecomod*, São Paulo, 2007.

FIGUEIREDO, N. J. V. – Utilização do Biogás de Aterro Sanitário Para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo De Caso – Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie – São Paulo – 2007.

FISCHER, J.R.; IANNOTTI, E.L.; PORTER, J.H.; GARCIA, A. Producing methane gas from swine manure in a pilot-size digester. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.22, n.2, p.370-4, 1979.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P.F.F. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. Cap.2,p.29-52.

FORESTI, E. Fundamentos do processo da digestão anaerobia. Notas de aula (EESC-USP) 15p. 1997.

GARCIA, J. L.; PATEL, B. K. C.; OLLIVIER, B. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic *Archae*. *Anaerobe*.. v.6, p. 205-226, 2000.

GASPAR, R.M.B.L. *Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo - PR*. 2003. 106 f.

GAZZONI, D. L. Biotecnologia e agroenergia: um bom negócio. *Gazeta Mercantil*, 5.2. 2007.

GERARDI, M. H. The microbiology of anaerobic digesters. Jon Wiley & Sons, 2003. 130p.

GOLDEMBERG⁺ J. Biomassa e Energia. *Quím. Nova*, vol.32, n.3 São Paulo, pp.582-587,2009.

GOMEZ, X. CUETOS, M.J.; OTERO, M.; MORÁN, A. 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* 31:2.017, 2006.

GUNASSELAN, V.N. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy*. V.13,n.(1/2),p.83-114,1997.

HABIBA, L. et al.Improvement of activated sludge stabilization and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition. *Bioresource Technology*, 2008.

HENN, A. Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – condição de partida – 2005. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, 2005.

HICKEY, R.; WU, W.; JONES, R.; VEIGA, M. C. The start-up, operation, monitoring and control of high-rate anaerobic treatment systems. *Water Science and Technology*. v.24, p.207-255, 1992.

HIRATA, M. et al. Return of dung to be hiagrass (*Paspalum notatum* Fliigge) pasture by dairy cattle. *Journal Japanese Grassland Society Science*, Nishinasuno, v. 35, n. 4, p.350-357, 1990.

IEA, 2002. *World Energy Outlook*, 2002. Paris, France, 2002.

INTERNATIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES Political Declaration. Bonn, 4 de junho de 2004. Disponível em: www.renewables2004.de/pdf/Political_declaration_final.pdf. Acesso em: Junho de 2005.

INWENT. Entrevista com Klaus Knecht. Disponível em: http://www.inwent.org/E+Z/content/archiv-ger/05-2006/inw_art1.html. Acesso em: 12 fev. 2009.

JENKINS, S.R.; ZHANG, X. Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *Journal WPFC*, v.63,n.1,p.28-34,1991.

JORDÃO, E.; SOBRINHO, P. Investigation and experience with post treatment for UASB Reactors in Brazil. In: *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2004: Session 61 through Session 70*, p. 13-22. (10).

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 3.ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 720 p.

KAREKESI et al. Status of Biomass Energy in Developing Countries and Prospects for International Collaboration. In *GFSE-5 Enhancing International Cooperation on Biomass*. Background Paper. Áustria, Maio 2005.

KATUWAL, H., BOHARA, A. Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 2668-2674.2009.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M.J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Biore-source Technology*. v.83, p. 27-36, 2002.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. *As queimadas da cana*. São José dos Campos: Transtec Editorial, 1991.

KROEKER, E.J. Anaerobic treatment process stability. *Journal WPFC*, London, v.51, n.4, 1979, 718p.

LAPONCHE, B. L'énergie dans le monde: enjeux et prospective. In: JACQUET, P.; 2007.

LEITE, V. D., SOUSA, J. T., PRASAD, S., LOPES, W. S., JÚNIOR, G. B. A., DAN-TAS, A. M. M. – Tratamento de resíduos sólidos de central de abastecimentos e feiras livres em reator anaeróbio de batelada – revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.318-322, - Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, 2003.

LEITÃO, R. C. et al. The effects of operational and environmental variations on aerobic waste water treatment systems. A review. *Bioresource Technology*, v.97, n.9, p.1105-1118, 2006.

LEMA, J.M.; MENDEZ, R., SOTO, M. “Tratamento de anaeróbios para o tratamento de efluentes líquidos”. In: Curso de digestão anaeróbia aplicada a resíduos sólidos e líquidos. 1997.

LETTINGA, G. e RINZEMA, A. “Anaerobic treatment of sulfate containing wastewater”. *Bioenvironmental System*. 1985.

LOVINS, A. Getting off Oil. *The World in 2007. The Economist*, London, s. d., p.115.

LUCAS JÚNIOR, J. Algumas considerações sobre o uso de estrume de suínos como substrato para 3 sistemas de biodigestores anaeróbios. 1994. 113. Tese (Livre-Docencia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

LUCAS JÚNIOR, J. Aproveitamento energético de resíduos da suinocultura. In: ENERGIA, Automação e Instrumentação. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p.81-7.

LUCAS JÚNIOR, J.; GALBIATTI, J.A.; ORTOLANI, A.F. Produção de biogás a partir de estrume de ruminantes e monogástricos com e sem inoculo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16., 1987, Jundiaí. *Resumos...* Jundiaí: DEA/IA/SBEA, 1987. p.65.

LUNA, M. L. D. Tratamento Anaeróbio de Resíduos sólidos orgânicos para pequenas comunidades. Campina Grande, 2003. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) PRODEMA UFPB/UEPB, 80p.

MACEDO, I. C. Feasibility of Biomass-Derived Ethanol as a Fuel for Transportation. (Project ME-T1007 - ATN/DO-9375-ME), Activity 6: Potentials in Relation to Sustainability Criteria, SENER/BID, México, 2006.

MALAVOLTA, E. et al. Micronutrientes, uma visão geral. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M. C. Micronutrientes na Agricultura. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1989. p. 1-33.

MARAWANYIKA, G. Biogas applications for rural development in Zimbabwe. Farming World with Murimi Umlimi. *The Journal of Zimbabwe Farmers' Union (Zimbabwe)*. v. 19, n 3, p. 3-5, 1993.

MATA-ALVAREZ, J., MACE, S. e LLABRES, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74, (1), pp. 3–16. 2000.

McCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals, part three, toxic materials and their control. *Public Works* nov. 1964a. p. 91-94

McCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals, part two, environmental requirements and control. *Public Works* oct. 1964b. p. 123-126

McCARTY, P. L. History and overview of anaerobic digestion, In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION, 1981.

McCARTY, P. L.; MOSEY, F. E. Modelling of anaerobic digestion processes (a discussion of concepts). *Water Science and Technology*. v. 24, p.17-33, 1991.

McDONALD, P.; HENDERSON, A.R.; HERON, S.J.E. The biochemistry of silage. 2.ed. Merlow: Chalcomb Publications, 1991. 340p.

McKINNEY, Ross E. - Microbiology for sanitary engineers. New York: McGraw-Hill Book. Company, Inc., 1962. 293 p.

MECHICHI, T. e Sayadi, S. (2005) Evaluating process imbalance of anaerobic digestion of olive mill wastewaters. Process Biochemistry, 40, (1), pp. 139-145.

MERTENS, D.R. Using neutral detergent fiber to formulate dairy rations. In: NUTRITION CONFERENCE PROCESS GANT CONFERENCE FOR THE FEED INDUSTRY, 1982, Athens. Proceedings... Athens: University of Georgia, 1982. p.116-126.

METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1334 p.

NIELSEN, H. B., UELLENDHL, H. e AHRING B. K. Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter. Biomass and Bioenergy, 31, (11-12), pp. 820–830, 2009.

NOACK, W. Biogas in der Landwirtschaft. Darmstadt, Elsner, 1955.

NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão: a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1992. 93 p.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. *Dendroenergia*: fundamentos e aplicações. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

NORDBERG, A., EDSTROM M. Co-digestion of ley crop silage, straw and manure. 2001.

NUSSIO, L.G. Cana. Depois de se impor em pequenos confinamentos, ela começa a atrair as grandes. Para isso tem de vencer o desafio da ensilagem. Revista DBO Rural, n.6, p.104-112, 2003.

PARIKKA, M. Global biomass fuel resources. Biomass and Bioenergy. v. 27, issue 6, p. 613- 620, December. 2004.

PERCORA, V. Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir de biogás de estação de tratamento de esgoto residencial da USP – Estudo de caso, 152p. (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de pós graduação em energia (PIPGE) da Universidade de São Paulo, SP. 2006

PETERSSON, A. Country Report: Sweden by SGC (Swedish Gas Centre), IEA Task 37 Presentation, 2009: - <http://www.iea-biogas.net/publicationsreports.htm>.

PICANÇO, A. P. Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. 2004. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PIEROTTI, S. M. Avaliação da partida de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis. 2007. 141p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – SP, 2007.

PLÖCHL, M., HEIERMANN, M., . Biogas farming in central and northern Europe: a strategy for developing countries? Agricultural Engineering International: the CIGR journal. Invited Overview, v. 8, p.1-15, 2006.

POL, L.H.; REBAC, S.; KATO, M.; LIER, J.C. and LETTINGA, G. “Anaerobic treatment of low-strength wastewater”. In: V Latin-American Workshop/Seminar Wastewater Anaerobic Treatment. Viña del Mar / Chile. p.27-30.1998.

Press information bureau of the government of India. Fact Sheet Non Conventional Energy. Disponível em <http://pib.nic.in/archieve/facts hut/fs2000/nonenergi.html>. Acesso em 26 fev. 2009.

RAUSSEN. T. Comunicação pessoal, jun. 2008.

RIBAS, N. M. F. Fase de adaptação de um biodigestor do tipo pulg-flow para tratamento da manipueira, Ponta Grossa, 2000.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. Journal WPCF, Alexandria, v. 58, n. 5, . 406-411, 1986.

RIZK, M. C. et al. Anaerobic codigestion of fruit and vegetable waste and sewage sludge. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 5:1,2007.

ROCHA, G. J. M.; GONÇALVES, A. R. Bagaço de cana: a principal matéria-prima da pesquisa aplicada no grupo de conversão de biomassa vegetal da Faenquil. *Revista ALCOOLbrás*, ano VII, n. 96, p. 98-99, 2005.

SACHS, J. VON; MEYER, U.; RYS, P.; FEITKENHAUER, H. New approach to control the methanogenic reactor of a two phase anaerobic digestion system. *Water Research*. v. 37, n. 5, p. 973-982, 2003.

SACHS, I. A revolução energética do século XXI. *Estud av. (on line)*. 2007, vol. 21, n. 59, pp. 21-38.

SILVA, SALOMÃO A.; OLIVEIRA, R. Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias. 1985.

SANTANA, M. A. E.; TEIXEIRA, D. E. Uso do bagaço de cana-de-açúcar na confecção de chapas de aglomerados. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7.; CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., 1993, Curitiba. *Anais...* São Paulo: SBS/SBEF, 1993. p. 667-672.

SANTOS, M. B. Proposta metodológica para o planejamento do uso agrícola da vinhaça, considerando os seus aspectos ambientais por meio do sistema de informações geográficas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, SP, 123 p. 2001.

SANTOS, M.V.F.1*, GÓMEZ, Castro; A.G.2, PEREA, J.M.2; GARCIA, A.2, Guim, A.1 e PÉREZ, Hernández, M.2 1Universidade Federal Rural de Pernambuco. CEP 52171-900. Pernambuco. Brasil. mercia@dz.ufrpe.br - 2Departamento de Producción Animal. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales. 14014 Córdoba – España, 2001.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. *Ánálises Químicas em plantas*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’, 1974, 56p.

SAWYER, Clair N.; McCARTY, Perry L.; PARKIN, Gene F. *Chemistry for environmental engineering*. 4. ed. MacGrall Hill, 1994. 658 p.

SCHEER, H. Playdoer pour les énergies renouvelables. *Le Monde Diplomatique*, fév. 2007.

SCHELEDER, E.M.M. *O mercado invisível* – Brasília, Outubro, 1998.

SEGHEZZO, L. et al. The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Tecnology*, v.65, n.3, p.175-190, 1998.

SILVA, A. J. P. *Aplicação de partículas longas e orientadas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de painel particulado similar ao OSB*. 2006. 152 f. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, D.J; QUEIROZ, A. C. *Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos*. Viçosa: Editora Universitária, 2002. 235p.

SOARES, H.M. (1990). “Digestão anaeróbia de efluentes de fábricas de cervejas e refrigerantes em reator tipo fluxo ascendente com manta de lodo (UASB)”. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SOLERA, R.; ROMERO, L. I.; SALES, D. The evolution of microorganisms in a thermophilic anaerobic reactor. In: Latin American Workshop and Symposium on Aerobic Digestion, VII, 2002, México: Mérida. ANAIS... Mérida UNAM, 2002. P. 29-34.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. Revista DAE. v. 44, p.88-94, 1984.

SOUZA, R. M. *Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Biogás Através da Biodigestão da Vinhaça e Comparação com Outros Energéticos*. Trabalho apresentado no IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro – BA, 2000

SOSNOWSKI, P. et al. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. *Advance en Enviromental Research*, 7(3):609, 2003.

SOSNOWSKI, P. et al. Kinetic investigation of methane co-fermentation of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 99:5731, 2008.

SPEECE, R.E. “Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters”. Vanderbilt University. Published by Archae Press. United States of America.1996.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VINIL, S. *Integrated solids waste management. Engineering principles and management issues*. Irwin Macgraw Hill, 978 p. 1993.

UMETSU, K.; YAMAZAKI, S.; KISHIMOTO, T.; TAKAHASHI, J.; ZHANG, C.; MISAKI, T.; HAMAMOTO, O.; IHARA, I.; KOMIYAMA, M. Anaerobic co-digestion of dayry manure and sugar beets. *International Congress Series, Amsterdam*, v.1293,p. 307-310,2006.

URBAN, F., Benders, R., Moll, H. Energy for Rural India, Applied Energy, doi:10.1016/j.apenergy.2009.02.018.2009.

US EPA. Methane. Disponível em: <<http://www.epa.gov/methane/scientific.html>>. Acesso em: 12 fev. 2009.

VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G. “Tratamento anaeróbio de esgotos – um manual para regiões de clima quente”. p.208. Editora Epgraf.1994.

VAN SOEST, P. J. Nutritional Ecology of Ruminants. Comstock Publishing Associates, Ithaca, 1982. 573p.

VERAGOO, D. Cogeneration: The Promotion of Renewable Energy and Efficiency in Mauritius. In Regional consultative meeting on REEEP in East Africa. AFRE-PREN/FWD, Nairobi, Junho de 2003.

VIANNA, A.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. *Manual de aplicação de sistemas descentralizados de geração de energia elétrica para projetos de eletrificação rural – energia biomassa*. CEPEL, 2000.

VIÑAS, M.; MARTINEZ, J.; BASELLI, B. Advantages of an anaerobic reactor for TMP wastewater with separated acidogenic and methanogenic stages. Environmental Technology. v. 14, p.995-1000,1993.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. v. 1. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1996. 243 p.

WEC, FAO; The Challenge of Rural Energy Poverty in Developing Countries. Londres, World Energy Council, October, 1999.

WEILAND, P. (2000) Anaerobic waste digestion in Germany – Status and recent developments. Biodegradation, 11, (6), pp. 415-421.

YADVIKA, SANTOS, H., SREEKRISHNAN, T., Kohli, S, Rana, V. (2004), Enhancement of Biogas production from solid substrates using different techniques - a review, *Bioresource Technology*, 95, pp. 1-10.