

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR PALOTINA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS**

**CINÉTICA DE CONSUMO DE SUBSTRATO NA
CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS DA
BOVINOCULTURA DE LEITE E CAMA DE AVIÁRIO**

Aluna: Karlin Utech
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Dilcemara
Cristina Zenatti

PALOTINA – PR
Dezembro de 2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR PALOTINA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS**

**CINÉTICA DE CONSUMO DE SUBSTRATO NA
CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS DA
BOVINOCULTURA DE LEITE E CAMA DE AVIÁRIO**

Aluna: Karlin Utech
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Dilcemara
Cristina Zenatti

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Superior de
Tecnologia em Biocombustíveis –
UFPR/Setor Palotina, como requisito
parcial para obtenção do grau de
Tecnólogo em Biocombustíveis

PALOTINA – PR
Dezembro de 2013

Não faça promessas, apenas faça. Não deixe de sonhar. Mas, acima de tudo viva. Existem barreiras, montanhas e muralhas para te impedir. Mas, acredite em si mesmo, no final tudo vale a pena. @Cardozo_0

Aos meus pais; Marcolf Utech e Helga Loni Ohlweiler Utech, que são razão de todo esforço e dedicação, pelo incentivo, educação, apoio e amor dedicados a mim durante toda minha vida. Aos meus irmãos Claudio Utech e Claus Utech pela companhia amizade e parceria em todos os momentos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus que é nosso Pai, que orienta e ilumina o caminho de forma a prosseguir, e sempre das forças para superar os obstáculos.

Aos meus familiares, pais e irmãos, o meu muito obrigado por todos ensinamentos e amor a mim dedicados, e por se fazerem sempre presentes em todos os momentos, incentivando, apoiando, consolando e animando principalmente nos momentos difíceis.

Aos amigos e companheiros de turma, pelos companheirismo, apoio e diversão. Que juntos, em busca da construção do conhecimento, fizeram com que momentos e situações difíceis fossem mais facilmente contornadas, em especial a Giovana Giacobbo, Fábio William Nascimento, e Milton Fernando de Jesus Blanco.

A todos os professores que fizeram parte desta minha caminhada, o meu muito obrigado pela paciência e dedicação.

A Professora Orientadora Dilcemara Cristina Zenatti, pela dedicação, ensinamentos e orientação repassados durante a realização deste trabalho.

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Marechal Cândido Rondon, a qual permitiu a coleta dos dados para realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina, pela oportunidade de aprender e crescer, no período acadêmico, e pela disponibilização dos laboratórios para realização das análises necessária para a elaboração do presente trabalho.

A Usina de Açúcar Santa Terezinha pela oportunidade de estágio; e a seus colaboradores, principalmente do setor da destilaria e da fábrica de açúcar, pelos ensinamentos práticos transmitidos.

Ao professor Dile Pontarollo Stremel pela orientação prestada no estágio obrigatório.

E a todos aqueles que não foram citados, mas que direta ou indiretamente contribuíram na realização desse trabalho.

RESUMO

Devido às mudanças que vem ocorrendo no setor produtivo leiteiro, em que esta se adotando um sistema de criação intensivo, passou a ocorrer um acúmulo de dejetos, devido à alta concentração de animais em pequenas áreas. Estes dejetos se manejados de forma incorreta causam a contaminação do ambiente. Com a crescente preocupação com o ambiente e a busca por alternativas para mitigar estes impactos, tem-se como alternativa a biodigestão anaeróbia que origina como subprodutos o biogás e o biofertilizante. Por este motivo realizou-se trabalho, com o objetivo de verificar a relação entre as alterações da temperatura ambiente, a produção de biogás, e a velocidade de consumo de substratos (Demanda Química de Oxigênio - DQO e sólidos voláteis - SV). O experimento foi desenvolvido na Estação Experimental Antônio Carlos dos Santos Pessoa, que pertence à UNIOESTE – *Campus* de Marechal Cândido Rondon, no período de maio a julho de 2013, período correspondente a transição de outono para inverno. O biodigestor foi alimentado com dejetos de bovinocultura de leite juntamente com cama de aviário em um biodigestor experimental contínuo patenteado pela empresa BioKöhler®, com capacidade de 20 m³. Ao avaliar os resultados obtidos observou-se que a produção de biogás é diretamente afetada pela temperatura; a velocidade de consumo dos sólidos voláteis também sofre influencia da temperatura, apresentando comportamento semelhante; impactando na velocidade de consumo deste substrato; a velocidade de consumo da DQO não sofre influencia direta da temperatura, assim como também em relação a produção de biogás a velocidade de consumo da DQO apresenta comportamento independente, no qual observou-se que com o aumento da temperatura não ocorre aumento do consumo de DQO.

Palavras-chave: substrato, temperatura e produção de biogás.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 CENÁRIO DA PECUÁRIA BRASILEIRA.....	3
3.2 SISTEMAS DE CONFINAMENTO	6
3.3 BIODIGESTORES.....	7
3.4 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	9
3.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	11
3.6 CINÉTICA DE CONSUMO DE SUBSTRATO	11
3.7 SÓLIDOS TOTAIS	12
3.8 MATÉRIA ORGÂNICA COMO SUBSTRATO	13
3.9 BIOGÁS.....	13
4 MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1 SÉRIE DE SÓLIDOS.....	23
4.2 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO	24
4.3 CONSUMO DE SUBSTRATO	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 SÓLIDOS VOLÁTEIS	29
5.2 DQO	31
6 CONCLUSÃO	36
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vacas Ordenhadas por Região no Brasil em 2012	5
Figura 2 - Fluxograma da biodigestão anaeróbia	10
Figura 3 - Modelo de biodigestor utilizado no estudo	17
Figura 4 - Adição e homogeneização da cama de aviário na câmara de alimentação, e vista da câmara de alimentação e câmara de biodigestão.....	18
Figura 5 - Animais na sala de alimentação	19
Figura 6 - Medição da densidade do afluente, e coleta da amostra de entrada de dejetos do biodigestor	20
Figura 7 - Amostra de entrada e saída de dejetos do biodigestor.....	22
Figura 8 - Medidor de gás.	22
Figura 9 - Relação entre a temperatura e o volume de biogás produzido por semana.	27
Figura 10 - Relação entre a velocidade de consumo (k) dos sólidos voláteis e a temperatura ambiente.	28
Figura 11 - Relação entre a velocidade de consumo (k) dos sólidos voláteis e a produção de biogás.....	29
Figura 12 - Relação entre a velocidade de consumo (k) da DQO e a temperatura...31	
Figura 13 - – Relação entre a velocidade de consumo (k) da DQO e a produção de biogás.....	32
Figura 14 – Comparação entre a velocidade de consumo dos sólidos voláteis (k-sv) e a velocidade de consumo da DQO (k-DQO) em função da temperatura (T).....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do Biogás.....	15
Tabela 2 - Resultados das análises realizadas.	26

1 INTRODUÇÃO

Com a modernização da agropecuária, cada vez mais o sistema de confinamento é fortalecido nos diversos setores de produção.

A bovinocultura e a avicultura possuem um grande destaque na agropecuária brasileira no cenário mundial. Conforme dados do IBGE (2012), o Brasil foi o segundo maior produtor de gado bovino, e terceiro maior produtor de aves, a nível mundial, no ano de 2012.

Na busca por maiores produtividades, ocorreram mudanças significativas nos sistemas de produção, passando a adotar um sistema de confinamento, aumentando o número de animais por área.

Porém neste sistema ocorre o acúmulo de grande quantidade de esterco devido ao espaço restringido, havendo necessidade de um correto tratamento destes resíduos (TESTON, 2010).

Visando minimizar os impactos gerados por estes sistemas, passou-se a realizar a biodigestão anaeróbia, que utiliza os dejetos como subprodutos, transformando-os em biogás e biofertilizante, agregando valor para as atividades desenvolvidas na propriedade rural.

Na biodigestão anaeróbia o consócio microbiano realiza a degradação da matéria orgânica complexa em compostos orgânicos simples e nutrientes dissolvidos, produzindo o biogás e o biofertilizante, em ambientes isentos de presença de oxigênio livre (CICHELO et al. 2012).

Nesse contexto foi desenvolvido este trabalho que tem como objetivo realizar o estudo cinético de um biodigestor da marca Biökohler, operado com dejetos bovinos e cama de aviário.

Conforme Zaiat (2003), a cinética das reações tem por objetivo realizar o estudo da velocidade de reação, ou velocidade de conversão. É diferente dos termos de entrada, saída e acúmulo de matéria no sistema, que são termos físicos, o termo de reação depende do mecanismo químico ou bioquímico de conversão. Segundo Silva (2009), seu estudo relaciona a velocidade de crescimento das leveduras com o consumo de substrato e a formação de produto.

Conforme Neto (1999, *apud*. SILVA, 2009) realizar o estudo cinético de um fenômeno ou processo consiste em estudar sua evolução no tempo realizando a quantificação de algumas grandezas, que no caso da degradação de material

orgânico são: tempo, concentração de substratos que limita o processo, a concentração do produto de interesse, e a concentração de microrganismos presentes.

Dentre os diversos fatores que interferem na velocidade das reações, os principais são a temperatura, composição do sistema, pressão e propriedades do catalizador ou biocatalizador (ZAIAT, 2003).

Com este estudo objetiva-se verificar a relação entre as velocidade de consumo dos substratos (DQO e sólidos voláteis) com a temperatura e o volume de biogás produzido.

A cinética bioquímica de um determinado processo consiste no estudo das velocidades de crescimento dos microrganismos relacionados a utilização de substrato e a formação de produtos, e devem ser expressos por meio de modelos matemáticos que expressem de forma clara a eficácia dos processos (SILVA, 2009).

Para medir a velocidade das reações foram analisados os sólidos voláteis e a DQO dos afluentes e efluentes do biodigestor em estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a velocidade (k) de consumo de substratos (Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos Voláteis (SV)) para a produção de biogás em função da variabilidade da temperatura ambiente na codigestão anaeróbia de dejetos da bovinocultura de leite e cama de aviário.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a velocidade de consumo dos sólidos voláteis com relação a de produção de biogás.
- Avaliar a velocidade de consumo da DQO observando a influência na produção de biogás.
- Verificar a influência da variabilidade da temperatura externa do biodigestor na produção de biogás e na velocidade de consumo de substratos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CENÁRIO DA PECUÁRIA BRASILEIRA

A bovinocultura é um dos principais destaques do agronegócio brasileiro no cenário mundial. Em 2012 o país se apresentava como dono do segundo maior rebanho efetivo do mundo, com 211,279 milhões de cabeças, ficando apenas atrás da Índia (IBGE, 2012).

Ao realizar a análise dos plantéis de efetivos bovinos registrados nos anos de 2012, 2011, observa-se que com exceção a região Norte que apresentou um crescimento de 1,3%, as demais regiões apresentaram reduções nos plantéis (IBGE, 2012).

O Pará, Acre, Tocantins, Amapá e Roraima, foram os estados que contribuíram para o aumento do efetivo de animais na região Norte (IBGE, 2012).

Na análise por estado, os que apresentaram maiores efetivos de bovinos no ano de 2012 foram, Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Pará, somando 54,4% do efetivo nacional. O Paraná ficou com a décima posição, com 9.413.937 cabeças, que representa 4,5% da produção nacional. (IBGE, 2012).

O município de Marechal Cândido Rondon/PR, é o 13º município no ranking nacional de produção de leite, com um rebanho de 21.402 vacas, distribuídas em 1.862 propriedades (IBGE, 2012).

Conforme dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o Brasil ocupa a 6º posição mundial na produção de leite, ficando atrás da União Europeia, Índia, Estados Unidos, China e Rússia (IBGE, 2012).

O número de vacas ordenhadas em 2012 foi de 22.803.519 vacas, correspondendo a 10,8% do efetivo total de bovinos, com uma produção de 32.304.421 mil litros de leite (IBGE, 2012). As vacas estavam dispostas por região conforme mostrado na Figura 1.

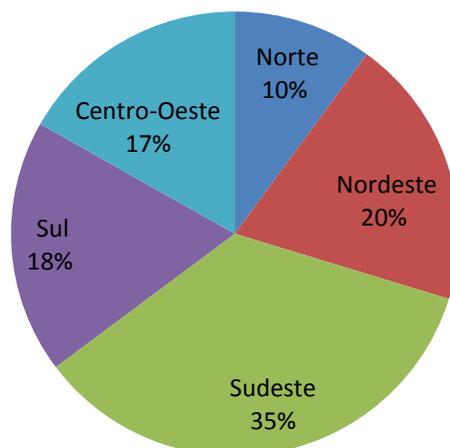


Figura 1 - Vacas Ordenhadas por Região no Brasil em 2012
Fonte: Adaptado de IBGE (2012).

Os estados com maior produção leiteira são Minas Gerais (25,6% da produção nacional), Rio Grande do Sul (15,3%) e Paraná (13,1%)

Assis (2005) classificou quatro tipos de sistemas de produção de leite no Brasil, de acordo com o grau de intensificação e o nível de produtividade e caracterizados com a alimentação adotada, utilizando dados do Senso Agropecuário do IBGE de 1996.

Os sistemas são: extensivos, no qual os animais são criados exclusivamente a pasto; semi-extensivo, os animais recebem suplementação volumosa na época de baixo crescimento do pasto; sistema intensivo a pasto é caracterizado por animais criados a pasto com forrageiras de alta capacidade de suporte, com suplementação volumosa na época de baixo crescimento do pasto, ou em alguns casos, durante todo o ano; e sistema intensivo em confinamento, no qual os animais são mantidos confinados, recebendo volumosas conservadas como, silagem e feno no cocho (ASSIS, 2005).

Conforme dados da Martins (2013), houve um crescimento na produção de leite no ano de 2010, sendo a produção brasileira de 30,7 bilhões de litros, representando 4,42% da produção mundial, que foi de 695,7 bilhões de litros.

Porém o número de fazendas no Brasil foi reduzido em 3,2%, visto que os produtores passaram a exercer outras atividades agropecuárias. Conforme estimativas, no ano de 2009, diariamente 100 fazendas deixaram de produzir leite. Isto ocorreu devido a necessidade de redução dos custos unitários de produção,

havendo necessidade do aumento da escala de produção, fazendo com que as fazendas menores que não possuem condições de ampliar a produção, deixassem a atividade (MARTINS, 2013).

3.2 SISTEMAS DE CONFINAMENTO

A cadeia leiteira esta passando por mudanças em termos de processos de produção, sendo indicado por uma acelerada modernização tecnológica. Cada vez mais esta se investindo no melhoramento genético dos plantéis, em ajustes na nutrição animal e no melhoramento das pastagens, o que tem contribuído para o aumento de produtividade por animal. Analisando as tendências mundiais, esta ocorrendo uma redução no número de fazendas produtoras de leite, e na quantidade total de vacas utilizadas para a produção de leite, porém o tamanho individual das fazendas em área esta aumentando, bem como o número de vacas e o volume de produção por fazenda (MARTINS, 2013). Ou seja, esta havendo uma densificação da produção, aumentando o número de animais em áreas cada vez menores.

Conforme Schlesinger (2009), em São Paulo, a criação de gado esta sendo substituída pelo plantio da cana-de-açúcar. Também em outras regiões do país, a atividade esta perdendo espaço para outras culturas, verificando-se a tendência de um aumento do número de cabeças em áreas cada vez menores, devido ao aumento de suporte das pastagens.

A exploração intensiva de animais por sua vez, esta desencadeando preocupações referentes a poluição ambiental, causada pelo grande volume de dejetos produzidos em pequenas áreas. E nos confinamentos para a produção de leite o problema é ainda maior, visto que além das fezes e da urina dos animais, é gerado um grande volume de água residuária resultante do processo de limpeza e higienização dos equipamentos de ordenha e limpeza dos estábulos (PHOLMANN, 2000).

Manso e Ferreira (2007), define como dejetos o conjunto de fezes, urina, água desperdiçada dos bebedouros, água de higienização e resíduos de volumosos e ração, resultantes do processo de criação, que são acumulados nos sistemas de confinamento, devido a concentração de animais em áreas limitadas.

Apenas parte dos alimentos consumidos pelos animais é aproveitado para sua manutenção, sendo a maior parte eliminada em forma de esterco e urina. O gado bovino leiteiro produz em torno de 10% de seu peso corporal em fezes e urina, representando em média de 45 a 48 kg/vaca/dia (KONZEN, ALVARENGA, 2013)

Segundo Cronk (1996), citado por Johann (2010), dependendo do manejo adotado na higienização dos animais e dos estábulos, o volume de água consumido por animal pode variar de 40 até 600 litros, incluindo a lavagem das excretas, bem como limpeza dos equipamentos de ordenha e armazenamento de leite e banho dos animais.

Em sistemas de pastejo, com baixa concentração de animais, os dejetos são dispersos, sofrendo total decomposição. Porém, a medida que os animais são confinados, mesmo que por poucas horas diárias, como para a ordenha; ou nos sistemas de confinamento, os dejetos ficam acumulados, sendo potenciais poluidores (HARDOIN, GONÇALVES, 2003).

3.3 CAMA DE AVIÁRIO

Devido ao aumento da avicultura de corte nos últimos anos, esta sendo produzida uma grande quantidade de cama de frango. Visto que a mesma constitui um possível passivo ambiental (COSTA, 2012).

A cama de frango atualmente é muito utilizada como fertilizante, devido a sua elevada concentração de nutrientes. Porém estes nutrientes podem se tornar poluidores do solo e da água, principalmente em regiões com grandes concentrações de produção de frango, e poucas áreas disponíveis para a disposição dessa cama (SAGULA, 2012).

Para tratamento destes resíduos avícolas a biodigestão anaeróbia se apresenta como uma alternativa sustentável, uma vez que além de obter energia elétrica a baixo custo, recicla o material residual da sua granja e auxilia na redução dos impactos ambientais gerados no processo (SAGULA, 2012).

3.3 BIODIGESTORES

Dessa forma os biodigestores estão ganhando espaço na modernização da agricultura, sendo incentivados pela crise da energia e busca por fontes alternativas, solucionando ainda o problema da preocupação com o destino correto desses dejetos (COLDEBELLA et. al., 2006).

O biodigestor consiste em um tanque isolado do ar atmosférico, em que a partir de matéria orgânica produz biogás e biofertilizante, Os microrganismos presentes no meio, realizam a degradação da matéria orgânica, na ausência de oxigênio, sendo portanto, denominados biodigestores anaeróbios (ROYA et al., 2011).

Também conhecidos como reatores anaeróbios simplificados, os biodigestores apresentam semelhantes tempos de detenção hidráulica e celular, e podem ser projetados de acordo com o tipo de operação que será conduzido, de forma contínua, por batelada, ou de alimentação mista (ANDRADE et al. 2002).

O sistema contínuo é indicado para tratamento de materiais fluidos e uniformes, obtido continuamente, devendo ser projetado de acordo com o manejo dos animais e a disponibilidade de mão-de-obra. A operação por batelada é adequada para resíduos como as camas de criações confinadas, podas de gramas e restos de culturas, ou seja, que são obtidos periodicamente (ANDRADE et al. 2002).

De acordo com Kunz (2010), a tecnologia dos biodigestores é conhecida a muito tempo; sendo os modelos mais difundidos: indiano, chinês e canadense, havendo grande utilização deste último principalmente devido a praticidade de instalação, custo, manuseio e manutenção

O biodigestor do modelo Indiano é de fácil construção. Este é caracterizado por possuir uma campanula de metal como gasômetro, que fica mergulhada em um selo d'água externo, fazendo com que as perdas na produção de biogás sejam reduzidas; e uma parede central que tem por função dividir a câmara de fermentação em duas, fazendo com que o material circule por todo o interior. Este modelo é operado com alimentação contínua, e pressão de operação constante, de forma que o gasômetro se desloca verticalmente a medida que ocorre o acúmulo de gás produzido. Visando evitar entupimentos dos canos na entrada e saída dos dejetos do biodigestor, os sólidos totais devem apresentar uma concentração de até

8%, facilitando também a circulação destes no interior da câmara (BONTURI, DIJK, 2012).

Assim como o biodigestor indiano, o modelo chinês também deve ser alimentado continuamente com a concentração dos sólidos totais próximo de 8%, facilitando a circulação do material no interior, e evitando problemas de entupimento dos canos na entrada e saída do material. Porém o custo deste é menor, visto que este biodigestor é construído em alvenaria, com o teto abobadado, impermeável, o qual armazena o biogás. Porém caso sua estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada poderão ocorrer problemas de vazamento do biogás (DEGANUTTI et al., 2002).

Este modelo segue o princípio de prensa hidráulica, ocorrendo o deslocamento do efluente do interior da câmara de fermentação para a caixa de saída, conforme ocorre o aumento da pressão no seu interior; e em caso de descompressão os dejetos percorrem sentido contrário. A pressão interna do gás é parcialmente reduzida, visto que parte do gás formado na caixa de saída é liberado para o ambiente, sendo por este motivo que o modelo chinês não é adotado para instalações de grande porte (DEGANUTTI et al., 2002).

No Brasil o modelo mais difundido é o canadense, que possui cobertura em lona PVC, tendo boa adaptação tanto em pequenas como em grandes propriedades, a um custo reduzido e facilidade de implantação. (OLIVEIRA, 2012).

O modelo canadense apresenta geometria retangular, e é caracterizado por possuir largura maior que profundidade, possuindo assim uma grande área de exposição ao sol, o que proporciona maior produção de biogás devido a elevação da temperatura (OLIVEIRA, 2012).

3.4 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Dentre os diversos processos existentes para tratamento de resíduos, a digestão anaeróbia é um método bastante atrativo, pois gera o biogás, como fonte alternativa de energia, e o biofertilizante (ORRICO, LUCAS JR., ORRICO JR., 2007). É um processo natural, que ocorre na ausência de oxigênio, sendo a matéria orgânica decomposta pelas bactérias presentes no meio. (PHOLMANN, 2000).

Os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia podem ser divididos em três grupos: de bactérias fermentativas, bactérias acetanogênicas e arqueas metanogênicas, visto que possuem comportamento fisiológico diferentes (BERNI, 2011).

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo, podendo-se distinguir quatro etapas neste: a hidrólise, a acidogênese, a acetanogênese e a metagênese, sendo cada um realizado por uma população bacteriana específica conforme demonstrado no fluxograma demonstrado na Figura 2 (SCHMITT, WESCHENFELDER, VIDI, 2006)

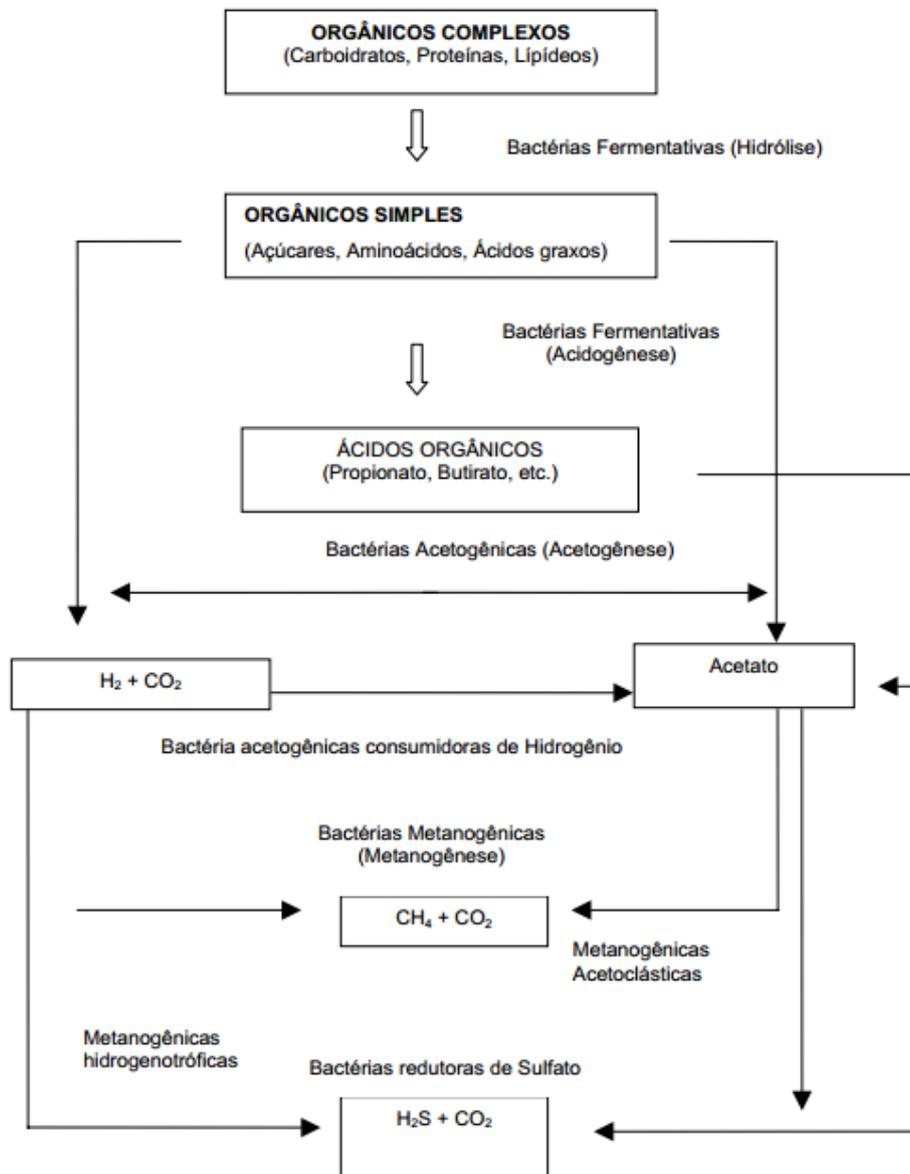


Figura 2 - Fluxograma da biodigestão anaeróbia
Fonte: Chernicharo, 2007.

Na hidrólise ocorre a quebra das partículas maiores em partículas menores, sendo o material particulado convertido em monômeros simples, ou seja, compostos solúveis, que são utilizados pelas bactérias fermentativas (BERNI, 2011).

Conforme Machado (2011), o grau e a taxa de hidrólise do substrato pode ser afetada por vários fatores como a temperatura e tempo de residência do substrato no reator, composição do substrato e tamanho das partículas, pH, entre outros, podendo esta fase ser limitante para o processo de biodigestão anaeróbia.

A fase da acidogênese consiste na fermentação dos compostos solúveis, açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, originados na fase da hidrólise, produzindo compostos ainda mais simples, como ácidos graxos voláteis (ácido acético, fórmico propiônico, butírico e láctico), álcoois, cetonas, hidrogênio, dióxido de carbono, amônia e sulfeto de hidrogênio (SCHMITT, WESCHENFELDER, VIDI, 2006).

Na fase da acetogênese os ácidos graxos e álcoois formados na fase anterior são degradado arqueas acetogênicas, dando origem à acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, sendo estes produtos substrato para as arqueas metanogênicas. Dos compostos formados pelas bactérias acidogênicas, apenas a acetato e o hidrogênio são substrato para a produção de metano (SILVA, 2009). Os demais compostos formados, o propianato e o butirato, que representam pelo menos 50% da DQO biodegradável, são convertidos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (KUNZ, 2010).

A última fase é a metanogênese. Nesta etapa os compostos orgânicos (ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono) são degradados à metano e dióxido de carbono, sendo as bactérias divididas em dois grupos, de acordo com a afinidade por substrato na qual o grupo das bactérias acetotróficas reduzem o ácido acético ou metanol, e das bactérias hidrogênotróficas, reduzem o dióxido de carbono e hidrogênio (SCHMITT, WESCHENFELDER, VIDI, 2006).

Dentre os diversos fatores que podem afetar a eficiência da produção de biogás destacam-se: a composição química do resíduo, a impermeabilidade ao ar, temperatura, pH, alcalinidade, acidez, consumo de ácidos orgânicos e nutrientes.

Mantendo-se a temperatura (próximo a 35°C) e o pH (entre 7 e 8) do substrato, a concentração de nutrientes e de sólidos da solução (de 7 a 9 partes de sólidos em 100 partes de líquido) nos níveis ideais, a produção de biogás torna-se otimizada. Porém, em caso de oscilações a produção de gás pode ser drasticamente

afetada, por exemplo, se a temperatura estiver abaixo de 15°C, a produção do gás é muito baixa; se o pH estiver abaixo de 7 é paralisada. E se a concentração de nutrientes for insuficiente a produção é retardada (TURDERA e YURA, 2006).

Porém a produção do metano é um processo muito lento, devido a lenta velocidade de crescimento das arqueas metanogênicas, resultando em um longo tempo de retenção, necessitando de grandes tanques para realizar a fermentação (PHOLMANN, 2000).

3.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A temperatura afeta os processos biológicos de diversas maneiras, sendo este o fator ambiental mais importante para a digestão anaeróbia. Dentre seus efeitos, a temperatura tem influência direta nas alterações da velocidade do metabolismo das bactérias, no equilíbrio iônico e na solubilidade dos substratos, principalmente de lipídios (SCHMITT, WESCHENFELDER, VIDY, 2006).

Para a maioria dos processos biológicos podem ser definidas três faixas de temperatura; psicrófila (0 a 20°C); mesófila (20 a 45°C) e termófila (45 a 70°C), dentro das quais são definidas as temperaturas mínima, ótima e máxima, em que não ocorre o crescimento microbiano, em que ele ocorre de forma máxima, e acima do qual o mesmo é inviabilizado (SCHMITT, WESCHENFELDER, VIDY, 2006).

O processo se torna mais eficiente quando operado em temperaturas mais altas, visto que ocorrem com maior velocidade. Porém em baixas temperaturas ocorre um decréscimo da atividade microbiana, gerando problemas na operação (ZHANG, 2006, *apud*. MENEZES, 2012).

De acordo com Zahng et. al. (2006, citado por MENEZES, 2012), a temperatura influencia diretamente no rendimento da formação do metano (CH₄), pois afeta de forma significativa a conversão, cinética, estabilidade e qualidade do efluente.

3.6 CINÉTICA DE CONSUMO DE SUBSTRATO

A cinética das reações realiza o estudo da velocidade de reação, ou velocidade de conversão. É diferente dos termos de entrada, saída e acúmulo de matéria no sistema, que são termos físicos, o termo de reação depende do mecanismo químico ou bioquímico de conversão (ZAIAT, 2003). Segundo Silva (2009), seu estudo relaciona a velocidade de crescimento das leveduras com o consumo de substrato e a formação de produto.

Conforme Neto (1999), citado por SILVA (2009), realizar o estudo cinético de um fenômeno ou processo consiste em estudar sua evolução no tempo realizando a quantificação de algumas grandezas, que no caso da degradação de material orgânico são: tempo, concentração de substratos que limita o processo, a concentração do produto de interesse, e a concentração de microrganismos presentes.

O estudo da velocidade das reações é importante, pois proporciona um entendimento aprofundado sobre o sistema reagente, através da descrição molecular das reações podendo, por exemplo, indicar sobre os substratos preferenciais dos microrganismos e permite o aprimoramento de reatores de projetos para reatores de configuração em escala real (ZAIAT, 2003).

A cinética bioquímica de um determinado processo consiste no estudo das velocidades de crescimento dos microrganismos relacionados a utilização de substrato e a formação de produtos, e devem ser expressos por meio de modelos matemáticos que expressem de forma clara a eficácia dos processos (SILVA, 2009).

Conforme Zaiat (2003), para medir as velocidades das reações é necessário realizar a interpretação dos dados obtidos em um reator, podendo estes ser concentrações de reagentes ou produtos, cujos resultados específicos obtidos são influenciados pelo reator utilizado.

Dentre os diversos fatores que interferem na velocidade das reações, os principais são a temperatura, composição do sistema, pressão e propriedades do catalizador ou biocatalizador (ZAIAT, 2003).

3.7 SÓLIDOS TOTAIS

Visto que os sólidos correspondem ao resíduo resultante da evaporação, secagem ou calcinação da amostra, a temperatura pré-estabelecida durante um intervalo de tempo fixado, podem ser classificados em sólidos totais, em suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis, de acordo com a operação de secagem a qual são submetidos (PROGRAMA ÁGUA AZUL, 2013).

Com exceção aos sólidos sedimentáveis (método volumétrico), os demais são determinados pelo método gravimétrico, que utiliza balança analítica ou de precisão. Visto que a amostra é secada na estufa a 103 a 105 °C até peso constante, obtendo-se os sólidos totais. (PROGRAMA ÁGUA AZUL, 2013).

Conforme Oliveira (2006), citado por Miranda, Lucas Junior e Thomaz (2009), os sólidos voláteis representam a matéria orgânica contida no resíduo possível de transformação, utilizada como substrato para as arqueas metanogênicas, produtoras de biogás.

De acordo com Menezes (2012), os sólidos totais representam o resíduo total contido no substrato, de origem orgânica ou inorgânica, podendo este ser o indicador da massa total a ser tratada. Porém a bioconversão ocorre na fração orgânica do substrato, e tem sua taxa aumentada na medida que aumenta as concentrações de sólidos totais voláteis (STV).

3.8 MATÉRIA ORGÂNICA COMO SUBSTRATO

A DQO (demanda química de oxigênio) tem relação direta com a estabilidade da matéria orgânica, sendo um fator importante no estudo da biodigestão anaeróbia, visto que quanto melhor ocorrer a degradação do resíduo, maior é sua remoção (SLORGON, et. al. 2011).

Conforme Augusto (2011), a DQO indica de forma indireta a quantia de matéria orgânica presente na amostra, por meio da indicação da quantidade de oxigênio que seria consumido por reações químicas de oxidação dos compostos orgânicos, sem a ação dos microrganismos.

3.9 BIOGÁS

O biogás é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio. É o produto resultante da biodigestão anaeróbia, e tem diversas aplicações na propriedade rural, podendo também ser utilizado no consumo doméstico e geradores de energia elétrica. A utilização do biogás proporciona ganhos tanto econômicos como ambientais, pois reduz a quantidade de combustível consumido, bem como faz a substituição de um combustível não renovável por um renovável (ORRICO JR., 2007).

Sua composição varia de acordo com as características da matéria orgânica do substrato utilizado na fermentação e das condições de operação dos biodigestores. O biogás é composto principalmente por metano, e gás carbônico, havendo ainda em pequenas concentrações presença de outros gases, como sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio, e monóxido de carbono, conforme a tabela 2.

Gás	Símbolo	Concentração no Biogás (%)
Metano	CH ₄	50 – 80
Dióxido de carbono	CO ₂	20 – 40
Hidrogênio	H ₂	1 – 3
Nitrogênio	N ₂	0,5 – 3
Gás sulfídrico e outros	H ₂ S, CO, NH ₃	1 – 5

Tabela 1 - Composição do Biogás

Tabela 2 - Composição do Biogás

Fonte: Adaptado por COLDEBELLA (2006), citado por KUNZ (ANO).

A quantidade de biogás produzido a partir da decomposição da biomassa se dá em virtude de vários fatores, dentre os quais estão a temperatura, pH, composição do substrato (relação carbono/nitrogênio), presença ou não de oxigênio, nível de umidade, e a quantidade de bactérias x volume de biomassa (DONGALA, 2010).

O poder calorífico do biogás varia em função de sua pureza, alternando entre 5.000 e 7.000 kcal/m³, conforme a concentração de metano presente na mistura, podendo chegar a 12.000 kcal/m³, quando purificado (TURDERA, YURA, 2006).

Para Kunz (2013), quanto mais metano presente em sua composição, mais rico é o biogás, ou seja, maior é seu potencial energético. O biogás gerado em aterros sanitários possui em torno de 50% de metano; quando produzido em reatores anaeróbios de efluentes, pode conter até 70 % de metano, porém apresenta ainda menor poder calorífico que o gás natural, que possui 95% de metano, sendo este mais puro.

Teston (2010) obteve a produção de 1,4m³ de biogás (CH₄)/dia, em seu estudo sobre a produção de energia a partir do esterco bovino no qual a produção teórica seria de 2 m³ processando uma massa de esterco de 60 a 70 kg dia⁻¹.

De acordo com um trabalho de pesquisa realizado no Departamento de Engenharia da Universidade de Lavras por Hardoin e Gonçalvez (2003), um biodigestor pode produzir um volume de 118m³ de biogás com os dejetos oriundos de um confinamento de 100 vacas (TESTON, 2010).

Em seu estudo sobre a biodigestão anaeróbia de cama de aviário composta por maravalha, Palhares (2004) obteve a produção de biogás, utilizando os dejetos produzidos por 1000 aves, de 243 m³, equivalente a 8,1 GLP botijões de 13 kg.

Já Costa (2012), em um estudo sobre a produção de biogás utilizando cama de frango diluída em água e biofertilizante de dejetos suínos, obteve a produção biogás de 1,389 m³ por (m³) kg⁻¹ de cama de primeiro lote, e observou que a fração sólida demorou ser digerida, visto que em cama de primeiro lote há maior concentração de matéria orgânica digerível.

Quando comparado com outros combustíveis, o conteúdo energético de em metro cubico (1 m³) equivale energeticamente a: 0,40 kg de GLP (gás liquefeito de petróleo) utilizado nas residências; 0,61 a 0,70 litros de gasolina; 0,55 litros de óleo diesel; e 0,80 litros de álcool. (LAZZARI, 2013).

Devido ao seu valor energético, biogás possui diversas aplicações, podendo ser utilizado nas propriedades rurais para aquecimento e movimentação mecânica, dessa forma reduzindo os custos na propriedade e dando um tratamento adequado para os resíduos (BARROS, 2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação Experimental Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos Pessoa, que pertence ao Núcleo de Estações Experimentais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizada no município de Marechal Cândido Rondon – PR, na Linha Guará, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 24° 33' 40" S, longitude 54° 04' 12" W e altitude de aproximadamente 420 metros.

Os dados utilizados foram coletados no período 20 de maio a 12 de julho de 2013, período correspondente a transição de outono para inverno. Os dados de temperatura e biogás foram medidos diariamente, e as amostras dos dejetos de entrada e saída foram coletadas 3 vezes por semana.

O biodigestor experimental utilizado para o desenvolvimento da pesquisa é da marca Bioköhler, e possui sistema de alimentação contínuo. O biodigestor é formado por duas caixas d'água de 10.000 litros cada, reforçadas por cintas, visando suportar a pressão hidráulica do líquido e do gás em seu interior. Uma das caixas d'água é normal, possuindo fundo plano e a outra possuindo o seu fundo arredondado, instalado no sentido vertical, de forma que as caixas ficam uma sobre a outra, sendo uma totalmente enterrada no solo, e a outra, de fundo arredondado, sobre a anterior ficando totalmente fora do solo, conforme a figura 3.

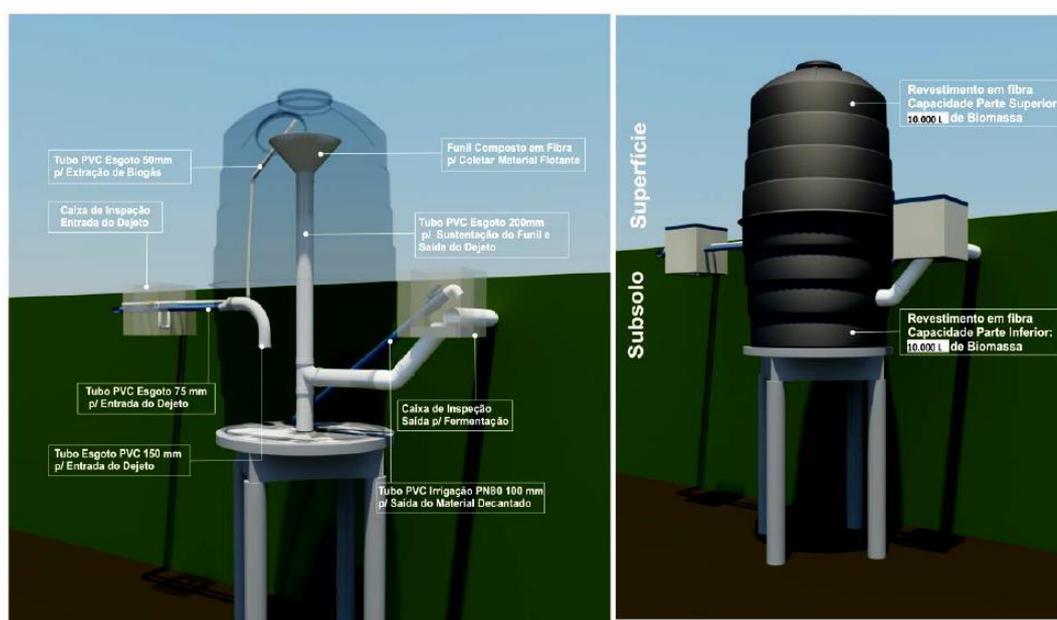


Figura 3 - Modelo de biodigestor utilizado no estudo
 Fonte: Blanco (2013).

O biodigestor possui a câmara de biodigestão constituída em fibra de vidro, com capacidade de 20m³, e volume útil de 19,56 m³. Este era manejado e operado de segunda a sábado, as 11 horas da manhã.

Quanto a alimentação, o biodigestor era alimentado com aproximadamente 92% de dejetos bovinos, nos quais estão inclusos além do esterco, a água de limpeza das instalações, urina e restos de alimentos, e 8% de cama de aviário, os quais eram misturados na câmara de abastecimento, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4 - Adição e homogeneização da cama de aviário na câmara de alimentação, e vista da câmara de alimentação e câmara de biodigestão.
Fonte: UTECH (2013)

Tanto os afluentes como o biogás são canalizados subterraneamente para proteção do sol, chuvas, e para proteção de qualquer impacto que possa danificá-los.

Os dejetos bovinos utilizados foram raspados da sala de alimentação; diluídos com água na proporção de 1:1 (para cada parte de dejetos, acrescentava-se uma ou duas partes de água), e então escorriam pelo encanamento até a caixa de alimentação do biodigestor através da gravidade, pela diferença hidráulica. O plantel que produzia os dejetos era composto por 12 vacas da raça holandesa, e o volume de entrada de dejetos no biodigestor era em média de 344 kg (dejetos + água).

Na câmara de abastecimento do biodigestor foram adicionados diariamente 30 kg de cama de aviário, que foi adquirida de produtores de frango da região, visando a otimização da produção de biogás. A cama de aviário era homogeneizada com os dejetos, e na sequência realizava-se a alimentação do biodigestor.

A Figura 5 traz os animais sendo alimentados na sala de alimentação, de onde originavam-se os dejetos utilizados na codigestão anaeróbia.



Figura 5 - Animais na sala de alimentação
Fonte: UTECH (2013)

Com os dejetos bovinos na caixa de alimentação do biodigestor, realizava-se a aferição da altura que estes apresentavam, seguido da homogeneização, com posterior coleta da amostra do afluente do biodigestor (amostra de entrada), e determinação da densidade, com o uso de um densímetro manual da marca Incontrm, modelo número 5582, sendo a escala de 1,000 a 1,100 g mL⁻¹, aferido a 20°C.



Figura 6 - Medição da densidade do afluente, e coleta da amostra de entrada de dejetos do biodigestor

Fonte: UTECH (2013)

A alimentação era efetuada com o auxílio de uma bomba centrífuga em duas etapas; sendo primeiramente realizada a adição dos dejetos bovinos diluídos com água, até enviar volume próximo a metade da caixa de alimentação; e na sequência procedendo-se com a adição da cama de aviário homogeneizada com os dejetos bovinos, terminando a alimentação do biodigestor.

Visto que o biodigestor é operado de modo contínuo, o descarte do biofertilizante era realizado no mesmo momento da alimentação, efetuando-se a coleta do efluente neste momento, sendo esta a mostra de saída.

Após concluída a alimentação do biodigestor realizava-se nova aferição da altura dos dejetos contidos na caixa de alimentação, para quantificar o volume que a bomba não conseguia succionar.

Com posse destes dados calculava-se o volume de entrada do biodigestor, através da seguinte equação:

Equação 1

$$v = \frac{d \times H \times \pi}{4}$$

Em que:

V = Volume (m³)

H = Diferença de altura (cm)

π = PI , proporção numérica que tem origem na relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, tendo valor aproximado de 3,14.

d = Diâmetro, a caixa de alimentação apresentava diâmetro de 1 metro.

Também foi calculado o tempo de detenção hidráulica (TDH) do biodigestor, obtendo-se um resultado de aproximadamente 51 dias, conforme a Equação 2, que resume que o volume total de material em processo de biodigestão anaeróbia é igual ao volume útil do biodigestor, dividido pela vazão, que se iguala ao volume médio alimentado por dia, realizando-se uma média semanal para obter a vazão.

Equação 2

$$TDH = V / Q$$

Onde:

V = volume útil do biodigestor (m³);

Q = vazão (m³/dia).

Para a realização das análises, as amostras eram coletadas 3 vezes por semana, segundas, quartas e sextas-feiras, totalizando 49 amostras, das quais uma é da cama de aviário, 24 do afluente e 24 do efluente do biodigestor, conforme a Figura 7.

As amostras eram armazenadas em garrafas PET de 500 mL, e conservadas em um congelador até a realização das análises.



Figura 7 - Amostra de entrada e saída de dejetos do biodigestor.
Fonte: UTECH (2013)

O biogás gerado no processo fermentativo era quantificado pelo aparelho medidor de gás fabricado pela LAO Indústria, modelo G 0,6 (Figura 8), projetado para medição de consumo doméstico de gás natural, GLP ou manufaturado. Este aparelho apresentava um sistema de irreversibilidade, evitando que ocorra o fluxo do produto no sentido contrário ao da instalação.



Figura 8 - Medidor de gás.
Fonte: UTECH (2013)

Os dados meteorológicos, referente a temperatura média do período de estudo, foram cedidos pela Estação Climatológica Automática de Marechal Cândido Rondon – PR, também localizada na Estação Experimental. O aparelho que mede a temperatura é da marca Vaisala, modelo HMP45A, classe B, e possui um sensor que mede temperatura no ar, sendo o sensor de platina Pt 100. Ele opera na faixa de - 40 °C a + 60 °C, 500 ms é seu tempo de resposta e exatidão de +- 0,2 °C.

4.1 SÉRIE DE SÓLIDOS

Os métodos utilizados para proceder a determinação dos sólidos foi adaptado a partir do estabelecido pelo APHA (1995), sendo o método 2540-B correspondente ao sólidos totais; e o 2540-E aos sólidos fixos e voláteis.

Inicialmente os cadinhos foram levados para a mufla a 560°C, por um período de duas horas, sendo na sequência, colocados em um dessecador até esfriarem; procedendo-se sua pesagem.

Adicionou-se um volume de 10 mL da amostra aos cadinhos, sendo elas então levadas a estufa a 105°C permanecendo por 8 horas nesta. Após este tempo as amostras foram colocadas no dessecador até esfriarem a peso constante, realizando a pesagem dos cadinhos, obtendo-se o peso seco. Por fim os cadinhos foram levados a mufla novamente, por um período de 2 horas a temperatura de 560°C, sendo resfriados no dessecador, e efetuado sua pesagem.

Para a análise da cama de aviário, foi utilizado 5 gramas de amostra desta matéria, procedendo-se com os mesmos passos utilizados para análise dos dejetos bovinos, sendo todas as amostras analisadas em triplicata.

Os equipamentos utilizados foram disponibilizados no Laboratório de Química Analítica e Produção de Biogás da UFPR – Setor Palotina, sendo eles:

- a) Estufa com circulação e renovação de ar SL-102 da SOLAB;
- b) Balança analítica SHIMADZU modelo AY220; e
- c) Mufla GP Científica – Calibração NBR ISSO/IEC 17025 CAL 0183

4.2 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

A demanda química de oxigênio foi determinada conforme a metodologia de Foresti *et al.* (2005).

Em um tubo de vidro, adicionou-se 2,5mL do dejetos de bovino, diluído na proporção de 1:100, devido a alta concentração de DQO. Na sequência realizou-se a adição de 3,5mL de solução catalítica (Ag_2SO_4) e 1,5mL de solução digestora ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{HgSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$).

Para a amostra da cama de aviário, adicionou-se 3 gramas do material nos tubos de vidro, realizando-se os mesmos procedimentos utilizados para a análise dos dejetos bovinos.

Os tubos contendo a solução foram levados a autoclave, aquecendo lentamente, e mantendo a 120°C por 2 horas, sendo então retirados e embrulhados com papel alumínio, levando-os a geladeira até resfriarem. Após resfriados foi realizando a leitura de absorvância no espectrofotômetro, no comprimento de onda de 620nm.

Os equipamentos utilizados para realização das análises foram disponibilizados pelo Laboratórios de Química Analítica e Produção de Biogás, Laboratório de Química Instrumental da UFPR – Setor Palotina, sendo eles:

Espectrofotômetro modelo NOVA 1600 UV

Autoclave vertical AV Phoenix Luferca.

4.3 CONSUMO DE SUBSTRATO

O crescimento celular depende do consumo de nutrientes, os quais fornecem energia e matéria prima para a síntese da massa molecular, e liberam no meio produtos do seu metabolismo (ZAIAT, 2003)

Para determinação da velocidade de consumo de substrato considerou-se as equações:

Equação 3

$$DQO_F = DQO_0 \times e^{-kt}$$

Para a determinação da velocidade de consumo da DQO, em que:

DQO_F = Demanda química de oxigênio final

DQO_o = Demanda química de oxigênio inicial

k = constante da velocidade de consumo de substrato

t = tempo de detenção hidráulica

Equação 4

$$SV_F = SV_o \times e^{-kt}$$

Para a determinação da velocidade de consumo dos sólidos voláteis, em que:

SV_F = Volume de sólidos voláteis final

SV_o = Volume de sólidos voláteis inicial

k = constante da velocidade de consumo de substrato

t = tempo de detenção hidráulica

Estas reações são classificadas como reações de primeira ordem, nas quais taxa de reação é proporcional à concentração do reagente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das amostras coletadas, foram realizadas as análises físico-químicas de sólidos totais e voláteis, e de demanda química de oxigênio, bem como foram adquiridos os dados referentes a temperatura a produção de biogás, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Semanas	Temperatura média (°C)	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	Biogás (m ³)	DQO (g kg ⁻¹)	SVR (g kg ⁻¹)
1	19,4 ± 1,35	17,2	20,8	5,087	75,321	25,882
2	18,2 ± 2,04	14,9	20,5	2,586	101,076	21,024
3	18,1 ± 1,06	16,7	19,5	5,147	97,972	20,21
4	18,6 ± 1,22	15,7	19,4	5,71	153,715	25,982
5	16,3 ± 2,89	11,2	19,6	4,064	108,811	36,46
6	17,7 ± 2,49	13,7	21,3	2,122	94,441	22,994
7	19,1 ± 2,19	15,6	21,8	5,36	56,764	34,479
8	20,1 ± 0,66	19,1	21,4	7,253	69,995	36,474
Total				31,578	291,56	223,505
Máximo	21,8	19,1	21,8	11,439	44,182	36,474
Mínimo	11,2	11,2	19,4	0,018	27,727	20,21

Tabela 3 - Resultados das análises realizadas.

As quatro primeiras semanas apresentaram temperaturas médias próximas, entre 18,1 e 19,4 °C, e a produção média de biogás próximo de 5 m³, com exceção a segunda semana em que foi produzido apenas 2,586 m³ de biogás. Este resultado pode ser justificado em função da brusca variação das temperaturas, que estavam mais próximas de 20° C, e reduziram para 14,9 °C e 15,7, na quinta e sexta-feira respectivamente.

Já as menores temperaturas ocorreram na quinta semana, sendo registrada mínima de 11,2 °C e máxima de 19,6 °C, com média de 16,3 °C, porém a menor produção de biogás foi constatada na sexta semana, média de 2,122 m³. Observou-se que a quinta semana iniciou com temperaturas mais altas no início, sofrendo uma brusca queda na sexta-feira e permanecendo até no domingo, com temperaturas entre 11,2 °C e 13,7 °C, podendo este ser o motivo da menor produção de biogás ocorrida na semana seguinte.

A sexta semana iniciou com temperaturas mais baixas, 13,7 °C no domingo, aumentando gradativamente, e encerrando a semana com a temperatura máxima registrada, de 21,3 °C.

Na oitava semana foi observada a maior média de temperatura, de 20,1 °C, com temperatura mínima de 19,1 °C, e máxima de 21,4 °C; e a maior produção de biogás, de 7,253 m³.

Na Figura 9 relaciona-se a temperatura média ambiente com o volume de biogás produzido, em termos semanais.

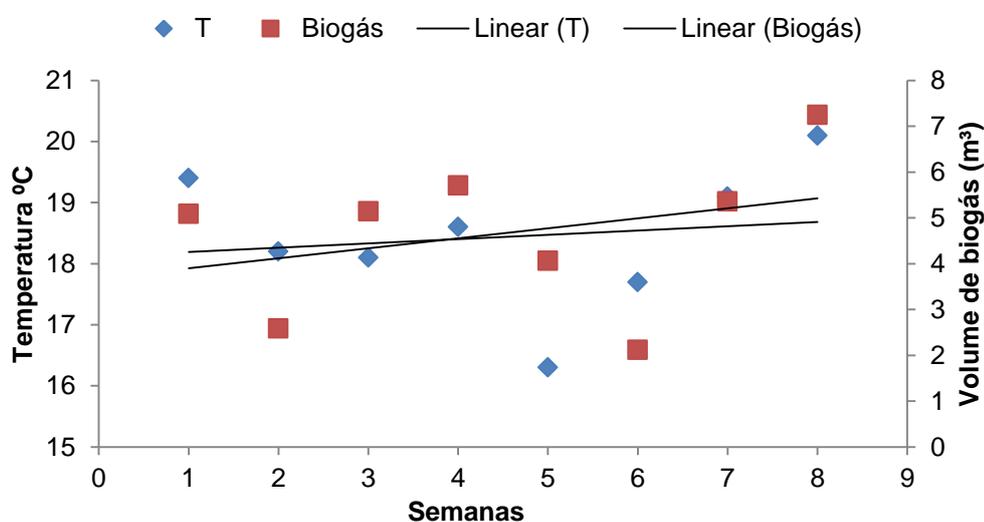


Figura 9 - Relação entre a temperatura e o volume de biogás produzido por semana.

Constatou-se que a produção de biogás acompanhou as temperaturas, havendo maior produção de biogás quando as temperaturas apresentavam-se maiores, e reduzindo a quantidade de biogás produzido quando ocorriam quedas na temperatura. Esta relação pode ser observada na Figura 9, por meio das linhas de tendência, visto que ambas possuem o mesmo sentido. A maior produção de biogás foi registrada na oitava semana (7,253 m³), juntamente com as maiores temperaturas do período analisado (média de 21,1 °C). E as menores temperaturas foram constatadas na quinta semana, porém a menor produção de biogás foi verificada na sexta semana, podendo ser justificado pelo fato a quinta semana terminar com baixas temperaturas na sexta semana iniciar com temperaturas menores, permanecendo baixa até na quarta-feira, variando nestes dias de 11,2 °C à 17 °C.

Conforme SINGH (1994), a produção de biogás é otimizada basicamente em duas faixas de temperatura, a mesofílica (temperatura entre 20°C e 40°C), e a termofílica (entre 50°C e 60°C), e a temperatura ideal esta entre 30°C e 35°C; destacando-se ainda que os sistemas mesofílicos são muito sensíveis a variação da temperatura.

Visto que as análises foram realizadas no período de maio a julho (transição do outono para o inverno), já esperavam-se temperaturas mais baixas. E pode-se observar maior produção de biogás nas semanas em que as temperaturas se mantinham mais próximas de 20°C, e baixa produção nas semanas em que as temperaturas ficaram abaixo, principalmente de 18°C.

5.1 SÓLIDOS VOLÁTEIS

Os sólidos voláteis representam a matéria orgânica contido no resíduo possível de transformação, sendo este o substrato que será convertido em biogás (OLIVEIRA (2006), citado por MIRANDA, LUCAS JUNIOR, THOMAZ (2009)).

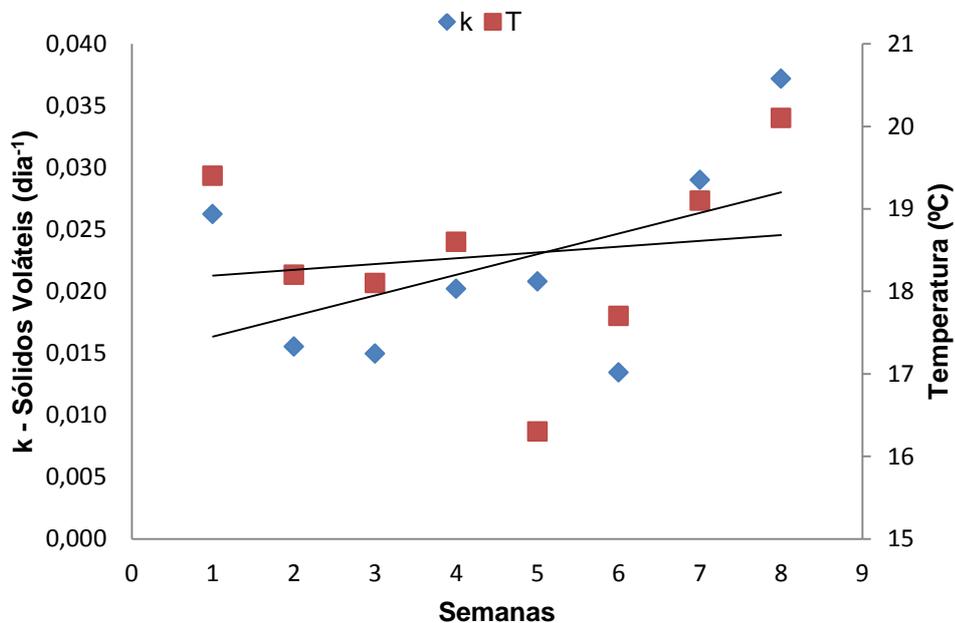


Figura 10 - Relação entre a velocidade de consumo (k) dos sólidos voláteis e a temperatura ambiente.

Com relação ao estudo dos sólidos voláteis, verificou-se que a velocidade do consumo de substrato esta diretamente ligada a temperatura, visto que apresentou comportamento semelhante, com maior velocidade nos períodos de maiores temperaturas, como pode ser observado na Figura 10. A maior velocidade foi verificada na oitava semana ($0,037 \text{ dia}^{-1}$), com média de temperatura de $20,1^{\circ}\text{C}$. E a menor velocidade ocorreu na sexta semana ($0,013 \text{ dia}^{-1}$), em que foi registrada média de temperatura de $17,7^{\circ}\text{C}$. Esta correlação foi comprovada através das linhas de tendência que possuem sentido positivo.

Porém, na quinta semana observou-se a menor média de temperatura registrada no período, influenciou na queda da velocidade do consumo dos sólidos voláteis apenas na sexta semana, conforme observado na Figura 10. Isto se deve ao fato de que na quinta semana ocorreu uma queda brusca na temperatura, que de $18,5^{\circ}\text{C}$, foi para $12,1^{\circ}\text{C}$ na sexta-feira, e permanecendo abaixo de 17°C até na quarta-feira da sexta semana.

Ao analisar a velocidade de consumo dos sólidos voláteis em relação a produção de biogás, observa-se que assim como há relação entre o k e a temperatura, também há relação entre eles.

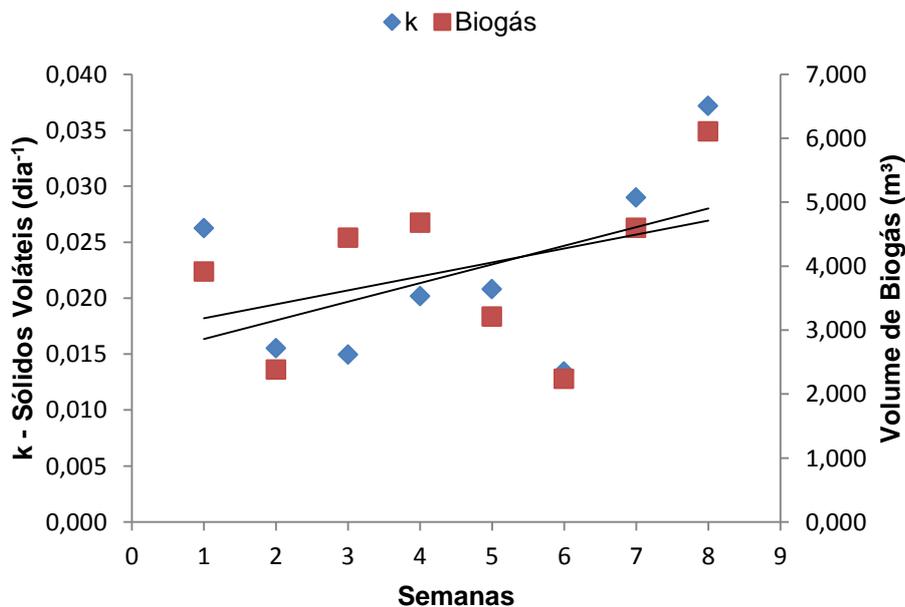


Figura 11 - Relação entre a velocidade de consumo (k) dos sólidos voláteis e a produção de biogás.

Na Figura 11 observa-se que ambos possuem um comportamento semelhante, sendo comprovado por meio das linhas de tendência, que seguem um sentido positivo. Verifica-se que quanto maior a velocidade de consumo de substrato (k), maior a produção de biogás, com exceção das terceira e quarta semanas, em que houve uma discrepância entre a velocidade de consumo dos sólidos voláteis e a produção de biogás, podendo ter ocorrido devido a algum acúmulo no sistema, que mesmo com um k mais baixo, houve um aumento da produção de biogás detectada.

5.2 DQO

O estudo da cinética de consumo de substrato também foi realizado em função do consumo de DQO.

Neste comparou-se a velocidade de consumo (k) de DQO em função da temperatura e do biogás produzido.

Quando comparada a velocidade do consumo de substrato com a temperatura, observou-se que a temperatura não influencia na velocidade do consumo da DQO.

A análise de DQO indica a quantidade de oxigênio que seria consumido por meio de reações químicas de oxidação dos compostos orgânicos, sem a ação dos microrganismos, indicando de forma indireta a quantidade de matéria orgânica presente na amostra (AUGUSTO, 2011).

Na Figura 12 verifica-se que a velocidade do consumo da DQO apresentou comportamento inverso à temperatura, uma vez que esta velocidade reduzia com o aumento da temperatura. Observou-se que quando a temperatura apresentou-se mais alta, por exemplo na primeira e na oitava semana, 19,1°C e 20,1°C respectivamente; a velocidade de consumo de substrato foram as mais baixas obtidas de $0,005\text{dia}^{-1}$ e $0,002\text{dia}^{-1}$, e nas semanas intermediárias, em que a temperatura se apresentou mais baixa, a velocidade de consumo da DQO sofreu um aumento.

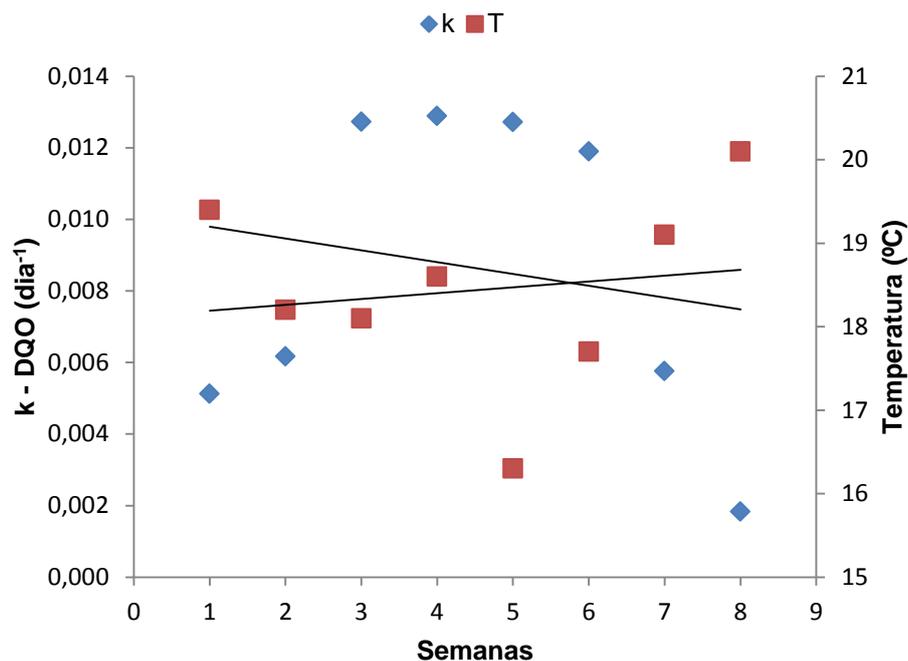


Figura 12 - Relação entre a velocidade de consumo (k) da DQO e a temperatura.

Tendo-se que a temperatura e a produção de biogás se comportam de maneira semelhante; assim como a velocidade de consumo de DQO apresenta comportamento análogo à temperatura, a produção de biogás também apresenta esta relação.

A partir das linhas de tendência, comprovou-se que a velocidade de consumo de substrato apresenta comportamento inverso em relação à temperatura, observado na Figura 12; e ao volume de biogás produzido, observando-se a Figura 13. Esta relação análoga foi comprovada por meio das linhas de tendência, da velocidade de consumo de substrato (k) que apresentou sentido negativo, enquanto que para a temperatura e volume de biogás produzido a linha segue tendência positiva.

Na Figura 13 observa-se que a relação análoga na velocidade de consumo de DQO com relação a produção de biogás. Notou-se que quando houve uma redução na velocidade do consumo de substrato, ocorreu um incremento no volume de biogás produzido. Esta resposta em maior produção de biogás pode ser em função de maior quantidade de substâncias oxidadas.

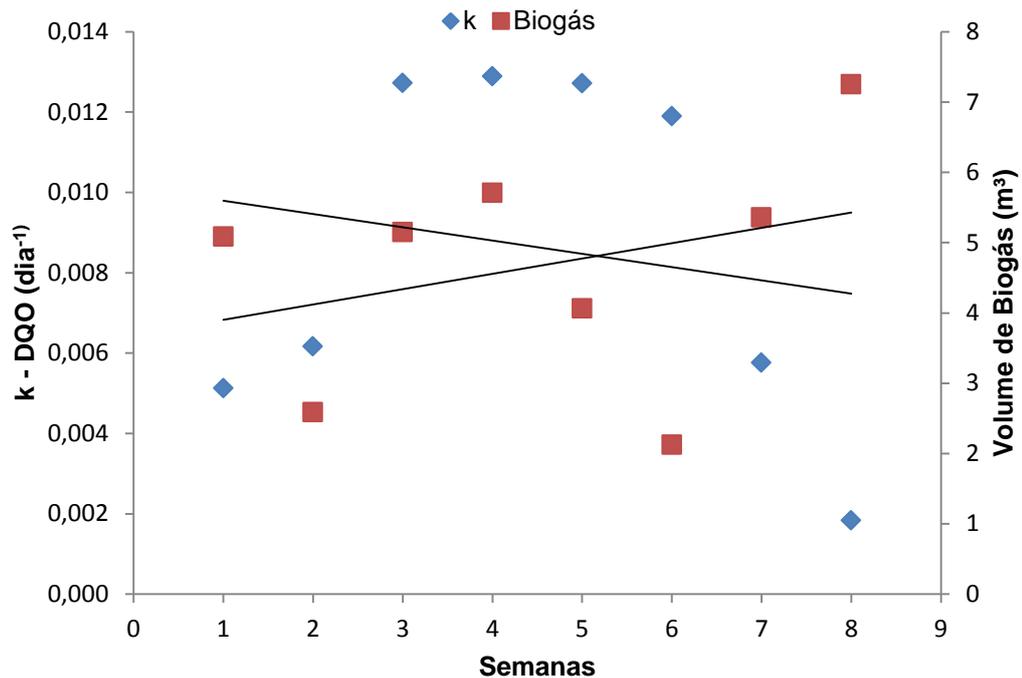


Figura 13 - – Relação entre a velocidade de consumo (k) da DQO e a produção de biogás.

Esta semelhança quanto aos resultados obtidos quando comparada a velocidade de consumo da DQO com a temperatura e o volume de biogás produzido pode ser justificado pelo comportamento semelhante existente ambos.

Ao analisar a velocidade de consumo de sólidos voláteis e velocidade de consumo de DQO, observou-se que os mesmos são inversamente proporcionais, uma vez que quanto maior o k dos sólidos voláteis, menor o k da DQO, como pode ser verificado na Figura 14.

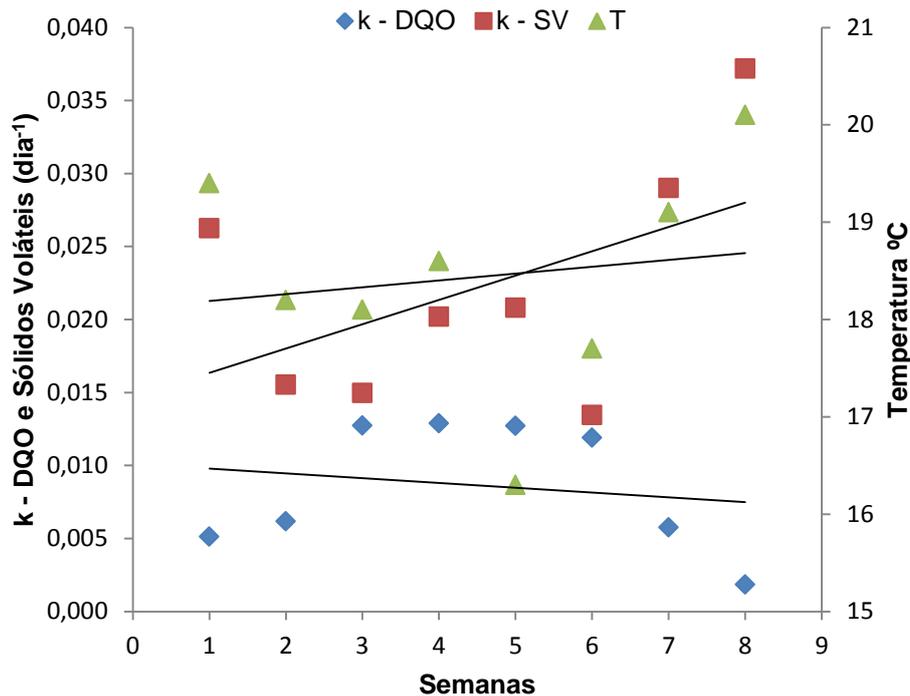


Figura 14 – Comparação entre a velocidade de consumo dos sólidos voláteis (k-sv) e a velocidade de consumo da DQO (k-DQO) em função da temperatura (T).

Visto que a temperatura possui comportamento semelhante à velocidade de consumo de sólidos voláteis, e inverso à velocidade de consumo de DQO, observou-se que quando havia um aumento ou redução da temperatura, ocorria um aumento ou redução, de forma proporcional, na velocidade de consumo dos sólidos voláteis, e contrário com relação a velocidade de consumo da DQO.

As linhas de tendência da Figura 14 comprovam estas relações. A velocidade de consumo dos sólidos voláteis e da temperatura possui comportamento semelhante, visto que a tendência segue sentido positivo. Já a tendência da velocidade de consumo de substrato segue sentido negativo, mostrando o comportamento análogo aos anteriores.

Visto que a DQO analisa a degradabilidade da matéria orgânica, observa-se que a utilizada neste experimento, pela análise da baixa DQO, é dificilmente degradada. Isto se deve a adição da cama de aviário, junto aos dejetos bovinos, visto que em sua composição há materiais ligninocelulósicos.

Conforme Palhares (2004), a cama é denominada todo material disposto sobre o piso dos galpões para servir de leito às aves, sendo uma mistura de ração, penas das aves, excretas e o material utilizado sobre o piso. Dos vários materiais

utilizados como cama pode-se citar a maravalha, resíduos do beneficiamento de madeira, casca de arroz, capim seco, entre vários outros materiais.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

Existe relação direta entre a temperatura e o volume de biogás produzido, uma vez que com o aumento da temperatura ocorre um incremento na produção de biogás;

A velocidade de consumo dos sólidos voláteis apresentou comportamento diretamente proporcional à temperatura e ao volume de biogás produzido, havendo um aumento na produção de biogás sempre que ocorreu aumento da temperatura;

A velocidade de consumo da DQO mostrou comportamento inverso à temperatura e a produção de biogás. Com o aumento da temperatura ocorria a redução na velocidade de consumo da DQO.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, A. G, de. **Sistemas de produção de leite no Brasil**. Juiz de Fora – MG. Dez. 2005. 6f. Circular técnica 85. Disponível em: <http://www.cnpqgl.embrapa.br/nova/publicacoes/circular/CT85.pdf>. Acesso em: 19 out. 2013.

AUGUSTO, K. V. Z. **Tratamento e reuso do efluente de biodigestores no processo de biodigestão anaeróbia da cama de frango**. 85f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000837306&fd=y>. Acesso em: 29 nov. 2013.

BARROS, T. D. **Biogás**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2013. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe3qf9d0sy.html>. Acesso em: 03 nov. 2013.

BERNI, J.V. **Fermentação anaeróbica de dejetos bovinos em biodigestor canadense: análise de macro e micronutrientes de biofertilizante**. 58f. Trabalho de Graduação (Tecnologia em Biocombustíveis) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Araçatuba, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.fatecaracatuba.edu.br/suporte/upload/Biblioteca/BIO%201770710912016%20-%20Autora%20Jessica%20Violin%20Berni.pdf>. Acesso em: 27 out. 2013.

BONTURI, G. de L.; DIJK, M. V. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. **Revista Ciências do Ambiente** - UNICAMP. São Paulo. v. 8, n. 2, p. 88-95, outubro 2012. Disponível em: <http://www2.ib.unicamp.br/revista/be310/index.php/be310/article/viewFile/338/266>. Acesso em: 03 nov. 2013.

COSTA, L. V. C. da. **Produção de Biogás utilizando cama de frango diluída em água e em biofertilizante de dejetos de suínos**. 75f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”, Campus de Botucatu. Botucatu, 2012. Disponível em: <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0796.pdf>. Acesso em: 23 out. 2013.

DONGALA, Abrão Macandi. **Projeto de Biodigestor para Geração de Bioenergia em Sistema de Produção de Suínos**: um estudo de caso da Região de Icolo e Bengo - Angola. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ppgem.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2010/2010DissertacaoAbraoMacandiDongala.pdf>. Acesso em: 27 out. 2013.

ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002. Campinas. **Proceedings**. ANDRADE, M. S. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N.; SILVA, L. G. de S. e; ELIAS, M. J. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na

perspectiva da sustentabilidade ambiental. Campinas, SP. 12f. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/030.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2013.

ENCONTRO DE ENERGERGIA NO MEIO RURAL, 4. 2002, Campinas. **Anais**. DEGANUTTI, R.; PALHACI, MC. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. 5f. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100031&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 27 out. 2013.

ENCONTRO DE ENERGERGIA NO MEIO RURAL, 6. 2006, Campinas. **Anais**. COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M. de; SOUZA, J. de; KOHELER, A. C. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite. 9f. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200053&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 25 out. 2013.

ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6. 2006, Campinas. **Anais**. TURDERA, M. V.; YURA, D. Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de dourados. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS. 7f. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/062.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2013.

FORESTI, E.; ZAIAT, M. MORAES, E. M.; ADORNO, M. A. T.; PAIM, A. P.; RODRIGUES, J. A. D.; RATUSZNEO, S. M; CANTO, C. S.; DAMASCENO, L. H. S.; BORZANI, W. **Métodos de análises físico-químicas de rotina de águas residuárias tratadas biologicamente**. p.85, 2005.

HARDOIM, P. C.; GONÇALVES, A. D. M. A. **Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite**. an.3. ENCONTRO DE ENERGERGIA NO MEIO RURAL. 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100053&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 22 out. 2013.

IBGE. **Produção da Pecuária Municipal 2012**. Rio de Janeiro, v. 40, p.1-71, 2012 . Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Producao_da_Pecuaria_Municipal/2012/ppm2012.pdf>. Acesso em: 19 out. 2013.

JOHANN, A. T. da S. **Desenvolvimento de tecnologia alternativa para tratamento de efluente da limpeza dos currais de gado leiteiro**. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas – Universidade Estadual Oeste do Paraná. Toledo, 2010. Disponível em: <http://projetos.unioeste.br/pos/media/File/eng_quimica/Adriana.pdf>. Acesso em: 17 nov.2013.

KONZEN, E. A.; ALVARENGA, R. C. **Fertilidade do solo**: Adubação orgânica. EMBRAPA, 2013. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/ferorganica.htm>>. Acesso em: 27 out. 2013.

KUNZ, A. **Fundamentos Biológicos para produção de biogás e bioconversão.** Curso de Atualização em Energias do Biogás. Módulo II – Linhas de base para a produção e conversão de energia do biogás. Pág.. 5 a 32.

LAZZARI, N. M. de. **Biogás:** passos para construir biodigestores e suas vantagens. Centro de Produções Técnicas, 2013. Disponível em: <<http://www.cpt.com.br/cursos-eletricidade-fazenda/artigos/biogas-passos-para-construir-biodigestores-e-suas-vantagens>>. Acesso em: 27 out. 2013.

MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar.** 51f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”, Campus de Botucatu. Botucatu, 2011. Disponível em: < <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0708.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2013.

MANSO, K. R. de J.; FERREIRA, O. M. **Confinamento de bovinos:** Estudo do gerenciamento dos resíduos. Universidade Católica de Goiás, 2007. 19f. Disponível em: <<http://www.cigeneticabovina.com.br/pe/dcd768bbf6991ca78688c72e4c51ba09.pdf>> . Acesso em: 20 out. 2013.

MARTINS, C. E.; et. al. **Leite no Brasil e no mundo:** Aspectos socioeconômicos e ambientais. EMBRAPA - Gado de leite 2013. Disponível em: <<http://www.cnpq.embrapa.br/sistemaproducao/41-leite-no-brasil-e-no-mundo-aspectos-socioecon%C3%B4micos-e-ambientais>>. Acesso em: 19 out. 2013.

MENEZES, J. M. C. **Influência da Concentração de sólidos totais e temperatura na bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos.** 99f. Dissertação (Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental) . Universidade Estadual da Paraíba. Disponível em: <<http://pos-graduacao.ascom.uepb.edu.br/ppgcta/download/dissertacoes-defendidas/Dissertacoes2012/jorge%20marcell%20coelho%20menezes.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

MIRANDA, A. P.; LUCAS JUNIOR, J.; THOMAZ, M. C. **Redução de sólidos e produção de biogás em biodigestores abastecidos com dejetos de suínos alimentados com dietas formuladas com milho ou sorgo.** In. Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais I. 11 a 13 de Março de 2009 – Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: SIGERA, 2009. p. 258-263. Disponível em: <<http://sbera.org.br/sigera2009/downloads/obras/061.pdf>>. Acesso em: 18 nov.2013.

OLIVEIRA, M. M. De. **Estudo da inclusão de compartimentos em Biodigestores modelo canadense.** 118f. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos) - Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Agroindustriais e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

Disponível em: <http://coral.ufsm.br/ppgepro/attachments/article/125/2012-%20Matias%20Marchesan%20de%20Oliveira%2006_09_2012.pdf>. Acesso em: 03. Nov. 2012.

ORRICO, A. C. A.; LUCAS JR., J. de L.; ORRICO JR., M. A. P. O. Caracterização e biodigestão anaeróbia dos dejetos de caprinos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v.27, n.3, p. 639-647 set./dez. 2007. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n3/a06v27n3.pdf>>. Acesso em: 27. Out. 2013.

ORRICO JR., M. A. P. **Biodigestão anaeróbia e compostagem de dejetos de suínos, com e sem separação de sólidos**. 93f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal. Jaboticabal, 2007. Disponível em:< <http://www.fcav.unesp.br/download/pgtrabs/zoo/m/3346.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2013.

PALHARES, J.C. P. **Uso da Cama de Frango na Produção de Biogás**. Concórdia. EMBRAPA. 2004, 12 p. Circular Técnica. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/cit41.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2013.

PHOLMANN, Marcelo. **Levantamento de Técnicas de Manejo de Resíduos da Bovinocultura Leiteira no Estado de São Paulo**. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 2000. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000219682&fd=y>>. Acesso em 20 out. 2013.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. **Sólidos Totais**. 2013. Disponível em: <http://www.programaaguaazul.rn.gov.br/indicadores_08.php>. Acesso em: 15 nov.2013.

ROYA, et. al. Biogás – Uma energia limpa. **Revista Eletrônica Novo Enfoque**, Universidade Castelo Branco, v. 13, n. 13, p. 142 – 149, ano 2011. Disponível em: <http://www.castelobranco.br/sistema/novo enfoque/files/13/artigos/12_BunoRoya_Biogas_Prof_Djalma_VF.pdf>. Acesso em: 27 out. 2013.

SAGULA, A. L. **Biodigestão anaeróbia de cama de frango em co-digestão com caldo de cana**. 2012. Tese (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura). Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0744.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

SCHLESINGER, S. **O gado bovino no Brasil**. 2009. 40 f. Disponível em: <http://www.boell-latinoamerica.org/downloads/texto_gado_boll_2009-4.pdf>. Acesso em 19 out. 2013.

(SCHMITT, F.; WESCHENFELDER, S.; VIDI, T. M. **Tratamento anaeróbio de efluentes**. 60f. Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Florianópolis, 2006. Disponível em:

<https://www.google.com.br/search?q=SCHMITT%2C+WESCHENFELDER%2C+VIDI&oq=SCHMITT%2C+WESCHENFELDER%2C+VIDI&aqs=chrome..69i57.2328j0j8&sourceid=chrome&espv=210&es_sm=93&ie=UTF-8>. Acesso em: 25 out. 2013.

SILVA, W. R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. 159f. Tese (Doutorado do Programa de Pós Graduação em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2009. Disponível em: <http://www.quimica.ufpb.br/posgrad/teses/Tese_Wellington_Regis_Silva.pdf>. Acesso em 27, out. 2013.

SLORGON et al. Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas. **Acta Scientiarum Technology**. V. 33.n. 4, p. 421-424. Maringá, 2011. Disponível em: <<http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/viewFile/8259/8259>>. Acesso em: 29 nov. 2013.

TESTON, D. C.: **A produção de energia a partir de esterco bovino como solução ambiental para impactos gerados por sistemas intensivos de produção animal**. 45f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental e Negócios) Setor Energético, Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. 2010. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2010/Monografias/monografia_GA_IEEU_SP_dcteston_20100907_final.pdf>. Acesso em: 19. Out. 2013.

ZAIAT, M. **Desenvolvimento e Análise de Biorreatores Anaeróbios Contendo Células Imobilizadas para Tratamento de Águas Residuárias**: Reator anaeróbio de leito fixo, reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais. Texto (Concurso Público de Título de Livre-Docente) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, nov. 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/18/tde-30012008-100731/pt-br.php>>. Acesso em: 25 set. 2013