



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A
DETERMINAÇÃO DO METANO GERADO EM REATOR DE BANCADA

CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO – 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A
DETERMINAÇÃO DO METANO GERADO EM REATOR DE BANCADA**

JUCIELIO CALADO ALVES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – PPGECA/UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária.

Orientadora: Prof^ª. Dr.^a Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo

**CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO – 2015**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

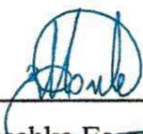
- A472a Alves, Jucielio Calado.
Avaliação dos parâmetros físico-químicos para a determinação do metano gerado em reator de bancada / Jucielio Calado Alves. – Campina Grande, 2015.
74 f. : il. Color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2015.
- "Orientação: Prof.^a Dr.^a Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo".
Referências.
1. Resíduos Sólidos. 2. Biogás. 3. Biorreator. 4. Concentração de Metano. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Melo, Márcio Camargo de. III. Título.

CDU 628.4.032(043)

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A
DETERMINAÇÃO DO METANO GERADO EM REATOR DE BANCADA**

JUCIELIO CALADO ALVES

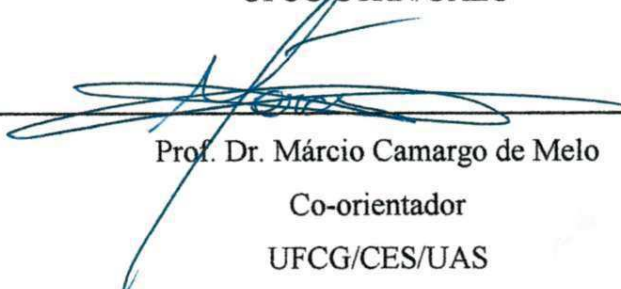
Dissertação apresentada e aprovada em ____ / ____ / ____ pela banca examinadora,
constituída dos seguintes membros:



Prof.^a Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Orientadora

UFMG/CTRN/UAEC



Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo

Co-orientador

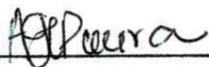
UFMG/CES/UAS



Prof.^a Dra. Patrícia Hermínio Cunha Feitosa

Examinadora Interna

UFMG/CTRN/UAEC



Prof.^a Dra. Ana Ghislane Henrique Pereira van Elk

Examinadora Externa

UERJ

“Se você não puder ser uma árvore frondosa no alto de uma montanha. Seja um pequeno arbusto na beira do rio. Mas seja o melhor arbusto que você puder ser.”

(D. Mallock)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio Alves Calado e Josefa Maria Calado Alves, e a todos os familiares e amigos por terem me apoiado durante toda a construção do meu conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, por está sempre na minha vida dando força e coragem para enfrentar os obstáculos e por ter proporcionado a realização de mais um sonho.

À minha família, especialmente aos meus pais Antônio Alves Calado e Josefa Maria Calado Alves, que acreditaram em mim, que sempre me apoiaram na caminhada do saber, e, sobretudo, pelo o imenso amor.

À minha orientadora a professora Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, pela colaboração e orientação desta dissertação.

Ao meu co-orientador o professor, Dr. Márcio Camargo de Melo pela participação efetiva e indispensável na orientação deste trabalho.

Às professoras, Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elke a Dra. Patrícia Herminio Cunha Feitosa pela valiosa contribuição que prestaram na banca de qualificação.

Sou grato a todo o Grupo de Geotecnologia Ambiental – GGA/UFCEG, pelas ideias compartilhadas, pelos conselhos e comentários valiosos que contribuíram para a elaboração e melhoria deste trabalho.

Aos alunos e funcionários da Escola Severino Cabral, que colaboraram no desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas, dores compartilhadas e pela verdadeira amizade que construímos, em particular aqueles que estavam sempre ao meu lado, por todos os momentos que passamos durante esses dois anos, meu especial agradecimento. Sem vocês essa trajetória não seria tão prazerosa.

Ao departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina grande.

Ao CNPQ, pela concessão da bolsa de estudos e que, assim como a Vale do Rio Dice financiaram e custearam o experimento.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18

CAPÍTULO 2

2	FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RSU.....	21
2.1.1	Fases da digestão dos RSU.....	21
2.2	PRODUÇÃO DE GASES.....	26
2.3	TIPOS DE BIORREADORES.....	27
2.3.1	Modelo de Lagoas Cobertas.....	28
2.3.2	Modelo Indiano.....	29
2.3.3	Modelo Chinês.....	30
2.3.4	Biorreatores de Mistura Completa.....	30
2.3.5	Sistema de Operação dos Biodigestores.....	32
2.4	PARÂMETROS FÍSICOS E FÍSICO – QUÍMICOS.....	32
2.4.1	Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos sólidos urbanos.....	33
2.4.2	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	33
2.4.3	Teor de Umidade.....	35
2.4.4	Ácidos Graxos Voláteis (AGV).....	35
2.4.5	Alcalinidade.....	36
2.4.6	Cloretos.....	36
2.4.7	Teor de Sólidos Voláteis.....	37

CAPÍTULO 3

ARTIGO 01: Influência da Capacidade Tamponante dos Resíduos Sólidos Orgânicos na Produção de Metano.....	38
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

INTRODUÇÃO.....	39
METODOLOGIA	40
RESULTADOS E DISCURSÃO.....	42
CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	48

AERTIGO 02:Estimativa da Produção de Metano em Biorreator Anaeróbio de Bancada Preenchido com Resíduos Sólidos Orgânicos.....

INTRODUÇÃO.....	52
METODOLOGIA.....	53
RESULTADOS E DISCURSÃO.....	56
CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSÃO GERAL.....	65
REFERÊNCIAS.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Fases da Digestão dos RSU.....	22
Figura 02: Fases da degradação dos resíduos nos Aterros Sanitários.....	23
Figura 03: Modelo de Biodigestor Indiano.....	28
Figura 04: Modelo de Biodigestor Chinês.....	29
Figura 05: Modelo de Biodigestor de Lagoas Cobertas.....	30
Figura 06: Sistema de Operação em Batelada.....	31
Figura 07: Sistema de Operação Contínuo.....	31

Artigo Influência da Capacidade Tamponante dos Resíduos Sólidos Orgânicos 01: na Produção de Metano

Figura 01: Esquema geral do biorreator anaeróbio utilizado na pesquisa.....	41
Figura 02: Concentração de ácidos voláteis e alcalinidade em função do tempo.....	43
Figura 03: Valores de pH e concentrações de CH ₄ em função do tempo.....	45
Figura 04: ACP para o tempo, alcalinidade, ácidos voláteis, pH e CH ₄	47

Artigo Estimativa da Produção de Metano em Biorreator Anaeróbio de 02: Bancada Preenchido com Resíduos Sólidos Orgânicos

Figura 01: Esquema geral do biorreator anaeróbio utilizado na pesquisa.....	54
Figura 02: Concentração de metano e temperatura em função do tempo.....	57
Figura 03: Volume e concentração de metano em função do tempo.....	58
Figura 04: ACP para concentração de CH ₄ , volume de CH ₄ captado e temperatura.....	60

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 01: Volume de Metano Produzido entre T e T+1.....	55
Equação 02: Volume de Metano Acumulado (mL).....	55
Equação 03: Taxa de Geração de Metano (mL/dia).....	56
Equação 04: Eficiência do Metano (%).....	56

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIACÕES

ACP – Análise de Componentes Principais

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPA – Agência Ambiental Norte-Americana

EPE -Empresa de Pesquisa Energética

GLP - Gás Liquefeito do Petróleo

H₂ - Hidrogênio

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de

LGA – Laboratório de Geotecnia Ambiental
Mudanças Climáticas)

MME – Ministério de Minas e Energia

N₂ – Nitrogênio

NaHCO₃– Bicarbonato de Sódio

NH₃ – Amônia Livre

NTK - Nitrogênio Amoniacal Total

O₂ – Oxigênio

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVC – Policloreto de Vinila

RS – Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

UNFCCC - United Nations Framework Convention On Climate Change

RESUMO

O estudo dos parâmetros físico-químicos como o pH, alcalinidade, ácidos voláteis, entre outros, ajuda a entender a dinâmica de decomposição dos RS, assim como, a produção do biogás que deve ser estimada com o intuito de se conhecer o seu potencial de geração energético afim de utiliza-lo na manutenção dos aterros sanitários e as diversas finalidades existentes. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi estimar, com base nos parâmetros físico-químicos, a produção de metano em um reator anaeróbio de bancada preenchido com resíduos orgânicos. Para se estimar a produção de metano foi construído e instrumentado um biorreator anaeróbio em escala de bancada, no qual foi preenchido com resíduos orgânicos triturados provenientes de uma escola de ensino médio da cidade de Campina grande – PB. Com o intuito de monitorar a degradação dos resíduos, estes foram coletados quinzenalmente pela válvula de coleta de resíduo. As medições das concentrações de metano no biorreator foram realizadas em média a cada 6 dias, durante 355 dias de monitoramento. A estimativa da produção de metano foi mensurada através da adaptação do modelo matemático utilizado por Harrieset al., 2001 e ABE, 2014, que considerou as pressões internas no biorreator, temperaturas diárias e concentração de metano no biorreator. Com os resultados foi observado que, devido à adição de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) os resíduos presentes no biorreator apresentaram concentrações de alcalinidade resistentes às influências dos ácidos voláteis o que contribuiu para o tamponamento do meio e, assim, favoreceu a atividade das arqueas metanogênicas que consumiram os ácidos, oriundos da degradação, e o converteram em metano. Deste modo, destaca-se que através do método de estimativa utilizado, o volume de CH_4 acumulado durante o período de monitoramento do biorreator foi de aproximadamente 67,5 L e que se comparado com sistemas semelhantes, esta produção apresentou-se elevada. Conclui-se que, a capacidade de tamponamento do meio contribuiu para a atividade das arqueas metanogênicas, o que favoreceu as concentrações de metano que apresentaram valores entre 40 a 59 %. Observa-se que, este estudo apresentou uma importância científica, no qual poderá contribuir para gestão dos resíduos sólidos, permitindo estimar a real produção de metano dos resíduos sólidos orgânicos e o seu potencial de contaminação. Por fim, os objetivos deste estudo foram alcançados de forma satisfatória, permitindo estimar o potencial de produção de metano do biorreator estudado.

Palavras-chave: biogás; biorreator; concentração de metano; resíduos sólidos.

ABSTRACT

The physical-chemical parameters such as pH, alkalinity, volatile acids, among others, help to understand the dynamics of decomposition of the RS, as well as the production of biogas to be estimated in order to know their potential energy generation in order to use it in the maintenance of landfills and the various existing purposes. Thus, the objective of this research was to estimate, based on the physicochemical parameters, methane production in an anaerobic reactor bench filled with organic waste. To estimate methane production was built and instrumented an anaerobic bioreactor bench scale, in which was filled with crushed organic waste from a high school in the city of Campina great - PB. In order to monitor the waste degradation, these were collected fortnightly by waste collection valve. The measurements of methane concentrations in the bioreactor were held on average every 6 days, during 355 days of monitoring. The estimation of methane production was measured by adapting the mathematical model used by Harries et al., 2001 and EBA, 2014, which considered the internal pressures in the bioreactor, daily temperatures and methane concentration in the bioreactor. With the results it was observed that due to the addition of sodium bicarbonate (NaHCO_3) the residues present in the bioreactor showed alkalinity concentrations resistant to the influences of the volatile acids which contributed to the buffering the medium and thus favored the activity of methanogenicarchaea who consumed acids, derived from the degradation, and converted into methane. Thus, it is emphasized that through used estimation method, the volume of CH_4 accumulated during the bioreactor monitoring period was approximately 67.5 L and compared with similar systems, this production was up high. In conclusion, the buffering capacity of the medium contributed to the activity of methanogenicarchaea, which favored methane concentrations that varied from 40-59%. It is observed that, this study presented a scientific importance, which may contribute to solid waste management allowing to estimate the actual production of methane from organic waste and its potential contamination. Finally, the objectives of this study were achieved satisfactorily, allowing to estimate the methane production potential of the studied bioreactor.

Keywords: biogás; bioreactor; methane concentration; solid waste.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

As atividades do homem produzem diversos tipos de Resíduos Sólidos (RS) que apresentam variações na composição e volume devido às práticas de consumo e método de produção, porém os seus efeitos negativos refletem na saúde humana e no meio ambiente (RIBEIRO, 2009).

A mitigação dos impactos negativos da disposição inadequada dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) pode ser feita através do uso de aterros sanitários. Os aterros sanitários são ricos em matéria orgânica que, de forma natural, possuem carga energética que pode ser convertida em energia através da decomposição biológica.

A decomposição da matéria orgânica levando em conta as condições adequadas dos parâmetros físicos, químicos e biológicos produz um subproduto gasoso, denominado biogás, que contém, entre outros elementos, o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO), e o gás sulfídrico (H_2S) (MELO, 2011). O reaproveitamento do biogás é uma alternativa que apresenta benefícios ambientais, tecnológicos, econômicos e contribui para uma melhor gestão dos RS.

O estudo dos parâmetros físico-químicos como o pH, alcalinidade, ácidos voláteis, entre outros, ajuda a entender a dinâmica de decomposição dos RS, assim como, a produção do biogás que deve ser estimada com o intuito de se conhecer o seu potencial de geração energética a fim de utilizá-lo na manutenção dos aterros sanitários.

Um método representativo para analisar as reações de produção de biogás é o uso de reatores anaeróbios de bancada. Eles contribuem para o monitoramento das condições que comprometem as reações físico-químicas e microbiológicas nos aterros sanitários. Assim, os processos operacionais nos reatores devem ser semelhantes ao que acontece em escala real e adequada de acordo com as condições ambientais.

Vale ressaltar que a Lei 12.305/2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), incentiva a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético dos resíduos sólidos. Sendo assim, o estudo dos fatores físico-químicos que influenciam a produção de biogás em reatores de bancada é de grande

importância para o processo de gestão dos resíduos sólidos orgânicos, podendo contribuir para a diminuição da geração dos gases presentes nos aterros sanitários.

Os reatores anaeróbios de bancada também pode ser uma alternativa de tratamento dos RS, pois a matéria orgânica presente no seu interior, quando estabilizada pelos microrganismos, pode ser disposta de forma ambientalmente correta, o que diminui as concentrações dos gases nos aterros sanitários.

Considerando-se a importância do uso de reatores no entendimento dos fenômenos envolvidos na decomposição dos RS e na produção de biogás, com caráter qualitativo e quantitativo, a pesquisa foi realizada por meio da construção de um reator anaeróbio de bancada preenchido com resíduos sólidos orgânicos, no qual possibilitou estudar as influências dos parâmetros físico-químicos na produção do biogás.

Esta pesquisa fez parte de uma parceria entre Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Escola de Ensino Médio Severino Cabral da cidade de Campina Grande – Paraíba, que colaborou com os resíduos orgânicos estudados. Vale salientar que para o desenvolvimento deste estudo houve a participação dos professores e alunos da escola assim como, dos pesquisadores do Grupo de Geotecnologia Ambiental - GGA/UFCG.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estimar com base nos parâmetros físico-químicos a produção de metano em um reator anaeróbio de bancada preenchido com resíduos orgânicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorar os parâmetros físico-químicos que influenciam a produção de metano no biorreator anaeróbio de bancada;
- Identificar fatores intervenientes na produção de metano;
- Proporcionar condições favoráveis ao processo de produção de metano;

- Avaliar a influência da capacidade tamponante dos resíduos sólidos orgânicos na produção de metano;
- Testar modelo matemático para estimar a produção do metano.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O estudo está disposto em 4 capítulos. O capítulo 1 aborda a introdução que contém um breve embasamento teórico sobre a problemática dos resíduos sólidos e o uso de biorreatores anaeróbios, além disso, neste capítulo encontra-se os objetivos que justificam o desenvolvimento desta pesquisa.

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica que dá um arcabouço teórico sobre a digestão anaeróbia, assim como, os parâmetros físico-químicos e os modelos de previsão de produção de biogás.

O capítulo 3 apresenta estudos no formato de artigos, que relacionam os fatores físico-químicos e a estimativa da produção de biogás com o reator anaeróbio de bancada.

Por fim, no capítulo 4 estão presentes as conclusões e referências deste estudo.

CAPÍTULO 2

Neste capítulo encontram-se os aspectos que norteiam a digestão anaeróbia, produção de gases, tipos de biorreatores, parâmetros físico-químicos e os modelos de previsão da produção de biogás. Esta sequência do estudo ajuda a entender os mecanismos envolvidos na produção de biogás, assim como a sua estimativa.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RSU

O aquecimento global é um assunto que tem recebido uma atenção especial por parte dos ambientalistas. Com origem natural, esse fenômeno é potencializado pela emissão dos gases de efeito estufa oriundos das atividades antrópicas. Assim, a redução na emissão destes gases se tornou prioridade das autoridades ambientais, que além de proporem a redução, também incentivam o reaproveitamento de forma a diminuir os impactos ambientais.

Outra preocupação dos ambientalistas está relacionada à exploração dos recursos hídricos como fonte energética. Essa exploração gera impactos ambientais que aceleram a degradação dos recursos naturais. Com isso, alternativas direcionadas a diminuir o uso dos recursos hídricos são evidenciadas em propostas ambientais como o reaproveitamento energético dos ventos, sol, mar, entre outros.

O reaproveitamento energético dos gases produzidos na decomposição dos RS é uma das alternativas que reduz a exploração dos recursos hídricos e gera, entre outros impactos positivos, a geração de biocombustível, que ajuda a suprir a necessidade energética e a diminuir a concentração dos gases de efeito estufa. Assim, segundo Lora & Andrade (2009), os danos ambientais causados pela exploração acelerada dos combustíveis fósseis podem ser minimizados com a utilização energética do biogás.

Descoberto por Shirley em 1667, o biogás, que também é conhecido como gás dos pântanos, pode ser produzido de forma natural nas diversas localidades do planeta, como em pântanos, oceanos, fontes antropogênicas, em plantações de arroz alagado, tratamento de efluentes, aterro sanitário entre outras (CASSINI, 2003). Desta forma, o biogás é definido por

Martins & Assis (2007), como gás natural resultante da fermentação anaeróbia de materiais orgânicos, tais como, dejetos de animais e resíduos orgânicos em condições adequadas de umidade.

De acordo com DEAN (1996), por apresentar uma grande extensão territorial, o Brasil dispõe de grande quantidade de biomassa, que pode ser empregada aos modelos existentes de geração de energia.

A matéria orgânica que também é chamada de biomassa pode ser utilizada como biocombustível e bioenergia, porém, quando obtida da biomassa nova, como o estrume, restos de ração entre outros, esta gera energia através do biogás gerado pela degradação anaeróbia. No entanto, quando é proveniente da biomassa velha, como madeiras e palhas, esta é utilizada para geração de energia térmica por meio da queima desses materiais (ITAIPU, 2008).

De acordo com o IPCC (2006), os principais materiais responsáveis pela geração de biogás são materiais orgânicos, tais como, papel e papelão, têxteis e madeira.

O biogás produzido nos aterros sanitários tem em sua composição elementos como o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), traços de vapor de água (H_2O vapor), gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), amônia (NH_3), mercaptanas e outros gases (PRADO et al., 2010). Para Wereko-Brobby & Hagen (2000), o biogás é o produto final da digestão anaeróbia, no qual é composto basicamente por cerca de 60 % de metano (CH_4), 35% de dióxido de carbono (CO_2) e 5 % de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Vale ressaltar que o metano (CH_4) é cerca de 21 vezes mais poluente do que o dióxido de carbono (CO_2) (MAGALHÃES *et al.*, 2010).

De acordo com Silva et al. (2012), nos aterros sanitários a decomposição e produção de biogás acontecem de forma crescente e podem atingir valores máximos entre 4 e 6 anos. Em seguida, essa produção decresce lentamente até o fim da estabilização que ocorre após 15 e 20 anos de fechamento de uma célula.

A composição dos resíduos sólidos, as interferências físico-químicas e biológicas podem influenciar na quantidade e qualidade da produção dos gases. Conforme Chernicharo (2007) existem outros aspectos que influenciam a produção do biogás, tais como: o tipo de reator, a atividade metanogênica da biomassa, o tempo de residência celular, a presença de substâncias inibidoras e/ou limitantes do próprio processo e as variações nos parâmetros quantitativos operacionais do reator. Desta forma, a produção de biogás pode refletir a eficiência de operação dos aterros sanitários de RSU.

Com um potencial de 216 m³ de biogás por tonelada de resíduos, um aterro sanitário no período de um ano produz aproximadamente 5,8 milhões de m³ de biogás. Portanto, após uma década de funcionamento a energia gerada neste sistema chegaria a 432 MW/mês o que poderá abastecer a 2.800 residências (NECKER & ROSA, 2013).

Deste modo, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) (2008), no Brasil o potencial de geração de energia dos resíduos sólidos é em torno de 32,1 % do consumo total nacional (EPE, 2011). Assim, com um poder calorífico entre 5.000 e 6.000 Kcal/m³ e por ser menos tóxico, o metano pode substituir o uso de combustíveis fósseis, como por exemplo, o gás liquefeito do petróleo (GLP), o que ajuda a diminuir as concentrações dos gases causadores do efeito estufa e o aumento da geração de empregos para os trabalhadores especializados (OLIVEIRA & ROSA, 2003; TEIXEIRA, 2003).

2.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RSU

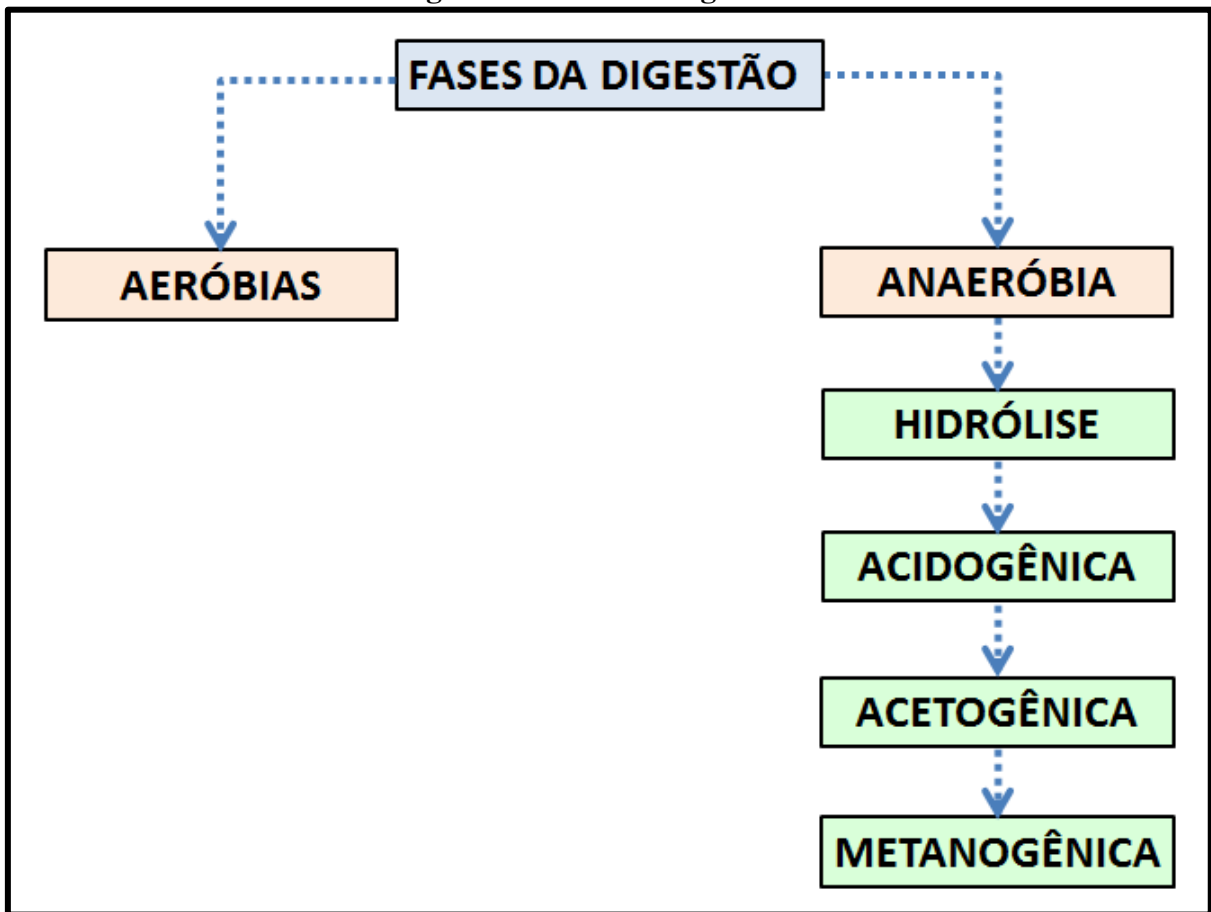
Segundo Kunz (2010), o processo de decomposição anaeróbia passa por fases na qual participam grupos de microrganismos que atuam de maneira interdependente e produzem como produto final o metano.

Existem substâncias de fácil e de difícil assimilação pelos microrganismos e por isso, faz-se necessário conhecer as etapas de degradação para compreender a velocidade em que os resíduos sólidos orgânicos são decompostos e assim poder prever o potencial de produção de biogás da massa residual.

2.2.1 Fases da digestão dos RSU

Conforme demonstrado na Figura 01, a digestão dos RS ocorre em duas fases principais: a digestão aeróbia e a digestão anaeróbia.

Figura 01 -Fases da digestão dos RSU

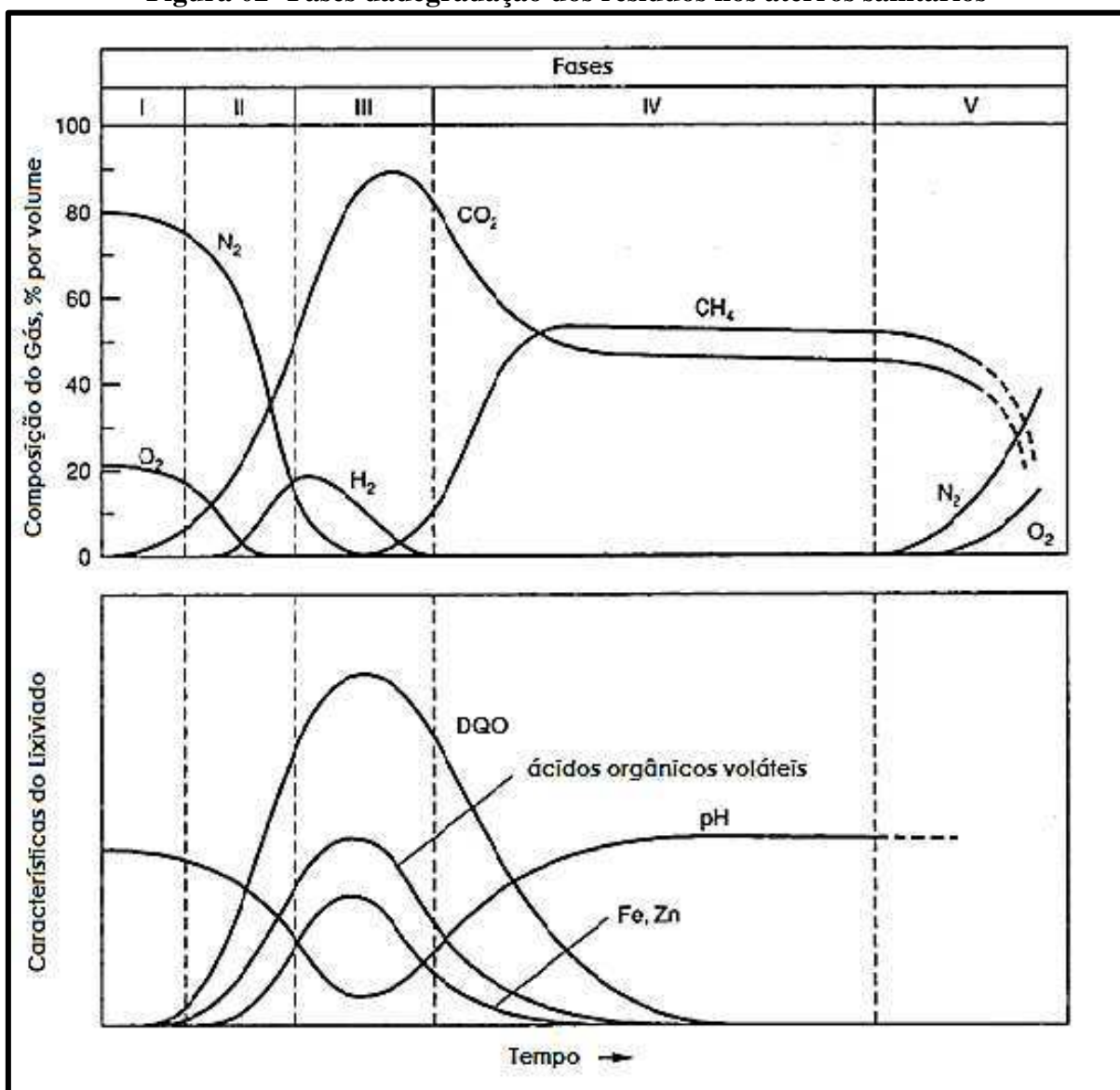


Fonte: Arquivo Pessoal

Na digestão aeróbia os microrganismos, tais como, os fotossintéticos, as leveduras e os fungos, degradam os resíduos na presença de oxigênio e liberam grande quantidade de calor, o que faz aumentar a temperatura do aterro (CASTILHOS JUNIOR et al., 2003). Esta fase é de curta duração, pois, se inicia durante o processo de cobertura da massa de resíduos, e com isso, torna-se limitada, causada pela falta de oxigênio e pela presença de uma determinada umidade no interior da célula. Como subproduto, este processo gera água, gás carbônico, gás nitrogênio e elevadas concentrações de sais de alta solubilidade dissolvidos no líquido resultante (TCHOBANOGLIOUS et al. 1993; CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

Tchobanoglou et al. (1993), como demonstrado na Figura 02, divide a digestão dos RS em cinco fases, nas quais apresentam características específicas, como a produção de lixiviado, chorume, gases, entre outros.

Figura 02 -Fases da degradação dos resíduos nos aterros sanitários



Fonte: TCHOBANOGLOU et al. (1993)

Estas fases são descritas como:

- Fase I (ajuste inicial): Nesta etapa os resíduos depositados nos aterros sanitários são degradados pelos microrganismos aeróbios. A grande demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no interior das células de resíduos diminui a concentração do oxigênio presente no meio, o que torna limitado o tempo de duração desta fase. Assim, os microrganismos convertem os resíduos em dióxido de carbono, água e calor. Por fim, devido a baixas concentrações de oxigênio os microrganismos facultativos começam a atuar na degradação da massa de resíduos sólidos.

- Fase II (transição): na presença de baixas concentrações de oxigênio nesta fase atuam os microrganismos anaeróbios que reduzem o nitrato e sulfato a gás nitrogênio e a sulfeto de hidrogênio. Os microrganismos responsáveis pela produção de metano e dióxido de carbono convertem a matéria orgânica complexada em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Devido as concentrações de ácidos orgânicos e os efeitos do dióxido de carbono, o pH do lixiviado começa a diminuir. Ao término deste processo verifica-se uma diminuição das concentrações dos gases O_2 e N_2 e a geração acelerada de CO_2 .
- Fase III (ácida): esta fase apresenta a formação de metano e a conversão dos compostos intermediários de baixa massa molecular em ácido acético e quantidades pequenas de hidrogênio e ácidos complexados. Os microrganismos não metanogênicos presentes nesta fase são bactérias anaeróbias e facultativas. Devido a presença de ácidos orgânicos dissolvidos e a elevada concentração de CO_2 , os valores de pH do chorume tendem a diminuir aproximadamente para 4.0, o que favorece a solubilização dos metais pesados entre outros resíduos inorgânicos.
- Fase IV (metanogênica): neste processo atuam os microrganismos metanogênicos estritamente anaeróbios que convertem os ácidos acéticos e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2 . O pH do chorume chega a valores que ficam entre 6.8 a 8.0 e as concentrações de DBO, DQO e condutividade elétrica tendem a diminuir. Nesta etapa os constituintes inorgânicos, assim como, as concentrações de metais pesados irão diminuir.
- Fase V (maturação): nesta fase as concentrações de materiais biodegradáveis não disponíveis começam a reagir, porém a geração de biogás diminui devido ao consumo dos nutrientes nas fases anteriores. Com relação ao teor de umidade, este permanece a migrar de forma lenta pela massa de resíduos. Por fim, de acordo com as medidas adotadas para fechar os aterros sanitários, as concentrações de biogás podem apresentar traços de nitrogênio e oxigênio.

Abiodigestão anaeróbia é definida por Medeiros et al. (2013), como um processo bioquímico e físico-químico no qual as bactérias degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio e produz como subproduto o biogás e obiofertilizante.

Segundo Barreto & Campos (2009), na digestão anaeróbia também conhecida como fermentação metanogênica atuam bactérias fermentativas hidrolíticas, bactérias fermentativas acidogênicas, bactérias acetogênicas e as *Archaeas* metanogênicas que produzem metano.

Este processo passa por quatro fases de degradação, como a, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Essas reações ocorrem por meio de enzimas produzidas pelas bactérias que transformam as macropartículas em micropartículas (SCHUMACHER, 1983). Portanto, essas fases podem ser definidas como:

- Hidrólise: nesta fase atuam as bactérias fermentativas hidrolíticas que convertem por meio de enzimas a matéria orgânica complexada em moléculas mais simples. Assim, as proteínas são convertidas em aminoácidos, os carboidratos se reduzem a açúcares solúveis e os lipídios em ácidos graxos de cadeia longa e glicerina (CHERNICHARO, 1997; SWIFT et al., 1979).
- Acidogênese: os compostos produzidos na fase de hidrólise são metabolizados e fermentados por grupos de bactérias acidogênicas, estritas e facultativas, que excretam moléculas orgânicas mais simples, como por exemplo: ácidos graxos voláteis de cadeias mais curtas, gás carbônico, hidrogênio, álcoois, ácido lático, ácido propiônico, ácido butírico, amônia, sulfeto de hidrogênio, acetato e novas células bacterianas. Vale ressaltar o elevado nível da acidez, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Amoniacal Total (NTK) e ácidos voláteis nesta fase (CHERNICHARO, 1997; VAVILIN et al., 1997).
- Acetogênese: é a fase em que os produtos gerados pelas bactérias acidogênicas, são oxidados pelas bactérias acetogênicas a substratos mais simples, que são assimilados pelas bactérias metanogênicas. Este processo torna o meio ácido, o que ajuda a solubilizar os compostos inorgânicos, assim como, contribui para o aparecimento dos gases sulfídrico (H₂S), amônia e outros gases responsáveis pelos maus odores. Os produtos desta fase são: ácidos acéticos, dióxido de carbono, hidrogênio e o acetato (CHERNICHARO, 1997; CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

- **Metanogênese:** é a fase final da decomposição anaeróbia, na qual os produtos gerados na fase acetogênica são metabolizados pelas arqueasmetanogênicas que, em meio neutro ou próximo à neutralidade, liberam metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) como produto final deste processo. Nesta fase, os valores de pH e alcalinidades tendem a aumentar gradativamente, devido à atividade metabólica dos microrganismosacetogênicos e metanogênicos que consomem os ácidos voláteis simples, o que diminui suas concentrações, assim como, a DQO, DBO e Sólidos Voláteis(CHERNICHARO, 1997; TCHOBANOGLOUS et al., 1993).

Mesmo com a estabilização de grande parte dos compostos orgânicos, ao término destas etapas o processo de degradação pode durar por muitos anos devido a presença de materiais recalcitrantes, o que indica uma baixa degradabilidade comprovada pela relação DQO/DBO. Assim, quanto maior o valor da relação destes dois parâmetros, menor a biodegradabilidade (CONTRERA, 2008).

Por fim, fica evidente nas fases de degradação anaeróbiaa importância da existência de uma população microbiana com funções metabólicas distintaspara decompor os resíduos sólidos e com isso proporcionar de forma eficiente uma maior produção de biogás nos aterros sanitários.

2.3 TIPOS DE BIORREATORES USADOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O uso de biorreatores em condições controladas permite analisar os processos de degradação dos resíduos sólidos, a geração dos lixiviados e gases. Além disso, o uso desta tecnologia torna viável a realização da caracterização dos resíduos, o que não é possível de ser feito nos aterros sanitários (LEVINE et al., 2005).

Para que o processo de biodigestão anaeróbia ocorra em menos tempo do que nos aterros sanitários, nos biodigestores faz-se necessário a combinação de um inóculo no qual,este pode ser de origem animal (esterco bovino, suíno, entre outros) ou o próprio substrato estabilizado proveniente de processos anteriores, que irão acelerar as reações devido a sua alta concentração de microrganismos. Ele também inibe algumas interferências dos fatores físico-químicos, assim como equilibra o sistema, ajuda na estabilização dos RS e na produção do biogás (XAVIER; LUCAS JÚNIOR, 2010).

De acordo com Barrera(1993), os diversos tipos de biodigestores são estruturados, basicamente, por duas partes na qual, a primeira é constituída por um tanque onde ocorre a digestão da biomassa, e a segunda pelo gasômetro que armazena o biogás.

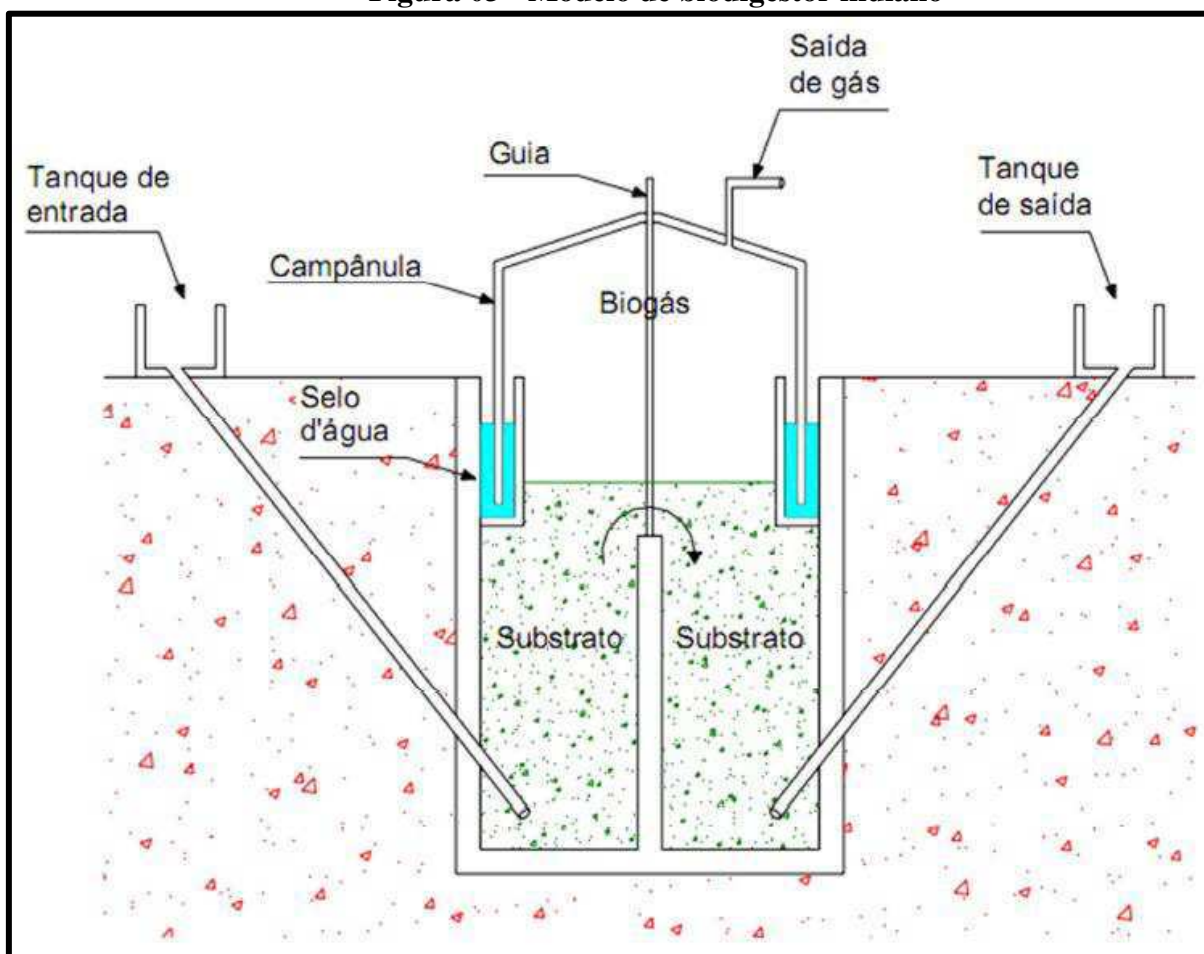
Citadas por Oliver et al. (2008), as vantagens do uso de biorreator podem ser descritas como:

- A geração de biogás, energia renovável e limpa;
- A produção de biofertilizante;
- Melhoria das condições de higiene para os animais e as pessoas;
- Benefícios ambientais;
- Benefícios econômicos e sociais;
- Tecnologia sustentável.

2.3.1 Modelo Indiano

O modelo indiano, demonstrado na Figura 03, tem como característica a presença de uma campânula flutuante que permite uma pressão constante no interior do biodigestor, possui um reservatório dividido em dois compartimentos que contribui para um contato maior do substrato com a câmara de fermentação, uma caixa de entrada do substrato e outra para a saída e o ponto de coleta de biogás (DEGANUTTI et al., 2002). A entrada dos substratos é feita no primeiro tanque, e no segundo tanque localiza-se a saída. Conforme o processo de digestão acontece, os substratos se tornam menos densos e começam a transbordar para o segundo tanque. Esse modelo apresenta desvantagem relacionada ao custo com o gasômetro que é feito em aço e de difícil fabricação (NISHIMURA, 2009).

Figura 03 - Modelo de biodigestor indiano

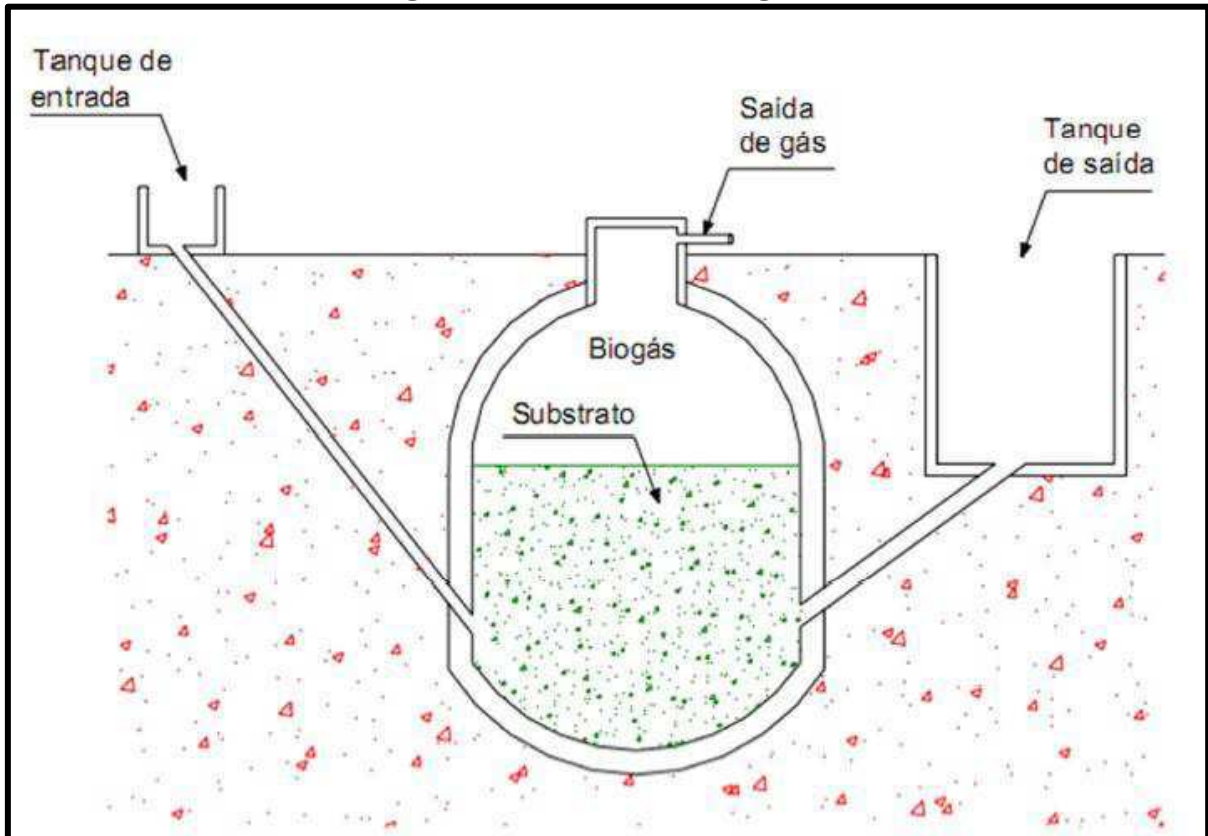


Fonte: NISHIMURA (2009)

2.3.2 Modelo Chinês

A Figura 04 demonstra o modelo Chinês que é construído abaixo do solo, tem uma estrutura de alvenaria em formato cilíndrico no teto e base, uma caixa para a alimentação e outra para a saída do material estabilizado e um ponto de coleta para o biogás. Este modelo tem baixo custo, pois, não possui gasômetro para o armazenamento do biogás. Apresenta funcionamento com base no princípio da prensa hidráulica, ou seja, o aumento da pressão causado pelo acúmulo do biogás desloca o substrato para a caixa de saída. A sua desvantagem está relacionada ao fato de apresentar pressão variável o que, pode causar uma descompressão e assim, mudar o sentido do fluxo no sistema (PINTO, 1999; CASTANHO; ARRUDA, 2008; KUNZ 2010).

Figura 04 - Modelo de biodigestor chinês



Fonte: NISHIMURA (2009)

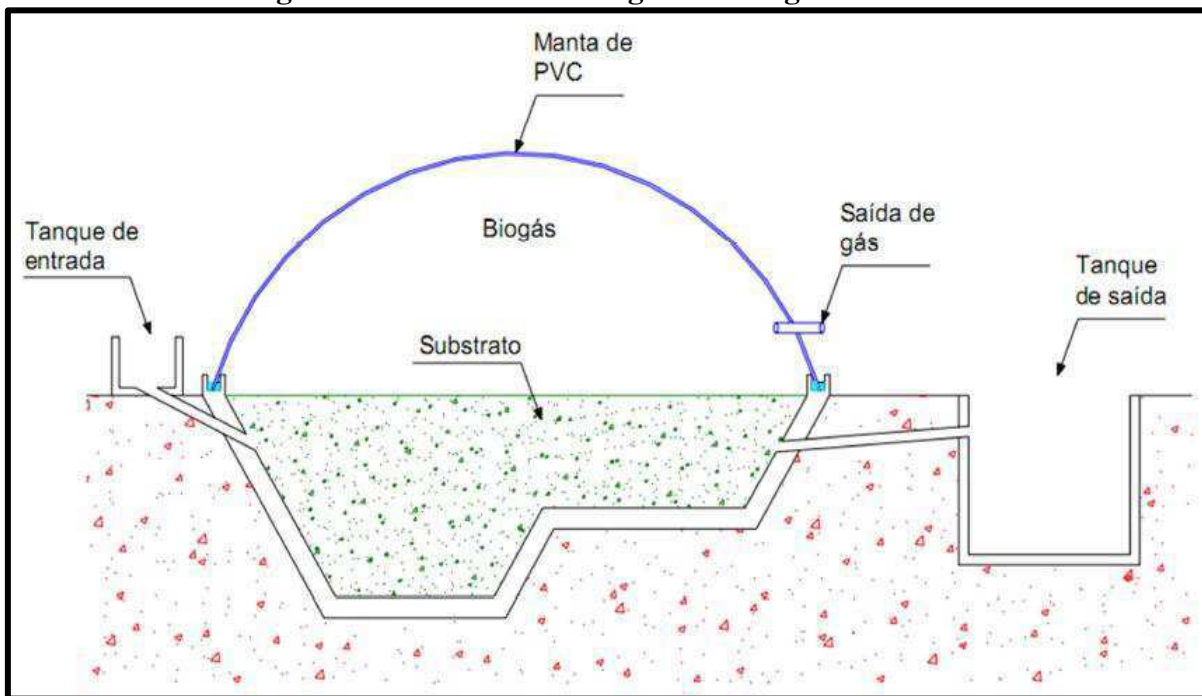
2.3.3 Modelo de Lagoas Cobertas

O modelo de lagoas cobertas também chamado de modelo da marinha ou canadense, assim como demonstrado na Figura 05, é um tipo de biodigestor horizontal no qual, apresenta uma largura maior que a profundidade. Possui como características uma caixa de carga em alvenaria por onde o substrato é adicionado, uma campânula de PVC flexível que se expande com a produção do biogás, uma profundidade abaixo do nível do solo que ajuda a equilibrar as mudanças de temperatura e um ponto de coleta para os materiais estabilizados e para o biogás (CASTANHO; ARRUDA 2008; KUNZ 2010).

Este modelo é indicado para clima quente e com pouca oscilação, pois os microrganismos anaeróbios necessitam de uma temperatura ideal para degradarem os substratos. A vantagem deste modelo é permitir uma produção constante de biogás devido à carga diária de sólidos voláteis. Apresenta como desvantagem o elevado custo de produção,

porém este possui menor custo de operação do que o modelo Indiano e Chinês (CASTANHO; ARRUDA 2008; WINROCK, 2008).

Figura 05 - Modelo de biodigestor de lagoas cobertas



Fonte: NISHIMURA (2009)

2.3.4 Biodigestores de Mistura Completa

Os biodigestores de mistura completa apresentam estrutura de concreto em formato de tanque, e podem ser construídos acima ou abaixo da terra com cobertura de lonas plásticas. São indicados para o tratamento de efluentes que apresentem altas concentrações de sólidos, entre 3 e 40%. Se comparado com as lagoas que exigem uma maior área, este sistema apresenta como vantagem o uso de pouco espaço (MAURÍCIO, 2009).

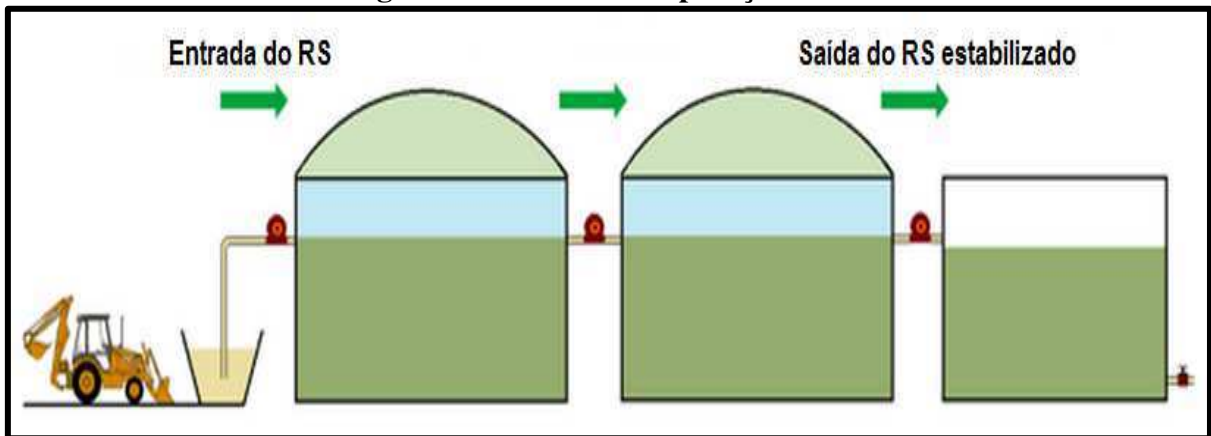
2.3.5 Sistema de Operação dos Biodigestores

Os biodigestores podem operar em dois sistemas distintos: o sistema em batelada e o contínuo.

Como demonstrado na Figura 06, os biodigestores em bateladas podem ser configurados com um ou mais tanques de reação por onde de forma intermitente o substrato

diluído é adicionado e extraído. Vale ressaltar que a produção do biogás não ocorre de forma contínua e, portanto, nas situações que se deseja uma produção constante utilizam-se vários tanques que possibilitem a partida e esvaziamento em sequência dos biodigestores(AUSTERMANN et al, 2007).

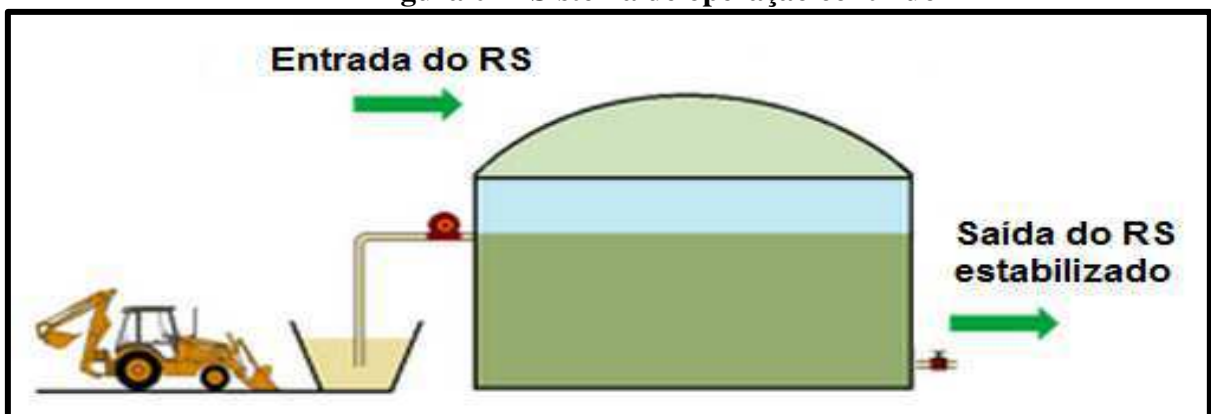
Figura 06 - Sistema de operação em batelada



Fonte: Adaptado de SOUZA et al., (2014)

Já no sistema contínuo os substratos são introduzidos e extraídos dos biodigestores sem interrupções, conforme demonstrado na Figura 07. Assim, a produção de biogás se torna constante o que, contribui para a otimização da geração de energia (AUSTERMANN et al, 2007).

Figura 07 - Sistema de operação contínuo



Fonte: Adaptado de SOUZA et al., (2014)

2.4 PARÂMETROS FÍSICOS E FÍSICO-QUÍMICOS

Dentre os parâmetros relacionados ao processo anaeróbio de produção de biogás pode-se destacar o pH, temperatura, teor de sólidos totais, entre outros, que influenciam diretamente no sistema e podem causar o desequilíbrio nos resultados da biodigestão (MEDEIROS et al., 2013).

Os estudos tecnológicos relacionados à produção de biogás tem mostrado grande margem de inconfiabilidade. Uma análise criteriosa dos parâmetros que comprometem a produção de biogás deve ser feita, com o intuito de aperfeiçoar os sistemas para uma melhor representatividade (FOLLETTO et al., 2008). Assim, o monitoramento dos parâmetros físico-químicos permite criar condições adequadas para o desenvolvimento dos microrganismos e identificar as interferências que influenciam o processo de digestão, o que ajuda a acelerar a estabilização dos resíduos e a produção de metano (BORGLIN et al., 2004; CAMPOS et al., 2005).

2.4.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica dos RSU

A composição gravimétrica e volumétrica é um parâmetro de grande importância para gestão de RSU, pois de forma representativa permite estimar o volume e o peso ocupado por cada tipo de resíduo nas células de aterro (PEREIRA, *et al.*, 2010).

A intensificação deste parâmetro ocorre por uma variedade de fatores, tais como, o clima, a cultura e os hábitos das comunidades locais. Deste modo, o comportamento geotécnico dos aterros poderá ser afetado caso não haja uma avaliação prévia das reais condições dos RSU de cada região.

De acordo com Melo (2011) durante todo o processo de monitoramento dos aterros sanitários o comportamento físico, físico-químico e microbiológico pode ser analisado a partir da composição gravimétrica e volumétrica que influenciam em toda a dinâmica dos aterros. Assim, segundo Van Elk (2007), a produção de biogás é influenciada pelo volume e tipo de resíduos orgânicos presentes nos aterros sanitários, ou seja, quanto maior a quantidade de matéria orgânica, maior será a taxa de produção de biogás.

Portanto, vale lembrar que para cada tonelada de resíduos depositada nos aterros o potencial de produção de biogás será de 216 m³ (NECKER & ROSA, 2013).

2.4.2 Temperatura

Segundo Van Elk (2007), muitos autores recomendam temperaturas distintas para que ocorra uma atividade bacteriana capaz de degradar com eficiência a massa de resíduos, porém a faixa ideal de temperatura para este processo seria entre 30 a 55 °C o que, conseqüentemente contribuirá para uma elevada produção de biogás. Com isso, Ferreira (2006) afirma que temperaturas abaixo de 30 °C podem interferir na atividade metabólica dos microrganismos o que retarda a digestão dos resíduos. Portanto, o crescimento bacteriano pode ser influenciado pelas faixas de temperaturas e pelas pequenas oscilações que afetam o desenvolvimento das populações microbianas responsáveis pela degradação dos substratos e produção de metano. Deste modo, Chernicharo (2000), demonstra a seguir as respectivas faixas e suas temperaturas:

- Faixa psicrófila: entre 0°C e 20°C;
- Faixa mesófila: entre 20°C e 45°C;
- Faixa termófila: entre 45°C e 70°C.

As variações de temperatura do ambiente interno e externo do sistema podem fornecer ou extrair calor para a massa de resíduos. Este fenômeno é explicado pelos fatores típicos de invernos prolongados e as baixas temperaturas que desestabilizam a atividade das bactérias mesófilas o que inibe o processo de bio decomposição anaeróbia. Porém, a situação tende a ser amenizada em regiões de clima tropical, pois as variações de temperatura interna e externa da massa de resíduo se apresentam menores (AUDIBERT, 2011).

Por fim, conclui-se que os microrganismos anaeróbios decompositores dos resíduos sólidos não suportam interferências provocadas pelas variações de temperaturas e, por isso, a produção de biogás se torna dependente deste parâmetro, pois são as bactérias, em especial as metanogênicas, as responsáveis pela produção do biogás.

2.4.3 Potencial Hidrogeniônico - pH

Segundo Egreja Filho (1996), de forma direta o pH pode influenciar na atividade enzimática dos microrganismos e com isso comprometer a digestão anaeróbia dos resíduos. Devido à alteração do potencial de oxi-redução do meio este parâmetro também interfere de forma indireta na toxicidade de alguns compostos.

De acordo com Campos et al. (2006), o pH pode ser ajustado a um valor determinado, porém esse valor pode vir se alterar devido a atividade metabólica dos microrganismos que tornam o meio ácido ou básico.

O pH na fase inicial de decomposição dos resíduos sólidos encontra-se baixo devido a atividade das bactérias hidrolíticas fermentativas que produzem grande quantidades de ácidos graxos voláteis de cadeia curta. Porém, conforme o avanço das fases de degradação, estes ácidos são consumidos pelas bactérias metanogênicas somados aos cátions de nitrogênio amoniacal originados da degradação de proteínas, tornam o meio alcalino e consequentemente elevam os valores do pH e a produção de metano (CAMPOS, 1999; CATAPRETA, 2008).

Conforme Campos et al. (2006), a grande maioria das bactérias permitem variações de pH entre 5 e 9 no entanto, o crescimento destes microrganismos assim como a produção de biogás, necessitam de um pH compreendido entre 6,5 e 7,5. Porém Riuji (2009), ressalva a possibilidade de estes organismos produzirem metano numa faixa de pH entre 6 e 8.

Os valores de pH correspondentes a cada fase da degradação, são citados por Lima (1995), como:

- Fase aeróbia: pH (neutro/básico) acima de 7,0
- Fase acetogênica: pH na faixa de 5,2 a 6,5
- Fase metânica instável: pH na faixa de 6,8 a 7,2
- Fase metânica estável: pH na faixa de 7,0 a 7,2

Com base neste contexto este parâmetro apresenta uma íntima relação com a alcalinidade e com os ácidos voláteis presentes na massa residual. Assim, Van Haandel e Lettinga (1994), relata que o aumento das concentrações de ácidos graxos voláteis reduz o pH para valores abaixo de 6,3 o que pode causar a fermentação ácida e consequentemente desestabilizar o sistema pela inibição da atividades das bactérias metanogênicas.

Portanto, os valores de pH fora da faixa aceitável pelos microrganismos afetam a produção de metano.

2.4.4 Teor de Umidade

De acordo com Van Elk (2007), os RSU do Brasil apresentam grande quantidade de matéria orgânica que associada às condições de umidade e temperatura demonstra o potencial de geração de biogás do país.

Segundo Alcantara (2007), inúmeros fatores podem influenciar no teor de umidade dos resíduos sólidos, tais como, composição desses resíduos, as condições climáticas, os procedimentos operacionais de coleta e transporte, o projeto e manejo do aterro e a evolução do processo de decomposição química e microbiológica.

Com relação aos efeitos da umidade na decomposição dos resíduos, segundo Alves (2008), se comparado com o rendimento em campo o biogás produzido nos estudos em escala laboratoriais tem-se apresentado baixo devido o teor de umidade adotado nos experimentos.

Por fim, o percentual de umidade presente na massa de resíduo que seja favorável a produção de metano encontra-se entre 60 a 80%. Assim, a atividade metabólica dos microrganismos pode ser prejudicada caso a umidade esteja com concentrações altas, pois o transporte de massa pode ficar limitado e com isso a penetração e distribuição dos microrganismos na massa residual ficarão comprometidas (LOPES, 2000; OLIVEIRA, 2009; CHANAKYA et al., 2007; MEIRA, 2009). No entanto, Van Elk (2007), relata que os baixos teores de umidade podem comprometer a decomposição da matéria orgânica, pois os microrganismos decompositores necessitam da presença de água nos interstícios do maciço de resíduos para que possam degradar a massa residual.

2.4.5 Ácidos Graxos Voláteis (AGV)

De acordo com Dillenburg (2006), os ácidos graxos voláteis podem ser definidos como ácidos graxos solúveis em água que apresentam até seis carbonos, baixo peso molecular e podem ser destilados a pressão atmosférica.

O monitoramento das concentrações de ácidos voláteis é de grande importância para se manter eficiente o processo de digestão anaeróbio, pois sem o controle do acúmulo de ácidos voláteis a alcalinidade será praticamente toda consumida, o que tornará o pH baixo e consequentemente irá afetar a produção de biogás devido a inibida atividade das bactérias metanogênicas (CONTRERA, 2008).

Portanto, se o processo de degradação não possuir concentrações de alcalinidade suficiente para resistir às influências dos AGV, o desenvolvimento das bactérias metano será inibido e a produção de metano ficará comprometida o que pode torna o sistema ineficiente.

2.4.6 Alcalinidade

Segundo Chernicharo (1997), a alcalinidade e o pH são ligados intrinsecamente no entanto, são derivados de agentes distintos logo, as concentrações de espécies alcalinas tem a função de manter o pH resistente a ação dos ácidos voláteis e a precipitar os metais pesados presentes em torno da massa residual. Portanto, os metais alcalinos e alcalinos-terrosos controlam a acidez o que estimula os processos digestivos dos microrganismos e por isso ajuda a aumentar a degradação dos resíduos.

Porém, valores elevados de pH também podem inibir o funcionamento dos sistemas metabólicos e portanto, a acidez contribui no controle das altas concentrações de alcalinidade do meio. (POLVINELLI, 1987).

Para neutralizar a atividade dos compostos resultantes da digestão dos substratos complexos e manter um meio com pH favorável às populações metanogênicas, faz-se necessário monitorar e quando necessário corrigir as concentrações da alcalinidade presentes nos reatores anaeróbios (BARCELOS, 2009).

Conforme Chernicharo (1997) para elevar o tamponamento dos sistemas em que a alcalinidade é insuficiente deve-se adicionar produtos químicos tais como, a cal hidratada, cal virgem, carbonato de sódio, bicarbonato de sódio, hidróxido de sódio e bicarbonato de amônia.

Ao término da fase metanogênica a alcalinidade tende a se elevar a valores que ficam entre 6.000 a 14.000 mg/L (LIMA, 1995).

2.4.7 Cloretos

Os íons cloretos é um importante indicador de contaminação por lixiviado, pois são originados a partir das substâncias inorgânicas e estão presentes em águas residuárias, resíduos sólidos e em lixiviados (RIBEIRO, 2012).

O monitoramento das concentrações de cloretos além de indicar o nível de degradação biológica que se encontram os resíduos, também é um importante parâmetro na avaliação da

presença de contaminantes derivados da composição dos resíduos após a destinação final nos aterros sanitários (RIBEIRO et al., 2012).

Quando presente na massa de resíduos, o alumínio, se associa a matéria orgânica e pode formar um complexo que influencia fortemente no tamponamento do pH na atividade do alumínio (BLOOM et al., 1979; García-Rodeja et al., 2004).

2.4.8 Teor de Sólidos Voláteis

O teor de sólidos voláteis pode ser definido como a quantidade de resíduos sólidos orgânicos presentes na massa residual e que levado a temperaturas inferiores a 550 °C tende a se volatilizar. Assim, este parâmetro é de grande importância na estimativa da quantidade de matéria orgânica e na avaliação do comportamento das propriedades físicas, químicas e biológicas da massa de resíduo, pois a redução de suas concentrações indica o nível de estabilização e degradabilidade em que se encontra o material orgânico (LEITE, 2008; ARAÚJO et al. 2010).

Vale lembrar que os sólidos voláteis presentes no chorume são oriundos da decomposição da fração de resíduos facilmente degradáveis (MONTEIRO, 2003).

CAPÍTULO 3: ARTIGO 01

INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE TAMPONANTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS NA PRODUÇÃO DE METANO

RESUMO

A capacidade de tamponamento dos resíduos sólidos orgânicos, estudados a partir dos parâmetros físico-químicos pH, alcalinidade e ácidos voláteis são importantes para avaliar a decomposição dos resíduos sólidos ao longo do tempo e, assim, entender as suas influências sobre as concentrações de metano. Desta forma, a pesquisa teve como objetivo avaliar a capacidade de tamponamento do processo de degradação dos resíduos sólidos orgânicos e sua influência sobre as concentrações de metano. Para este estudo, foi construído e instrumentado um biorreator anaeróbio em escala de bancada. Os resíduos orgânicos desta pesquisa foram provenientes de uma escola de ensino médio da cidade de Campina Grande-PB-Brasil, onde foram triturados e utilizados para o preenchimento do biorreator. Com o intuito de monitorar a degradação dos resíduos, estes foram coletados quinzenalmente pela válvula de coleta de resíduo. Com os resultados foi observado que, os resíduos presentes no biorreator apresentaram concentrações de alcalinidade resistentes às influências dos ácidos voláteis o que contribuiu para o tamponamento do meio e, assim, favoreceu a atividade das arqueas metanogênicas que consumiram os ácidos oriundos da degradação, e o converteram em metano. Pode-se concluir que a capacidade de tamponamento do meio contribuiu para a atividade das arqueas metanogênicas, o que favoreceu as concentrações de metano.

Palavras-chave: biorreatores; capacidade tamponante; produção de metano; resíduos sólidos.

CAPACITY OF INFLUENCE BUFFERING SOLID WASTE ORGANICS IN METHANE PRODUCTION

ABSTRACT

The buffering capacity of organic solid waste, studied from the physico-chemical parameters pH, alkalinity and volatile acids are important to evaluate the decomposition of solid waste

over time and thus understand their influences on methane concentrations. Thus, the research aimed to evaluate the buffering capacity of the degradation process of organic solid waste and its influence on methane concentrations. For this study, was built and instrumented an anaerobic bioreactor bench scale. Organic waste of this research were from a high school in the city of Campina Grande - PB - Brazil, where they were crushed and used to fill the bioreactor. In order to monitor the waste degradation, these were collected fortnightly by waste collection valve. With the results it was observed that the residues present in the bioreactor showed alkalinity concentrations resistant to the influences of the volatile acids which contributed to the buffering the medium and thus favored the activity of methanogenicarchaea who consumed acids derived from the degradation, and the converted to methane. It can be concluded that the buffering capacity of the medium contributed to the activity of methanogenicarchaea, which favored methane concentrations.

Keywords:bioreactors; buffering capacity; production of methane; solid waste.

INTRODUÇÃO

Estudar a capacidade tamponante do sistema de degradação de resíduos sólidos é de extrema importância, por permitir avaliar a resistência do pH, devido à presença de ácidos ou bases, e assim acompanhar o processo de degradação dos resíduos orgânicos e os subprodutos gerados (SOUSA et al., 2013). Desta forma, a ação decompositora dos microrganismos pode ser afetada pelos fatores físico-químicos, os quais devem ser monitorados e controlados a fim de se manter o equilíbrio do sistema.

O monitoramento destes parâmetros pode ser realizado através de biorreatores anaeróbios, que são tecnologias de tratamento de resíduos sólidos amplamente utilizados para se compreender a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos, assim como a produção de biogás.

Destaca-se que os fatores físico-químicos estão intrinsecamente correlacionados e refletem a taxa de decomposição dos resíduos sólidos. Tendo em vista que o meio anaeróbio exige condições ambientais adequadas, qualquer desequilíbrio nestes fatores pode comprometer a atividade dos microrganismos decompositores da massa de resíduo o que irá refletir na eficiência da produção de biogás.

Dentre os parâmetros físico-químicos que refletem a decomposição dos resíduos destacam-se:pH, alcalinidade total e ácidos voláteis.

Os ácidos voláteis e a alcalinidade segundo Pereira et al. (2009), são importantes parâmetros na avaliação da digestão anaeróbia, pois a presença de substâncias tais como: ácidos, carbonatos, bicarbonatos e hidroxilas, no processo de degradação dos resíduos sólidos, podem influenciar nos valores de pH e conferir ao meio, diferentes comportamentos que afetam a atividade das bactérias decompositoras dos resíduos sólidos e assim comprometer a produção de biogás.

A produção de biogás, de acordo com Tchobanoglous et al. (1993), pode ser favorecida quando o pH do meio encontra-se entre 6,5 a 7,5 em função das atividades das arqueas metanogênicas, o que corresponde em uma maior produção de biogás. Porém, para manter essa faixa ótima de pH, próximo à neutralidade e resistente as alterações causadas pelos ácidos voláteis, faz-se necessário que os valores de alcalinidade estejam em concentrações elevadas para que atue como meio tamponante.

Uma forma de interpretar os resultados do comportamento tamponante da degradação dos resíduos sólidos orgânicos é o uso de métodos estatísticos. Dentre as inúmeras ferramentas do estudo estatístico, destaca-se a Análise em Componentes Principais (ACP) que correlaciona às variáveis envolvidas e explica as variâncias existentes entre os parâmetros.

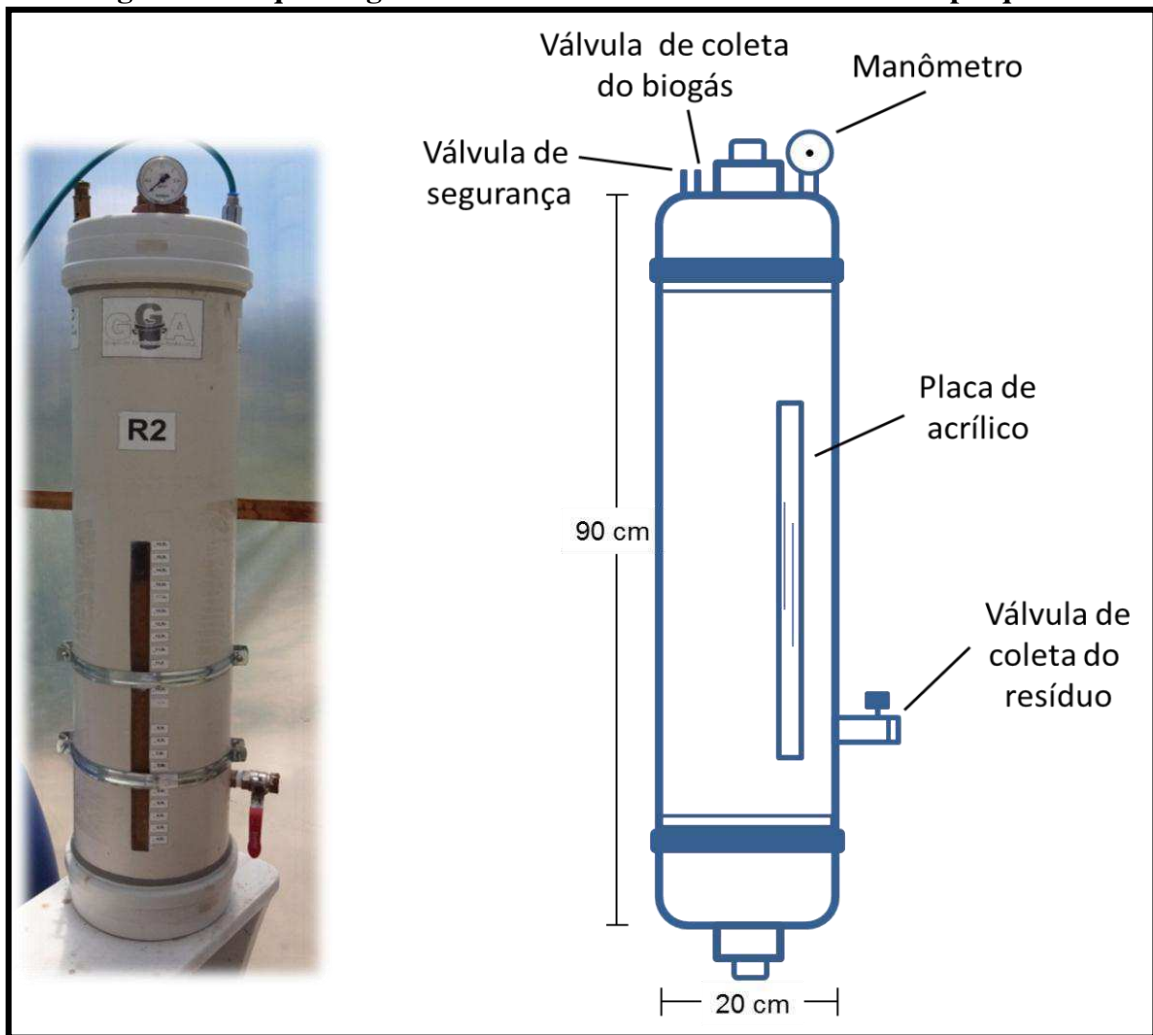
O objetivo deste trabalho é avaliar a capacidade tamponante do processo de degradação dos resíduos sólidos orgânicos e suas influências nas concentrações de metano (CH_4) presentes em um biorreator anaeróbio de bancada.

METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG em parceria com a Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral, localizada no município de Campina Grande – PB- Brasil.

Este estudo foi desenvolvido em três etapas, a primeira etapa foi realizada na UFCG, onde foi construído, instrumentado, testado e ajustado um biorreator com capacidade de 28 L (Figura 01).

Figura 01-Esquema geral do biorreator anaeróbio utilizado na pesquisa



Fonte:Dados da pesquisa, 2014

Nas dependências da UFCG também foram realizadas as análises dos parâmetros físico-químicos: pH, alcalinidade total e ácidos voláteis que seguiram a metodologia estabelecida pelo Standard Methods (AWWA, APHA, WEF, 2012).

A segunda etapa consistiu na coleta dos resíduos sólidos gerados pela escola, na qual foi realizado o estudo da composição gravimétrica e volumétrica destes resíduos. Após a realização destas composições, a parte da fração orgânica foi utilizada para o preparo da amostra, onde foram adicionados 25 Kg de resíduos orgânicos, 14 L de água, que correspondeu a cerca de 80 % da umidade total, o que segundo a USEPA (1991), uma umidade alta em torno dos 60 a 80 % pode aumentar a produção de metano, 3,750 Kg de esterco bovino (inóculo), correspondendo a 15 % da massa total de resíduos, o que de acordo com Lopes et al., (2003), essa é a proporção ideal para uma boa produção de metano no biorreator. Com o intuito de elevar o valor do pH para 7,5, também foi acrescentado de forma

gradativa 1,282 Kg de Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3), o que contribuiu para o tamponamento do meio fortalecendo a alcalinidade. No entanto, deste volume total já homogeneizado foi retirado 15 L para o preenchimento do biorreator previamente construído.

A terceira etapa constitui-se por meio das coletas das amostras de resíduos orgânicos presentes no biorreator do monitoramento das concentrações de metano. Destaca-se que a primeira amostra analisada dos resíduos se deu durante o preenchimento do biorreator. Já as demais amostras foram coletadas quinzenalmente em um período de 355 dias de monitoramento, no qual o biorreator era agitado manualmente, com intuito de se obter uma amostra homogênea, e em seguida, através da válvula de coleta do resíduo retirava-se uma amostra de aproximadamente 250 mL do biorreator sendo as amostras encaminhadas para o Laboratório de Geotecnia Ambiental, localizado na UFCG, onde foram realizadas as análises de pH, alcalinidade total e ácidos voláteis. As concentrações de metano (CH_4) foram monitoradas através do detector portátil e automático de gases com infravermelho Dräger modelo X - am 7000. Inicialmente era realizada a calibração do equipamento e em seguida o cromatógrafo portátil era ligado, e com auxílio da mangueira, o equipamento foi acoplado ao reator e permaneceu interligado por um intervalo de tempo aproximadamente de 3 minutos a cada 2 dias de monitoramento.

Com relação ao estudo estatístico, utilizou-se do software STATÍSTIC 7.0 que forneceu a análise multivariada, por meio da Análise de Componentes Principais, dos parâmetros tempo, pH, ácidos voláteis, alcalinidade e metano.

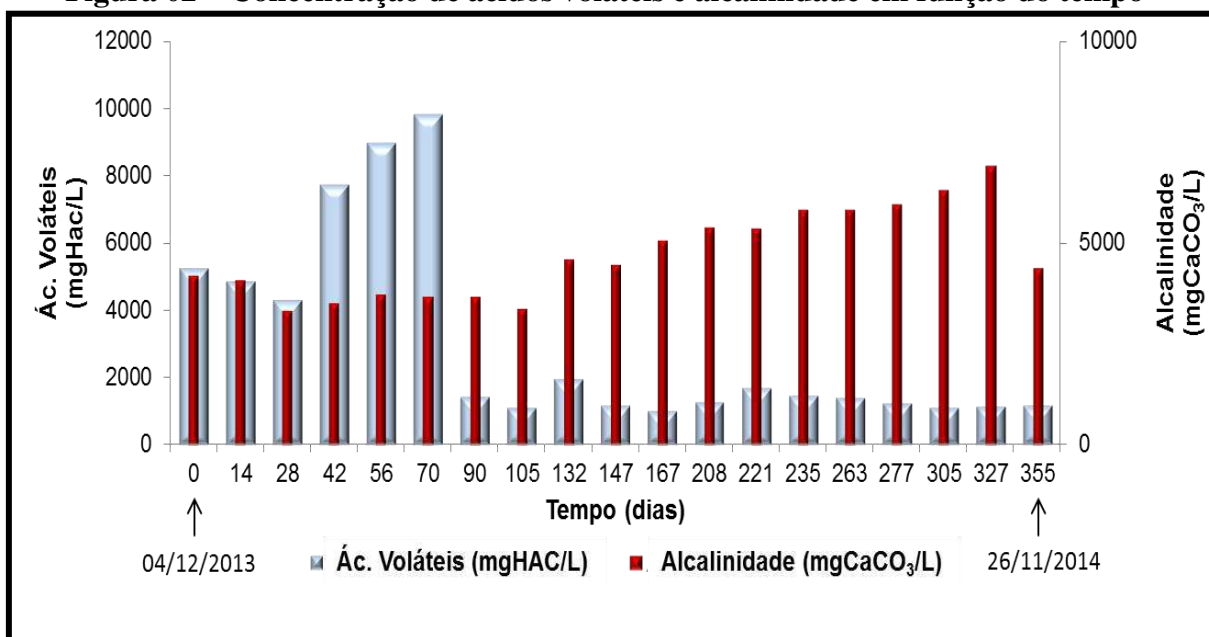
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram potencial de tamponamento do processo de degradação dos resíduos sólidos orgânicos e suas influências nas concentrações de metano (CH_4) presentes no biorreator anaeróbio de bancada.

Ácidos Voláteis e Alcalinidade

A Figura 02 demonstra o comportamento temporal dos ácidos voláteis e alcalinidade no biorreator.

Figura 02 – Concentração de ácidos voláteis e alcalinidade em função do tempo



Os valores de alcalinidade total e ácidos voláteis tiveram um comportamento esperado em todo o período dos 355 dias de monitoramento do biorreator. Logo, segundo Whiteley et al. (2006), este comportamento é explicado através das fases hidrolítica fermentativa, acidogênese, acetogênese e metanogêneses nas quais as bactérias decompositoras presentes nestas fases degradaram a matéria orgânica influenciando nas concentrações dos ácidos voláteis e alcalinidade, o que contribui para os diferentes comportamentos do pH durante o processo degradativo da massa de resíduo.

Para que o sistema funcione de forma eficiente segundo Metcalf&Eddy (1991), nas fases de degradação as concentrações de alcalinidade devem estar entre 1000 a 5000 mg L⁻¹. Assim, nos primeiros 14 dias de monitoramento o biorreator apresentou concentrações de alcalinidade que ficaram entre 4177 a 4080 mgCaCO₃ L⁻¹. No entanto, a partir do 28 ° dia até o 105 ° dia esses valores tiveram um decaimento e se mantiveram entre 3720 a 3299 mgCaCO₃ L⁻¹ o que indica que neste período de tempo o processo de tamponamento não resistiu as influências dos ácidos orgânicos produzidos durante a decomposição da matéria orgânica pelas bactérias Hidrolíticas fermentativas.

De acordo com Lima (1995), durante a fase metanogênica o meio tende a apresentar elevados valores de alcalinidade podendo variar de 6000 a 14000 mgCaCO₃ L⁻¹. Sendo assim, entre o 132 ° dia até o 327 ° dia de operação o biorreator em estudo apresentou valores deste parâmetro que variaram entre 4455 a 6886 mgCaCO₃ L⁻¹ o que pressupõe a presença das

arqueasMetanogênicas que converteram os ácidos voláteis em metano e assim contribuíram para o tamponamento do sistema de degradação da matéria orgânica.

Com relação às concentrações de ácidos voláteis, do início do monitoramento até o 28 ° dia, os valores ficaram entre 4296 a 5256 mgHAC L⁻¹, porém, entre 42 ° dia e o 70 ° dia esses valores se acentuaram e alcançaram concentrações entre 7740 a 9798 mgHAC L⁻¹ devido a presença das bactérias Acidogênicas que degradaram os resíduos de forma intensiva o que proporcionou a elevada concentração dos ácidos orgânicos tornando o meio desfavorável a atividade dos microrganismos produtores de metano durante este período. Contudo, de acordo com Stafford (1980) e Mccarty&Pittmann (2001), nos processos de estabilização da matéria orgânica, as concentrações de ácidos voláteis ideais para o desenvolvimento das arqueasMetanogênicas devem ficar na faixa de 2000 a 4000 mgHAC L⁻¹. Porém, identificou-se que o reator em estudo apresentou baixas concentrações de oxigênio, o que favoreceu o desenvolvimento de bactérias facultativas que produziram ácidos orgânicos pelo processo de acidogênese e acetogênese e, assim, contribuíram para os elevados valores de ácidos voláteis na fase inicial de degradação dos resíduos orgânicos.

Observa-se, que a partir do 90 ° dia até o término do monitoramento as concentrações de ácidos voláteis diminuíram devido ao desenvolvimento das arqueasMetanogênicas que consumiram e converteram esses ácidos a valores de metano (CH₄) que chegaram a 59 %.

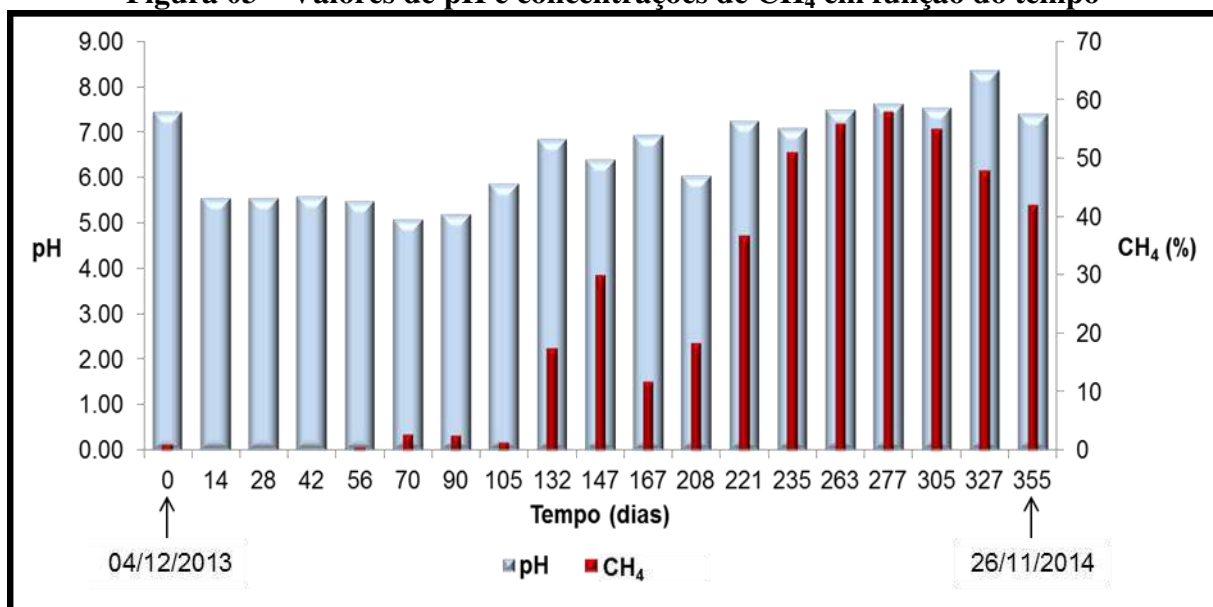
Ao término do monitoramento, no 355 ° dia, os valores da alcalinidade continuaram resistentes às interferências dos ácidos voláteis, o que indicou boas condições de tamponamento do sistema. No entanto, neste ultimo dia de operação do biorreator os parâmetros apresentaram diminuições em suas concentrações devido à baixa taxa de degradação da matéria orgânica pelos microrganismos, o que refletiu na atividade das arqueasMetanogênicas e consequentemente nas concentrações de CH₄ que chegaram a 42%.

Desta forma, devido às elevadas concentrações de alcalinidade, o meio apresentou um tamponamento resistente às interferências causadas pelos ácidos voláteis. Assim, a atividade das arqueasMetanogênicas foi potencializada, o que contribuiu para as altas concentrações de metano que apresentaram valores significantes chegando a 59%.

Potencial Hidrogeniônico (pH) e Metano (CH₄)

A Figura 03 demonstra o comportamento do pH e CH₄ durante a período de monitoramento do biorreator.

Figura 03 – Valores de pH e concentrações de CH₄ em função do tempo



De acordo com Pohland & Harper (1985) e Catapreta (2008), conforme os resíduos são degradados pelos microrganismos, o pH inicial se apresenta ácido devido a adição de ácidos voláteis pelas bactérias Acidogênicas, porém, ao longo das fases de degradação o meio torna-se básico devido ao consumo destes ácidos pelas arqueas Metanogênicas, o que contribui para a elevação dos valores de pH e favorece uma maior produção do biogás (MEIRA, 2009).

Em todo o período de monitoramento, os resíduos sólidos orgânicos analisados apresentaram valores de pH que variaram de 5,1 a 8,3, e isso ocorreu provavelmente devido a atividade dos microrganismos presentes nas fases acidogênica, acetogênica e metanogênica que consequentemente influenciaram nas condições de tamponamento do sistema, o que pode ter refletido nas concentrações de metano.

O biorreator no início do monitoramento apresentou pH com valor de 7,4 devido a adição do Bicarbonato de Sódio (NaHCO₃), numa concentração de 30 g L⁻¹, durante o processo de alimentação do sistema, o que evitou a diminuição brusca do pH durante a fase hidrolítica fermentativa. Porém, ao longo da decomposição da matéria orgânica as concentrações de ácidos voláteis fizeram com que o pH a partir do 14 ° dia até o 105 ° dia de operação permanecesse em uma faixa entre 5,1 a 5,8, o que indicou uma baixa capacidade de tamponamento do sistema neste período e consequentemente pode ter afetado as concentrações de metano. Deste modo, segundo Van Haandel & Lettinger (1993), a fase acidogênica pode ser um fator limitante na conversão da matéria orgânica em metano. Sendo assim, neste mesmo período de tempo as concentrações de metano no biorreator

permaneceram abaixo dos 3 %, o que é justificado pela presença das bactérias Acidogênicas que tornam o meio ácido e, assim, inibem o crescimento das arqueas Metanogênicas, responsáveis pela produção de metano.

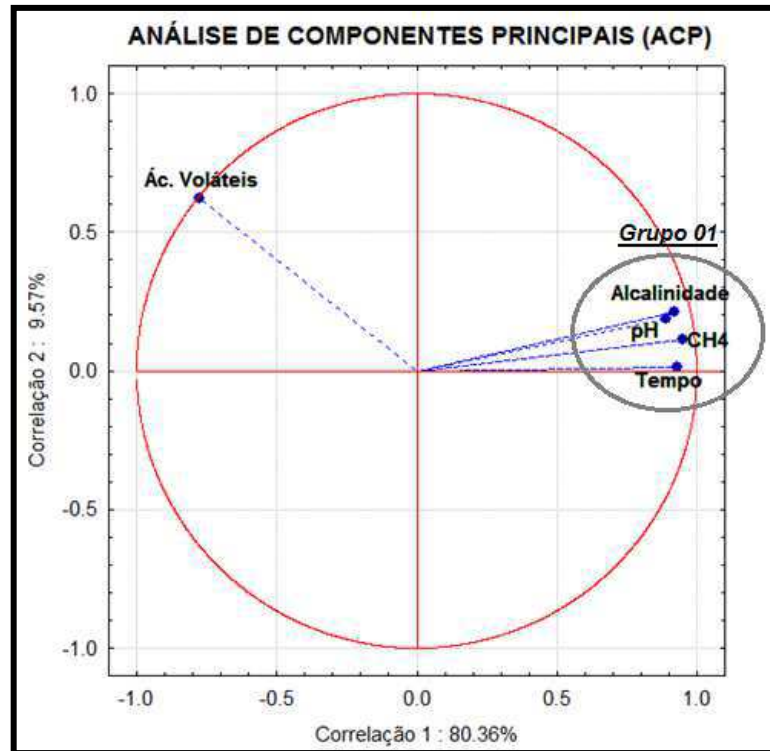
Observa-se, que entre o 132 ° dia ao 355 ° dia de operação os valores de pH se elevaram permanecendo em uma faixa de 6,0 a 8,4, o que pode ser justificado pelas concentrações de alcalinidade e o aumento da atividade das arqueas Metanogênicas, as quais consumiram os ácidos voláteis e conseqüentemente favoreceu ao tamponamento do sistema, o que contribuiu para o aumento das concentrações do metano. Portanto, segundo Campos et al. (2006), os valores ideais de pH para o crescimento das arqueas Metanogênicas encontra-se entre 6,5 a 7,5. Assim, com o meio próximo à neutralidade os microrganismos se comportaram de forma mais eficiente quanto à produção de metano, o que fez com que nesse período de tempo as concentrações de metano aumentassem de 17 % para 59 %.

Vale lembrar que as proporções de metano presentes no biogás, segundo Magalhães et al. (2010), variam entre 45 % à 60 % do total de gases gerados e portanto, a partir do 235 ° dia de monitoramento o biorreator em estudo apresentou ótimas condições de tamponamento, o que contribuiu para concentrações de metano que variaram entre 51 % a 59 %. Porém, segundo Schirmer et al. (2014), após as concentrações de metano atingirem valores entorno de 55%, o processo de degradação da massa de resíduos entra na fase de maturação. Assim, de acordo com Sponza & Ağdağ (2004), a quantidade de metano produzida pode ser um indicador do grau de estabilização dos resíduos e desta forma, entre o 327 ° dia e o 355 ° dia de monitoramento, devido estabilização da matéria orgânica pelos microrganismos, o biorreator apresentou um decaimento nas concentrações de metano ficando entre 42 % a 48 %.

Análise de Componentes Principais (ACP)

A análise de componentes principais foi elaborada com o intuito de demonstrar estatisticamente o comportamento da capacidade tamponante dos resíduos e suas interferências nas concentrações de metano. Assim, como demonstrado na Figura 04, as correlações nos dois eixos explicam as variações dos dados em aproximadamente 90%, o que representa uma alta interação entre os parâmetros: tempo, alcalinidade, ácidos voláteis, pH e metano (CH₄).

Figura 04 - ACP para o tempo, alcalinidade, ácidos voláteis, pH e CH₄



A ACP aplicada a esta pesquisa demonstrou a formação de um grupo (denominado Grupo 01) com uma forte correlação entre as variáveis envolvidas, ou seja, observa-se uma estreita relação entre alcalinidade, pH, CH₄ e o tempo. Esse comportamento já era esperado, haja vista que ao passar do tempo com a biodegradação da matéria orgânica pelos microrganismos, os ácidos voláteis produzidos neste processo foram sendo consumidos pelas arqueas Metanogênicas, o que conseqüentemente, contribuiu para a elevação das concentrações de alcalinidade. Portanto, este comportamento colaborou para a capacidade tamponante do sistema tornar o pH do meio favorável a produção de CH₄.

Observa-se que o estudo apresentou uma correlação negativa na qual a componente ácidos voláteis se comportou de maneira oposta ao grupo 01, pois como citado acima, as concentrações deste parâmetro tenderam a diminuir com o passar do tempo, o que contribuiu para capacidade tamponante do sistema tornar o meio ideal ao desenvolvimento das arqueas Metanogênicas produtoras de metano.

Assim, a ACP dos parâmetros confirmou estatisticamente a capacidade de tamponamento do meio, pois a formação do grupo demonstrou que as concentrações de alcalinidade resistiram às influências dos ácidos voláteis e tornaram o pH elevado durante toda a fase metanogênica.

CONCLUSÃO

- Pôde-se observar que a adição do Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3) e a estabilização da matéria orgânica, favoreceram a alcalinidade do sistema que resistiu às influências dos ácidos voláteis, o que contribuiu para tamponamento do meio e assim o pH se manteve ótimo para o desenvolvimento das arqueas Metanogênicas que consumiram os ácidos e os converteram em metano.
- No início do monitoramento, as condições operacionais do biorreator demonstraram-se desfavoráveis ao desenvolvimento das arqueas Metanogênicas, pois as altas concentrações de ácidos voláteis tornaram o pH ácido e influenciaram nas baixas concentrações da alcalinidade, o que justificou a inibição da atividade dos microrganismos produtores de metano.
- O estudo dos parâmetros físico-químicos pH, ácidos voláteis e alcalinidade permitiu analisar a capacidade tamponante do sistema e assim, entender o processo biodegradativo dos resíduos sólidos orgânicos e suas interferências nas concentrações de metano.

REFERÊNCIAS

- APHA; AWWA; WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. pp.1268, 22a ed. Washington. D. C., 2012.
- CAMPOS, C. M. M. et al. *Desenvolvimento e Operação de Reator Anaeróbio de Manta de lodo (UASB) no Tratamento dos Efluentes da Suinocultura em Escala Laboratorial*. Revista Ciência e Agrotecnologia, ISSN 1413-7054, v. 30, p. 140-147, 2006.
- CATAPRETA, C.A.A.; SIMÕES, G.F. *Caracterização volumétrica dos resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro sanitário experimental*. XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS. 2008.
- LIMA, L. M. Q. *Lixo: Tratamento e Biorremediação*. Hemus. 3 ed. Campinas, Brasil, 1995.
- LOPES, W. S; LEITE, V. D; SOUSA, J. T; PRASAD, S; ATHAYDE JUNIOR, G. B. *Fatores Interveniante no Processo de Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos*. In 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, SC.
- MAGALHÃES, G. H. C; ALVES, J. W. S; SANTOS, F. F; COSTA, R.M; KELSON, M. *Redução das incertezas sobre o Metano recuperado (R) em inventários de emissões de gases*

de efeito estufa por tratamento de resíduos, e sobre o parâmetro AdjustmentFactor (AF) em projetos de coleta e destruição de metano em aterros no âmbito do MDL. São Paulo, Brasil, 2010. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso no dia 14/01/2014.

MCCARTY, P. L., PITTMANN, *Biotechnology: Principles and Applications*. 754 p, McGraw-Hill – New York, B. E. *Environmental* 2001.

MEIRA, R. C. *Estudo Biodegradativo dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande – PB em Escala Experimental*. 2009. 113 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.

METCALF, L.; EDDY, P.H. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*, 3rd ed., Singaporre: McGraw-Hill Int., 1991.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MONTERANI, F. *Effects of pH, acidity and alkalinity on the microbiota activity of an anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating pig manure effluents*. *Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 4(3), p. 157-168, 2009.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills*. Tech Project n. E20 G01. 1985.

SCHIRMER, W. N., JUCÁ, J. F. T., SCHULER, A. R. P., HOLANDA, S., JESUS, L. L. *Methane Production in Anaerobic Digestion of Organic Waste from Recife (Brazil) Landfill: Evaluation in Refuse of Different Ages*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. ISSN 0104-6632 – Brazil, 2014.

SOUSA, R. B. A. et al. *Análise da Capacidade Tamponante do Meio de Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos em um Lisímetro*. 24º. Encontro Técnico AESABESP, 2013.

SPONZA, D. T. AND AĞDAĞ, O. N. *Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors*. *Process Biochemistry*, 39(12), p. 2157-2165, 2004.

STAFFORD, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R. *Methane Production From Waste Organic Matter*. 285p., CRC Press, Inc., 1980.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management*. Engineering principles and management issues. New York. 1993.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Greenhouse gases and Global Warming Potential values*. U.S Greenhouse Gas Inventory Program. Office of Atmospheric Programs, Washington, USA, 1991.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGER, G. *Tratamento Anaeróbio de Esgoto: Um Manual para Regiões de Clima Quente*, Epgraf, Campina Grande, 240p, 1994.

WHITELEY, C.G., LEE, & D.J. *Enzyme technology and biological remediation*. *Enzyme and Microbial Technology*, p. 38, p. 291–316, 2006.

ARTIGO 02

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO EM BIORREATOR ANAERÓBIO DE BANCADA PREENCHIDO COM RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

RESUMO

O estudo da estimativa da produção de biogás em biorreator anaeróbio de bancada permite compreender o real potencial de produção de metano dos diferentes tipos de resíduos sólidos presentes nos aterros sanitários. Assim, o objetivo deste estudo foi estimar a produção de metano em biorreator anaeróbio de bancada, preenchido com resíduos sólidos orgânicos. Para se estimar a produção de metano foi construído e instrumentado um biorreator anaeróbio em escala de bancada, no qual foi preenchido com resíduos orgânicos triturados provenientes de uma escola de ensino médio da cidade de Campina grande – PB. O monitoramento das concentrações de metano no biorreator foi realizado em média a cada 6 dias, durante 353 dias de monitoramento. A estimativa da produção de metano foi mensurada através da adaptação do modelo matemático utilizado por Harrieset al., 2001 e ABE, 2014, que considerou as pressões internas no biorreator, temperaturas diárias e concentração de metano no biorreator. Com os resultados foi observado que as condições ambientais no biorreator foram favoráveis as atividades das arqueasmetanogênicas que contribuíram para o aumento das concentrações de metano, que apresentou valores esperados ficando entre 40 a 59 %. Deste modo, observou-se que, através do método de estimativa utilizado, o volume de CH₄ acumulado durante o período de monitoramento do biorreator foi de aproximadamente 67,5 L e que se comparado com estudo semelhante esta produção apresentou-se elevada. Conclui-se que, este estudo apresentou uma importância científica, no qual poderá contribuir para gestão dos resíduos sólidos, permitindo estimar a real produção de metano dos resíduos sólidos orgânicos e o seu potencial de contaminação. Por fim, os objetivos deste estudo foram alcançados de forma satisfatória, permitindo estimar por meio o real potencial de produção de metano do biorreator estudado.

Palavras-chave: biorreator; biogás; produção de metano; resíduos sólidos.

ESTIMATE OF METHANE PRODUCTION IN BIOREACTOR BENCH ANAEROBIC COMPLETED WITH SOLID WASTE ORGANIC

ABSTRACT

The study estimated biogas production in anaerobic bioreactor bench allows us to understand the actual methane production potential of different types of solid residues in landfills. The objective of this study was to estimate the methane production in anaerobic bioreactor bench, filled with organic solid waste. To estimate methane production was built and instrumented an

anaerobic bioreactor bench scale, in which was filled with crushed organic waste from a high school in the city of Campina Grande - PB. The monitoring of the methane concentration in the bioreactor was performed on average every 6 days, during 353 days of monitoring. The estimation of methane production was measured by adapting the mathematical model used by Harries et al., 2001 and EBA, 2014, which considered the internal pressures in the bioreactor, daily temperatures and methane concentration in the bioreactor. With the results it was observed that the environmental conditions in the bioreactor favored the activities of methanogenicarchaea that contributed to the increase in methane concentration, which showed expected values being between 40-59%. Thus, it was observed that by used estimation method, the volume of CH₄ accumulated during the monitoring period, the bioreactor was approximately 67.5 L and compared with a similar study showed that production is high. In conclusion, this study showed a scientific importance, which may contribute to solid waste management, allowing to estimate the actual production of methane from organic waste and its potential contamination. Finally, the objectives of this study were achieved satisfactorily, allowing estimate by the actual methane production potential of the studied bioreactor.

Keywords:bioreactor; biogás; methane production; solid waste.

INTRODUÇÃO

O estudo da estimativa da produção de biogás em biorreator anaeróbio de bancada permite compreender o potencial de produção de metano (CH₄) dos diferentes tipos de resíduos sólidos presentes em aterros sanitários.

Segundo Reinhart e Townsend (1998) as concentrações dos gases no biogás dependem da composição dos resíduos sólidos presentes nos aterros sanitários. O biogás é um produto resultante da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos que contém entre outros gases o CH₄ e dióxido de carbono (CO₂) (THOMPSON et al., 2005). O CH₄ é o constituinte responsável pelo potencial energético do biogás e pode estar presente na massa de resíduo em concentrações que variam entre 40 a 60 % (ATABI et al., 2014).

O processo de formação do biogás apresenta-se como um fenômeno complexo, devido à presença dos diversos resíduos e suas interações físico-químicas e biológicas ao longo do tempo (KIM et al., 2008). Assim, a degradação dos resíduos e sua consequente geração de gases, segundo Tchobanoglous (1994), possui cinco fases: aeróbia, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na fase aeróbia, onde há presença de oxigênio, consiste numa fase curta, pois existe apenas microorganismos facultativos. Segundo Aquino e Chernicharo (2005) na hidrólise, ocorrerão de forma insatisfatória à conversão de compostos de cadeias complexas em outros compostos de cadeias mais simples. Na acidogênese, há produção principalmente de ácidos graxos voláteis e dióxido de carbono por meio das bactérias

fermentativas. Na acetogênese, é produzido o substrato para as bactérias produtoras de CH₄, o qual consiste em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. Por fim, na metanogênese, as arqueasmetanogênicas convertem acetato, dióxido de carbono e hidrogênio em CH₄ e dióxido de carbono.

Vale salientar que, durante essas etapas, existem condições físico-químicas e microbiológicas do meio, que influenciam diretamente no processo degradativo e, conseqüentemente, na geração de gases.

De acordo com Tarazona (2010), há uma grande incerteza quanto à estimativa das emissões de gases nos aterros sanitários devido, especialmente, à variedade de processos que ocorrem dentro da massa de resíduo. Com isso, os métodos existentes para o cálculo da estimativa de emissões dos gases são geralmente fórmulas empíricas, que contém poucos parâmetros representativos e confiáveis nas previsões de quantidades de CH₄.

Os diferentes métodos existentes para calcular a quantidade de CH₄ produzido na massa de resíduo, apresentam uma aproximação grosseira, pois, consideram somente a quantidade de resíduos sólidos orgânicos dispostos nos aterros ou a cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição dos resíduos) (MENDES, 2005). Porém, vários fatores podem afetar a geração de gases nos aterros, dentre eles a composição dos resíduos, temperatura, umidade, disponibilidade de microrganismos, presença de nutriente, geometria e operação do aterro (FIRMO, 2010). Deste modo, observa-se que os modelos existentes não utilizam de variáveis relacionadas aos aspectos microbiológicos e nem a cinética ou taxa de conversão microbiana.

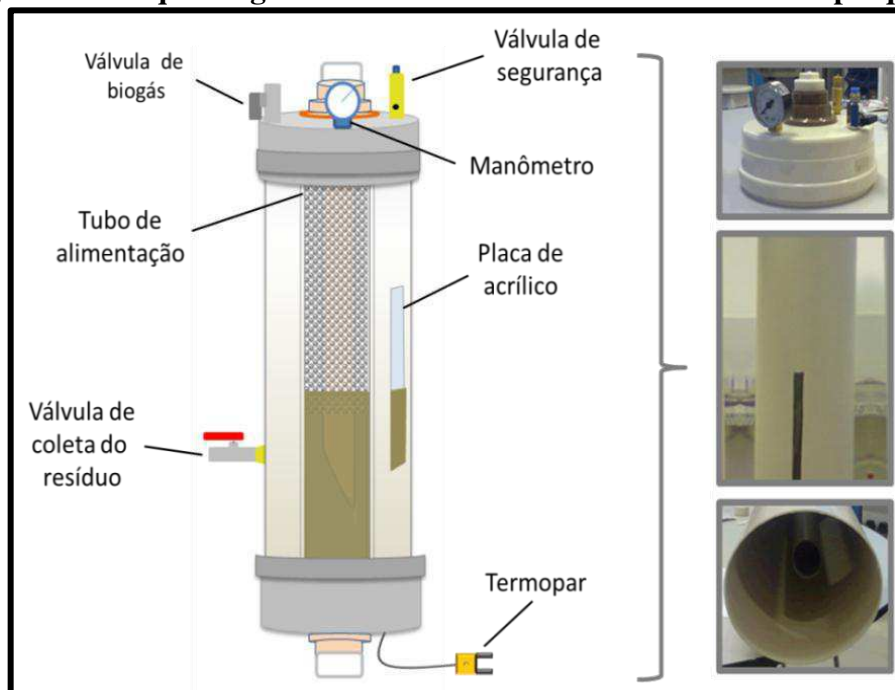
Diante desses fatos, este estudo tem como objetivo estimar a produção de CH₄ em biorreator anaeróbico de bancada preenchido com resíduos sólidos orgânicos provenientes de uma escola de ensino médio da cidade de Campina Grande-PB, através da adaptação do modelo matemático utilizado por Harrieset al., 2001 e ABE, 2014, que considera as pressões, temperaturas diárias e concentração de metano no biorreator.

METODOOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em parceria com a Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral, localizada em Campina Grande – PB.

Como demonstrado na Figura 01, nas dependências da UFCG, foi construído um biorreator com capacidade de 28 L, no qual foi instrumentado, testado, ajustado e preenchido.

Figura 01 - Esquema geral do biorreator anaeróbico utilizado na pesquisa.



Fonte: Dados da pesquisa, 2014

Para o preenchimento do biorreator, foram coletados e caracterizados através da composição gravimétrica e volumétrica os resíduos sólidos produzidos pela Escola, em seguida, a fração de resíduos orgânicos foi separada e utilizada na alimentação do sistema.

Vale lembrar que o preenchimento foi realizado com uma amostra de 15 L proveniente de uma mistura constituída de 25 Kg de resíduos orgânicos, 14 L de água que correspondeu a cerca de 80 % da umidade total, o que segundo a USEPA (1991), uma umidade alta em torno dos 60 a 80 % pode aumentar a produção de metano, 3,750 Kg de esterco bovino (inóculo), correspondendo a 15 % da massa total de resíduos, o que de acordo com Lopes et al., (2003), essa é a proporção ideal para uma boa produção de metano no biorreator. Com o intuito de elevar o valor do pH para 7,5, também foi acrescentado de forma gradativa 1,282 Kg de Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3), o que contribuiu para o tamponamento do meio favorecendo o processo de metanogênese.

A medição das concentrações de CH_4 no biorreator foi realizada em média a cada 6 dias, durante 353 dias de monitoramento. Assim, estas concentrações foram determinadas por meio do detector portátil e automático de gases com infravermelho (Dräger modelo X -

am7000). Para a utilização do cromatógrafo portátil foram obedecidos os procedimentos necessários ao seu funcionamento, tais como, carregamento da bateria e calibração. Em seguida, com auxílio da mangueira, o equipamento foi acoplado à válvula de biogás do biorreator onde permanecia ligado por aproximadamente 3 minutos.

O monitoramento da temperatura no interior do biorreator foi realizado por um termômetro digital MT - 600 com precisão de leitura de aproximadamente 0,1 % no qual foi acoplado a um termopar instalado na parte inferior do biorreator.

A pressão no interior do biorreator foi aferida por meio do manômetro Premium - esfigmomanômetro ML – 177/1992646.

A estimativa da produção de metano foi mensurada através da adaptação do modelo matemático utilizado por Harries et al., 2001 e ABE, 2014. Assim, por meio das Equações 01, 02 e 03 determinou-se o potencial de produção de CH₄ considerando as variáveis concentrações de CH₄, pressões e temperaturas diárias no biorreator.

- Equação 01: Volume de Metano Produzido entre T e T+1

$$\text{Produzido entre T + (T+1)} = \left[\left(\frac{PR \text{ (mbar)} \times VUR \text{ (mL)} \times 22,41}{[83,14 \times TR \text{ (K)}]} \right) \times 1000 \right] \times \left(\frac{CM \text{ (\%)}}{100} \right)$$

Onde:

T: Tempo (dias);

PR (mbar) - Pressão do Reator em milibar;

VUR (mL) - Volume útil do Reator em litros;

TR (K) - Temperatura do Reator em Kelvin;

CM (%) – Concentrações de Metano em Percentagem.

- Equação 02: Volume de Metano Acumulado (mL)

$$\text{Volume de Metano Acumulado (mL)} = [\text{Gerado entre T e (T+1)}] + \text{VMA (mL)}$$

Onde:

T - Tempo (dias);

VGA(mL) - Volume de metano acumulado do dia anterior em litros.

- Equação 03: Taxa de Geração de Metano (mL/dia)

$$\text{Taxa de Produção de Metano} = \frac{\text{Volume Acumulado (mL)}}{\text{Nº de dias corridos}}$$

Observa-se, que a razão do volume de CH₄ acumulado (mL) pelos dias corridos forneceu a taxa de geração média de biogás (mL).

A eficiência do CH₄, como demonstrado na Equação 04, foi calculada pela razão entre a massa de CH₄ produzida durante os 353 dias de monitoramento e pelo peso de resíduos orgânicos presentes no biorreator que correspondeu a 8,5 kg.

- Equação 04: Eficiência do Metano (%):

$$Ef (\%) = \frac{M(\text{CH}_4)}{PR}$$

Onde:

Ef (%) – Eficiência do Metano em Percentagem;

M (CH₄) - Massa do Metano em Quilograma;

PR – Peso do Resíduo orgânico em Quilograma.

Para o desenvolvimento deste estudo utilizou-se de planilhas do programa Microsoft Office Excel 2010, na qual foram dispostos os dados coletados durante todo o período de monitoramento e assim aplicadas às equações do volume de metano produzido, volume de metano acumulado, taxa de geração de metano e a eficiência do metano.

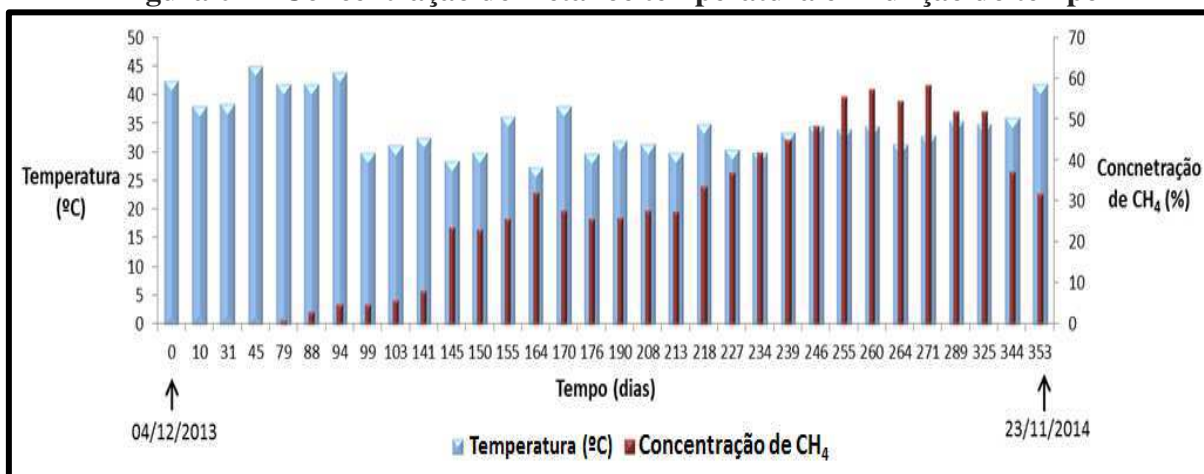
Para o estudo estatístico da estimativa de produção de metano foi utilizado o programa STATÍSTIC 7.0, que fez a análise multivariada, por meio da Análise de Componentes Principais, das variáveis, concentração de CH₄, volume de CH₄ captado, temperatura e tempo de monitoramento.

RESULTADOSE DISCUSSÃO

Os resultados obtidos representam o comportamento dos parâmetros físico-químicos e suas influencias sobre a produção de metano do biorreator estudado. A Figura 01 demonstra os

valores referentes à temperatura e as concentrações de CH₄ ao longo dos 353 dias de monitoramento do biorreator.

Figura 02 – Concentração de metano e temperatura em função do tempo



De acordo com Van Elk (2007), durante as fases de decomposição dos resíduos as temperaturas diversas favorecem a degradação da massa residual pelas bactérias e que para se ter uma elevada produção de CH₄ a faixa ideal de temperatura deve ser entre 30 a 55 °C. Os resultados da Figura 02 demonstram que durante os 353 dias de monitoramento a temperatura se manteve praticamente dentro da faixa ideal para o desenvolvimento das bactérias decompositoras ficando em média entre 30 a 45 °C, o que pode ter refletido no aumento das concentrações e volume de CH₄. Este comportamento das temperaturas está relacionado à ação decompositora das arqueasmetanogênicas que se associam à temperatura e ao pH tornando-os parâmetros importantes para a degradação da matéria orgânica, assim como para a produção de biogás.

Segundo Schirmer et al. (2014), na fase inicial de degradação dos resíduos sólidos, a ausência de oxigênio torna o meio anaeróbio o que acelera o desenvolvimento das arqueasmetanogênicas, possibilitando a presença de baixas concentrações de CH₄ logo nos primeiros dias de degradação dos resíduos. O meio anaeróbio, associado às temperaturas ideais ao desenvolvimento das arqueasmetanogênicas, proporcionaram durante o início do monitoramento do biorreator em estudo, entre o 0 e 79º dia, a presença de baixas concentrações de CH₄ que ficaram entre 0,2 a 2 %. Além da ausência do oxigênio, a hidrólise de substâncias orgânicas facilmente degradáveis pode ser outro fator que contribuiu para a presença das baixas concentrações de CH₄ na fase inicial de operação do biorreator, pois,

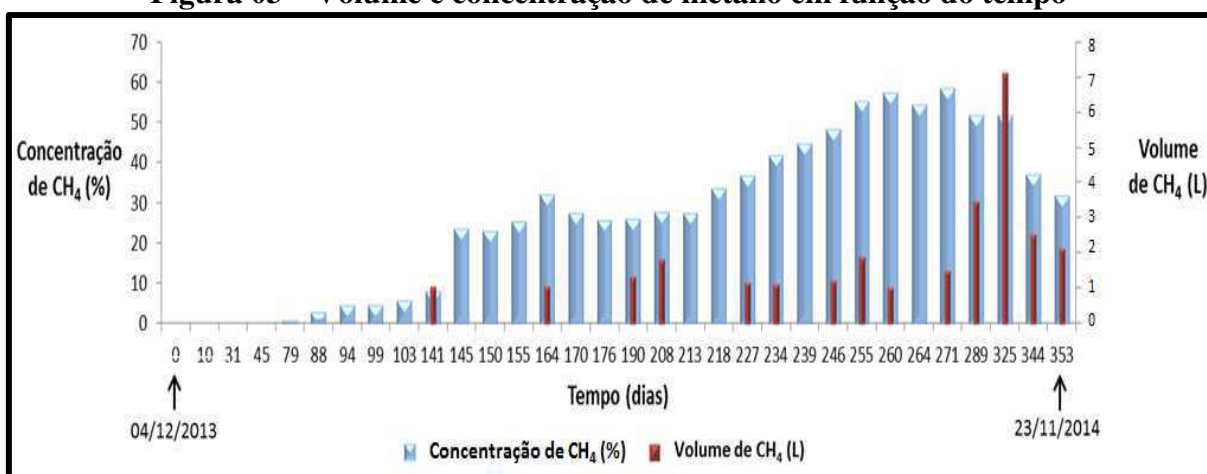
estas substâncias passaram rapidamente pelo processo de hidrólise, e as fases subsequentes, até se converterem em CH₄ (PARAWIRA et al., 2004).

A partir do 88º dia de operação, as concentrações de CH₄ tenderam a se elevar, pois, a temperatura no interior do biorreator permaneceu na faixa desejada para o aumento da atividade das arqueasmetanogênicas que converteram os ácidos carboxílicos resultantes da digestão das bactérias presentes nas demais fases de degradação da matéria orgânica. Destaca-se, que o biogás proveniente da decomposição anaeróbia dos resíduos apresenta concentrações de metano que variam entre 45 a 60% do total de gases gerados (MAGALHÃES et al., 2010). Entre o 239º e 325º dia de monitoramento do biorreator em estudo, as concentrações de CH₄ alcançaram valores entre 45 a 58 % do biogás produzido pelo biorreator.

Segundo Schirmeret al. (2014), a fase de maturação ocorre logo após as concentrações de CH₄ atingirem valores entorno dos 55%. Assim, após as concentrações de metano do biorreator em estudo atingirem 58 %, nos 344º e 353º dia de monitoramento o sistema entrou na fase de maturação, onde as percentagens estimadas decresceram ficando respectivamente em 37% e 32 %, provavelmente devido à estabilização da matéria orgânica pelas bactérias decompositoras.

Com relação à produção de metano, a Figura 03 demonstra as concentrações e o volume de metano produzido durante os 353 dias de operação do biorreator.

Figura 03 – Volume e concentração de metano em função do tempo



De acordo com Hansen et al. (2004), o potencial de produção de CH₄ pode ser definido como a quantidade de CH₄ produzida durante o período de monitoramento de um biorreator. Assim, os valores correspondentes ao volume de CH₄ produzido em todo o período

de operação do biorreator foram estimados através da Equação 01, que utilizou as variáveis: pressão, temperatura e concentrações de CH_4 . Deste modo, observa-se na Figura 03 que o volume de CH_4 produzido durante os 353 dias de monitoramento, tiveram variações que não acompanharam as concentrações existentes no meio, logo, segundo Barros et al. (2009), o volume de CH_4 produzido depende de diversos fatores tais como a quantidade de matéria orgânica, tipo de digestor e temperatura.

De acordo com Schirmer et al. (2014), diferentemente do que se espera, os resíduos em estado avançado de decomposição, produzem volumes maiores de metano se comparado com resíduos em estágio inicial de degradação. Observa-se na Figura 03 que os volumes estimados nos primeiros 103 dias de operação do biorreator em estudo ficaram abaixo de 1 L, porém no decorrer do monitoramento os valores tenderam a se elevar, devido ao processo de estabilização dos resíduos causados pela atividade das bactérias decompositoras. Assim, percebe-se que após o 255º dia de operação, a produção de CH_4 tendeu a se elevar chegando a 7 L. Destaca-se que, segundo Huitric e Soni (1997) ao completar as fases de degradação os resíduos tendem a diminuir gradativamente o volume de CH_4 produzido.

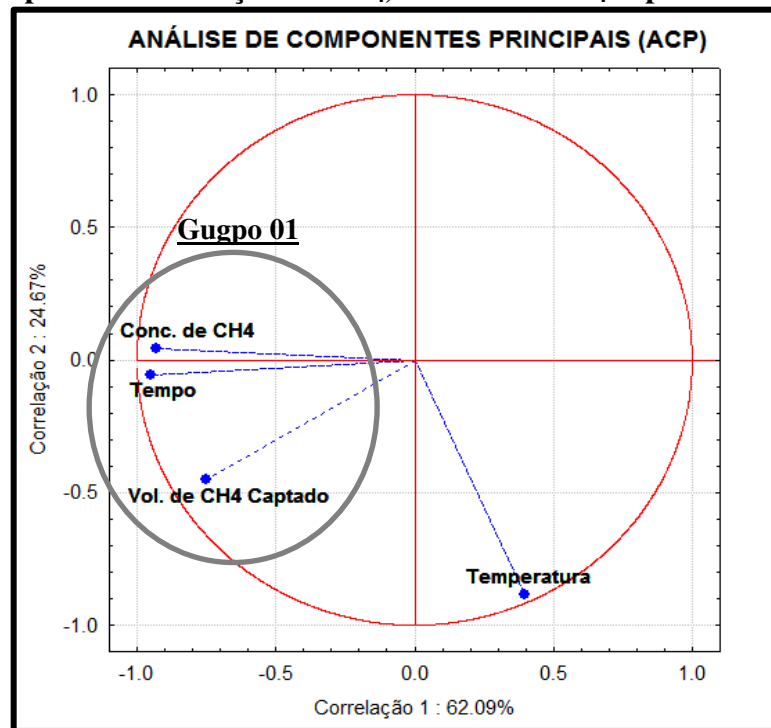
Após 80 dias de monitoramento a estimativa do volume de CH_4 mensurada em bioreator por Schirmer et al. (2014), teve como resultado volumes que ficaram em torno de 1 L a 1,048 L. O volume de CH_4 acumulado no biorreator em estudo foi estimado através da Equação 02, que considerou o somatório do volume de CH_4 captado em cada dia de coleta, o que resultou no volume acumulado de aproximadamente 67,5 L ao longo de todo período de operação do biorreator. Portanto, após a conversão das unidades de medida, a massa de CH_4 acumulada durante os 353 dias de monitoramento foi de 0,04286 Kg.

A taxa de geração de CH_4 foi calculada por meio da Equação 03, que considerou a razão do volume de CH_4 acumulado, pelos dias de monitoramento do biorreator. Deste modo, pôde-se afirmar que a taxa de geração de CH_4 no biorreator foi de 0,00012 Kg/dia, e que a eficiência foi de 0,504 %, o que permite mensurar a capacidade de produção de CH_4 em outros sistemas que utilize resíduos semelhantes. Com base no resultado da eficiência da produção de metano do biorreator em estudo, foi possível estimar a quantidade de CH_4 produzido em uma célula de resíduos com capacidade de uma tonelada, na qual a produção esperada seria de 5,04 kg/Ton. Vale lembrar, que este estudo considerou somente a produção de metano de um biorreator com capacidade de 15 L de resíduos e que em escala maior a contribuição deste sistema poderá se elevar favorecendo o reaproveitamento energético dos gases gerados e assim colaborar para o fortalecimento da matriz energética do nosso país.

Análise de Componentes Principais (ACP)

A elaboração da análise de componentes principais teve como objetivo, confirmar estatisticamente os resultados obtidos na estimativa da produção de CH_4 do biorreator em estudo. As variáveis estudadas através da ACP foram as seguintes: concentração de CH_4 , volume de CH_4 captado, temperatura e tempo. Como demonstrado na Figura 04, estas variáveis apresentam oscilações que podem ser explicadas por meio das correlações existentes nos dois eixos nos quais esclarecem aproximadamente 86% das diferenças entre os dados.

Figura 04 - ACP para concentração de CH_4 , volume de CH_4 captado e temperatura



O resultado da ACP demonstra a formação de um grupo com forte correlação entre as variáveis envolvidas, porém, percebe-se que os componentes, concentrações de CH_4 e tempo apresentam uma ótima correlação, se comparadas com o volume de CH_4 captado. Deste modo, observa-se que ao longo dos dias de monitoramento, os resíduos presentes no biorreator foram sendo degradados pelas bactérias decompositoras, que converteram a matéria orgânica em CH_4 , no qual foi aumentando proporcionalmente ao longo do tempo de operação do biorreator.

O volume de CH_4 captado no biorreator não acompanhou as suas concentrações, assim com o tempo apresentou uma interação forte com as outras variáveis do grupo, o que foi

limitado devido os valores apresentarem oscilações que não se comportaram de forma contínua ao longo dos dias de monitoramento do sistema. Desta forma, a ACP comprovou estatisticamente o resultado observado no Figura 03, onde demonstra que durante todo o período de monitoramento do biorreator o volume de CH_4 captado apresentou variações que não acompanharam as concentrações existentes no meio.

Em contra partida, com relação ao grupo 1 a ACP demonstrou uma correlação negativa representada pela variável temperatura. Assim, enquanto as componentes que formaram grupo se correlacionaram entre si, a temperatura se comportou de forma oposta, devido os seus valores apresentarem oscilações durante todo o período de operação do biorreator, o que afetou o comportamento desta variável, fazendo com que se apresentasse de forma oposta ao tempo, concentrações e volumes de CH_4 .

Desta forma, a ACP demonstrou que as variáveis presentes no grupo 1 tiveram influência da temperatura, porém, as oscilações nos valores deste parâmetro não permitiram uma correlação forte, haja vista que, os elementos do grupo 1 seguiram a mesma tendência de valores o que permitiu uma maior interação entre as variáveis envolvidas.

CONCLUSÃO

- o estudo da capacidade de produção de metano dos resíduos sólidos orgânicos apresentou uma importância científica, no qual poderá contribuir para gestão dos resíduos sólidos permitindo estimar a real produção de metano dos resíduos sólidos orgânicos e o seu potencial de contaminação.
- as Equações 01, 02, 03 e 04 permitiram determinar o potencial de produção de metano do biorreator em estudo.
- A temperatura interna do biorreator, apresentou oscilações durante todo o período de operação do sistema, porém, essas variações estiveram dentro da margem ideal de temperatura para o desenvolvimento das bactérias decompositoras, o que foi favorável à produção de CH_4 .

- As condições ambientais do biorreator foram favoráveis ao aumento das concentrações de CH₄, que apresentou valores ótimos, quando comparado a valores da literatura, ficando entre 45 a 58 %.
- Através do método de estimativa utilizado, observou-se que o volume de CH₄ acumulado durante o período de monitoramento do biorreator foi entorno de 67,5 L e que se comparado com sistemas semelhantes esta produção apresenta-se elevada.
- portanto, os objetivos deste estudo foram alcançados de forma satisfatória, permitindo estimar por meio das Equações 01, 02, 03 e 04 o real potencial de produção de metano do biorreator estudado.

REFERÊNCIAS

- ABE. Department of Agricultural and Biological Engineering - University of Florida. *Responses of biological systems to environmental stimuli – Biochemical Methane Potential determination*. Disponível em: <www.abe.ufl.edu/~chyn/download/ABE2012C/bmplab_leary.doc>. Acesso em: 12/09/2014.
- AQUINO, S. F. E.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 10, n. 2, p. 152 – 161. 2005.
- ATABI, F.; EHYAEI, M. A.; AHMADI, M. H. Calculation of CH₄ and CO₂ Emission Rate in Kahrizak Landfill Site with Land GEM Mathematical Model. In: THE 4TH WORLD SUSTAINABILITY FORUM – CONFERENCE PROCEEDINGS PAPER. 2014.
- BARROS, R. M. et al. Estudo da produção de biogás da digestão anaeróbia de esterco bovino em um biodigestor. *Revista Brasileira de Energia*. v. 15, N. 2, 2^o, p. 95-116, Sem. 2009.
- FIRMO, A. L. B. et al. Avaliação do Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro da Muribeca. In: 3^o SIMPÓSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA DE RESÍDUOS. JOÃO PESSOA-PB, 2010.
- HANSEN, T. L.; SCHMIDT, J. E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J. C.; MOSBAEK, H. AND CHRISTENSEN, T. H. Method for Determination of Methane Potentials of Solid Organic Waste. *Waste Management*. 24(4), p. 393-400. 2004.
- HARRIES, C. R.; CROSS, C.J.; SMITH, R. Development of a Biochemical Methane Potential (BMP) Test and Application to Testing of Municipal Solid Waste Samples.

In:PROCEEDINGS SARDINIA, EIGHTH INTERNATIONAL WASTEMANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM. Cagliari, Italy. Cagliari: CISA. v. 1, p. 579-588. 2001.

HUITRIC, R., SONI, R. Making the Most of LFG Projection Models. In: PROCEEDINGS FROM SWANA'S 20TH ANNUAL LFG SYMPOSIUM.MontereyCalifornia, USA, 1997.

LOPES, W. S; LEITE, V. D; SOUSA, J. T; PRASAD, S; ATHAYDE JUNIOR, G. B. Fatores Interveniente no Processo de Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos. In 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, SC, 2003.

MAGALHÃES, G. H. C; ALVES, J. W. S; SANTOS FILHO, F; COSTA, R.M; KELSON, M. *Redução das incertezas sobre o Metano recuperado (R) em inventários de emissões de gases de efeito estufa por tratamento de resíduos, e sobre o parâmetro AdjustmentFactor (AF) em projetos de coleta e destruição de metano em aterros no âmbito do MDL.*São Paulo, Brasil, 2010. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso no dia 14/01/2014.

MENDES, L. G. G.; SOBRINHO, P. M. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. Universidade Estadual Paulista–UNESP. Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá–FEG. Departamento de Energia–DEN. *Revista Ciências Exatas*. Taubaté, v. 11, n. 2, p. 71-76, 2005.

PARAWIRA, W.; MURTO, M.; ZVAUYA, R. AND MATTIASSON, B., Anaerobic batch Digestion of Solid Potato Waste Alone and in Combination with Sugar Beet Leaves. *Renewable Energy*, 2004.

REINHART, D. R.; TOWNSEND, T. G. Landfill Bioreactor, Design & Operation.*Lewis Publishers*.Boca Raton, 1998.

SCHIRMER, W. N.; JUCÁ.J. F. T.; SCHULER, A. R. P.; HOLANDA, S.; JESUS. L. L. Methane Production in Anaerobic Digestion of Organic Waste from Recife (Brazil) Landfill: Evaluation in Refuse of Diferent Ages. *BrazilianJournalofChemicalEngineering*. ISSN 0104-6632 - Brazil 2014.

TARAZONA, C. F. *Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THESSSEN, H.; VIGIL, S. A. Composicion y Caracteristicas, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedoro. *Gestion Integral de ResiduosSolidos*.v. 1, capítulo 11.4, Mc Graw Hill. 1994.

THOMPSON, S.; TANAPAT, S. Waste Management Options for Greenhouse Gas Reduction.*Journal of Environmental Informatics*.6 (1), 16–24, 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Greenhouse gases and Global Warming Potential values*. U.S Greenhouse Gas Inventory Program. Office of Atmospheric Programs, Washington, USA, 1991.

VAN ELK, A. G. H. P. Redução de emissão na disposição final. In: _____. MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO APLICAÇÃO A RESÍDUOS SÓLIDOS. 1. Ed. Rio de Janeiro: IBAMA, 2007.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSÃO GERAL

- A estimativa da produção de metano com base nos parâmetros físico-químicos dos resíduos orgânicos presentes no biorreator estudado, permitiu entender os mecanismos envolvidos na cinética de conversão microbiana.
- O monitoramento dos parâmetros físico-químicos pH, Alcalinidade e Ácidos Voláteis possibilitou entender o processo biodegradativo dos resíduos sólidos orgânicos e suas interferências nas concentrações de metano, pois estes parâmetros demonstraram que, assim como a temperatura, o tamponamento da massa de resíduo pode ser um fator determinante na atividade das arqueas metanogênicas produtoras de metano.
- Identificou-se que os fatores intervenientes na produção de metano estão relacionados às altas concentrações de ácidos voláteis, ao pH, a presença de oxigênio no meio, e as variações de temperatura que podem afetar a atividade das arqueas metanogênicas e consequentemente influenciar nas concentrações e volume do metano no biorreator.
- A otimização do processo de produção de metano deu-se por meio da adição do inóculo (esterco bovino), o qual proporcionou ao biorreator condições biológicas favoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos decompositores da massa de resíduo.
- A adição do bicarbonato de sódio (NaHCO_3) também contribuiu para a otimização do processo de produção de metano no biorreator, pois atuou de forma eficiente no tamponamento dos resíduos orgânicos estudados.
- O modelo matemático testado mostrou-se viável na determinação do volume de metano produzido no biorreator, pois se comparada com outros sistemas à produção de metano acumulada deste estudo apresentou-se elevada ficando em torno de 67,5 L.

- O estudo da capacidade de produção de metano dos resíduos sólidos orgânicos apresentou uma importância científica, no qual poderá contribuir para gestão dos resíduos sólidos permitindo estimar a real produção de metano dos resíduos sólidos orgânicos e o seu potencial de contaminação.

REFERÊNCIAS

ABE. Department of Agricultural and Biological Engineering - University of Florida. *Responses of biological systems to environmental stimuli – Biochemical Methane Potential determination*. Disponível em: <www.abe.ufl.edu/~chyn/download/ABE2012C/bmplab_leary.doc>. Acesso em: 12/09/2014.

ALCÂNTARA, P. B. *Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados*. 2007. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE.

ALVES, I.R.F.S. *Análise Experimental do Potencial de Geração de Biogás em Resíduos Sólidos Urbanos*. 2008. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE.

APHA; AWWA; WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. p.1268, 22a ed. Washington. D. C., 2012.

AQUINO, S. F. E.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 10, n. 2, p. 152 – 161. 2005.

ARAÚJO, E. P.; FARIAS, R. M. S.; COSTA, E. P.; SANTOS, S. G.; MONTEIRO, V. E. D.; ARAÚJO, J. M. Relação entre os Sólidos Voláteis e a Presença de Microrganismos Aeróbios em um Biorreator na cidade de Campina Grande-PB. In: III SIMPÓSIO DE INOVAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS – SICBIO, Recife-PE, 2010.

ATABI, F.; EHYAEI, M. A.; AHMADI, M. H. Calculation of CH₄ and CO₂ Emission Rate in Kahrizak Landfill Site with Land GEM Mathematical Model. In: THE 4TH WORLD SUSTAINABILITY FORUM – CONFERENCE PROCEEDINGS PAPER. 2014.

AUDIBERT, J. L. *Avaliação Qualitativa e Quantitativa do Biogás do Aterro Controlado de Londrina*. 2011. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

AUSTERMANN, S.; ARCHER, E.; WHITING, K. J. *Comercial Assessment - Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects, Juniper for Renewables East*, 2007. Disponível em:

<[http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RE S/PUBLICATIONS/RENEWABLES%20EAST%20%20ANAEROBIC%20DIGESTI%20\(F ULL%20REPORT\).PDF](http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RE S/PUBLICATIONS/RENEWABLES%20EAST%20%20ANAEROBIC%20DIGESTI%20(F ULL%20REPORT).PDF)>. Acesso em: 14 de nov. de 2014.

BARCELOS, B. R. *Avaliação de Diferentes Inóculos na Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Orgânicos*. 2009. 90 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília.

BARRERA, P. *Biodigestores: Energia, Fertilidade e Saneamento para a Zona Rural*. São Paulo: Editora Ícone, p. 11, 1993.

BARRETO, A. C.; CAMPOS, C. M. M. Avaliação de um Sistema de Irrigação Autopropelido Aplicando Água Residuária de Suinocultura. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 33, Edição Especial, p. 1752-1757, 2009.

BARROS, R. M. et al. Estudo da produção de biogás da digestão anaeróbia de esterco bovino em um biodigestor. *Revista Brasileira de Energia*. v. 15, N. 2, 2º, p. 95-116, Sem. 2009.

BLOOM, P. R.; MACBRIDE, M. B.; WEAVER, R.M. Aluminum Organic Matter in Acid Soils: Buffering and Solution Aluminum Activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:488-493, 1979.

BORGLIN, S. E. et al. Comparison of Aerobic and Anaerobic Biotreatment of Municipal Solid Waste. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* V. 54, p. 815–822, 2004.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de Agosto de 2010. Dispõe sobre a *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. *PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA: Casa Civil - Subchefia para Assuntos Jurídicos*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acessado em 04 de Jul. de 2014.

CAMPOS, J. R. et al. *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*. PROSAB, Abes, Rio de Janeiro, 435 p, 1999.

CAMPOS, C. M. M.; SALÉH, B.B.; CARMO, F. R. Determination of Kinetic Parameters of a La-scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) tion of Kinetic Parameters of a La-scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) Removing Organic Loading from Swine Manure Effluents. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, V. 29, p. 1045 – 1051, 2005.

CAMPOS, C. M. M. et al. Desenvolvimento e Operação de Reator Anaeróbio de Manta de lodo (UASB) no Tratamento dos Efluentes da Suinocultura em Escala Laboratorial. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, v. 30, p. 140-147, ISSN 1413-7054, 2006.

CASSINI, S.T. *Digestão de Resíduos sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás*. Rio de Janeiro, Projeto PROSAB, ABES/Rima, 210p., 2003.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. Biodigestores. In: 6º SEMANA DE TECNOLOGIA EM ALIMENTOS, Ponta Grossa, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.

CASTILHOS JR. A. B. *Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte*. Projeto PROSAB - RIMA, ABES, Rio de Janeiro, 2003.

CATAPRETA, C. A. A. *Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação*. 2008. 316 p. Tese (Doutorado em Saneamento, meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais.

CATAPRETA, C.A.A.; SIMÕES, G.F. *Caracterização volumétrica dos resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro sanitário experimental*. XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS. 2008.

CHANAKYA, H. N; RAMACHANDRA, T. V et al. Micro-treatment Options for Components of Organic Fraction of MSW in Residential Áreas. *Environ Monit Assess.* N. 135, p. 129–139. 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: DESA/Universidade Federal de Minas Gerais, 246p. 1997.

CHERNICHARO C. A. L. *Reatores Anaeróbios, Cap. 2 -Fundamentos da Digestão Anaeróbia*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios*. 2.ed., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CHERNICHARO, C.A.L. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, v. 5, 379 p., 2007.

CONTRERA, R. C. *Estudo da Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários em Sistema de Reatores Anaeróbio e Aeróbio Operados em Bateladas Sequenciais e em um Filtro Biológico Anaeróbio Contínuo de Fluxo Ascendente*. 2008. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DEAN, W. *A ferro e fogo: a história e a Devastação da Mata Atlântica Brasileira*. Tradução de Cid Knipel Moreira. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M. et al. Biodigestores Rurais: Modelo Chinês, Indiano e Batelada. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4º, Campinas. Bauru: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2002.

DILLENBURG, M. E. *Variação da Taxa de Recirculação de Lixiviado Determinada pela Concentração de Ácidos Voláteis no Tratamento da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos domésticos*. 2006. 135 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

EGREJA FILHO, F. B. *Relatório de atividades de consultoria junto à superintendência de limpeza urbana de Belo Horizonte*. Belo Horizonte: CODEPRO, 1996.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanco Energético Nacional 2012 – Ano Base 2011*. Brasília: EPE, 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em 20 de jun.de 2013.

FERREIRA, M. A. da S. *Aplicação de Modelos de Avaliação Qualitativa e Quantitativa dos Percolados Gerados em um Aterro Sanitário*. 2006. 212 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio.

FIRMO, A. L. B. et al. Avaliação do Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro da Muribeca. In: 3º SIMPÓSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA DE RESÍDUOS. JOÃO PESSOA-PB, 2010.

FOLLETTO, F. A. et al. Metodologia para Quantificação de Pequena Quantidade de Biogás Gerado em Reatores Anaeróbios em Escala de Laboratório. IX SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – PUCRS, 2008.

GARCÍA-RODEJA, E.; NÓVOA, J.C.; PONTEVEDRA, X.; MARTÍNEZ-CORTIZAS, A. & BUURMAN, P. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena*, 56:155-183, 2004.

HANSEN, T. L.; SCHMIDT, J. E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J. C.; MOSBAEK, H. AND CHRISTENSEN, T. H. Method for Determination of Methane Potentials of Solid Organic Waste. *Waste Management*. 24(4), p. 393-400. 2004.

HARRIES, C. R.; CROSS, C.J.; SMITH, R. Development of a Biochemical Methane Potential (BMP) Test and Application to Testing of Municipal Solid Waste Samples. In: PROCEEDINGS SARDINIA, EIGHTH INTERNATIONAL WASTEMANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM. Cagliari, Italy. Cagliari: CISA. v. 1, p. 579-588. 2001.

HUITRIC, R., SONI, R. Making the Most of LFG Projection Models. In: PROCEEDINGS FROM SWANA'S 20TH ANNUAL LFG SYMPOSIUM. Monterey California, USA, 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Solid Waste Disposal. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Report produced by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on the invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change, 2006.

ITAIPU. *Binacional*. 2008. Disponível em: <[http://http://www.itaipu.gov.br](http://www.itaipu.gov.br)>. Acesso em 08 de Jun. de 2013.

KUNZ, A. Suinocultura Brasileira e Cenário de Créditos de Carbono Pós Cop-15. *Suinocultura Industrial*, n 3. 2010.

LEITE, H. E. A. S. *Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande-PB*. 2008. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LEVINE, A. D. et al. *Assessment of Biogeochemical Deposits in Landfill Leachate Drainage Systems*. Florida: University of South Florida, 2005.

LIMA, L. M. Q. *Lixo: Tratamento e Biorremediação*. Hemus. 3. ed. Campinas. Brasil. 1995.

LOPES, W.S. *Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos Inoculados com Rumem Bovino*. 200. 72 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.

LOPES, W. S; LEITE, V. D; SOUSA, J. T; PRASAD, S; ATHAYDE JUNIOR, G. B. Fatores Interveniante no Processo de Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos. In 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, SC, 2003 .

LORA, E.S.; ANDRADE, R.V. Biomass as Energy Source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.13, p.777-788, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 08 de Jul. de 2014.

MAGALHÃES, G. H. C; ALVES, J. W. S; SANTOS FILHO, F; COSTA, R.M; KELSON, M. *Redução das Incertezas Sobre o Metano Recuperado (R) em Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Tratamento de Resíduos, e Sobre o Parâmetro Adjustment Factor (AF) em Projetos de Coleta e Destruição de Metano em Aterros no Âmbito do MDL*. São Paulo, Brasil, 2010. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 14 de jan. de 2014.

MARTINS, Davis Silva; ASSIS, Elaine Gomes. Estudo de Viabilidade Econômica da Implantação de um Biodigestor em uma Granja de Perus. In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27, 2007, Foz do Iguaçu. Anais eletrônicos..., 2007. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR590444_9790.pdf>. Acesso em 16 de Dez. de 2013.

MAURÍCIO, G. Perspectivas Energéticas, Socioeconômicas e Ambientais. *Revista Agroenergia da Biomassa Residual*, Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, Editor: Cícero Bley Jr., et al., 2ª ed. rev., 2009.

MCCARTY, P. L., PITTMANN, *Biotechnology: Principles and Applications*. 754 p, McGraw-Hill – New York, B. E. *Environmental* 2001.

MEDEIROS. N. V. S. et al. *Análise de Reator Anaeróbico de Bancada para Biodigestão Controlada em Laboratório*. Universidade Federal do Pernambuco – UFPE, 2013.

MEIRA, R. C. *Estudo Biodegradativo dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande – PB em Escala Experimental*. 2009. 113 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.

MELO, M. C. *Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados*. 2011. 148p. Tese (Doutorado em Ciencia e Engenharia de Materiais), Centro de Ciencias e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MENDES, L. G. G.; SOBRINHO, P. M. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. Universidade Estadual Paulista–UNESP. Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá–FEG. Departamento de Energia–DEN. *Revista Ciências Exatas*. Taubaté, v. 11, n. 2, p. 71-76, 2005.

METCALF, L.; EDDY, P.H. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*, 3rd ed., Singaporpe: McGraw-Hill Int., 1991.

MONTEIRO, V. E. D. *Análises físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro da Muribeca*. 2003. 246 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

NECKER, H. S; ROSA, A. L. D. Estimativa Teórica da Geração de Biogás do Futuro Aterro Sanitário de Ji - Paraná – RO. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET*. e-ISSN 2236 1170, v. 17 n. p. 3416- 3424, 2013.

NISHIMURA, R., *Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional*. 2009. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.

OLIVEIRA, K. T. L. L.; GOMES, R. A. *Contribuições da Recuperação do Biogás de Aterro Sanitário: Uma Análise para Goiânia*. 2009. Disponível em

<<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/conj/conj12/artigo03.pdf>>. Acessado em 10 de dez. de 2014.

OLIVEIRA, L. B., ROSA, L. P. Brazilian Waste Potential: Energy, Environmental, Social and Economic Benefits. *Energy Policy*. 31: 1481–1491, 2003.

OLIVER, et al. *Manual de Treinamento em Biodigestão*. Instituto Winrock. Brasil, 2008.

PARAWIRA, W.; MURTO, M.; ZVAUYA, R. AND MATTIASSON, B., Anaerobic batch Digestion of Solid Potato Waste Alone and in Combination with Sugar Beet Leaves. *Renewable Energy*, 2004.

PEDOTT, J. G. J.; AGUIAR, A. O Biogás em Aterros Sanitários: Comparando a Geração Estimada com a Quantidade Verificada em Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. *Holos*, Ano 30, Vol. 4, ISSN 1807 – 1600, 2014.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MONTERANI, F. *Effects of pH, acidity and alkalinity on the microbiota activity of an anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating pig manure effluents*. Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 4(3), p. 157-168, 2009.

PEREIRA, F. T. G. et al. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB. In: SINRES - 2º SIMPÓSIO NORDESTINO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. 2010.

PINTO, C. P., *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*. 1999. 162f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills*. Tech Project n. E20 G01. 1985.

POLVINELLI, J. *Ação dos Metais Pesados nos Processos Biológicos de Tratamento de Águas Residuárias*. 1987. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo, São Paulo.

PRADO, M. A. C. et al. Estudo da Variação da Concentração de Metano no Biogás Produzido a Partir das Águas Residuárias do Café. *Ciênc.agrotec.*, Lavras, v. 34, n. 2, p. 475-484, 2010.

REINHART, D. R.; TOWNSEND, T. G. Landfill Bioreactor, Design & Operation. *Lewis Publishers*. Boca Raton, 1998

RIBEIRO, D. V. *Resíduos Sólidos: Problema ou Oportunidade?* Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

RIBEIRO, L. S. et al. Evolução da Concentração de Cloretos dos Resíduos Sólidos Urbanos em Biorreator. III CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. São Paulo – SP, 2012.

RIUJI, L. C. Research on Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste at Household Level in Dar Es Salaam, Tanzania. *Bachelorthesis*. Institute of Natural Resource Sciences. Zurich University. 63f. 2009.

SCHIRMER, W. N., JUCÁ, J. F. T., SCHULER, A. R. P., HOLANDA, S., JESUS, L. L. *Methane Production in Anaerobic Digestion of Organic Waste from Recife (Brazil) Landfill: Evaluation in Refuse of Different Ages*. Brazilian Journal of Chemical Engineering. ISSN 0104-6632 – Brazil, 2014.

SCHUMACHER, M.M. Landfill Methane Recovery. *Energy Technology Review*, nº 84. Park Ridge: Noyes, 558p. 1983.

SILVA, P. C. M. et al. Estudo da Biodegradabilidade e do Potencial de Geração de Biogás através de Monitoramento de Reatores com Resíduos Sólidos Urbanos. VII CONGRESSO NORTE E NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO – CONNEPI, 2012.

SOUSA, R. B. A. et al. *Análise da Capacidade Tamponante do Meio de Degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos em um Lisímetro*. 24º. Encontro Técnico AESABESP, 2013.

SOUZA, J. et al. Usinas para Tratamento de RSU: Biodigestão Anaeróbia Versus Incineração. *RevistaEspacios*, V. 35 (nº11), 2014.

SPONZA, D. T. AND AĞDAĞ, O. N. *Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors*. *Process Biochemistry*, 39(12), p. 2157-2165, 2004.

STAFFORD, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R. *Methane Production From Waste Organic Matter*. 285p., CRC Press, Inc., 1980.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W. & ANDERSON, J. M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Berkeley: University of California Press, 1979. 372p.

TARAZONA, C. F. *Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. 2010. 210 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues*. New York, 1993.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THESSSEN, H.; VIGIL, S. A. Composicion y Caracteristicas, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedoro. *Gestion Integral de Residuos Sólidos*. v. 1, capítulo 11.4, Mc Graw Hill. 1994.

TEIXEIRA, V.H. *Biogás*. Textos Acadêmicos. UFLA/FAEPE. Lavras, Minas Gerais, 2003.

THOMPSON, S.; TANAPAT, S. Waste Management Options for Greenhouse Gas Reduction. *Journal of Environmental Informatics*.6 (1), 16–24, 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Greenhouse gases and Global Warming Potential values*. U.S Greenhouse Gas Inventory Program. Office of Atmospheric Programs, Washington, USA, 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *LANDGEM (Landfill Gas Emission Model)*, Version 3.01 – User’s Guide, EPA – Environmental Research Group, 2005.

VAN ELK, A. G. H. P. Redução de Emissão na Disposição final In: _____. *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicação a Resíduos Sólidos*. 1. Ed. Rio de Janeiro: IBAMA, 2007.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGER, G. *Tratamento Anaeróbio de Esgoto: Um Manual para Regiões de Clima Quente*, Epgraf, Campina Grande, 240p, 1994.

VAVILIN, V. A. et al. Modelling Methanogenesis During Anaerobic Conversion of Complex Organic Matter at Low Temperatures. *Water Science and Technology*, 36(6-7):531-538, 1997.

WEREKO-BROBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. *Biomass Conversion and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 2000.

WHITELEY, C.G., LEE, & D.J. *Enzyme technology and biological remediation*. Enzyme and Microbial Technology, p. 38, p. 291–316, 2006.

WINROCK: *Manual de Biodigestão*. Salvador, BA: 21 p. 2005.

XAVIER, C. A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. *Parâmetros de Dimensionamento para Biodigestores Batelada Operados com Dejetos de Vacas Leiteiras com e Sem Uso de Inóculo*. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 2, apr. 2010 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010069162010000200003&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 10 de jan. de 2014.

ZISON. S. *Landfill Gas Production Curves: Myths vs. Reality*. City of Commerce: Pacific Energy, 1990.