



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**  
**PRO - REITORIA DE PÓS - GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E TEMPERATURA NA  
BIOESTABILIZAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS**

**ALUNO: JORGE MARCELL COELHO MENEZES**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. VALDERI DUARTE LEITE**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ALDRE JORGE MORAIS BARROS**

**CAMPINA GRANDE-PB**

**2012**

**JORGE MARCELL COELHO MENEZES**

**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E TEMPERATURA NA  
BIOESTABILIZAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. VALDERI DUARTE LEITE**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ALDRE JORGE MORAIS BARROS**

**CAMPINA GRANDE-PB**

**2012**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na sua forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL-UEPB

M543i Menezes, Jorge Marcell Coelho.  
Influência da Concentração de sólidos totais e temperatura na bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos [manuscrito]. / Jorge Marcell Coelho Menezes. – 2012.  
99 f.: il. color.

Digitado

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Centro de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual da Paraíba, 2012.

“Orientação: Prof. Dr. Valderi Duarte Leite, Departamento de Ciência e Tecnologia”.

1. Resíduos sólidos orgânicos vegetais. 2. Digestão anaeróbia. 3. Reator anaeróbio em batelada. 4. Temperatura. 5. Concentração de sólidos totais. I. Título.

22. ed. CDD 363.728 5

JORGE MARCELL COELHO MENEZES

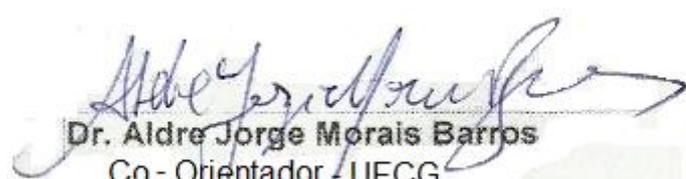
**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E TEMPERATURA NA  
BIOESTABILIZAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ORGÂNCOS**

Aprovada em 30 de Março de 2012

BANCA EXAMINADORA:



**Dr. Valderi Duarte Leite**  
Orientador - UEPB



**Dr. Aldre Jorge Morais Barros**  
Co - Orientador - UFCG



**Dr. José Tavares de Oliveira**  
Examinador Interno - UEPB



**Dr. Roberto Alves de Oliveira**  
Examinador Externo - UNESP

**Campina Grande, PB**

**2012**

## **DEDICATÓRIA**

A Deus,  
Aos meus pais  
Ana Cristina e Francisco Jorge  
e em especial a minha noiva  
Andreza Raphaella.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por iluminar meus passos e sempre me dar forças para superar os obstáculos que surgem em minha vida com sua benção.

Aos meus pais Ana Cristina e Francisco Jorge e a meu irmão Saulo, por sempre estarem ao meu lado. Obrigado por me tornarem o que sou hoje, uma pessoa determinada e que não se abala com os obstáculos da vida.

Em especial à minha noiva Andrezza Raphaella, por estar sempre ao meu lado nas minhas conquistas e, principalmente, nos momentos mais difíceis de minha vida. Obrigado por fazer com que todos os instantes da minha vida sejam mais completos.

A minha Família e amigos do Crato – CE, por todo o carinho, apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida. Em especial a minha avó Cândida e aos meus primos Felipe e João Leite.

A Marluce Costa e João Vianeí, por me acolherem como um filho na família. A Roberta, Márcio e meus sobrinhos Andrezza e Andrey, por vocês estarem sempre me apoiando e incentivando a lutar por meus objetivos.

A Valderi Duarte Leite por tamanha excelência como orientador, por seu incentivo, amizade, ensinamentos e contribuições ao longo dessa pesquisa.

Ao meu Co-orientador Aldre Jorge, pelo incentivo e confiança em mim depositado.

Aos Professores José Tavares de Sousa e Roberto Alves de Oliveira, por aceitarem participar desta banca de dissertação.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, por todo o conhecimento repassado através de seus professores, em especial aos Professores Wilton Silva Lopes e Fernando Fernandes Vieira. Obrigado pela ajuda e por não medir esforços, auxiliando sempre que necessário.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, possibilitando a realização deste trabalho.

À minha turma de mestrado em especial a Alaine, Hindria e Marielle pelo companheirismo ao longo do curso.

A equipe da EXTRABES, Matheus, Cícero, Aline, Isabelle, Julia, Catarina, Luciana e em especial a Aurélia e a todos os demais que de alguma forma, me ajudaram através de incentivo, conselho, companheirismo e parceria no dia a dia.

Aos Grandes amigos conquistados em Campina Grande, Tiago Cavalcante, Rene, Juliana, Wagner Moreira, Thiago José, Felipe e Karol pela convivência prazerosa repleta de momentos especiais e por todo o apoio recebido nos momentos difíceis.

Aos amigos conquistados na USP em São Carlos – SP, Daniel, Tiago, Rafael, Dagoberto e Fabricio, por serem companheiros durante os 3 meses que passei em São Carlos e pelos ensinamentos que levarei sempre comigo.

A todos que colaboraram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho.

Don't worry about a thing,  
cause every little thing gonna be all right.

**Bob Marley**

## RESUMO

Cerca de 260 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) são coletados diariamente no Brasil e devido à falta de gerenciamento adequado, o descarte desses resíduos geralmente causa impactos ambientais. Nas destinações finais, os resíduos sólidos orgânicos (RSO), presentes nos RSU, sofrem biodegradação, produzindo lixiviado e gases de efeito estufa. Os resíduos sólidos orgânicos vegetais (RSOV), parcela dos RSO, merecem destaque quanto ao tratamento, pois os mesmos são gerados em grandes quantidades nas centrais de abastecimento, portanto podem constituir grande risco ao ambiente. Uma alternativa que se destaca no âmbito do tratamento de RSO é a digestão anaeróbia, isto devido produzir  $\text{CH}_4$  como produto final, considerando-se como fonte de energia renovável. Neste estudo foi analisado o comportamento da digestão anaeróbia dos RSOV em reatores anaeróbios em batelada (RAB), verificando a influência das temperaturas ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ),  $40$  e  $50^\circ\text{C}$  e concentração de sólidos totais de  $36,2$ ;  $48,5$  e  $59,9$   $\text{gST.L}^{-1}$  em sua bioestabilização. O sistema experimental foi instalado e monitorado nas dependências da Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgoto Sanitário da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande – PB. Os substratos utilizados na alimentação dos reatores foram preparados a partir da mistura de RSOV e lodo anaeróbio de esgoto sanitário, oriundo de reator UASB. 27 RAB foram monitorados, sendo 12 de 2,30 litros e 15 de 1,15 litros de capacidade volumétrica unitária, sendo reservado cerca de 15% deste volume para o *head-space*. A quantificação do volume do biogás foi realizada diariamente e a determinação de sua composição, por cromatografia gasosa, semanalmente. Após 160 dias de monitoramento, os reatores foram descarregados e o substrato bioestabilizado foi caracterizado. Dentre as condições estudadas, observou-se que o tratamento que melhor favoreceu o processo de digestão anaeróbia foi para os reatores com substrato contendo concentração de sólidos totais de  $36,2$   $\text{gST.L}^{-1}$  a temperatura ambiente, obtendo-se eficiência de remoção de  $\text{DQO}_{\text{total}}$  de 28,5%, volume de 23,85 litros de biogás, 9,05 litros de  $\text{CH}_4$  e percentual máximo de  $\text{CH}_4$  no biogás de 56%. Assim, a digestão anaeróbia pode ser considerada alternativa viável para o tratamento dos RSOV, aproveitando seus potenciais energéticos de forma racional e reduzindo o volume de resíduos destinados a lixões e/ou aterros.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos orgânicos vegetais; digestão anaeróbia; reator anaeróbio em batelada; temperatura; concentração de sólidos totais.

## ABSTRACT

About 260 tons of municipal solid waste (MSW) is collected daily in Brazil and due to lack of proper management, these wastes are disposed of improperly usually impacting the environment. In the final destinations, the organic solid waste (OSW) present in MSW, undergo biodegradation, producing leachate and greenhouse gases. The vegetable solids wastes (VSW) portion of the OSW should be highlighted regarding the treatment, as they are generated in large quantities in central supply and can therefore be a major risk to the environment. An alternative that stands under the OSW treatment is anaerobic digestion, due produce  $\text{CH}_4$  as the final product, considering as a source of renewable energy. In this study was analyzed the behavior of the anaerobic digestion of VSW in anaerobic batch reactor (ABR), and the influence of ambient temperatures (average  $21.5^\circ\text{C}$ ),  $40$  and  $50^\circ\text{C}$  and total solids of  $36.2$ ,  $48.5$  and  $59.9 \text{ gST.L}^{-1}$  in its biostabilization. The experimental system was installed and monitored on the premises of the Experimental Station for Biological Treatment of Sewage at the State University of Paraiba, Campina Grande - PB. The substrates used to feed the reactors were prepared from the mixture of VSW and anaerobic sewage sludge, originating from a UASB reactor. 27 ABR were monitored, 12 with 2.30 liters and 15 with 1.15 liter of volume unit, being allowed to about 15% of the volume for the head-space. The quantification of the volume of biogas was performed daily and determination of its composition, by gas chromatography, weekly. After 160 days of monitoring, the reactors were unloaded and the biostabilized substrate was characterized. Among the conditions studied, it was observed that the best treatment that favored the anaerobic digestion was for reactors with a substrate containing total solids of  $36.2 \text{ gST.L}^{-1}$  at room temperature, resulting in removal efficiency 28.5% of total COD, volume 23.85 liters of biogas, 9.05 liters of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CH}_4$  maximum percentage of 56% in the biogas. Thus, anaerobic digestion can be considered a viable alternative for the treatment of VSW, taking advantage of its potential energy in a rational manner and reducing the volume of waste going to landfills and/or landfills.

**Keywords:** Vegetable solid wastes, anaerobic digestion, anaerobic batch reactor, temperature, total solids concentration.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

<b>FIGURA 1:</b> Etapas do processo de digestão anaeróbia .....	28
<b>FIGURA 2:</b> Lodo anaeróbio de esgoto sanitário.....	39
<b>FIGURA 3:</b> Resíduos sólidos orgânicos vegetais triturados e peneirados .....	40
<b>FIGURA 4:</b> Substrato utilizado para alimentação dos reatores .....	40
<b>FIGURA 5:</b> Variação da temperatura ambiente para o período de monitoramento estudado .....	42
<b>FIGURA 6:</b> Reatores anaeróbios em batelada.....	49
<b>FIGURA 7:</b> Representação esquemática do sistema experimental .....	49
<b>FIGURA 8:</b> Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 36,2 gST.L <sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás .....	67
<b>FIGURA 9:</b> Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 36,2 gST.L <sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH <sub>4</sub> ; (b) do volume acumulado de CH <sub>4</sub> .....	68
<b>FIGURA 10:</b> Efeito da temperatura na quantidade percentual de CH <sub>4</sub> presente no biogás gerado, para os substratos contendo 36,2 g ST.L <sup>-1</sup> .....	69
<b>FIGURA 11:</b> Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 48,5 gST.L <sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de biogás; (b) do volume acumulado do biogás .....	71
<b>FIGURA 12:</b> Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 48,5 gST.L <sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; a) da taxa de produção de CH <sub>4</sub> ; b) do volume acumulado de CH <sub>4</sub> .....	72
<b>FIGURA 13:</b> Efeito da temperatura na quantidade percentual de CH <sub>4</sub> presente no biogás gerado para os substratos contendo 48,5 gST.L <sup>-1</sup> .....	73

<b>FIGURA 14:</b> Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 59,9gST.L <sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás .....	74
<b>FIGURA 15:</b> Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 59,9gST.L <sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH <sub>4</sub> ; (b) do volume acumulado de CH <sub>4</sub> .....	75
<b>FIGURA 16:</b> Efeito da temperatura na quantidade percentual de CH <sub>4</sub> presente no biogás gerado diariamente para os substratos contendo 59,9 gST.L <sup>-1</sup> ..	77
<b>FIGURA 17:</b> Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura ambiente (média 21,5°C), quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás. ....	78
<b>FIGURA 18:</b> Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura ambiente (média 21,5°C), quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH <sub>4</sub> ; (b) do volume acumulado de CH <sub>4</sub> .....	79
<b>FIGURA 19:</b> Efeito da concentração de sólidos totais presente no substrato, na quantidade percentual de CH <sub>4</sub> presente no biogás gerado para a temperatura ambiente (média 21,5°C) .....	80
<b>FIGURA 20:</b> Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 40°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.....	81
<b>FIGURA 21:</b> Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 40°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH <sub>4</sub> ; (b) do volume acumulado de CH <sub>4</sub> .....	82
<b>FIGURA 22:</b> Efeito da concentração de sólidos totais presente no substrato, na quantidade percentual de CH <sub>4</sub> presente no biogás gerado para a temperatura de 40°C .....	83

<b>FIGURA 23:</b> Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 50°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.....	84
<b>FIGURA 24:</b> Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 50°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH <sub>4</sub> ; (b) do volume acumulado de CH <sub>4</sub> .....	86
<b>FIGURA 25:</b> Efeito da concentração de sólidos totais presente no substrato, na quantidade percentual de CH <sub>4</sub> presente no biogás gerado para a temperatura de 50°C.....	87
<b>FIGURA 26:</b> Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da DQO (k DQO). .....	97
<b>FIGURA 27:</b> Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da STV (k STV).....	97
<b>FIGURA 28:</b> Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da COT (k COT).....	98
<b>FIGURA 29:</b> Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da NTK (k NTK) .....	98

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1:</b> Classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.....	22
<b>TABELA 2:</b> Classificação quanto à origem da geração dos resíduos sólidos.....	23
<b>TABELA 3:</b> Composição gravimétrica em porcentagem dos RSU de algumas cidades do nordeste do Brasil .....	24
<b>TABELA 4:</b> Grupos e espécies de bactérias participantes do processo anaeróbio..	30
<b>TABELA 5:</b> Parâmetros, frequências, métodos e referências para as análises das frações semissólida e gasosas.....	43
<b>TABELA 6:</b> Tratamentos aplicados aos reatores anaeróbios em batelada .....	48
<b>TABELA 7:</b> Tipos de resíduos sólidos orgânicos vegetais e dados quantitativos de peso e percentual.....	51
<b>TABELA 8:</b> Caracterização química dos resíduos sólidos orgânicos vegetais.....	52
<b>TABELA 9:</b> Características físicas e químicas do lodo anaeróbio utilizado na preparação do substrato .....	54
<b>TABELA 10:</b> Características químicas dos substratos utilizados para alimentação dos reatores .....	55
<b>TABELA 11:</b> Características físicas e química dos substratos, parcialmente bioestabilizados, variando-se as condições de temperatura e concentração de sólidos totais presentes no substrato.....	57
<b>TABELA 12:</b> Balanço de massa dos parâmetros de $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK aplicados ao reator.....	60
<b>TABELA 13:</b> Constantes de decaimento obtidas para os parâmetro de $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK.....	61
<b>TABELA 14:</b> Resumo da ANOVA para a constante k para $DQO_{total}$ .....	62

<b>TABELA 15:</b> Resumo da ANOVA para a constante k para STV. ....	62
<b>TABELA 16:</b> Resumo da ANOVA para a constante k para COT.....	63
<b>TABELA 17:</b> Resumo da ANOVA para a constante k para NTK.....	63
<b>TABELA 18:</b> Modelos cinéticos de decaimento para os parâmetro de $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK.....	64
<b>TABELA 19:</b> Estimativas das concentrações residuais de $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK para o período de monitoramento de 365 dias.....	65
<b>TABELA 20:</b> Eficiências de remoção de $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK para o período de monitoramento de 365 dias .....	66
<b>TABELA 21:</b> Produção teórica e experimental de $CH_4$ para o COT transformado ...	88

## LISTA DE ABREVIACÃO E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AT	Alcalinidade Total
C	Carbono
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CH <sub>4</sub>	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMPASA	Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas
EXTRABES	Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Gás Sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
M <sub>apl</sub>	Massa Aplicada
M <sub>res</sub>	Massa Residual
M <sub>trans</sub>	Massa Transformada
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de Sódio
NBR	Norma Brasileira

NH <sub>3</sub>	Amônia
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nitrogênio Amoniacal
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrito
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
O <sub>2</sub>	Oxigênio
P	Fósforo
PA	Pureza Analítica
pH	Potencial Hidrogeniônico.
RAB	Reatores Anaeróbios em Batelada
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
RSOV	Resíduos Sólidos Orgânicos Vegetais
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Enxofre
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Sulfato
ST	Sólidos Totais
STV	Sólidos Totais Voláteis
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	20
2.1	OBJETIVO GERAL .....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	21
3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	21
3.1.1	Classificação dos resíduos sólidos .....	21
3.2	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	24
3.2.1	Resíduos sólidos orgânicos.....	25
3.3	DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS..	26
3.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	26
3.5	MICROBIOLOGIA DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS.....	28
3.6	CINÉTICA DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS .....	30
3.7	FATORES INTERVENIENTES NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	33
3.7.1	Temperatura.....	34
3.7.2	Concentração de sólidos.....	35
3.7.3	Alcalinidade e pH.....	35
3.7.4	Umidade.....	36
3.7.5	Nutrientes.....	37
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	38
4.1	RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS VEGETAIS.....	38
4.2	LODO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO .....	38
4.3	ESGOTO SANITÁRIO .....	39
4.4	SUBSTRATO .....	39
4.5	MONITORAMENTO DO SISTEMA EXPERIMENTAL .....	42
4.6	METODOLOGIA ANALÍTICA.....	43
4.6.1	Carbono orgânico total.....	44
4.6.2	Alcalinidade total e ácidos graxos voláteis.....	44
4.6.3	Determinação do volume de biogás produzido.....	45
4.6.4	Cromatografia gasosa.....	47

4.7	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	48
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA FRAÇÃO SEMISSÓLIDA....	50
5.2	BALANÇO DE MASSA .....	59
5.3	DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES CINÉTICAS DE DECAIMENTO...	60
5.4	FRAÇÃO GASOSA.....	66
5.4.1	Efeito da temperatura na geração de biogás. ....	66
5.4.2	Efeito da concentração de sólidos totais na geração de biogás. ....	77
5.5	TAXA DE PRODUÇÃO TEÓRICA DE GÁS METANO .....	87
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos está associada diretamente à história do homem desde seu surgimento, porém com o passar dos anos, a industrialização e o acelerado crescimento dos centros urbanos fez com que a sua geração crescesse. Por esse motivo há a necessidade da implantação de sistemas de gerenciamento de resíduos como uma prática usual para que se possa proporcionar a redução dos impactos causados no solo, no ar e nos corpos aquáticos.

Santos, L. (2008), ressaltou a necessidade da implantação de medidas como o acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final para que os resíduos gerados não provoquem problemas de ordem social, ambiental, econômica, paisagística e de saúde pública.

A falta de gerenciamento adequado com relação à separação e disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem como consequência a intensificação da degradação do local em que ocorrerá o seu descarte. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), são coletados cerca de 260 mil toneladas de RSU, diariamente no Brasil, sendo que 50,8% deste quantitativo têm como destinação final lixões, 22,5% aterros controlados e 27,7% aterros sanitários.

Nesse contexto, a elaboração e implantação do projeto de gerenciamento de resíduos sólidos nas cidades é provavelmente a solução mais adequada a ser adotada, possibilitando a implantação de técnicas e incentivo à coleta seletiva. A aplicação desse projeto favorece a separação dos RSU, permitindo que os resíduos passíveis de reciclagem sejam reintroduzidos no ciclo produtivo como matéria-prima, que os resíduos orgânicos possam ser tratados, possibilitando a geração de compostos ou biogás combustível, restando apenas o material inerte que seria destinado a aterros sanitários, tendo como consequência a redução das áreas requeridas por estes, assim como o aumento de sua vida útil e a redução de possíveis impactos ambientais.

Estudos como o de Casado et al. (2010) e Santos e Mota (2010), apontaram que cerca de 30% da composição dos RSU é representada por materiais passíveis de reciclagem, 50% de resíduos sólidos orgânicos (RSO) e os 20% restante de resíduos inertes.

Silva (2009), mencionou que esses RSO são constituídos dos resíduos sólidos rurais ou agrícolas, de alguns tipos de resíduos industriais e de lodo de estação de tratamento de esgoto doméstico.

Quando descartados de forma inadequada, os RSO sofrem biodegradação, tornando-se responsáveis pela geração de compostos poluentes que geram grandes impactos ao meio ambiente. Para evitar tais problemas, se faz necessária a aplicação de métodos que possam ser utilizados como forma de tratamento. Entre esses métodos, destacam-se os processos biológicos aeróbios, que caracterizam-se por produzir compostos capazes de fertilizar o solo, e os processos biológicos anaeróbios, que apresentam como principal produto o biogás, com potencial energético.

Para o delineamento de processos de tratamento dos RSO, devem ser levadas em considerações as condições e exigências locais. No caso do processo aeróbio, existe a vantagem de ser realizado com uma faixa de tempo relativamente menor que o processo anaeróbio, porém requer adição de energia externa devido à necessidade de ser fornecido oxigênio ( $O_2$ ) ao meio. Já o processo anaeróbio tem como produto final o biogás, que possui metano ( $CH_4$ ) em sua composição e pode ser utilizado como fonte energética para o sistema ou até mesmo para comercialização.

Estudos visando o aumento da taxa de bioestabilização dos processos anaeróbios são realizados com a finalidade de reduzir o seu tempo de estabilização. A concentração de sólidos presentes no substrato e a temperatura em que este é submetido a tratamento, são fatores importantes que devem ser estudados para redução deste tempo.

Portanto, o presente trabalho objetivou analisar os efeitos causados pela temperatura e concentrações de sólidos totais em reatores anaeróbios em batelada (RAB), a fim de avaliar entre as condições estudadas a que melhor favorece a bioestabilização anaeróbia.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a degradação de RSO por via anaeróbia em reator anaeróbio em batelada, nas condições de temperatura ambiente (média 21,5°C), 40°C e 50°C e concentrações de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física e química dos resíduos sólidos orgânicos vegetais (RSOV) oriundos da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA), da cidade de Campina Grande – Paraíba;
- Realizar a caracterização quali/quantitativa do biogás e dos RSO estabilizados produzidos pelo processo de digestão anaeróbia;
- Delinear parâmetros cinéticos do processo de bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, em função da concentração de sólidos totais e da temperatura estudada.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS**

Resíduos sólidos é a expressão utilizada para definir de forma mais abrangente todos os tipos de resíduos gerados resultantes das diversas atividades humanas.

Segundo a Norma Brasileira (NBR) 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), revisada em 2004, define-se resíduo sólido como sendo, “resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de varrição e lodos provenientes de sistemas de tratamento de água”.

As características quantitativas e qualitativas dos resíduos sólidos estão diretamente relacionadas ao local onde foram gerados, devido à interferência de hábitos alimentares, fatores econômicos, sociais, culturais, geográficos e climáticos.

Boer et al. (2010), mencionaram que as propriedades dos resíduos sólidos estão relacionadas com as características de cada componente presente em sua composição, como o teor de umidade, matéria orgânica e poder calorífico.

##### **3.1.1 Classificação dos resíduos sólidos**

A diversidade dos componentes presentes na composição dos resíduos sólidos permite que estes sejam classificados com relação à origem e ao nível de risco potencial, favorecendo assim o melhor planejamento e aplicação do gerenciamento de resíduos.

Na Tabela 1 apresenta-se a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, segundo ABNT – NBR 10.004 (2004).

**TABELA 1:** Classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
CLASSE I (PERIGOSOS)	Inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
CLASSE IIA (NÃO-INERTES)	Biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.
CLASSE IIB (INERTES)	Quaisquer resíduos que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: Adaptado da ABNT (2004).

As principais fontes geradoras dos resíduos sólidos estão classificadas na Tabela 2, de acordo com o IPT/CEMPRE (2000).

**TABELA 2: Classificação quanto à origem da geração dos resíduos sólidos.**

ORIGEM DO RESÍDUO	DESCRIÇÃO
DOMICILIAR	Gerados nas residências, podem ser constituídos por restos de comida, papéis, embalagens em geral e uma grande diversidade de outros itens.
COMERCIAL	Originados dos diversos estabelecimentos comerciais e de serviço, como supermercados, lojas, bares, entre outros.
PÚBLICO	Oriundos da limpeza pública urbana, como resíduos de varrição das vias públicas, praias, áreas de feiras livres, entre outros.
SERVIÇO DE SAÚDE	Materiais produzidos em serviços de saúde tais como hospitais, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias entre outros.
PORTOS, AEROPORTOS, TERMINAIS RODOVIÁRIOS E FERROVIÁRIOS	Originam-se basicamente de material de higiene, asseio pessoal e restos de alimentação, que podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados e países.
INDUSTRIAL	Resíduos que apresentam características variadas em função das diversas atividades realizadas, como as indústrias: metalúrgica, petroquímica, alimentícia, entre outros.
AGRÍCOLA	São resíduos sólidos gerados a partir das atividades agrícolas e da pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita, entre outros.
ENTULHOS	Constituem geralmente de resíduos inertes e passíveis a reaproveitamento, são gerados pela construção civil, através de demolições e restos de obras, entre outros.

Fonte: Adaptado IPT/CEMPRE (2000).

### 3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os RSU são os resíduos gerados dentro do perímetro urbano, que compreende residências, comércios, indústrias, estabelecimento de saúde, limpeza pública, construção civil e agrícola.

A diferença na composição dos RSU está relacionada diretamente com a fonte geradora. Essa diferença poder ser observada a partir da análise da composição gravimétrica dos RSU de algumas cidades do nordeste do Brasil apresentada na Tabela 3.

**TABELA 3:** Composição gravimétrica em porcentagem dos RSU de algumas cidades do nordeste do Brasil.

COMPONENTES/CIDADE	CAMPINA GRANDE (Paraíba)	FORTALEZA (Ceará)	PIRAMBÚ (Sergipe)	MURIBECA (Pernambuco)
MATÉRIA ORGÂNICA	56,76	49,0	51,37	48,97
PLÁSTICO	15,52	14,0	18,20	22,96
VIDRO	1,14	2,0	1,11	0,9
METAIS	1,51	2,0	0,61	2,4
PAPEL E PAPELÃO	13,62	14,0	9,20	9,25
OUTROS	11,45	19,0	19,51	15,52

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2000), Santos e Mota (2010), Casado et al. (2010) e Firmo et al. (2010).

Para que o projeto de gerenciamento e disposição final dos resíduos tenha desenvolvimento adequado, é fundamental que os resíduos gerados na região analisada sejam pré-caracterizados, com o objetivo de determinar a composição dos resíduos e a melhor forma para disponibiliza-los no meio ou tratá-los.

A destinação desses resíduos deve ser realizada de forma adequada, pois a presença destes em determinados ambientes propiciará a geração de doenças, contaminação do solo e da atmosfera.

Uma possível solução para esses problemas seria a implantação de projetos de gestão de saneamento, onde ocorreria a administração dos resíduos para que estes não impactassem o meio ambiente. A aplicação do gerenciamento de resíduos sólidos numa comunidade facilitaria o direcionamento dos resíduos passíveis à reciclagem no ciclo produtivo como matéria-prima, restando apenas o material inerte que seria direcionado para o aterro sanitário, resultando em reduções da geração de poluentes e da área requerida para esta disposição final.

### 3.2.1 Resíduos sólidos orgânicos

Os RSO compreendem a parcela dos resíduos que são passíveis de degradação por ação microbiana e sua decomposição resulta em compostos com elevada demanda química de oxigênio (DQO) e gases de efeito estufa.

Observa-se no cenário atual que o processo de reciclagem vem ganhando espaço, mas não atua de forma abrangente, propiciando assim que os RSO sejam destinados de forma inadequada aos lixões e aterros sanitários.

Estima-se que os RSO constituam em média 50% dos RSU, portanto o tratamento dessa fração orgânica presentes nos resíduos, torna-se imprescindível para evitar possíveis impactos ambientais com o seu descarte inadequado.

Segundo Zhu et al. (2009), os processos de tratamento mais utilizados para fração orgânica dos RSU são a compostagem e a digestão anaeróbia.

Souto (2005), considerou a aplicação da digestão anaeróbia, uma alternativa viável que permite a estabilização e redução do volume dos RSU direcionados à disposição final, proporcionando também excelentes condições para o aproveitamento do biogás.

“A digestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU tem sido estudada nas décadas recentes, tentando desenvolver uma tecnologia que ofereça estabilização dos resíduos com recuperação dos recursos” (NGUYEN et al., 2007).

### 3.3 DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

A escolha do processo para tratar os RSO, é influenciada pelo local onde este será implantado. A região deverá absorver os produtos gerados para que seja viável a aplicação desse processo de tratamento.

Santos, M. (2010), ressaltou que a via biológica para degradação dos resíduos, apresenta diversas vantagens, dentre elas a conservação dos recursos, através da reciclagem da matéria orgânica e da possível produção de energia.

A decomposição de compostos orgânicos por via biológica pode ser realizada tanto na presença de  $O_2$ , sendo chamado de processo aeróbio, quanto na ausência deste, processo anaeróbio.

Segundo Subtil (2007), quando há  $O_2$  disponível no meio, a decomposição ocorre por completo, degradando totalmente a molécula orgânica, gerando como produto o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), que é desprovido de energia útil. Na ausência de  $O_2$ , a degradação é parcial, gerando produtos ainda com energia potencial disponível, como é o caso do  $CH_4$ , álcoois e ácidos graxos.

Segundo Parawira (2004), o tratamento aeróbio para os RSO, exemplificado pela compostagem, envolve o uso de  $O_2$  como acceptor de elétrons pelos microrganismos para degradação da matéria orgânica, gerando produtos como o  $CO_2$ , nitrato ( $NO_3^-$ ) e sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), enquanto que a digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo realizado em várias etapas por vários tipos de microrganismos, na ausência de  $O_2$ , sendo os principais produtos  $CH_4$  e  $CO_2$ .

### 3.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA

Raposo et al. (2011), citaram que a digestão anaeróbia é um processo tecnológico bioquímico para o tratamento de substratos orgânicos como esgoto e efluentes industriais, esterco animal e substratos sólidos (culturas energéticas, resíduos da agricultura e rejeitos de alimentos). Este processo envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica complexa pelo consórcio de microrganismos conduzindo a biogás.

Segundo Curry e Pillay (2012), o biogás rico em  $\text{CH}_4$  produzido na digestão anaeróbia é considerado uma fonte energética renovável, adequando-se à produção de energia e pode substituir as fontes energéticas fósseis.

Segundo Bruni (2010), a decomposição anaeróbia da matéria orgânica é um processo complexo que envolve diferentes populações microbianas, em que a maioria destas não produz  $\text{CH}_4$ , porém realizam algumas etapas de toda a cadeia de reações.

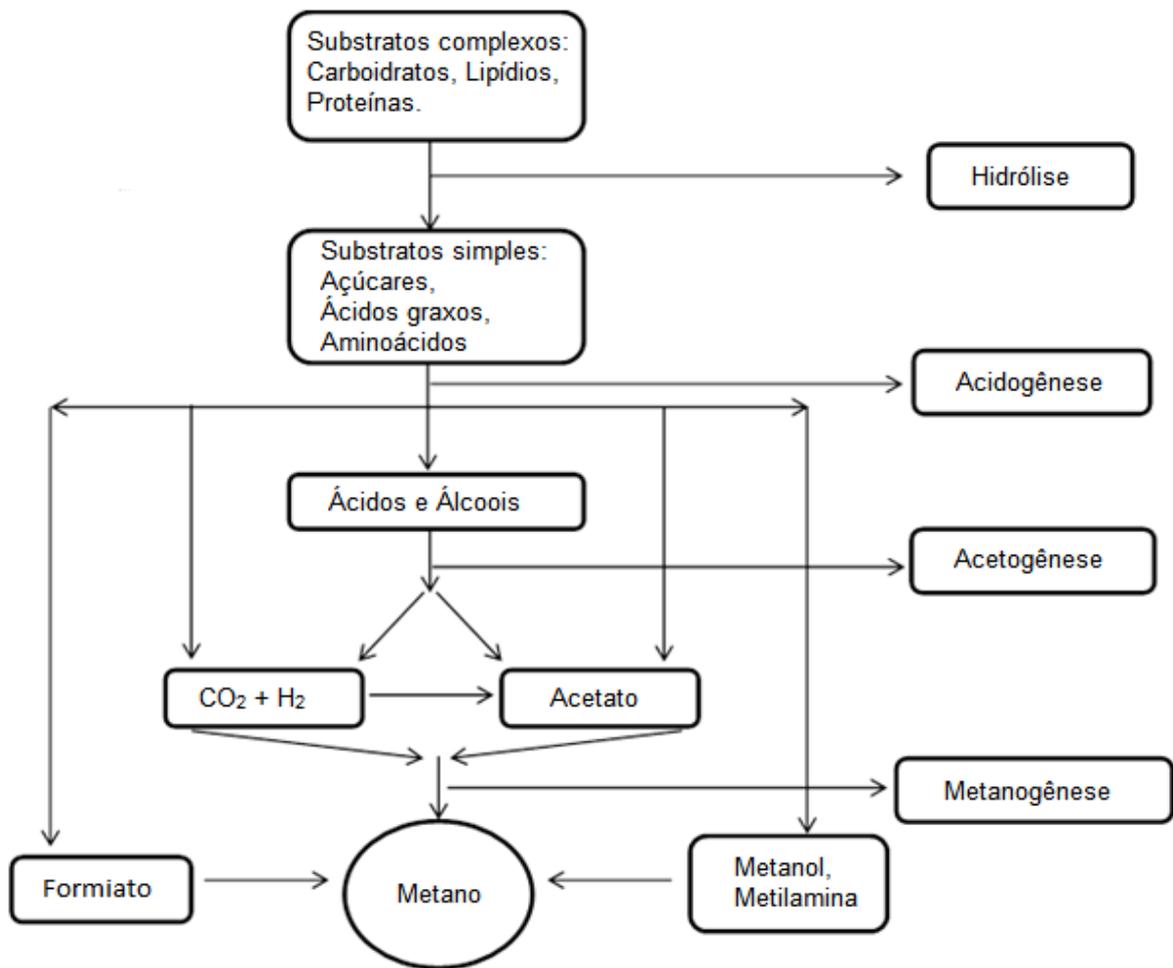
Leite et al. (2009), mencionaram que durante a digestão anaeróbia, diversas espécies de microrganismos interagem na conversão de substâncias complexas em substâncias mais simples, como  $\text{CH}_4$ , compostos inorgânicos,  $\text{CO}_2$ , nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Deublin e Steinhäuser (2008), ressaltaram que a formação de  $\text{CH}_4$  é um processo complexo, que pode ser dividido em quatro fases de degradação, chamadas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Na etapa de hidrólise, bactérias fermentativas convertem a matéria orgânica complexa insolúvel em moléculas solúveis por ação de enzimas hidrolíticas. Segundo Dillenburg (2006), na acidogênese, os compostos orgânicos solúveis são assimilados pelas bactérias, que os convertem a ácidos graxos voláteis (AGV) de cadeia curta, álcoois,  $\text{CO}_2$ , hidrogênio ( $\text{H}_2$ ),  $\text{NH}_3$  e outros compostos. De acordo com Chaudhary (2008), na acetogênese, ocorre digestão das moléculas simples geradas na etapa da acidogênese produzindo  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e principalmente acetato, que são os substratos para formação de  $\text{CH}_4$  na etapa seguinte, chamada de metanogênese, etapa em que é gerado  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ .

Segundo Fdez. - Güelfo et al. (2011a), a digestão anaeróbia pode ser uma opção atrativa como rota de disposição e fonte alternativa de energia, sendo muito estudada com o objetivo de introduzi-la ao tratamento da fração orgânica dos RSU. Os autores ainda citaram que o principal obstáculo na difusão desta tecnologia é a baixa taxa de biodegradabilidade dos resíduos sólidos (devido à composição química e a estrutura de materiais ligno-celulósicos) em comparação aos resíduos líquidos.

O esquema resumido das etapas da digestão anaeróbia é apresentado na Figura 1.



**FIGURA 1:** Etapas do processo de digestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado de Gerardi (2003).

### 3.5 MICROBIOLOGIA DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS

van Haandel e Marais (1999), relataram que durante o metabolismo bacteriano dois processos ocorrem simultaneamente, o catabolismo, que ocorre pela transformação química da matéria orgânica, e o anabolismo, que é o processo de assimilação ou síntese de nova massa celular. Os autores ainda mencionaram que a fonte material para que haja a síntese da nova massa celular vai depender do tipo de microrganismo, podendo ser na presença de microrganismos heterotróficos que utilizam a matéria orgânica ou no caso dos microrganismos autótrofos com o uso do  $\text{CO}_2$ .

Assim, o tipo de produto gerado dependerá da natureza do microrganismo, que, por sua vez, estará sujeito ao ambiente que se encontra, no qual, em ambientes aeróbios, a matéria orgânica será oxidada gerando compostos inorgânicos, já em ambientes anaeróbios, a matéria orgânica é fermentada, transformando-se em novos compostos sem que sejam mineralizados.

De acordo com Bitton (2005), apesar de serem encontrados alguns fungos e protozoários nos digestores anaeróbios, as bactérias são os principais microrganismos responsáveis pela realização do processo de digestão anaeróbia.

A digestão anaeróbia é representada por dois grupos de bactérias, as anaeróbias produtoras de ácidos e as *Archaeas* produtoras de CH<sub>4</sub>. De acordo com Dancanal (2006), esses dois grupos de microrganismos anaeróbios ainda podem ser subdivididos em quatro, sendo eles as bactérias formadoras de ácidos (butírico e propiônico), bactérias acetogênicas (ácido acético e H<sub>2</sub>), as *Archaeas* metanogênicas acetoclásticas e, por fim, *Archaeas* metanogênicas hidrogenotróficas.

Segundo Fdez. - Güelfo et al. (2011b), os microrganismos acidogênicos se desenvolvem mais rapidamente que os metanogênicos. Portanto, caso o substrato apresente elevada concentração de matéria orgânica particulada, a etapa de hidrólise será apontada como limitante, uma vez que será requerido maior tempo para solubilização dos compostos orgânicos. Caso o substrato a ser tratado venha a ser solúvel, a etapa limitante será a metanogênica.

De acordo com Stams e Plugge (2009), filogeneticamente, são diversas as *Archaeas* metanogênicas, sendo mais comumente encontradas atuando com as bactérias anaeróbias, as *Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales* e *Methanosarcinales*. Os autores também citaram que a relação sintrófica dos microrganismos da digestão anaeróbia torna-se importante, em virtude do H<sub>2</sub> não ser abundante na biosfera, e ser requisito necessário para o metabolismo de alguns microrganismos anaeróbios, e é continuamente produzido e consumido por microrganismos que contêm hidrogenases.

Os grupos e espécies de microrganismos que interagem entre si no processo anaeróbio são apresentados na Tabela 4.

**TABELA 4:** Grupos e espécies de bactérias participantes do processo anaeróbio.

TIPOS	ESPÉCIES DE BACTERIAS
BACTÉRIAS FERMENTATIVAS	<i>Clostrídios, Acetivibrio cellulolyticus, Bacteroides succinogenes, Butyrivibrio fibrisolvens, Eubacterium cellulosolvens, Bacillus sp, Selenomonas sp, Megasphaera sp, IachNospira multiparus, Peptococcus anaerobicus, Bifidobacterium sp, Staphylococcus sp.</i>
BACTÉRIAS ACETOGÊNICAS	<i>Syntrophomonas wolinii, S. wolfei, Syntrophus buswellii, Clostridium bryantii, Acetobacterium woddii.</i>
ARCHAEA METANOGENICAS ACETOCLÁSTICA	<i>Methanosarcina sp e Methanotherix sp, Methanosaeta sp.</i>
ARCHAEA METANOGENICAS HIDROGENOTRÓFICAS	<i>Methanobacterium sp, Methanobrevibacter sp, Methanospirillum sp</i>
BACTÉRIAS REDUTORAS DE SULFATO	<i>Desulfotomaculum sp, Desulfovibrio sp, Desulfobacter sp, Desulfococcus sp, Desulfosarcina sp, Desulfobacterium sp, Desulfonema sp</i>

Fonte: LOPES (2000).

### 3.6 CINÉTICA DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS

Segundo Silva (2009), o crescimento da população de microrganismos é um processo de transformações químicas, conhecido como processo fermentativo e deve ter sua cinética estudada, pois o conhecimento dos estágios inicial e final de um processo fermentativo permite uma série de informações, conclusões e avaliações sobre o mesmo, como por exemplo, rendimento, produtividade ou velocidade média de transformação.

A cinética de crescimento dos microrganismos, segundo Subtil (2007), pode ser influenciada por diversos parâmetros, como pH, temperatura do meio, controles internos, pela adaptabilidade ou heterogeneidade das populações celulares e interações entre massa celular e o ambiente (meio), como transferências de nutrientes, de produtos e de calor.

Segundo Libânio (2002), mesmo com as interações entre o meio abiótico e a microflora bacteriana, a estimativa do crescimento biológico pode ser realizada satisfatoriamente por modelos simplificados, construídos a partir da descrição de dois processos: o crescimento celular específico e respiração.

O estudo da cinética dos processos de biodigestão anaeróbia é importante, pois contribui para a determinação e otimização de parâmetros do projeto para reatores de configuração em escala real.

Ramos (2008), ressaltou que existem modelos que representam o crescimento microbiano, sendo o mais utilizado para descrever a taxa de crescimento microbiano, o modelo de Monod, e seus resultados podem ser resumidos em três equações básicas:

- Velocidade bruta de crescimento dos microrganismos (Equação 1):

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_c = Y_{X/S} \left(\frac{dS}{dt}\right)_u \quad (1)$$

Sendo:

X: concentração de microrganismos

S: concentração de substrato

t: tempo

$Y_{X/S}$ : é o fator de crescimento de bactérias por unidade de massa de substrato.

Índice "c": crescimento das bactérias

Índice "u": utilização do material orgânico.

- Velocidade de crescimento dos microrganismos (Equação 2):

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_c = X \cdot \mu = \mu_m \cdot \frac{S \cdot X}{K_s + S} \quad (2)$$

Sendo:

$\mu$ : velocidade específica de crescimento celular.

$\mu_m$ : velocidade específica máxima de crescimento celular

$K_S$ : constante de saturação do substrato para  $\mu = 0,5 \cdot \mu_m$

Para elevadas concentrações de substrato, a razão  $(S \cdot X / K_S + S)$ , se aproxima da unidade, refletindo em velocidade de crescimento microbiano independente da concentração do substrato (processo de ordem zero). Caso a concentração de substrato seja muito baixa ( $S \ll K_S$ ), a velocidade de crescimento se torna proporcional à concentração de substrato (cinética de primeira ordem).

Paralelamente ao crescimento de microrganismos, há o decaimento devido à morte de células vivas (Equação 3):

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_d = -X \cdot K_d \quad (3)$$

Sendo:

$K_d$ : constante da velocidade de decaimento, sendo o índice “d” representativo do decaimento da massa bacteriana.

A relação entre a velocidade específica de consumo de substrato ( $U$ ) e a velocidade específica de crescimento celular ( $\mu$ ), é expressa na Equação 4:

$$U = \frac{\mu}{Y_{X/S}} = U_m \cdot \frac{S}{K_S + S} \quad (4)$$

Sendo:

$U_m$ : Velocidade específica máxima de consumo de substrato ( $M_{\text{substrato}}/M_{\text{células}} \cdot T$ ).

Ramos (2008), ainda comentou que os parâmetros cinéticos  $\mu_m$ ,  $K_s$ ,  $K_d$  e  $U_m$  são específicos para cada cultura em meio líquido e determinadas condições nutricionais e ambientais. A partir dessas características, um modelo cinético deve ser ajustado e as constantes cinéticas determinadas experimentalmente.

Segundo Felizola et al. (2006), o modelo cinético de Monod tem sido usado para descrever o processo cinético em digestores anaeróbios, porém alguns pesquisadores encontram dificuldades em aplica-lo em seus sistemas, isso por necessitar de condições específicas. O modelo de Monod descreve uma cinética de saturação, onde estão em excesso todas as substâncias presentes no meio, com exceção do substrato limitante. Com isso, a equação que produzirá melhor efeito para a remoção do substrato com presença de material particulado, obedecerá à cinética de primeira ordem, apresentada na Equação 5.

$$S = S_0 \times e^{(-k_d \times T)} \quad (5)$$

Sendo:

S: Concentração do parâmetro monitorado para o tempo T.

$S_0$ : Concentração inicial do parâmetro monitorado.

K: Constante de decaimento ( $\text{dia}^{-1}$ )

T: Tempo em dias.

### 3.7 FATORES INTERVENIENTES NA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Muitos são os fatores que influenciam nos processos de tratamento anaeróbio dos resíduos sólidos, sendo a temperatura, concentração de sólidos totais, pH, alcalinidade, umidade e nutrientes, exemplos desses fatores.

### 3.7.1 Temperatura

A temperatura é um fator importante a ser observado na digestão anaeróbia, uma vez que esta pode alterar a atividade metabólica dos microrganismos, influenciar nas taxas das reações enzimáticas e desnaturar enzimas e proteínas em geral.

Segundo Raposo et al. (2011), a digestão anaeróbia pode proceder em condições psicrófilas (< 20°C), mesófilas (20 a 40°C) e termófilas (45 a 60 °C), sendo o principal problema da operação em baixas temperaturas o decréscimo na atividade do consórcio microbiano.

De acordo com Leite et al. (2004), em temperaturas altas, as reações biológicas ocorrem com maior velocidade, resultando possivelmente em maior eficiência do processo.

Zhang et al. (2006), citaram que a temperatura exerce papel vital na degradação da fração orgânica dos RSU, podendo afetar significativamente na conversão, cinética, estabilidade, qualidade do efluente e, conseqüentemente, no rendimento de formação do CH<sub>4</sub>. Os autores também ressaltaram que digestores anaeróbios convencionais operam na faixa de temperatura mesófila ou termófila, ou ainda no caso de países tropicais, em temperaturas ambientes.

De acordo com Bergamo et al. (2009), o efeito da temperatura na atividade biológica está relacionado ao tempo de retenção celular nos biodigestores, que deve ser superior com a diminuição da temperatura. Apesar dos microrganismos anaeróbios poderem se aclimatar às temperaturas de operação fora da faixa ideal, a atividade da biomassa e o desempenho do digestor podem ser adversamente afetados.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), manter a temperatura estável, na digestão anaeróbia, é importante devido às bactérias, especialmente as formadoras de CH<sub>4</sub>, serem sensíveis às mudanças de temperatura.

### 3.7.2 Concentração de sólidos

De acordo com Leite e Povinelli (1999), o resíduo total presente no substrato, seja oriundo de fonte orgânica ou inorgânica, irá se referir à concentração de sólidos totais, podendo ser o indicador da massa total a ser tratada. Os autores ainda citaram que no processo anaeróbio, a bioconversão acontecerá na fração orgânica do substrato, aumentando a taxa de bioconversão do resíduo à medida que a concentração de sólidos totais voláteis (STV) aumente.

Abbassi-Guendouz et al. (2012), descreveram que baseando-se nos sólidos totais contidos nos resíduos sólidos, são desenvolvidos três principais tipos de tecnologias para a digestão anaeróbia: processos úmidos (teor de sólidos totais inferior a 10%), semi-secos (teor de sólidos totais variando entre 10 a 20%) e secos (teor de sólidos totais superior a 20%). A tecnologia seca, também chamada de processos anaeróbios com alta concentração de sólidos totais, se torna atrativa devido reduzir a quantidade de água presente no resíduo bruto, e conseqüentemente, minimiza o tamanho do reator utilizado no tratamento. Entretanto, são relatadas dificuldades na operação da digestão seca em escalas laboratorial e industrial devido à altas concentrações de sólidos totais.

Segundo Dacanal (2006), as sobrecargas orgânica, hidráulica ou tóxica, podem ocasionar a acumulação de ácidos voláteis, devido à lavagem ou inibição das *Archaeas* metanogênicas, ocasionando, conseqüentemente, a inibição da produção de CH<sub>4</sub>.

### 3.7.3 Alcalinidade e pH

Metcalf e Eddy (2003), citaram que o pH é a forma utilizada para expressar a acidez ou alcalinidade do meio, e é definido como sendo o logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio.

Segundo Lopes (2000), quando o pH apresenta valores baixos, há possibilidade da concentração de AGV estar alta, o que inibirá a metanogênese, no

entanto, quando os valores se encontram acima de 8,0, é possível indicar a formação de  $\text{NH}_3$ .

Bitton (2005), ressaltou que bactérias acidogênicas produzem ácidos que, como consequência, tendem a baixar o pH do substrato. Em condições normais, esta redução é tamponada por bicarbonatos produzidos durante o processo de digestão anaeróbia, quando em condições adversas, esta capacidade tamponante tende a ser rompida, afetando a produção de  $\text{CH}_4$ . O autor ainda relatou que a acidificação é mais inibitória para os microrganismos metanogênicos que para os acidogênicos.

Deublin e Steinhäuser (2008), relataram que o pH ótimo para os microrganismos metanogênicos situa-se entre 6,7 e 7,5 e que para valores abaixo de 6,5, somente a *Methanosarcina* é capaz de suportar, o que reduzirá a eficiência de produção de  $\text{CH}_4$ .

Segundo Manahan (2000), alcalinidade é a capacidade da água de aceitar íons  $\text{H}^+$ . É um parâmetro importante, pois serve como tampão, evitando variações elevadas do pH. Geralmente os íons bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos são responsáveis pela alcalinidade na água.

De acordo com Gerardi (2003), a estabilidade do digestor anaeróbio é alcançada pela alta concentração de alcalinidade. É verificado que o decaimento desta concentração para abaixo do nível operacional normal, indique falha durante a digestão, resultando em rápida mudança no pH. O autor ainda mencionou, que tal redução pode ser causada pelo acúmulo de ácidos orgânicos, ocasionado em virtudes dos microrganismos metanogênicos não converterem os ácidos orgânicos a  $\text{CH}_4$ , ou devido à presença de resíduos que inibam a atividade dos microrganismos formadores de  $\text{CH}_4$ .

#### 3.7.4 Umidade

Lopes et al. (2002), citaram que a umidade contribui para o metabolismo dos microrganismos, pois favorece a assimilação de substrato e nutrientes necessários, comportando-se como agente condutor de enzimas e outros metabólitos microbianos importantes no processo de decomposição anaeróbia.

Segundo Picanço (2004), o crescimento dos microrganismos é influenciado pela mudança nos teores de umidade, pois esta é responsável pelo transporte de enzimas, bem como pela solubilização dos principais nutrientes.

### 3.7.5 Nutrientes

“O bom desempenho dos processos biológicos requer a disponibilidade de nutrientes essenciais para o desenvolvimento microbiano, em proporções adequadas” (VERSIANI, 2005).

Khanal (2008), relatou que na verdade os nutrientes não estão diretamente envolvidos na estabilização dos resíduos, mas são os componentes essenciais de uma célula bacteriana, necessários para a atividade e multiplicação das células existentes e síntese de novas células.

De acordo com Deublein e Steinhäuser (2008), no processo anaeróbio não ocorre o desenvolvimento de muita biomassa, necessitando, portanto, de uma pequena quantidade de nutrientes, tendo como relação desejada para a formação do CH<sub>4</sub>, uma razão de nutrientes de carbono (C), nitrogênio (N); fósforo (P); enxofre (S) de 500:20:5:3 e/ou uma razão de matéria orgânica de DQO:N:P:S de 800:5:1:0,5.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O sistema experimental foi instalado e monitorado nas dependências físicas da Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), localizada no bairro do Tambor na cidade de Campina Grande no estado da Paraíba, nordeste do Brasil.

### 4.1 RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS VEGETAIS

Os RSOV utilizados na preparação dos substratos para a alimentação dos reatores eram restos de frutas e verduras e foram coletados na EMPASA da cidade de Campina Grande.

Após a coleta dos RSOV, feita manualmente, e armazenamento em sacos plásticos, estes foram transportados para a EXTRABES e caracterizados físico-quimicamente e processados a fim de preparar os substratos nas concentrações de sólidos totais desejadas.

### 4.2 LODO ANAERÓBIO DE ESGOTO SANITÁRIO

Para a preparação do substrato, foi utilizado lodo anaeróbio de esgoto sanitário (Figura 2), coletado em um reator UASB, instalado e monitorado na EXTRABES.



**FIGURA 2:** Lodo anaeróbico de esgoto sanitário.

### 4.3 ESGOTO SANITÁRIO

Para o ajuste do teor de umidade dos substratos preparados, requerido para a obtenção das concentrações de sólidos totais desejadas, foi utilizado esgoto sanitário proveniente do interceptor leste do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Campina Grande – PB, localizado nas proximidades do laboratório da EXTRABES.

### 4.4 SUBSTRATO

Após coletados e caracterizados, os RSOV foram triturados com o auxílio de um triturador de resíduos orgânicos da marca Trapp-TR 2000. Posteriormente, os resíduos triturados foram peneirados em malhas de 3,36mm (mesh 6), até obtenção do produto final com características pastosa e uniforme (Figura 3).



**FIGURA 3:** Resíduos sólidos orgânicos vegetais triturados e peneirados.

Em seguida, foi adicionado lodo anaeróbico de esgoto sanitário ao resíduo peneirado (Figura 4). O substrato foi preparado a partir da mistura de 32 kg de RSOV e 8 kg de lodo anaeróbico, obtendo-se proporção de 80 % de RSOV para 20 % de lodo em base úmida, proposta por Leite et al. (2004).



**FIGURA 4:** Substrato utilizado para alimentação dos reatores.

Para obtenção das concentrações de sólidos totais desejadas, o substrato preparado foi diluído com esgoto sanitário. O volume de esgoto sanitário necessário para ajustar o teor de umidade dos substratos, foi estimado aplicando-se as Equações 6, 7 e 8:

$$M_{R(BS)} = M_{R(BU)} \times C_{ST} \quad (6)$$

$$M_{R(UC)} = \frac{M_{R(BS)}}{C_{ST(D)}} \quad (7)$$

$$M_{Esgoto} = M_{R(UC)} - M_{R(BU)} \quad (8)$$

Sendo:

$M_{R(BS)}$ : Massa do resíduo em base seca (kg);

$M_{R(BU)}$ : Massa do resíduo em base úmida (kg);

$M_{R(UC)}$ : Massa do resíduo com umidade corrigida (kg);

$M_{Esgoto}$ : Massa de esgoto necessária (kg);

$C_{ST}$ : Concentração de sólidos totais (%);

$C_{ST(D)}$ : Concentração de sólidos totais desejada (%).

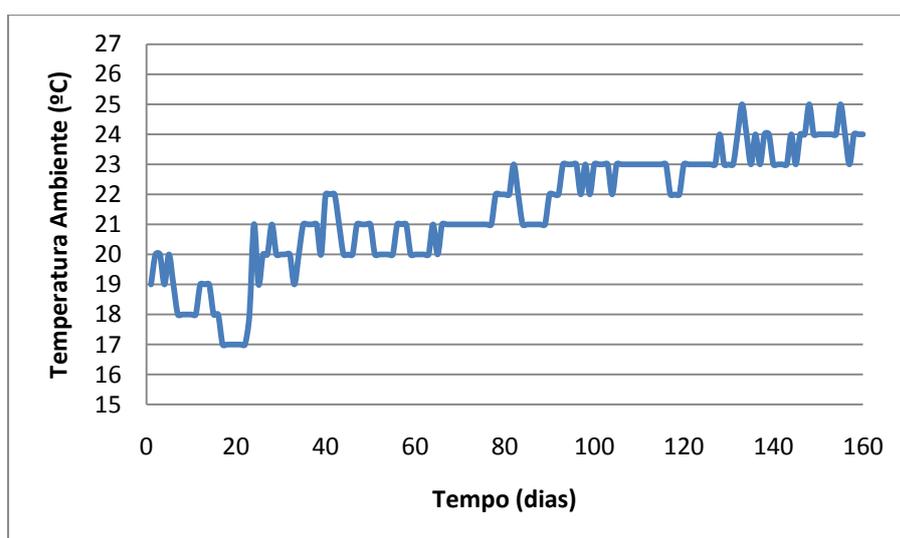
Devido às características de alguns RSOV, o pH inicial do substrato situou-se em torno de 4,30, sendo ajustado para a faixa de 6 a 6,5, com aplicação de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) pureza analítica (PA), para favorecer as condições do processo anaeróbio. Para determinar a quantidade de  $\text{NaHCO}_3$  (PA) necessária a ser adicionada ao substrato, preparou-se uma solução com concentração conhecida da mesma e por meio de titulação de uma amostra do substrato, determinava-se o volume de  $\text{NaHCO}_3$  requerido para o ajuste do pH desta amostra para a faixa

desejada. Por fim, determinava-se a quantidade em massa de  $\text{NaHCO}_3$  (PA) utilizada na titulação, para então ajustar para a quantidade total de substrato preparado.

#### 4.5 MONITORAMENTO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O monitoramento do sistema experimental teve início no dia 26 de Junho de 2011, finalizando no dia 02 de Dezembro de 2011, compreendendo período de 160 dia de monitoramento, consistindo-se da caracterização do substrato afluente, determinação da composição e do volume de biogás produzido nos reatores e caracterização do substrato bioestabilizado após o período de monitoramento.

As temperaturas estudadas foram ambiente,  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ . A variação da temperatura ambiente foi medida diariamente (Figura 5), para o período de monitoramento estudado, com o auxílio de um termômetro de máxima e mínima, possibilitando a determinação do volume de biogás produzido.



**FIGURA 5:** Variação da temperatura ambiente para o período de monitoramento estudado.

Ao observar a Figura 5, constatou-se que a temperatura ambiente no laboratório apresentou valores variando entre 17 a 25 °C, obtendo média de 21,5°C em relação ao período monitorado.

Os parâmetros monitorados, frequências, métodos e as referências de todas as análises são apresentados na Tabela 5.

**TABELA 5:** Parâmetros, frequências, métodos e referências para as análises das frações semissólida e gasosas.

FRAÇÕES	PARÂMETROS	FREQUÊNCIA	MÉTODO	REFERÊNCIAS
FRAÇÃO SEMISSÓLIDA	ST, STV e STF(g/L)	Afluente/Efluente	Gravimétrico	APHA (2005)
	COT (g/L)	Afluente/Efluente	Gravimétrico	Golueke (1977)
	DQO <sub>total</sub> (gO <sub>2</sub> /L)	Afluente/Efluente	Titulométrico	APHA (2005)
	NTK (g/L)	Afluente/Efluente	Micro Kjeldahl	APHA (2005)
	N - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/L)	Afluente/Efluente	Micro Kjeldahl	APHA (2005)
	N - NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (g/L)	Afluente/Efluente	Espectrofotométrico	APHA (2005)
	N - NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (g/L)	Afluente/Efluente	Espectrofotométrico	APHA (2005)
	P <sub>total</sub> (g/L)	Afluente/Efluente	Espectrofotométrico	APHA (2005)
	pH	Afluente/Efluente	Potenciométrico	APHA (2005)
FRAÇÃO GASOSA	CH <sub>4</sub> (%)	Semanalmente	Cromatográfico	
	CO <sub>2</sub> (%)	Semanalmente	Cromatográfico	
	N <sub>2</sub> (%)	Semanalmente	Cromatográfico	
	biogás produzido	Diariamente	Instrumental	

#### 4.6 METODOLOGIA ANALÍTICA

As determinações analíticas dos parâmetros químicos foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005), com exceção para a determinação do teor de carbono orgânico total (COT), onde foi utilizado o método proposto por GOLUEKE (1977), os parâmetros

de alcalinidade total e ácidos graxos voláteis, que seguiram o método proposto por DILALLO e ALBERTSON (1961). As metodologias são apresentadas a seguir:

#### 4.6.1 Carbono orgânico total

A determinação do teor de COT dos substratos afluentes e efluentes bioestabilizados, foi obtida a partir da parcela de STV da determinação de sólidos totais. Conforme a Equação (9), proposta por Golueke (1977), pode-se determinar o teor de COT.

$$COT = \frac{STV}{1,8} \quad (9)$$

Sendo:

STV: Teor de sólidos totais voláteis;

1,8: Fator de correlação constante.

#### 4.6.2 Alcalinidade total e ácido graxos voláteis

O método consiste na titulação da amostra com uma solução de ácido sulfúrico com concentração conhecida, até pH=4, correspondente ao ponto de equivalência da curva de titulação. Esse ponto de equivalência representa a alcalinidade total nas formas de AGV, alcalinidade ao sistema carbonato e fosfato. A Equação 10 é utilizada para determinar a alcalinidade total.

Após determinada a alcalinidade total, reduzia-se o valor do pH da amostra até pH = 3,3, para garantir a completa conversão dos íons bicarbonatos a CO<sub>2</sub>, removendo-os ao aquecer a amostra à temperatura de ebulição por três minutos. Em seguida, estas eram resfriadas, iniciando-se uma segunda titulação, a partir do

pH = 4,0 até pH = 7,0 com solução de hidróxido de sódio, com concentração conhecida, resultando na determinação dos AGV. Os resultados referentes as concentrações de AGV foram determinados pela Equação 11.

$$AT = \frac{N_t \times A}{V_a} \times 50 \text{ (gCaCO}_3\text{/l)} \quad (10)$$

Sendo:

$N_t$ : Normalidade do titulante;

A: Volume gasto na titulação;

$V_a$ : Volume da amostra;

50: Equivalente - grama do  $\text{CaCO}_3$ .

$$AGV = \frac{N_t \times A}{V_a} \times 60 \text{ (gH - Ac./l)} \quad (11)$$

Sendo:

$N_t$ : Normalidade do titulante;

A: Volume gasto na titulação;

$V_a$ : Volume da amostra;

60: Equivalente – grama do ácido acético.

#### 4.6.3 Determinação do volume de biogás produzido

Para a medição do volume de biogás produzido diariamente foi utilizado um manômetro de tubo em “U”, contendo como líquido manométrico álcool etílico hidratado 46° INPM, com massa específica de 914,8070 kg/m<sup>3</sup>. Assim, diariamente foi obtido o valor da altura deslocada pelo líquido manométrico, resultante da

pressão que o biogás exercia no manômetro. Com este valor, foi possível determinar a pressão exercida no reator pela Equação 12, e a partir desta pressão, obtia-se o número de moles existente no biogás a partir da Equação 13. Com o número de moles do biogás e ajustando-se às condições normais de temperatura e pressão (CNTP), pode-se obter o volume de biogás produzido com a Equação 14. Por fim, com os percentuais obtidos pela cromatografia gasosa, determinou-se o volume de cada fração componente do biogás (Equação 15).

$$P_x = P_y + \rho \times g \times h \quad (12)$$

Sendo:

$P_x$ : Pressão exercida no reator (Pa)

$P_y$ : Pressão atmosférica (Pa)

$\rho$ : Massa específica do líquido manométrico (kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : Aceleração de gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$h$ : Altura deslocada no manômetro (m)

$$n_{biogás} = \frac{R \times T}{P_x \times V} \quad (13)$$

Sendo:

$P_x$ : Pressão exercida no reator (Pa)

$V$ : Volume disponível no headspace do reator (m<sup>3</sup>)

$n_{biogás}$ : Número de moles do biogás (mol)

$R$ : Constante dos gases (Pa.m<sup>3</sup>/mol.K)

$T$ : Temperatura do reator (K)

$$V_{biogás} = \frac{n_{biogás} \times R \times T}{P} \quad (14)$$

Sendo:

$V_{biogás}$ : Volume de biogás gerado ( $m^3$ )

$n_{biogás}$ : Número de moles do biogás (mol)

R: Constante dos gases ( $Pa \cdot m^3/mol \cdot K$ )

T: Temperatura na CNTP (K)

P: Pressão na CNTP (Pa)

$$V_{fração} = V_{biogás} \times X_{fração} \quad (15)$$

Sendo:

$V_{fração}$ : Volume da fração do biogás desejada ( $m^3$ )

$V_{biogás}$ : Volume de biogás produzido ( $m^3$ )

$X_{fração}$ : Percentual da fração desejada do biogás (%)

#### 4.6.4 Cromatografia gasosa

Para obtenção da composição do biogás, em termos de  $N_2$ ,  $CH_4$  e  $CO_2$ , foi utilizado o cromatógrafo gasoso, com um detector de condutividades térmica de 250mA, coluna de aço inoxidável, preenchida com Porapak Q 100, de diâmetro interno de 2 mm, diâmetro externo de 6,4 mm e comprimento de 3 m. O gás de arraste utilizado nas determinações foi o hélio, com vazão de 30 L/min. As temperaturas do vaporizador, da coluna e do detector foram mantidas a 75, 75 e 100°C, respectivamente.

As amostras dos gases foram coletadas com o auxílio de uma seringa de 0,5mL com trava para evitar a perda de gás para o ambiente. Para a coleta das amostras de gases, perfurava-se o septo localizado na tampa do reator, possibilitando o acesso da agulha ao *head-space* do reator, onde era acumulado o biogás. Lavava-se a seringa, três vezes, com o próprio biogás a ser coletado, para

possibilitar a remoção de biogás residual, e então, coletava-se 0,5 mL de amostra gasosa, sendo levada ao cromatógrafo para ser injetada e iniciada a análise.

#### 4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foi feito o planejamento experimental com delineamento tipo fatorial completo, utilizando o software estatístico minitab 15 para a análise dos resultados. Foram estudados 3 níveis de temperatura e de concentrações de sólidos totais, com isso 9 tratamentos foram analisados (Tabela 6), em triplicata, totalizando 27 reatores anaeróbios em batelada. Quinze reatores possuíam capacidade volumétrica unitária de 1,15 litros de e os outros doze possuíam capacidade volumétrica unitária de 2,30 litros. Da capacidade volumétrica total de cada reator, cerca de 15% foi destinada para o *head-space*.

**TABELA 6:** Tratamentos aplicados aos reatores anaeróbios em batelada.

TRATAMENTO	TEMPERATURA	CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS (gST.L <sup>-1</sup> )
T1ST1	Ambiente (média 21,5°C)	36,2
T2ST1	40°C	36,2
T3ST1	50°C	36,2
T1ST2	Ambiente (média 21,5°C)	48,5
T2ST2	40°C	48,5
T3ST2	50°C	48,5
T1ST3	Ambiente (média 21,5°C)	59,9
T2ST3	40°C	59,9
T3ST3	50°C	59,9

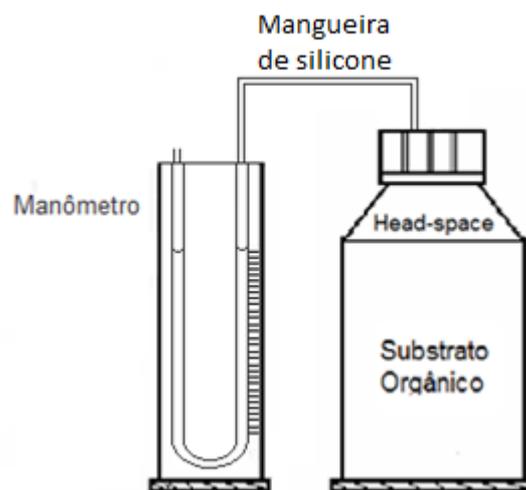
**LEGENDA:** T1 (temperatura ambiente), T2 (40°C), T3 (50°C);

ST1 (36,2 gST.L<sup>-1</sup>), ST2 (48,5 gST.L<sup>-1</sup>), ST3 (59,9 gST.L<sup>-1</sup>).

Os reatores anaeróbios em batelada e a representação esquemática do sistema experimental são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.



**FIGURA 6:** Reatores anaeróbios em batelada.



**FIGURA 7:** Representação esquemática do sistema experimental.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos, inicialmente, os dados da caracterização físico-química dos diferentes tipos de RSOV, dos três tipos de substratos utilizados na alimentação dos reatores e dos resíduos bioestabilizados descarregados dos reatores. Em seguida serão determinadas as diversas frações de massas de substrato de cada reator nos nove diferentes tratamentos estudados. Esta quantificação estratificada propiciará a avaliação sistemática da eficiência de transformação de massa de substrato e, conseqüentemente, subsidiará a determinação de parâmetros cinéticos em função das variáveis adotadas. Por último, serão discutidos os resultados referentes ao biogás produzido em cada reator, de modo a expressar a influência da concentração de sólidos e da temperatura no processo de bioestabilização anaeróbia de RSOV coletados em central de abastecimento.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA FRAÇÃO SEMISSÓLIDA

Os tipos de RSOV utilizados na preparação do substrato e os dados quantitativos dos pesos e percentuais relativos são apresentados na Tabela 7.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que dentre os RSOV descartados na EMPASA, os encontrados em maiores quantidades para o período coletado, foram banana (11,98%), tomate (10,80%), melão espanhol (10,33%) e melancia (10,28) e os encontrados em menores quantidades coentro (0,21%) e acelga (1,45%).

**TABELA 7:** Tipos de resíduos sólidos orgânicos vegetais e dados quantitativos de peso e percentual.

<b>Resíduo</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Percentual (%)</b>
<b>Acelga</b>	2,8	1,45
<b>Banana</b>	23,2	11,98
<b>Batata</b>	13,2	6,82
<b>Berinjela</b>	5,7	2,94
<b>Cenoura</b>	8,0	4,13
<b>Chuchu</b>	4,8	2,48
<b>Coentro</b>	0,4	0,21
<b>Couve</b>	11,7	6,04
<b>Jerimum</b>	4,4	2,27
<b>Mamão</b>	19,2	9,92
<b>Melancia</b>	19,9	10,28
<b>Melão Espanhol</b>	20	10,33
<b>Melão Português</b>	13,2	6,82
<b>Pepino</b>	8,6	4,44
<b>Pimentão</b>	8,2	4,24
<b>Repolho</b>	9,4	4,86
<b>Tomate</b>	20,9	10,80
<b>TOTAL</b>	<b>193,6</b>	<b>100,00</b>

Concluída a caracterização física dos RSOV, foi realizada a caracterização química, apresentada na Tabela 8.

Dos 17 diferentes tipos de RSOV estudados, pode-se constatar que os resíduos caracterizados que apresentaram os maiores valores de DQO foram batata ( $140,4 \text{ g.L}^{-1}$ ) e cenoura ( $111,1 \text{ g.L}^{-1}$ ), enquanto os que apresentaram os menores valores de DQO foram acelga ( $7,7 \text{ g.L}^{-1}$ ) e couve ( $11,3 \text{ g.L}^{-1}$ ). Quanto à concentração de sólidos totais, a batata, banana e cenoura, foram as que apresentaram maiores concentrações, com respectivos valores de  $141,8$ ,  $122,8$  e  $122,2 \text{ g.L}^{-1}$  e os RSOV que apresentaram as menores concentrações de sólidos totais foram pepino ( $24,1 \text{ g.L}^{-1}$ ) e acelga ( $22,1 \text{ g.L}^{-1}$ ). Constatou-se que todas as concentrações de STV foram superiores a 50% da concentração dos sólidos totais, o que é importante, pois como citado por Leite e Povinelle (1999), esta parcela é a que será bioconvertida a biogás.

**TABELA 8:** Caracterização química dos resíduos sólidos orgânicos vegetais.

NOME DA AMOSTRA	UMIDADE	ST	STV	STF	COT	NTK	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	DQO	pH	AT	AGV	C/N
Acelga	97,79	22,1	12,0	10,1	6,7	1,26	0,56	7,7	7,97	3,8	2,18	5,3
Batata	85,82	141,8	128,3	14,8	71,3	1,12	0,28	140,4	3,71	0	4,15	63,7
Banana	87,72	122,8	97,5	25,3	54,2	1,4	0,14	67,0	3,81	0	13,53	38,7
Berinjela	94,84	51,6	44,7	6,9	24,8	1,82	0,42	15,8	7,55	4,4	2,18	13,6
Cenoura	87,78	122,2	76,9	45,3	42,7	1,82	0,28	111,1	4,26	0,8	6,76	23,5
Chuchu	96,02	39,8	35,6	4,2	19,8	0,84	0,28	22,1	5,5	1,8	2,62	23,6
Coentro	92,24	77,6	39,1	38,5	21,7	1,96	0,84	26,2	8,49	15,6	3,93	11,1
Couve	93,28	67,2	51,1	16,1	28,4	1,26	0,70	11,3	8,01	4,4	1,53	22,5
Jerimum	93,35	66,5	53,1	13,4	29,5	1,26	0,28	57,8	5,61	6	7,2	23,4
Melancia	95,28	47,2	31,7	15,5	17,6	1,12	0,14	40,7	4,26	0,2	2,84	15,7
Melão Espanhol	91,82	81,8	66,2	15,6	36,8	1,12	0,14	53,3	4,44	1,2	2,18	32,9
Melão Português	94,74	52,6	38,8	13,8	21,5	2,24	0,70	50,5	4,31	1,8	12,22	9,6
Mamão	93,87	61,3	51,9	9,4	28,8	2,10	0,14	44,5	3,67	0	11,78	13,7
Pepino	97,59	24,1	16,0	8,1	8,9	1,12	0,28	23,5	5,39	3,2	3,27	7,9
Pimentão	95,88	41,2	32,7	8,5	18,1	1,68	0,56	29,1	5,58	3,8	4,80	10,8
Repolho	96,35	36,5	26,9	9,6	14,9	2,38	1,40	14,5	7,67	6	3,49	6,3
Tomate	97,21	27,9	17,2	10,7	9,6	1,26	0,84	24	5,58	4,2	5,45	7,6

\*Todos os parâmetros estão em g.L<sup>-1</sup>, exceto umidade (%), pH.

Os RSOV que apresentaram maiores valores de pH foram coentro (8,49), couve (8,01) e acelga (7,97). Os menores valores de pH foram para o mamão (3,67), a batata (3,71) e a banana (3,81). Levando-se em consideração os 17 tipos de RSOV estudados verificou-se que o pH variou de 3,7 a 8,5, com valor de pH de 4,30, após a mistura. Para a utilização destes tipos de resíduos para o processo de digestão anaeróbia, torna-se imperativa a correção do pH, que foi realizada inicialmente adicionando-se lodo de esgoto sanitário. Mesmo com 20% em peso em base úmida de lodo de esgoto sanitário à massa de RSOV, o pH não atingiu a faixa recomendada para o processo anaeróbio, fazendo-se necessidade da adição de  $\text{NaHCO}_3$  (PA) para ajustar o pH em 6,0 a 6,5.

Com relação às concentrações de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), os maiores valores encontrados foram para o repolho ( $2,38 \text{ g.L}^{-1}$ ), melão português ( $2,24 \text{ g.L}^{-1}$ ) e mamão ( $2,10 \text{ g.L}^{-1}$ ), e a menor concentração encontrada, dentre os RSOV, foi para o chuchu ( $0,84 \text{ g.L}^{-1}$ ).

A relação C/N dos RSOV variou de 5,3 a 63,7; com valor de 11,9; após a mistura, situando-se abaixo da relação recomendada por Deublein e Steinhauser (2008), portanto, a adição de lodo anaeróbio de esgoto sanitário, objetivou, além do acréscimo do pH, também elevar a relação C/N, a fim de favorecer o processo de digestão anaeróbia.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados relativos à caracterização química do lodo anaeróbio de esgoto sanitário, utilizado na preparação do substrato dos reatores.

Pode-se observar que a adição de lodo anaeróbio de esgoto sanitário ao substrato de RSOV, objetivou-se, principalmente, elevar o valor do pH e da relação C/N do substrato, uma vez que apresentou valores de 8,03 e 23,51, respectivamente, que foram superiores aos apresentados pelos RSOV.

Observa-se que foram apresentados resultados elevados quanto as concentrações de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e  $\text{NO}_3^-$ , isso possivelmente ocorreu devido após coletado, o lodo anaeróbio ter sido armazenado em ambiente aeróbio, o que fez com que ocorresse processo de nitrificação.

**TABELA 9:** Características físicas e químicas do lodo anaeróbio utilizado na preparação do substrato.

<b>PARÂMETROS</b>	<b>LODO</b>
<b>Umidade (%)</b>	93,61
<b>ST (g.L<sup>-1</sup>)</b>	63,9
<b>STV (g.L<sup>-1</sup>)</b>	29,62
<b>STF (g.L<sup>-1</sup>)</b>	34,29
<b>COT (g.L<sup>-1</sup>)</b>	16,46
<b>NTK (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0,70
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0,14
<b>DQO<sub>total</sub> (g.L<sup>-1</sup>)</b>	48,48
<b>pH</b>	8,03
<b>AT (g.L<sup>-1</sup>)</b>	7,05
<b>AGV (g.L<sup>-1</sup>)</b>	3,00
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	2,99
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	30,05
<b>Massa Específica (g.L<sup>-1</sup>)</b>	1029,1
<b>P<sub>total</sub> (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0,6115
<b>C/N</b>	23,51
<b>C/P</b>	26,91

Na Tabela 10 são apresentados os dados relativos à caracterização das frações semissólidas, correspondentes aos substratos utilizados nos reatores.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 10, constata-se que foram preparados substratos contendo concentrações de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, obtendo-se valores de DQO de 34,26; 44,56 e 58,57 g.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Tais valores de sólidos totais foram obtidos após estes substratos serem submetidos ao ajuste do teor de umidade com esgoto sanitário, uma vez que a massa de resíduos produzida a partir da mistura dos RSOV (63,8 gST.L<sup>-1</sup>) e o lodo (63,9 gST.L<sup>-1</sup>) possuiu concentração de sólidos totais superior as que seriam estudadas, tornando-se necessário sua diluição para obtenção das concentrações desejadas.

Com relação à concentração de STV, em todos os substratos as concentrações foram superiores à 58% da concentração de sólidos totais, e para o substrato com ST de 36,2 g.L<sup>-1</sup>; os STV foram de 21,29 g.L<sup>-1</sup>, para o substrato de ST de 48,5 g.L<sup>-1</sup>; os STV foram de 29,83 g.L<sup>-1</sup> e para o substrato de ST de 59,9 g.L<sup>-1</sup>; os STV foram de 37,46 g.L<sup>-1</sup>.

**TABELA 10:** Características químicas dos substratos utilizados para alimentação dos reatores.

<b>PARÂMETROS</b>	<b>SUBSTRATO (36,2 gST.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>SUBSTRATO (48,5 gST.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>SUBSTRATO (59,9 gST.L<sup>-1</sup>)</b>
<b>Umidade (%)</b>	96,38	95,15	94,01
<b>ST (g.L<sup>-1</sup>)</b>	36,2	48,5	59,9
<b>STV (g.L<sup>-1</sup>)</b>	21,29	29,83	37,46
<b>STF (g.L<sup>-1</sup>)</b>	14,94	18,65	22,43
<b>COT (g.L<sup>-1</sup>)</b>	11,83	16,57	20,81
<b>NTK (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0,63	0,91	1,12
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0,17	0,21	0,25
<b>DQO (g.L<sup>-1</sup>)</b>	34,26	44,56	58,57
<b>pH</b>	6,52	6,33	6,45
<b>AT (g.L<sup>-1</sup>)</b>	8,95	12,45	15,1
<b>AGV (g.L<sup>-1</sup>)</b>	8,45	10,97	14,35
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup>(mg.L<sup>-1</sup>)</b>	4,44	5,81	7,46
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(mg.L<sup>-1</sup>)</b>	16,82	18,32	21,76
<b>Massa Específica (g.L<sup>-1</sup>)</b>	1009,6	1010,9	1015,9
<b>P<sub>total</sub> (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0,1661	0,2795	0,2890
<b>C/N</b>	18,78	18,21	18,58
<b>C/P</b>	71,24	59,28	72,02

Com relação ao pH, mesmo adicionando o lodo, com pH 8,03, aos RSOV, com pH de 4,30, todos os substratos apresentaram pH em torno de 5,5, o que não favoreceria o processo de bioestabilização anaeróbio, para tanto, foi adicionado

$\text{NaHCO}_3$  (PA) para aumentar o pH, resultando em valores de pH de 6,52 (substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup>); 6,33 (substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup>) e 6,45 (substratos com 59,9 gST.L<sup>-1</sup>).

Quanto às concentrações de NTK para os substratos contendo 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, apresentaram magnitudes respectivas de 0,63; 0,91 e 1,12 g.L<sup>-1</sup>, sendo que deste quantitativo 0,17; 0,21 e 0,25 g.L<sup>-1</sup> correspondiam ao nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Estas concentrações de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, não demonstraram serem tóxicas para a digestão anaeróbia, possivelmente devido ao pH do substrato estar próximo da neutralidade, o que fazia que a forma de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> que seria predominante fosse a ionizada (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), que é menos tóxica aos microrganismos que a livre (NH<sub>3</sub>).

Quanto à relação C/N, foram obtidos valores de 18,78; 18,21 e 18,58, e para a relação C/P foram obtidos valores de 71,24; 59,28 e 72,02, para os substratos com 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo verificado que tais relações não afetaram a eficiência do processo, apesar de estarem abaixo das condições recomendadas ao processo anaeróbio, que são C/N: 25 e C/P:100, de acordo com Deublein e Steinhauser (2008).

Na Tabela 11 são apresentados os dados da caracterização química dos substratos parcialmente bioestabilizados descarregados dos reatores.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 11, observa-se que em todos os tratamentos, houve decréscimo nos valores de pH, sendo obtido menor valor para o tratamento do substrato com 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C), no qual o pH foi 5,53. O tratamento com maior valor de pH foi o substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura de 50°C, obtendo valor de pH de 6,48. A redução dos valores de pH está associada à ação dos microrganismos acidogênicos, que formam AGV a partir da degradação da matéria orgânica. A geração de ácidos pode vir a afetar a etapa da metanogênese, caso venha a reduzir o pH do meio de forma expressiva, influenciando no desenvolvimento das *Archaeas* metanogênicas.

A condição de tratamento que obteve a maior redução no valor de AGV foi ao tratar o substrato 36,2 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C), no qual constatou-se concentração de AGV de 4,49 g.L<sup>-1</sup> (46,8% de remoção), e na condição com menor redução deste parâmetro foi ao tratar o substrato 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C), com valor de 8,82 g.L<sup>-1</sup> (33,1% de remoção).

**TABELA 11:** Características físicas e química dos substratos, parcialmente bioestabilizados, variando-se as condições de temperatura e concentração de sólidos totais presentes no substrato.

Parâmetros	Temperatura Ambiente (média 21,5°C)			Temperatura 40°C			Temperatura 50°C		
	Substrato (36,2 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (48,5 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (59,9 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (36,2 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (48,5 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (59,9 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (36,2 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (48,5 gST.L <sup>-1</sup> )	Substrato (59,9 gST.L <sup>-1</sup> )
Umidade (%)	97,41	96,29	95,13	97,22	96,11	95,12	96,89	96,04	95,16
ST (g.L <sup>-1</sup> )	25,9	37,1	48,7	27,8	38,9	48,8	31,1	39,6	48,4
STV (g.L <sup>-1</sup> )	12,13	20,27	25,16	14,05	20,52	24,62	14,48	21,40	24,84
STF (g.L <sup>-1</sup> )	13,72	16,84	23,58	13,77	18,41	24,20	16,60	18,21	23,54
COT (g.L <sup>-1</sup> )	6,76	11,26	13,98	7,81	11,41	13,68	7,99	11,89	13,80
NTK (g.L <sup>-1</sup> )	0,45	0,64	0,81	0,47	0,62	0,80	0,53	0,72	0,81
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g.L <sup>-1</sup> )	0,23	0,33	0,45	0,27	0,40	0,43	0,25	0,37	0,44
DQO (g.L <sup>-1</sup> )	20,72	33,94	48,21	22,74	37,55	48,66	28,64	37,71	48,45
pH	6,27	5,88	5,53	6,03	6,06	5,99	6,48	6,43	5,93
AT (g.L <sup>-1</sup> )	5,56	7,63	8,82	5,89	8,05	9,51	6,40	8,35	9,51
AGV (g.L <sup>-1</sup> )	4,49	7,14	9,60	4,99	6,97	8,80	5,36	7,19	9,51
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	1,72	1,12	0,79	0,92	0,82	0,75	0,71	0,78	0,68
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	2,67	4,00	8,85	4,19	5,53	6,19	8,70	6,43	8,93
P <sub>total</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	0,1184	0,1763	0,2146	0,1259	0,1646	0,2092	0,1283	0,1717	0,2041
C/N	15,2	17,8	17,3	16,7	18,5	17,1	14,2	16,5	17,1

Segundo Leite et al. (2004), a relação ácidos graxos voláteis por alcalinidade total (AGV/AT), para a digestão anaeróbia, deve situar-se em torno de 0,5 para favorecer o estado de equilíbrio dinâmico no reator. Neste estudo, observa-se que as concentrações de AGV só superaram as concentrações de AT para o tratamento com substrato  $59,9 \text{ gST.L}^{-1}$  à temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), obtendo relações de AGV/AT de 1,1, e para o tratamento do mesmo substrato em temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , com relação de AGV/AT de 1,0.

Levando-se em consideração a concentração de NTK, observa-se que ocorreu redução em todos os substratos, e a condição de tratamento que apresentou maior redução, a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  ao tratar o substrato com  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$ , apresentando valor de  $0,62 \text{ g.L}^{-1}$  (eficiência de 32,2% de remoção), já a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  ao tratar o substrato com  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  removeu a menor quantidade,  $0,56 \text{ g.L}^{-1}$  (eficiência de 10,2% de remoção).

A redução da concentração de NTK ocorre, possivelmente, devido à parcela de  $\text{NH}_3$  ser removida do reator na forma de biogás. Quanto às frações de  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ , durante o processo anaeróbio, são utilizadas como aceptores de elétrons para degradação da matéria orgânica, fazendo assim com que ocorra o processo de desnitrificação, gerando  $\text{N}_2$ , que sairá do reator na forma de biogás.

Constata-se que ocorreu aumento nas concentrações de  $\text{N-NH}_4^+$  em todos os sistemas, evidenciando a ocorrência da amonificação do nitrogênio orgânico.

Segundo Silva (2009), devido ao substrato ser de origem predominantemente orgânica e sua hidrólise ser bem sucedida, ocorrerá acréscimo na concentração de  $\text{N-NH}_4^+$ .

Em termos de DQO, observou-se é que o aumento da temperatura, afetou de forma negativa a degradação da matéria orgânica, obtendo maiores remoções para os tratamentos a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ). Quanto à concentração de sólidos totais presentes no substrato, constatou-se que o aumento de sua concentração, pode refletir na redução da eficiência de degradação da matéria orgânica, isto devido serem aplicados aos reatores maiores cargas orgânicas, retardando o processo uma vez que estes materiais ainda serão hidrolisados e acidificados em maior quantidade para, em seguida, serem metabolizados pelas *Archaeas*. metanogênicas, podendo ter ocorrido sobrecarga.

Dentre todas as condições estudadas, a que apresentou maior remoção de  $\text{DQO}_{\text{total}}$  foi quando utilizado o substrato com  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  a temperatura ambiente

(média 21,5°C), obtendo valor de  $DQO_{total}$  residual de 20,72 g.L<sup>-1</sup> (remoção de 39,55%), já a menor remoção observada, foi para o tratamento do substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura de 40°C, com valor de  $DQO_{total}$  de 37,75 g.L<sup>-1</sup> (remoção de 15,28%).

De acordo com van Haandel e Marais (1999), a taxa de digestão anaeróbia aumenta com a temperatura até atingir uma faixa ótima de 30 a 37°C, tendendo a diminuir para temperaturas até 42°C e retornando a ter uma aceleração da taxa de degradação em uma faixa ótima de 53 a 55°C, decaindo novamente para temperaturas além de 58°C. Assim, possivelmente, pode ter ocorrido inibição dos microrganismos para as temperaturas de 40 e 50°C.

## 5.2 BALANÇO DE MASSA

A aplicação do balanço de massa aos reatores apresentados propicia a avaliação sistemática da eficiência de transformação da massa de substrato apresentada nestes reatores.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados quantitativos de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK advindos da aplicação do balanço de massa aos reatores nos diferentes tipos de tratamentos.

Analisando-se os resultados apresentado na Tabela 12, pode-se determinar qual é o efeito da temperatura e da concentração de sólidos totais na biodegradação anaeróbia. Dentre as condições estudadas, constata-se que para o período de monitoramento de 160 dias, foram obtidas maiores valores convertidos das massas aplicadas de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK, em massa transformadas em biogás, para os reatores com substrato apresentando menor concentração de sólidos totais em temperatura ambiente (média 21,5°C).

**TABELA 12:** Balanço de massa dos parâmetros de DQO<sub>total</sub>, STV, COT e NTK aplicados ao reator.

Tratamentos	DQO <sub>total</sub> (g/L)			STV (g/L)			COT (g/L)			NTK (g/L)		
	M <sub>apl</sub>	M <sub>res</sub>	M <sub>trans</sub>	M <sub>apl</sub>	M <sub>res</sub>	M <sub>trans</sub>	M <sub>apl</sub>	M <sub>res</sub>	M <sub>trans</sub>	M <sub>apl</sub>	M <sub>res</sub>	M <sub>trans</sub>
T1ST1	34,26	20,71	13,55	21,29	12,13	9,16	11,83	6,76	5,07	0,63	0,45	0,18
T2ST1	34,26	22,74	11,52	21,29	14,05	7,24	11,83	7,81	4,02	0,63	0,47	0,16
T3ST1	34,26	28,64	5,62	21,29	14,48	6,81	11,83	7,99	3,84	0,63	0,53	0,10
T1ST2	44,56	33,94	10,62	29,83	20,27	9,56	16,57	11,26	5,31	0,91	0,64	0,27
T2ST2	44,56	37,55	7,01	29,83	20,52	9,31	16,57	11,41	5,16	0,91	0,62	0,29
T3ST2	44,56	37,71	6,85	29,83	21,40	8,43	16,57	11,89	4,68	0,91	0,72	0,19
T1ST3	58,57	48,21	10,36	37,46	25,16	12,30	20,81	13,98	6,83	1,12	0,81	0,31
T2ST3	58,57	48,66	9,91	37,46	24,62	12,84	20,81	13,68	7,13	1,12	0,80	0,32
T3ST3	58,57	48,45	10,12	37,46	24,84	12,62	20,81	13,80	7,01	1,12	0,81	0,32

**LEGENDA:** M<sub>apl</sub>: massa aplicada; M<sub>res</sub>: massa residual; M<sub>trans</sub>: massa transformada.

De modo geral, foi observado com este estudo que a remoção de DQO foi mais expressiva com a redução da concentração de sólidos totais presentes no substrato, visto que com o aumento desta concentração, possivelmente, foram aplicadas maiores cargas orgânicas aos reatores, podendo dificultar a degradação da matéria orgânica, uma vez que serão hidrolisados e acidificados maiores quantidades do substrato, podendo inclusive ter ocorrido sobrecarga orgânica e afetado no metabolismo dos microrganismos.

Quanto ao efeito da temperatura sobre a digestão anaeróbia, observa-se que a temperatura ambiente (média 21,5°C) foi a que apresentou melhor comportamento dentre as temperaturas estudadas.

### 5.3 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES CINÉTICAS DE DECAIMENTO.

A constante cinética de decaimento ( $k$ ) é um dos parâmetros utilizados para avaliar o desempenho do processo anaeróbio de biodegradação de compostos orgânicos para um intervalo de tempo. Para determiná-la faz-se uso da equação 5,

mencionada no item 3.6. De acordo com a literatura, quanto maior for o valor dessa constante, maior será a remoção para o parâmetro estudado. Os valores das constantes obtidas com este estudo são apresentadas na Tabela 13, para os parâmetros de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK.

**TABELA 13:** Constantes de decaimento obtidas para os parâmetro de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK.

Tratamento	$DQO_{total}$ ( $dia^{-1}$ )	STV ( $dia^{-1}$ )	COT (g/L)	NTK ( $dia^{-1}$ )
T1ST1	$3,15 \times 10^{-3}$	$3,52 \times 10^{-3}$	$3,50 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-3}$
T2ST1	$2,56 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-3}$
T3ST1	$1,12 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-3}$	$2,45 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-3}$
T1ST2	$1,70 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-3}$	$2,20 \times 10^{-3}$
T2ST2	$1,07 \times 10^{-3}$	$2,34 \times 10^{-3}$	$2,33 \times 10^{-3}$	$2,44 \times 10^{-3}$
T3ST2	$1,04 \times 10^{-3}$	$2,08 \times 10^{-3}$	$2,07 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-3}$
T1ST3	$1,22 \times 10^{-3}$	$2,49 \times 10^{-3}$	$2,49 \times 10^{-3}$	$2,03 \times 10^{-3}$
T2ST3	$1,16 \times 10^{-3}$	$2,62 \times 10^{-3}$	$2,62 \times 10^{-3}$	$2,10 \times 10^{-3}$
T3ST3	$1,19 \times 10^{-3}$	$2,57 \times 10^{-3}$	$2,57 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-3}$

**LEGENDA:** T1 (temperatura ambiente), T2 (40°C), T3 (50°C);

ST1 (36,2 gST.L<sup>-1</sup>), ST2 (48,5 gST.L<sup>-1</sup>), ST3 (59,9 gST.L<sup>-1</sup>).

Os dados obtidos na Tabela 13 apresentam distribuição normal, conforme apêndice A, assim pôde-se realizar a análise de variância (ANOVA), com o auxílio do software estatístico minitab 15, tendo em vista verificar se existem diferenças significativas entre as condições de tratamento estudadas com relação à constante k.

Na Tabela 14, é apresentado o resumo da ANOVA, para os valores de k para  $DQO_{total}$ .

**TABELA 14:** Resumo da ANOVA para a constante k para  $DQO_{total}$ .

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Temperatura	2	0,0000037	0,0000019	37,98	0,000
Concentração de sólidos totais	2	0,0000066	0,0000033	66,95	0,000
Interação	4	0,0000037	0,0000009	18,68	0,000
Erro	18	0,0000009	0,0000000		
Total	26	0,0000148			

S = 0,0006624    R – Sq = 46,78%    R – Sq (adj) = 23,13%

Para as constantes apresentadas pela  $DQO_{total}$ , observa-se que com nível de confiança de 95%, a ANOVA indicou diferença significativa entre os dados apresentados para os fatores de temperatura, concentração de sólidos totais e a interação entre estes, uma vez que o p-valor obtido na análise, 0,00, foi inferior ao nível de significância de 0,05 estabelecido.

Na Tabela 15, é apresentado o resumo da ANOVA, para os valores de k para STV.

**TABELA 15:** Resumo da ANOVA para a constante k para STV.

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Temperatura	2	0,0000005	0,0000003	0,87	0,437
Concentração de sólidos totais	2	0,0000018	0,0000009	3,01	0,075
Interação	4	0,0000022	0,0000005	1,80	0,173
Erro	18	0,0000055	0,0000003		
Total	26	0,0000101			

S = 0,0002215    R – Sq = 94,05%    R – Sq (adj) = 91,41%

No caso dos valores de k para STV, não foram obtidas diferenças significativas entre os fatores estudados, com nível de confiança de 95%, de acordo com a ANOVA, tendo em vista que os p-valores obtidos na análise foram superiores ao nível de significância de 0,05.

Na Tabela 16, é apresentado o resumo da ANOVA, para os valores de k para COT.

**TABELA 16:** Resumo da ANOVA para a constante k para COT.

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Temperatura	2	0,0000008	0,0000004	1,32	0,292
Concentração de sólidos totais	2	0,0000015	0,0000007	2,42	0,117
Interação	4	0,0000019	0,0000005	1,58	0,222
Erro	18	0,0000054	0,0000003		
Total	26	0,0000096			

S = 0,0005485    R – Sq = 43,42%    R – Sq (adj) = 18,28%

Para os valores de k para COT, não foram obtidas diferenças significativas entre os fatores estudados, com nível de confiança de 95%, segundo ANOVA, uma vez que os p-valores obtidos foram superiores ao nível de significância de 0,05.

Na Tabela 17, é apresentado o resumo da ANOVA, para os valores de k para NTK. Como resposta da ANOVA, com nível de confiança de 95%, observa-se diferença significativa para o fator temperatura, com p valor de 0,000, e para a interação entre o fator temperatura e concentração de sólidos totais, com p-valor de 0,011.

**TABELA 17:** Resumo da ANOVA para a constante k para NTK.

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Temperatura	2	0,0000024	0,0000012	17,23	0,000
Concentração de sólidos totais	2	0,0000005	0,0000002	3,38	0,057
Interação	4	0,0000013	0,0000003	4,53	0,011
Erro	18	0,0000013	0,0000001		
Total	26	0,0000055			

S = 0,0002665    R – Sq = 76,72%    R – Sq (adj) = 66,37%

Com a obtenção das constantes de decaimento, podem ser gerados modelos cinéticos para o decaimento dos parâmetros estudados. A partir desses modelos, os valores teóricos a serem obtidos para os parâmetros estudados, podem ser determinados para um determinado tempo.

Os modelos cinéticos de decaimento obtidos neste estudo para os parâmetros de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK, são apresentados na Tabela 18.

**TABELA 18:** Modelos cinéticos de decaimento para os parâmetro de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK.

Tratamento	$DQO_{total}$	STV	COT	NTK
<b>T1ST1</b>	$DQO_{(t)} = 34,26 \times e^{-0,00315t}$	$STV_{(t)} = 21,29 \times e^{-0,00352t}$	$COT_{(t)} = 11,83 \times e^{-0,00350t}$	$NTK_{(t)} = 1,26 \times e^{-0,00216t}$
<b>T2ST1</b>	$DQO_{(t)} = 34,26 \times e^{-0,00256t}$	$STV_{(t)} = 21,29 \times e^{-0,00260t}$	$COT_{(t)} = 11,83 \times e^{-0,00260t}$	$NTK_{(t)} = 1,26 \times e^{-0,00184t}$
<b>T3ST1</b>	$DQO_{(t)} = 34,26 \times e^{-0,00112t}$	$STV_{(t)} = 21,29 \times e^{-0,00241t}$	$COT_{(t)} = 11,83 \times e^{-0,00245t}$	$NTK_{(t)} = 1,26 \times e^{-0,00108t}$
<b>T1ST2</b>	$DQO_{(t)} = 44,56 \times e^{-0,00170t}$	$STV_{(t)} = 29,83 \times e^{-0,00221t}$	$COT_{(t)} = 16,57 \times e^{-0,00241t}$	$NTK_{(t)} = 1,82 \times e^{-0,00220t}$
<b>T2ST2</b>	$DQO_{(t)} = 44,56 \times e^{-0,00107t}$	$STV_{(t)} = 29,83 \times e^{-0,00234t}$	$COT_{(t)} = 16,57 \times e^{-0,00233t}$	$NTK_{(t)} = 1,82 \times e^{-0,00244t}$
<b>T3ST2</b>	$DQO_{(t)} = 44,56 \times e^{-0,00104t}$	$STV_{(t)} = 29,83 \times e^{-0,00208t}$	$COT_{(t)} = 16,57 \times e^{-0,00207t}$	$NTK_{(t)} = 1,82 \times e^{-0,00146t}$
<b>T1ST3</b>	$DQO_{(t)} = 58,57 \times e^{-0,00122t}$	$STV_{(t)} = 37,46 \times e^{-0,00249t}$	$COT_{(t)} = 20,81 \times e^{-0,00249t}$	$NTK_{(t)} = 2,24 \times e^{-0,00203t}$
<b>T2ST3</b>	$DQO_{(t)} = 58,57 \times e^{-0,00116t}$	$STV_{(t)} = 37,46 \times e^{-0,00262t}$	$COT_{(t)} = 20,81 \times e^{-0,003262t}$	$NTK_{(t)} = 2,24 \times e^{-0,00210t}$
<b>T3ST3</b>	$DQO_{(t)} = 58,57 \times e^{-0,00119t}$	$STV_{(t)} = 37,46 \times e^{-0,00257t}$	$COT_{(t)} = 20,81 \times e^{-0,00257t}$	$NTK_{(t)} = 2,24 \times e^{-0,00206t}$

\*t = Tempo (dias)

Os modelos cinéticos de decaimento apresentados na Tabela 18, são a aplicação dos dados da concentração inicial e constantes k, obtidas anteriormente, referentes a cada parâmetro estudado, na equação 5, mencionada no item 3.6. Como dito anteriormente, com estes modelos, pode-se determinar quais seriam as concentrações residuais de  $DQO_{total}$ , STV, COT ou NTK para um determinado tempo (t).

Assim, adotando-se período de monitoramento de 365 dias, pode-se estimar quais seriam as concentrações residuais de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK, para o mesmo período.

Na Tabela 19 são apresentados os dados estimados referentes às concentrações residuais de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK, adotando-se período de monitoramento de 365 dias.

**TABELA 19:** Estimativas das concentrações residuais de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK para o período de monitoramento de 365 dias.

Tratamento	$DQO_{total}$ (g.L <sup>-1</sup> )	STV (g.L <sup>-1</sup> )	COT (g/L)	NTK (g.L <sup>-1</sup> )
T1ST1	10,86	5,89	3,30	0,29
T2ST1	13,44	8,24	4,58	0,32
T3ST1	22,76	8,83	4,83	0,42
T1ST2	23,94	12,35	6,86	0,41
T2ST2	30,15	12,70	7,06	0,37
T3ST2	30,44	13,97	7,77	0,53
T1ST3	37,57	15,10	8,39	0,53
T2ST3	38,36	14,38	7,99	0,52
T3ST3	37,99	14,66	8,14	0,53

Analisando os dados presentes na Tabela 19, observa-se que as concentrações residuais da  $DQO_{total}$  variou de 10,86 a 38,36 g.L<sup>-1</sup>, STV de 5,89 a 14,66 g.L<sup>-1</sup>, COT de 3,30 a 8,39 e NTK de 0,29 a 0,53 g.L<sup>-1</sup>. Constata-se que para o período de monitoramento de 365 dias, as concentrações residuais dos parâmetros estudados, foram menores de que os apresentados durante o monitoramento de 160 dias, obtendo-se maior transformação do material orgânico em biogás, tendo em vista que os microrganismos irão degradar o material orgânico por mais tempo.

Na Tabela 20 são apresentadas as eficiências de remoção de  $DQO_{total}$ , STV e NTK para o período de monitoramento de 365 dias.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 20, constata-se que o aumento do tempo de permanência do substrato nos reatores, tem como consequência maiores eficiências de remoção, como mencionado anteriormente. Por exemplo, ao tratar o substrato de menor concentração de sólidos totais em temperatura ambiente (média 21,5°C), eleva-se a eficiência de remoção de 39,6% para 68,3%, em relação

a  $DQO_{total}$ , de 43% para 72,3%, em relação aos STV, de 43% para 72,1%, em relação ao COT, e de 29,3% para 54,6%, em relação ao NTK.

**TABELA 20:** Eficiências de remoção de  $DQO_{total}$ , STV, COT e NTK para o período de monitoramento de 365 dias.

Tratamento	$DQO_{total}$ (%)	STV (%)	COT (%)	NTK (%)
T1ST1	68,3	72,3	72,1	54,6
T2ST1	60,8	61,3	61,3	49,0
T3ST1	33,6	58,5	59,2	32,6
T1ST2	46,3	58,6	58,6	55,2
T2ST2	32,3	57,4	57,4	59,0
T3ST2	31,7	53,2	53,1	41,2
T1ST3	35,9	59,7	59,7	52,3
T2ST3	34,5	61,6	61,6	53,6
T3ST3	35,1	60,9	60,9	52,9

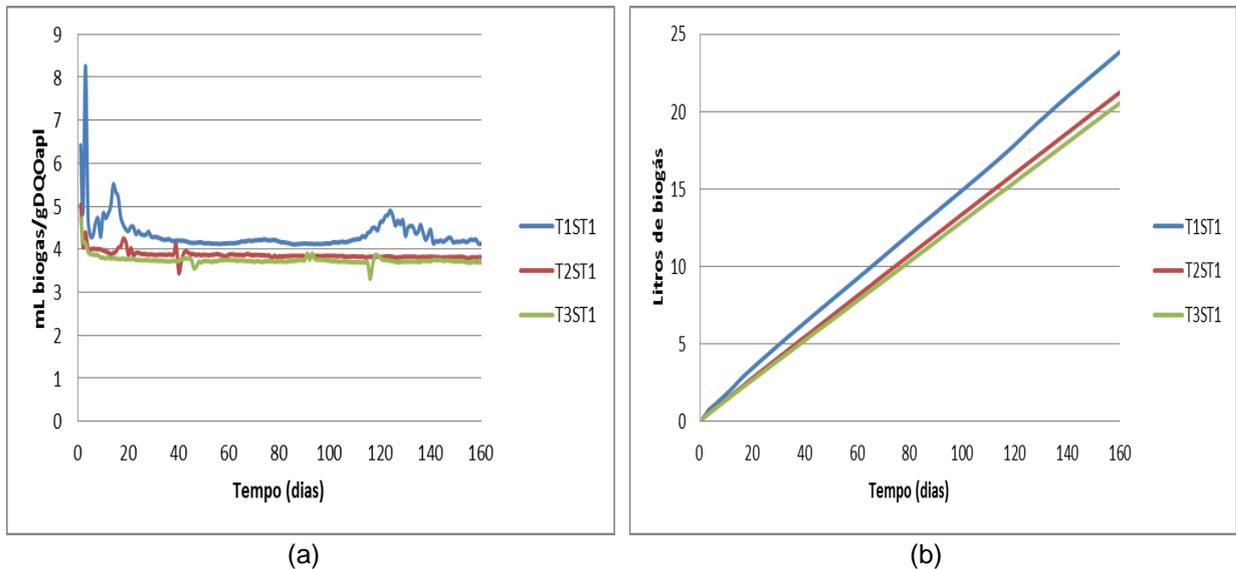
#### 5.4 FRAÇÃO GASOSA

O biogás gerado nos reatores foi medido diariamente e os efeitos da temperatura e da concentração de sólidos totais sobre sua produção serão apresentados em seguida. Deve-se ressaltar que os volumes dos gases obtidos neste capítulo foram ajustados de acordo com as CNTP.

##### 5.4.1 Efeito da temperatura na geração de biogás.

Na Figura 8 são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção do biogás (volume do biogás produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado do biogás (litros do biogás) para o substrato com

concentração de sólidos totais de  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  em temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ),  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ .



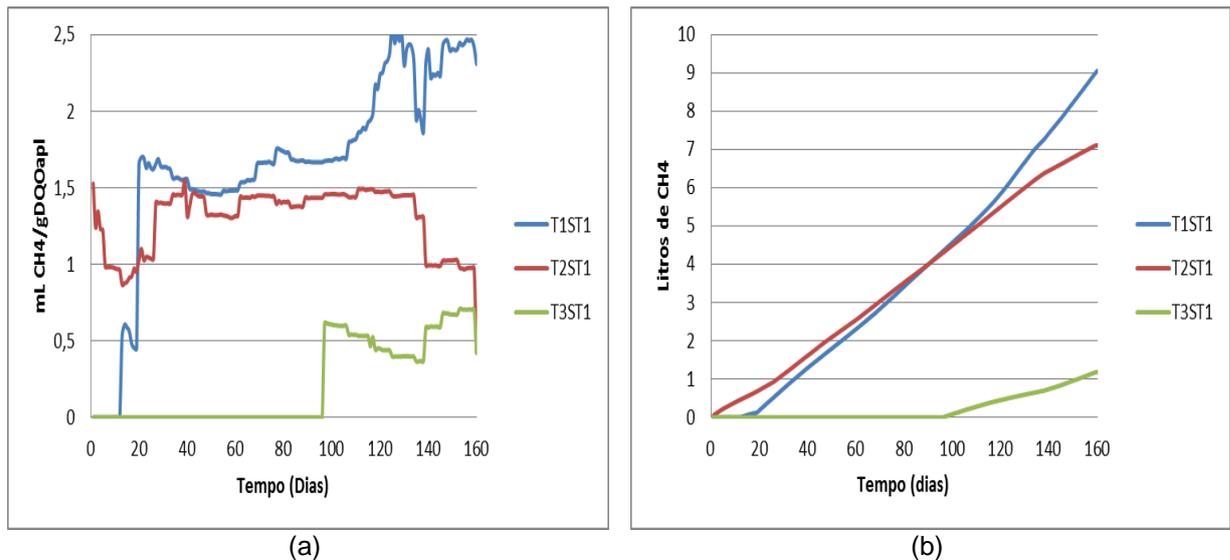
**FIGURA 8:** Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.

Analisando-se as tendências das curvas da Figura 8 (a), observa-se que para o substrato com  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$ , a temperatura que resultou em maior taxa de produção do biogás foi a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), apresentando valor médio diário de  $4,35 \text{ mL}$  de biogás/ $\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ , enquanto que para as temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$  as taxas médias de produção do biogás foram de  $3,87$  e  $3,75 \text{ mL}$  de biogás/ $\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ , respectivamente.

Com relação ao volume acumulado do biogás, apresentado na Figura 8 (b), constata-se que para o tratamento do substrato com  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ) foram acumulados aproximadamente  $23,85$  litros de biogás até o final do monitoramento. Para as temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$  os volumes acumulados foram de  $21,24$  e  $20,55$  litros de biogás, respectivamente.

Assim, o aumento da temperatura ocasionou a redução do volume de biogás acumulado, possivelmente, tal efeito deveu-se por terem sido inibidos alguns microrganismos produtores de biogás para as temperaturas de  $40$  e  $50^\circ\text{C}$ .

Na Figura 9, são apresentados os comportamento das variações temporais da taxa de produção de  $\text{CH}_4$  (volume de  $\text{CH}_4$  produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado de  $\text{CH}_4$  (litros de  $\text{CH}_4$ ) para substrato com concentração de sólidos totais de  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ),  $40$  e  $50^\circ\text{C}$ .



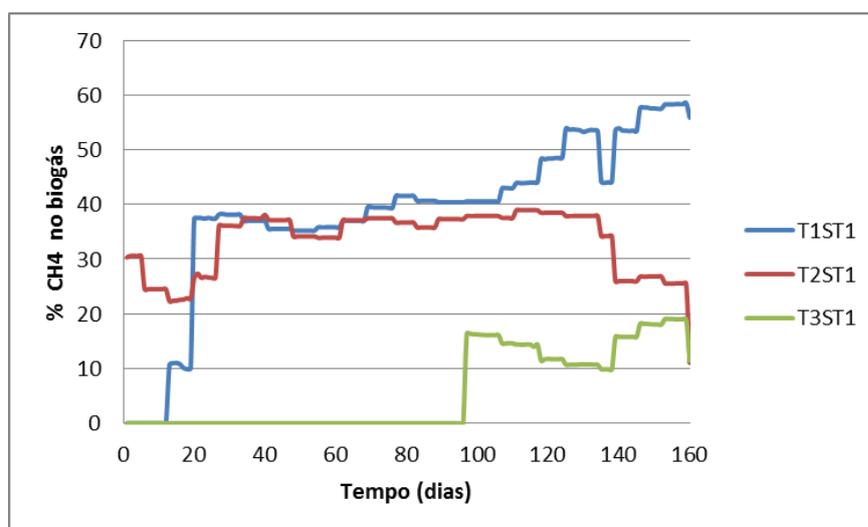
**FIGURA 9:** Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$  quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de  $\text{CH}_4$ ; (b) do volume acumulado de  $\text{CH}_4$ .

Ao analisar a Figura 9 (a), pode-se observar que primeiramente formou-se  $\text{CH}_4$  nos reatores a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , apresentando taxa de formação de  $\text{CH}_4$  com tendência de comportamento constante,  $1,40 \text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ , até os 140 dias de monitoramento, a partir deste período, tal comportamento obteve tendência de decréscimo, fazendo com que a taxa de formação de  $\text{CH}_4$  para todo o período de monitoramento fosse em média de  $1,30 \text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ . Para os reatores a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), a formação de  $\text{CH}_4$  ocorreu a partir do 13º dia, obtendo tendência de crescimento ao decorrer do monitoramento e taxa média de formação de  $\text{CH}_4$  de  $1,65 \text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ . Os reatores a temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , observa-se que a formação de  $\text{CH}_4$  ocorreu apenas decorridos 100 dias de monitoramento, apresentando a menor taxa de formação de  $\text{CH}_4$  dentre os diferentes níveis de temperaturas estudadas, em média  $0,22 \text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ .

Conforme apresentado na Figura 9 (b), observa-se que dentre as condições de temperatura estudadas, até o final do monitoramento, o maior volume acumulado de  $\text{CH}_4$  foi apresentado pela condição de temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), 9,05 litros de  $\text{CH}_4$ . Para a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , o volume acumulado de  $\text{CH}_4$  correspondeu a 7,11 litros. Para a temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , o volume acumulado foi de apenas 1,19 litros de  $\text{CH}_4$ .

Na Figura 9, apresenta-se o efeito da temperatura no comportamento da variação temporal do percentual de  $\text{CH}_4$  para substrato com concentração de sólidos totais de  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$ .

Quanto ao percentual de  $\text{CH}_4$  presente no biogás, apresentado na Figura 10, observa-se que na condição de temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ) obteve-se comportamento crescente durante todo o monitoramento, apresentando ao final deste, biogás com cerca de 58% de  $\text{CH}_4$  em sua composição. Para a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , o biogás gerado apresentou comportamento constante com percentual de  $\text{CH}_4$  de aproximadamente 36% até os 140 dias de monitoramento, sendo que ao término do mesmo, este percentual decresceu para 11%. Para a temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , observa-se que o  $\text{CH}_4$  só começou a ser formado decorridos aproximadamente 100 dias de monitoramento, obtendo percentual máximo de  $\text{CH}_4$  de 19% de  $\text{CH}_4$  presente no biogás, decorridos 153 dias.



**FIGURA 10:** Efeito da temperatura na quantidade percentual de  $\text{CH}_4$  presente no biogás gerado, para os substratos contendo  $36,2 \text{ g ST.L}^{-1}$ .

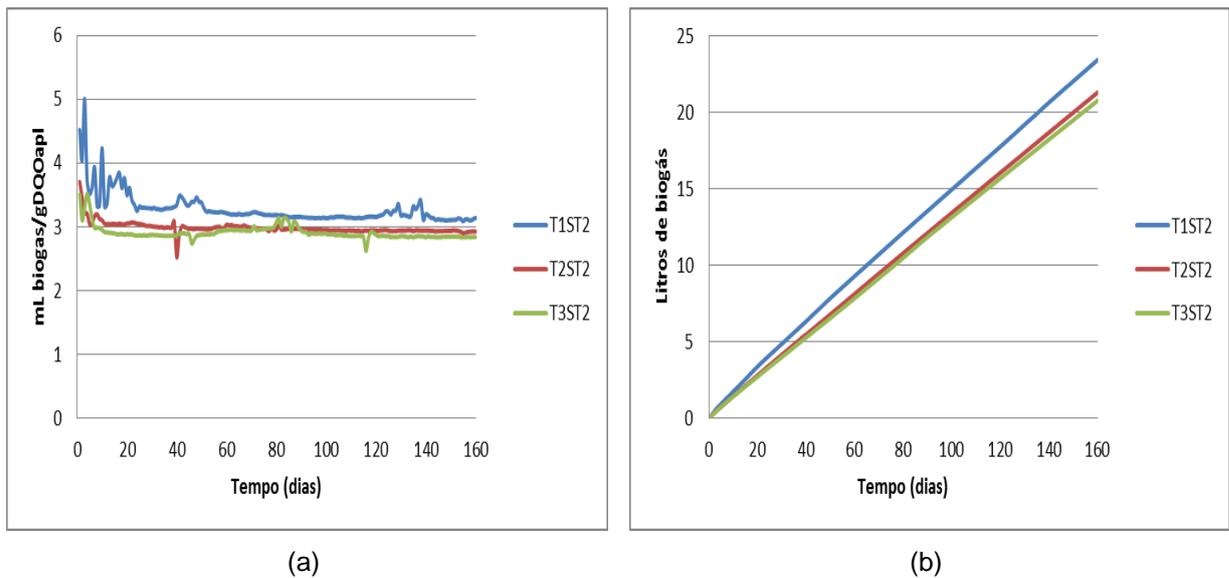
Assim, constata-se que a temperatura exerce influência na geração de biogás e  $\text{CH}_4$  para o tratamento do substrato com  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$ , sendo verificado que o aumento da condição de temperatura afetou de forma negativa a sua geração. Uma possível explicação para tal evento está no fato de que as temperaturas de 40 e  $50^\circ\text{C}$  possam ter inibido a atuação do grupo de microrganismos responsáveis pela metanogênese, tendo em vista os baixos valores obtidos com relação aos da temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ) quanto ao percentual de  $\text{CH}_4$  presente no biogás produzido diariamente, a taxa de produção e volumes acumulados de biogás e  $\text{CH}_4$ .

Na Figura 11, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção do biogás (volume do biogás produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado do biogás (litros do biogás) para o substrato com concentração de sólidos totais de  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$  em temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), 40 e  $50^\circ\text{C}$ .

Ao analisar a Figura 11 (a), verifica-se que para o substrato contendo  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$ , a temperatura que resultou em maior média na taxa do produção do biogás para os 160 dias de monitoramento, foi a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ),  $3,17 \text{ mL de biogás/gDQO}_{\text{aplicada}}$ , seguidos das temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  ( $2,98 \text{ mL de biogás/gDQO}_{\text{aplicada}}$ ) e  $50^\circ\text{C}$  ( $2,91 \text{ mL de biogás/gDQO}_{\text{aplicada}}$ ).

Com relação ao acúmulo de biogás, apresentado na Figura 11 (b), constata-se que dentre as condições de temperaturas estudadas, para o período de 160 dias de monitoramento, cerca de 23,41 litros de biogás foi acumulado no tratamento do substrato com  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$  em temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), enquanto que 21,28 litros de biogás foram acumulados para a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  e 20,74 litros para  $50^\circ\text{C}$ .

Desse modo observa-se que a temperatura exerceu influência na geração do biogás para o tratamento do substrato contendo  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$ , sendo constatada que a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ) foi a condição de temperatura que mais favoreceu a produção de biogás dentre a estudadas.

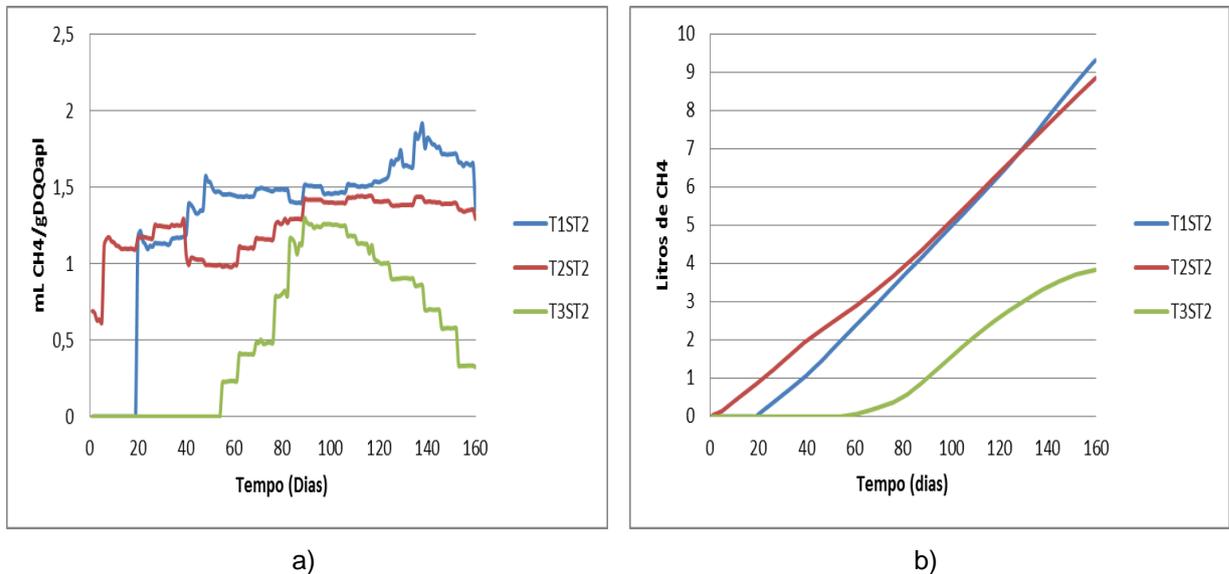


**FIGURA 11:** Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo 48,5 gST.L<sup>-1</sup> quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de biogás; (b) do volume acumulado do biogás.

Na Figura 12, são apresentados os comportamento das variações temporais da taxa de produção de CH<sub>4</sub> (volume de CH<sub>4</sub> produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado de CH<sub>4</sub> (litros de CH<sub>4</sub>) para substrato com concentração de sólidos totais de 48,5 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C), 40 e 50°C.

Conforme apresentado na Figura 12 (a), observa-se que, inicialmente, as taxas de produção de CH<sub>4</sub> para a temperatura de 40°C, foram as maiores dentre as condições estudadas, porém, após 40 dias de monitoramento, as taxas para a temperatura ambiente (média 21,5°C), superaram as da temperatura de 40°C, isso se deve possivelmente devido os microrganismos necessitarem de um período menor de adaptação ao substrato para esta temperatura, para a temperatura ambiente (média 21,5°C), foi necessário um período maior de adaptação, porém o desenvolvimento e metabolismo dos microrganismos para esta temperatura foram mais favoráveis, fazendo com que as taxas em temperatura ambiente (média 21,5°C) superassem as de temperatura de 40°C. Assim foram obtidas até o final do monitoramento, média de taxas de produção de CH<sub>4</sub> de 1,31 e 1,24 mL de CH<sub>4</sub>/gDQO<sub>aplicada</sub> para as temperatura ambiente (média 21,5°C) e 40°C, respectivamente. Para a temperatura de 50°C constata-se que além de ser requerido maior período para adaptação dos microrganismos metanogênicos, as condições

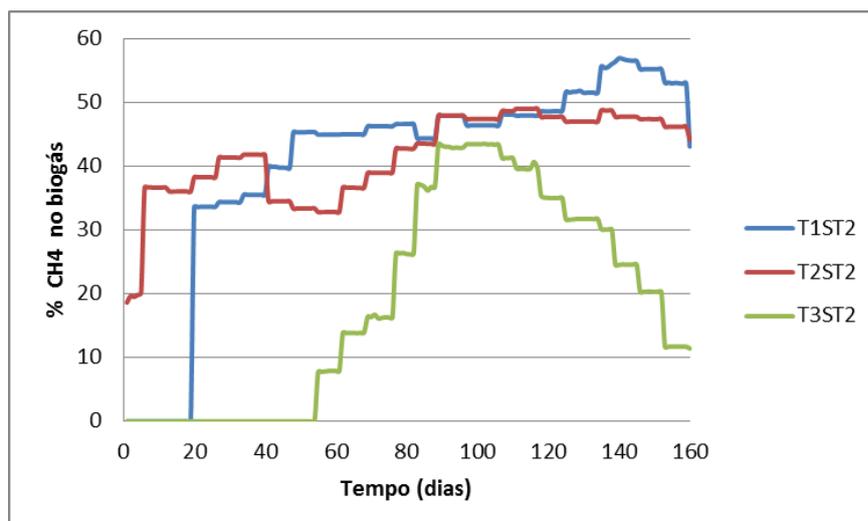
para seu metabolismo também não foram favoráveis, apresentando, em média, 0,54 mL de  $\text{CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$  de taxa de produção de  $\text{CH}_4$  até o fim do monitoramento.



**FIGURA 12:** Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$  quanto ao comportamento da variação temporal; a) da taxa de produção de  $\text{CH}_4$ ; b) do volume acumulado de  $\text{CH}_4$ .

Analisando-se a Figura 12 (b), constata-se que o maior volume acumulado de  $\text{CH}_4$  foi obtido para a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), 9,31 litros de  $\text{CH}_4$ . Para a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , foi acumulado 8,84 litros e para a temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , 3,84 litros. Isso possivelmente ocorreu devido à temperatura de  $50^\circ\text{C}$  não produzir boas condições para o desenvolvimento dos microrganismos metanogênico, por outro lado, favorecendo o metabolismo de outros microrganismos, responsáveis pela alta geração de biogás.

Na Figura 13, é apresentado o efeito das temperaturas no comportamento da variação temporal do percentual de  $\text{CH}_4$  para substrato com concentração de sólidos totais de  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$ .

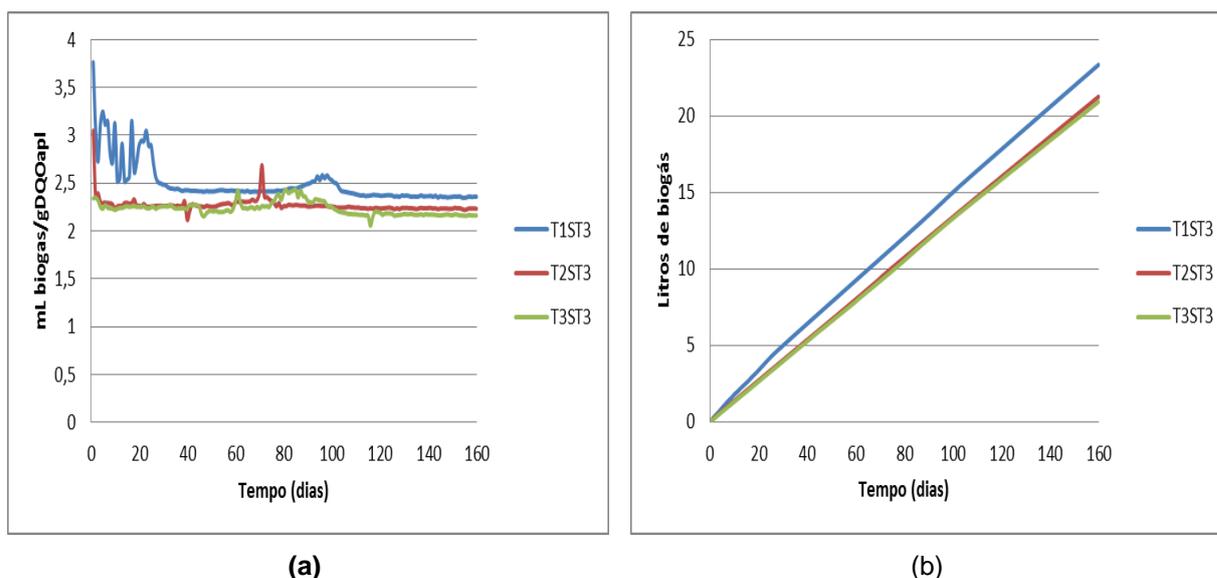


**FIGURA 13:** Efeito da temperatura na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás gerado para os substratos contendo 48,5 gST.L<sup>-1</sup>.

Quanto ao percentual de CH<sub>4</sub> no biogás, apresentado na Figura 13, observa-se que a condição de temperatura ambiente (média 21,5°C) obteve aumento gradativo na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás, atingindo ao máximo cerca de 57% de CH<sub>4</sub> presente no biogás, até o término do monitoramento. Para a temperatura de 40°C, o biogás gerado obteve percentual máximo de CH<sub>4</sub> de aproximadamente 49% após os 160 dias de monitoramento. Para a temperatura de 50°C, a formação de CH<sub>4</sub> iniciou-se após 55 dias de monitoramento, apresentando, no máximo, 43,5 % de CH<sub>4</sub> presente no biogás, decorridos 160 dias.

Na Figura 14, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção do biogás (volume do biogás produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado do biogás (litros do biogás) para o substrato com concentração de sólidos totais de 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C), 40 e 50°C.

Ao analisar a Figura 14 (a), verifica-se que, do mesmo modo que para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2 e 48,5 gST.L<sup>-1</sup>, a temperatura ambiente (média 21,5°C) também proporcionou maiores taxas de produção de biogás para o substrato com 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, apresentando valor médio de 2,49 mL de biogás/gDQO<sub>aplicada</sub>, enquanto que para as temperaturas de 40 e 50°C, foram obtidas médias de 2,27 e 2,23 mL de biogás/gDQO<sub>aplicada</sub>, respectivamente.



**FIGURA 14:** Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo  $59,9\text{gST.L}^{-1}$  quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.

Para o volume acumulado de biogás, Figura 14 (b), até o fim do monitoramento, observa-se que, neste caso, a temperatura ambiente (média  $21,5^{\circ}\text{C}$ ) também possibilitou o maior acúmulo de biogás, 23,34 litros, dentre as condições de temperaturas estudadas. Da mesma forma que para os casos anteriores, nos reatores a temperatura ambiente (média  $21,5^{\circ}\text{C}$ ), foram geradas condições mais favoráveis ao desenvolvimento e metabolismo dos microrganismos, que para as outras condições de temperatura. Os volumes acumulados para as temperaturas de  $40$  e  $50^{\circ}\text{C}$  foram 21,26 e 20,93 litros de biogás, respectivamente.

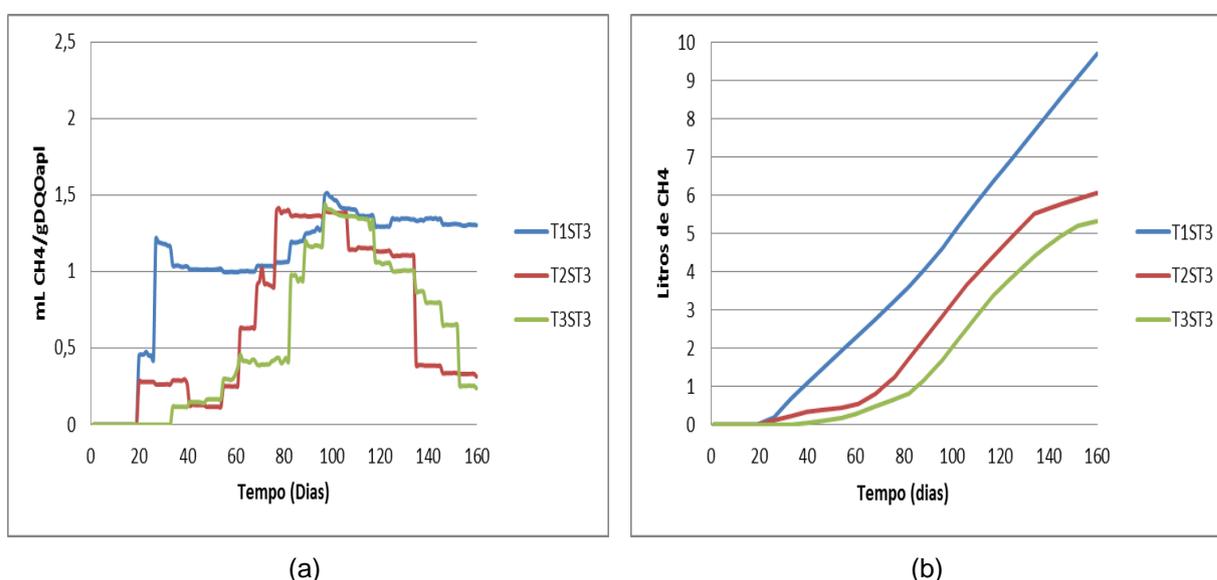
Assim, após verificada a influência da temperatura (nas condições ambiente,  $40$  e  $50^{\circ}\text{C}$ ) na digestão anaeróbia dos diferentes substratos estudados, constatou-se que o aumento da temperatura exerceu efeito negativo para a produção de biogás, e a temperatura ambiente (média  $21,5^{\circ}\text{C}$ ), foi a que possibilitou maiores taxas de produção e volumes acumulados de biogás dentre as temperatura estudadas.

O mesmo comportamento foi observado por Komemoto et al. (2009), ao estudarem o efeito da temperatura na produção de biogás a partir de resíduos alimentícios. Com o aumento da temperatura para a faixa termófila, ocorreu maior solubilização do substrato, porém a taxa de produção do biogás foi menor que a dos outros sistemas em temperaturas inferiores, ocorrendo, segundo o autor, devido a

atividade dos microrganismos que produzem o biogás ter sido inibida pela condição de alta temperatura.

Na Figura 15, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção de  $\text{CH}_4$  (volume de  $\text{CH}_4$  produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado de  $\text{CH}_4$  (litros de  $\text{CH}_4$ ) para o substrato com concentração de sólidos totais de  $59,9\text{gST.L}^{-1}$  em temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ),  $40^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ .

Conforme a Figura 15 (a), constata-se que a geração de  $\text{CH}_4$  para os reatores contendo substrato com  $59,9\text{gST.L}^{-1}$  à temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ) e a  $40^\circ\text{C}$ , iniciaram no mesmo período, 20 dias de monitoramento, porém, no decorrer do monitoramento, os reatores a temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), possivelmente geram condições mais favoráveis ao metabolismo dos microrganismos, fazendo com que fosse obtida taxa média de produção de  $1,03\text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ , enquanto que os de  $40^\circ\text{C}$ ,  $0,65\text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ . Para os reatores à temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , foi obtida média na taxa de produção de  $\text{CH}_4$  de  $0,57\text{ mL de CH}_4/\text{gDQO}_{\text{aplicada}}$ .



**FIGURA 15:** Influência da temperatura no tratamento do substrato contendo  $59,9\text{gST.L}^{-1}$  quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de  $\text{CH}_4$ ; (b) do volume acumulado de  $\text{CH}_4$ .

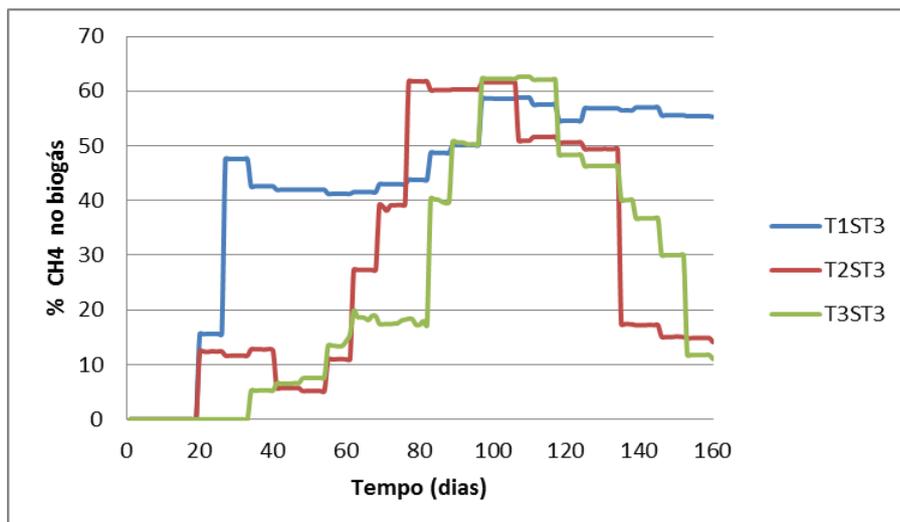
A partir da Figura 15 (b), observa-se que dentre as temperaturas estudadas, a temperatura ambiente (média 21,5°C) favoreceu ao processo em termos de volume acumulado de CH<sub>4</sub>, verificando valores da ordem de 9,69 litros de CH<sub>4</sub> (temperatura ambiente), 6,05 litros de CH<sub>4</sub> (temperatura de 40°C) e 5,32 litros de CH<sub>4</sub> (temperatura de 50°C).

De acordo com Deublin e Steinhauser (2008), a maioria dos microrganismos metanogênicos pertencem à faixa mesófila, o que possivelmente explicaria o fato dos reatores à temperatura de 50°C possuírem geração de CH<sub>4</sub> menor que as encontradas nos outros reatores à temperaturas inferiores. Os autores ainda destacam a sensibilidade dos microrganismos metanogênicos quanto à variação da temperatura, destacando que até mesmo pequenas variações podem causar redução na atividade destes microrganismos, recomendado que a faixa de variação seja mantida entre +/-2°C. Assim, tal efeito pode ter sido responsável pela redução das eficiências dos reatores às temperaturas de 40°C e 50°C.

Na Figura 16, é apresentado o efeito da temperatura no comportamento da variação temporal do percentual de CH<sub>4</sub> para substrato com concentração de sólidos totais de 59,9 gST.L<sup>-1</sup>.

Quanto ao percentual de CH<sub>4</sub> no biogás, apresentado na Figura 16, constata-se que na condição de temperatura ambiente (média 21,5°C), houve aumento gradativo na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás, obtendo no final do monitoramento, percentual de 55,3%. Com relação às outras condições de temperaturas, também houve um aumento gradativo no percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás, porém após 100 dias de monitoramento, para a temperatura de 40°C, e 120 dias, para a temperatura de 50°C, verificou-se decréscimo neste percentual. Possivelmente, tais temperaturas afetaram no metabolismo dos microrganismos metanogênicos, inibindo-os e fazendo com que ocorresse tal comportamento de redução, obtendo ao termino do monitoramento 14% de CH<sub>4</sub> presente no biogás para a temperatura de 40°C e 11% para a temperatura de 50°C.

Assim, observou-se que com aumento da condição de temperatura, o percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás foi reduzido. Este fato também foi observado por Lianhua et al. (2010), que ao digerir palha de arroz (75 gST.L<sup>-1</sup>) em temperaturas ambiente (25°C), mesófila (35°C) e termófila (55°C), obteve percentual máximo de CH<sub>4</sub> de 65,08%, 62,52% e 59,12%, respectivamente.

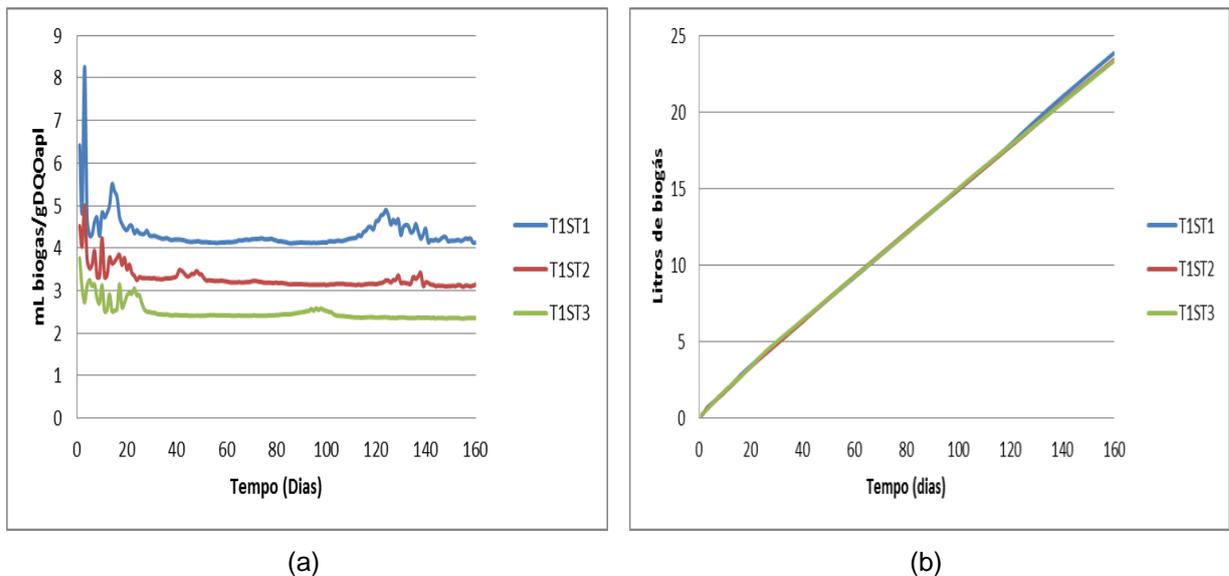


**FIGURA 16:** Efeito da temperatura na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás gerado diariamente para os substratos contendo 59,9 gST.L<sup>-1</sup>.

#### 5.4.2 Efeito da concentração de sólidos totais na geração do biogás.

Na Figura 17, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção do biogás (volume do biogás produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado do biogás (litros do biogás) para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C).

Analisando-se a Figura 17 (a), pode-se observar que em temperatura ambiente (média 21,5°C), o substrato que obteve maior taxa de produção de biogás foi o que apresentou menor concentração de sólidos totais, 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, com valor médio de 4,35 mL de biogás/gDQO<sub>aplicada</sub>. Para os substratos contendo 48,5 e 59,9gST.L<sup>-1</sup>, foram apresentados valores médios de taxa de 3,28 e 2,49 mL de biogás/gDQO<sub>aplicada</sub>, respectivamente.



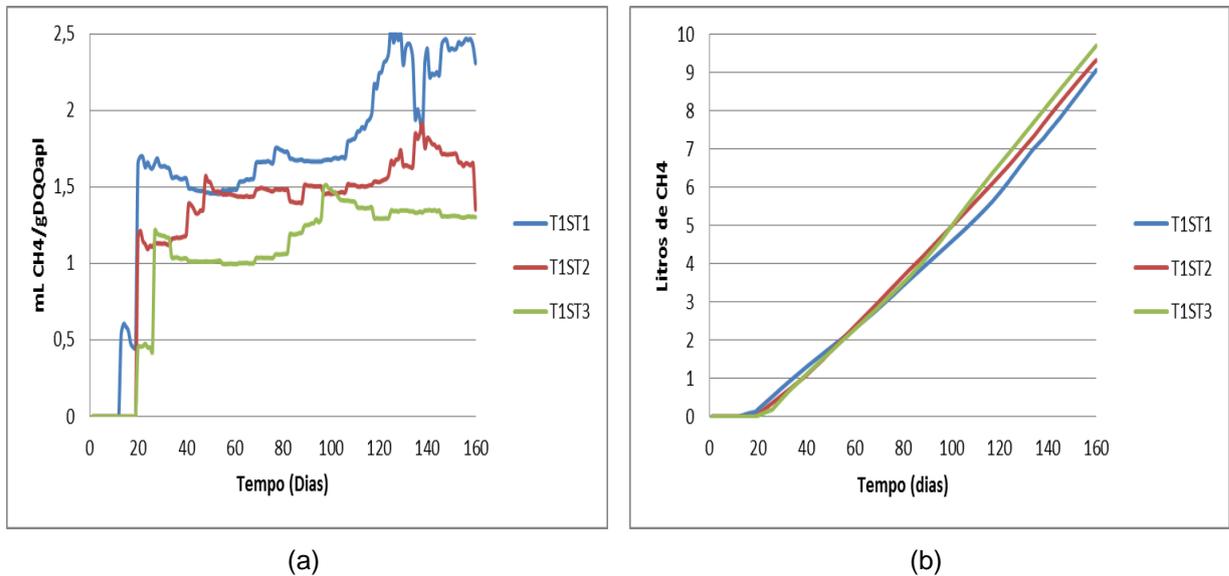
**FIGURA 17:** Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura ambiente (média 21,5°C), quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.

Constatou-se que apesar de possuírem diferentes taxas de produção de biogás, apresentadas na Figura 17 (b), os diferentes substratos possuíam volumes acumulados semelhantes, sendo 23,85; 23,41 e 23,34 litros de biogás para os substratos contendo 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Isso pode ser explicado devido os reatores apresentarem volumes diários de produção de biogás semelhantes, porém, por possuírem DQO aplicada diferente, a taxa de produção de biogás desses reatores tornam-se diferentes, sendo observado decréscimo da taxa com o aumento da DQO aplicada ao sistema.

Na Figura 18, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção de CH<sub>4</sub> (volume de CH<sub>4</sub> produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado de CH<sub>4</sub> (litros de CH<sub>4</sub>) para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C).

Com relação à formação de CH<sub>4</sub>, apresentada na Figura 18 (a), pode-se observar comportamento crescente para as taxas de produção de CH<sub>4</sub> para os três diferentes substratos, obtendo do mesmo modo que para a produção de biogás, maior taxa de produção de CH<sub>4</sub> para o substrato com menor concentração de sólidos totais, 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, onde apresentou valor médio de 1,65 mL de

$\text{CH}_4/\text{gDQO}$  aplicada. Para os substratos contendo 48,5 e 59,9  $\text{gST.L}^{-1}$ , apresentaram valores médios de taxa de 1,30 e 1,03  $\text{mL de CH}_4/\text{gDQO}$  aplicada, respectivamente.

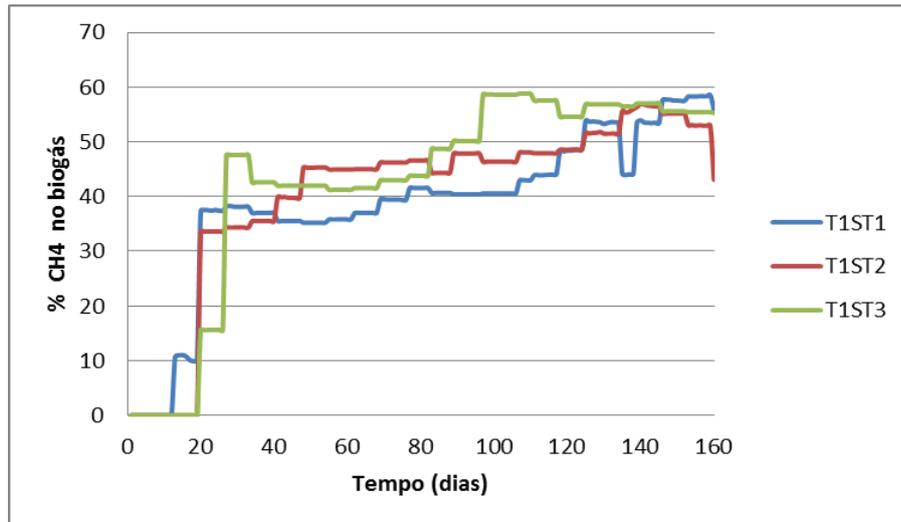


**FIGURA 18:** Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ), quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de  $\text{CH}_4$ ; (b) do volume acumulado de  $\text{CH}_4$ .

Ao analisar a Figura 18 (b), observa-se que apesar de possuírem diferentes taxas de produção de  $\text{CH}_4$ , verificou-se produção discretamente maior para o substrato contendo  $59,9 \text{ gST.L}^{-1}$ , onde foi acumulado volume de  $\text{CH}_4$  de 9,69 litros, enquanto que o substrato contendo  $48,5 \text{ gST.L}^{-1}$  foi acumulado 9,31 litros e para o substrato com  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$ , 9,05 litros. Como explicado anteriormente, isto ocorre devido os reatores apresentarem volumes diários de produção de  $\text{CH}_4$  semelhantes, porém, por possuírem DQO aplicada diferente, suas taxas de produção de  $\text{CH}_4$  tornam-se diferentes.

Portanto, verificou-se que o aumento da concentração de sólidos totais fez com que fosse obtido maior acúmulo de  $\text{CH}_4$ , devendo-se salientar que os volumes acumulados obtidos não apresentaram grandes diferenças entre si.

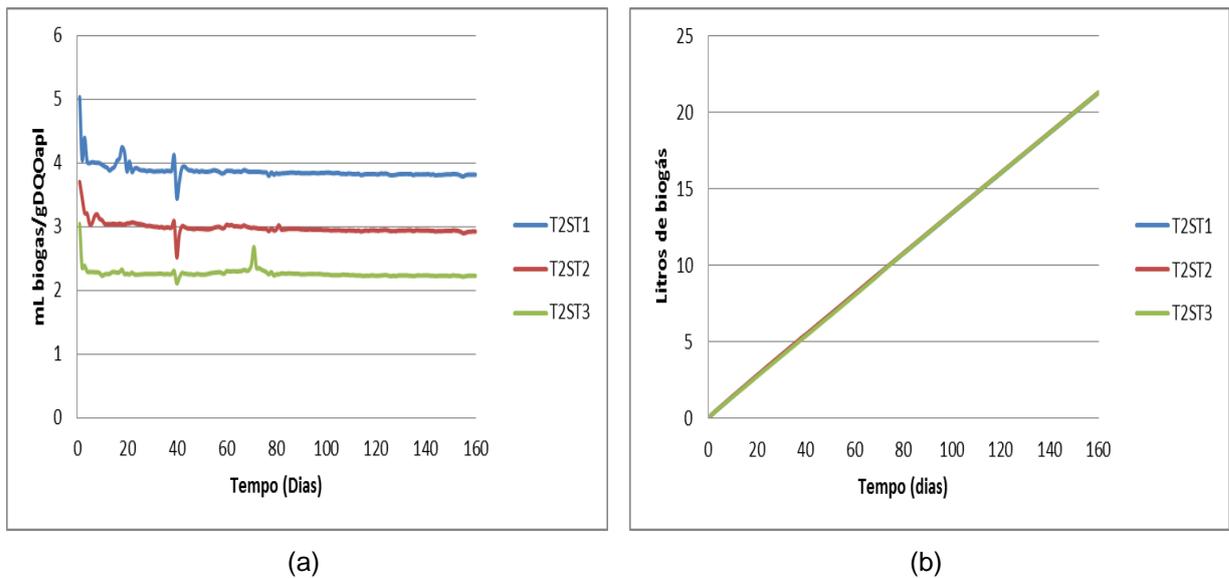
Na Figura 19, é apresentado o efeito da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura ambiente (média  $21,5^\circ\text{C}$ ) no comportamento da variação temporal do percentual de  $\text{CH}_4$ .



**FIGURA 19:** Efeito da concentração de sólidos totais presente no substrato, na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás gerado para a temperatura ambiente (média 21,5°C).

A partir da Figura 19, pode-se constatar que inicialmente formou-se CH<sub>4</sub> no substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, 20 dias de monitoramento, possivelmente devido a facilidade de assimilação da matéria orgânica solúvel pelos microrganismos, uma vez que a umidade neste substrato era superior aos outros, porém, no decorrer do monitoramento, verificou-se que o percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás para o substrato com 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, obteve os maiores valores, possivelmente devido ser encontrada maior concentração de STV, parcela dos sólidos que está disponível para assimilação e possível conversão a CH<sub>4</sub> pelos microrganismos. Com isso, foram obtidos percentuais máximos de CH<sub>4</sub> presente no biogás de aproximadamente 59% para o substrato com 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, decorridos 110 dias de monitoramento, de 57% para o substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup>, com 140 dias de monitoramento e 59% para o substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, no final do monitoramento (159 dias de monitoramento).

Na Figura 20, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção do biogás (volume do biogás produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado do biogás (litros do biogás) para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura de 40°C.



**FIGURA 20:** Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 40°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.

Ao analisar a Figura 20 (a), pode-se observar que em temperatura de 40°C, o substrato que obteve maior taxa de produção de biogás foi o que apresentou menor concentração de sólidos totais,  $36,2 \text{ gST.L}^{-1}$ , com valor médio de  $3,87 \text{ mL}$  de biogás/gDQO<sub>aplicada</sub>. Para os substratos contendo  $48,5$  e  $59,9 \text{ gST.L}^{-1}$ , foram apresentados valores médios de taxa de  $2,98$  e  $2,27 \text{ mL}$  de biogás/gDQO<sub>aplicada</sub>, respectivamente.

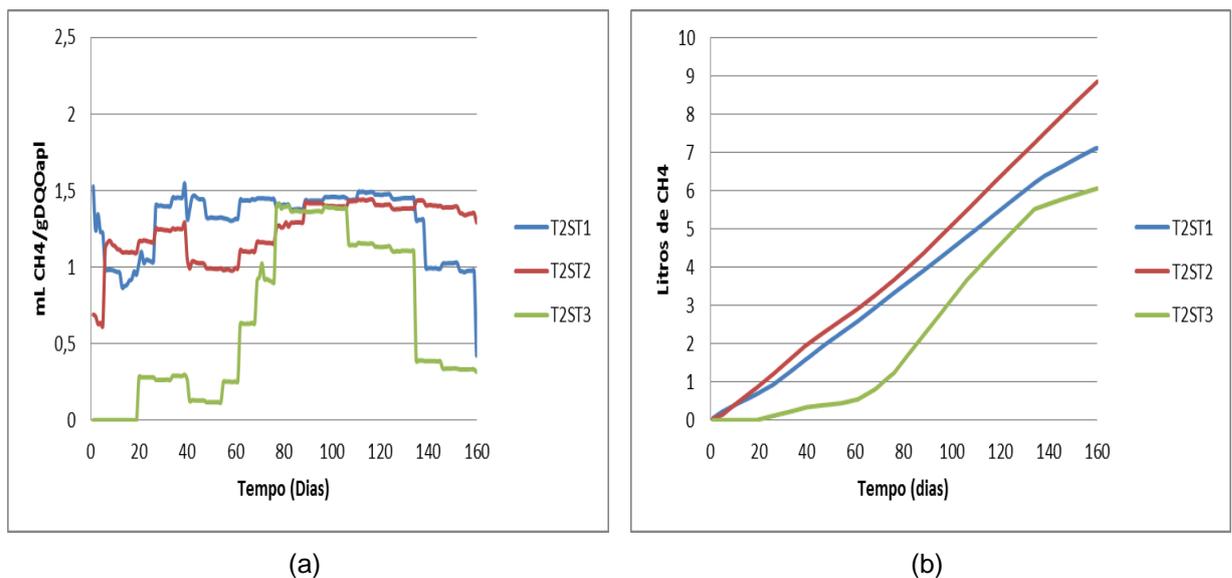
A partir da Figura 20 (b), constata-se que da mesma forma que para os substratos em temperatura ambiente (média 21,5°C), os volumes acumulados para os substratos a 40°C, apresentaram volumes aproximados, sendo eles  $21,24$ ;  $21,28$  e  $21,26$  litros de biogás, para os substratos com  $36,2$ ;  $48,5$  e  $59,9 \text{ gST.L}^{-1}$ , respectivamente.

Como dito anteriormente, a obtenção de volumes aproximados com taxas de produção diferentes, está relacionado à DQO aplicada nos reatores serem diferentes, porém devido os volumes de biogás gerados diariamente serem aproximados, os volumes acumulados de biogás ao final do monitoramento, também tornam se aproximados.

Assim, em temperatura de 40°C, observa-se que a concentração de sólidos totais, aparentemente não ocasionou a mudanças na digestão anaeróbia com relação a produção de biogás.

Na Figura 21, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção de CH<sub>4</sub> (volume de CH<sub>4</sub> produzido/ massa de DQO aplicada) e volume acumulado de CH<sub>4</sub> (litros de CH<sub>4</sub>) para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura de 40°C.

Observou-se que, em temperatura de 40°C, a maior taxa obtida para as diferentes condições de concentração de sólidos totais, foi apresentada pelo substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, em média 1,30 mL de CH<sub>4</sub>/gDQOaplicada. Para os substratos contendo 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> foram obtidos valores médios de 1,24 e 0,65 mL de CH<sub>4</sub>/gDQOaplicada, respectivamente.



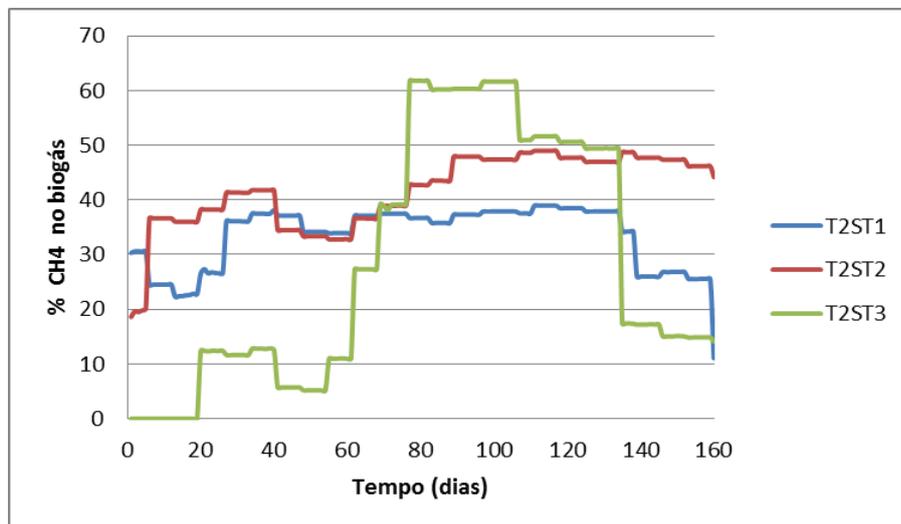
**FIGURA 21:** Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura 40°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH<sub>4</sub>; (b) do volume acumulado de CH<sub>4</sub>.

Quanto ao comportamento do volume acumulado de CH<sub>4</sub> ao longo do monitoramento, apresentado na Figura 21 (b), observa-se que diferente da produção de biogás, a produção de CH<sub>4</sub> em condições de temperatura de 40°C, obteve diferentes volumes acumulados, sendo verificado para o substrato contendo 48,5

gST.L<sup>-1</sup> maior acúmulo, 8,84 litros. Para os substratos com 36,2 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, observa-se acúmulo de 7,11 e 6,05 litros de CH<sub>4</sub>, respectivamente.

Os reatores à temperatura de 40°C, provavelmente tiveram seu metabolismo microbiano afetado devido a estufa onde estavam armazenados ter passado por manutenção durante o período de 3 dias, submetendo-os durante esse tempo a temperatura ambiente (média 21,5°C).

Na Figura 22, é apresentado o efeito da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 40°C no comportamento da variação temporal do percentual de CH<sub>4</sub>.

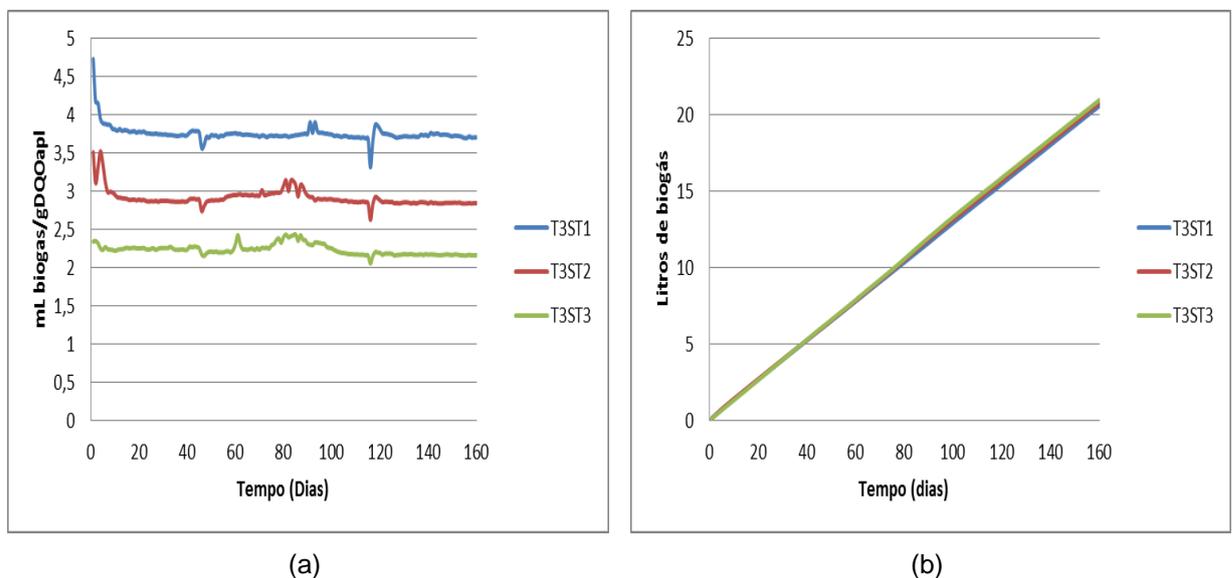


**FIGURA 22:** Efeito da concentração de sólidos totais presente no substrato, na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás gerado para a temperatura de 40°C.

Analisando-se a Figura 22, constata-se que dentre as condições de concentração de sólidos totais, para o substrato com maior concentração, a formação de CH<sub>4</sub> foi a última a ocorrer, porém para a mesma condição, foi verificado maior percentual de CH<sub>4</sub> no biogás, sendo 61,8%, após 77 dias de monitoramento. Para o substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup>, foi obtido percentual máximo de 49% com 102 dias de monitoramento e para o substrato com menor concentração de sólidos totais, 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, percentual máximo de 39% com 111 dias de monitoramento.

Observa-se que da mesma forma que para a condição de temperatura ambiente (média 21,5°C), os reatores em temperatura de 40°C, apresentaram aumento no percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás, com o aumento da concentração de sólidos totais, possivelmente ocorrendo devido à maior disposição de STV no substrato.

Na Figura 23, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção do biogás (volume do biogás produzido/massa de DQO aplicada) e volume acumulado do biogás (litros do biogás) para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura de 50°C.



**FIGURA 23:** Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura 50°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção do biogás; (b) do volume acumulado do biogás.

Quanto ao comportamento temporal com relação à taxa de produção de biogás, apresentado na Figura 23 (a), constata-se que da mesma forma que nos casos anteriores, os valores das taxas de produção de biogás cresceram da condição de maior para menor concentração de sólidos totais, assim obteve-se taxa de 3,75; 2,91 e 2,33 mL de biogás/gDQOaplicada, para o substrato com 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Com relação ao volume acumulado de biogás, Figura 23 (b), observa-se que para os três substratos em temperatura de 50°C, foram aproximados, sendo eles 20,55 litros (substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup>), 20,74 litros (substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup>) e 20,93 litros (substrato com 59,9 gST.L<sup>-1</sup>).

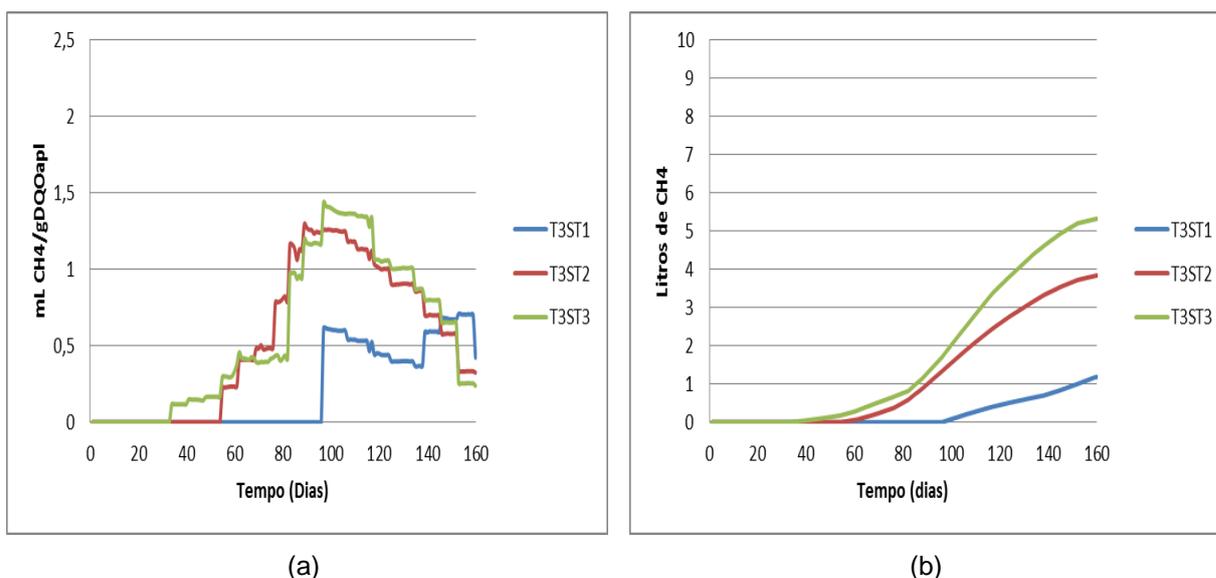
Portanto, verifica-se que, para este estudo, as concentrações de sólidos totais presentes nos substratos de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, não afetaram de forma expressiva os volumes acumulados de biogás, no período de 160 dias monitoramento.

Na Figura 24, são apresentados os comportamentos das variações temporais da taxa de produção de CH<sub>4</sub> (volume de CH<sub>4</sub> produzido/massa de DQO aplicada) e volume acumulado de CH<sub>4</sub> (litros de CH<sub>4</sub>) para os substratos com concentração de sólidos totais de 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura de 50°C.

Ao analisar a Figura 24 (a), observou-se que para a temperatura de 50°C, o substrato com 59,9 gST.L<sup>-1</sup> apresentou maior taxa de produção de CH<sub>4</sub>, 0,57 mL de CH<sub>4</sub>/gDQOaplicada. Foram obtidas taxas de 0,54 e 0,22 mL de CH<sub>4</sub>/gDQOaplicada para os substratos com 48,5 e 36,2 gST.L<sup>-1</sup>.

Pode-se observar, na Figura 24 (b), que a formação de CH<sub>4</sub> ocorreu de forma lenta para todos os reatores a 50°C, observando-se que com o aumento da concentração de sólidos totais presentes no substrato, foram geradas condições mais favoráveis para a produção de CH<sub>4</sub>, constatando-se por serem obtidos volumes acumulados de 5,32 litros de CH<sub>4</sub> para o substrato com maior concentração de sólidos totais (59,9 gST.L<sup>-1</sup>), 3,84 litros para o substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup> e de apenas 1,19 litros para o substrato com 36,2 gST.L<sup>-1</sup>.

Por tanto, a concentração de sólidos totais presente no substrato a 50°C, não afetou na produção do biogás, e foram apresentados valores semelhantes para os substratos, porém quanto ao volume acumulado de CH<sub>4</sub>, observou-se que a formação deste foi favorecida pelo aumento da concentração de sólidos totais presente no substrato.

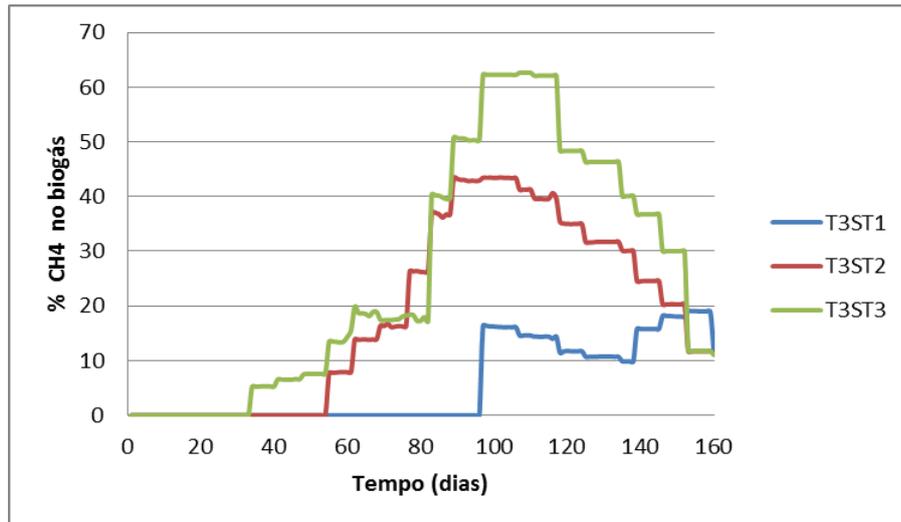


**FIGURA 24:** Influência da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura 50°C, quanto ao comportamento da variação temporal; (a) da taxa de produção de CH<sub>4</sub>; (b) do volume acumulado de CH<sub>4</sub>.

Na Figura 25, é apresentado o efeito da concentração de sólidos totais presentes nos substratos em temperatura de 50°C no comportamento da variação temporal do percentual de CH<sub>4</sub>.

Com relação à Figura 25, observa-se que o aumento da concentração de sólidos totais presentes nos substratos a 50°C, favoreceu o desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos, onde observa-se que a formação do CH<sub>4</sub> ocorreu de forma mais rápida para os reatores que apresentaram maior concentração de sólidos totais, sendo constatada início na geração de CH<sub>4</sub> nos 34<sup>o</sup>, 55<sup>o</sup> e 97<sup>o</sup> dia de monitoramento, para os substratos contendo 36,2; 48,5 e 59,9 gST.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Com relação à composição do biogás, o maior percentual de CH<sub>4</sub> para o substrato com maior concentração de sólidos totais foi obtido após decorrido o período de 107 dias de monitoramento, com cerca de 63% de CH<sub>4</sub>. Para o substrato com 48,5 gST.L<sup>-1</sup>, foi necessário um período de 99 dias de monitoramento para se obter aproximadamente de 43% de CH<sub>4</sub>, e para o substrato com menor concentração de sólidos totais, o percentual de CH<sub>4</sub> não superou os 20% até o final do monitoramento.



**FIGURA 25:** Efeito da concentração de sólidos totais presente no substrato, na quantidade percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás gerado para a temperatura de 50°C.

Com isso verifica-se que em temperatura de 50°C, a concentração de sólidos totais influenciou de forma expressiva o percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás, sendo constatado maior percentual de CH<sub>4</sub> com o aumento da concentração dos sólidos totais.

## 5.5 TAXA DE PRODUÇÃO TEÓRICA DE GÁS METANO

Pela relação estequiométrica, tem-se que 1g de carbono orgânico total (COT) produzirá, nas CNTP, 1,87 litros de CH<sub>4</sub>. Assim, é possível comparar a geração teórica de CH<sub>4</sub> com a produção experimental e saber o quanto eficiente o sistema foi para a geração de CH<sub>4</sub>.

São apresentados na Tabela 21, os valores de produção teórica e real de CH<sub>4</sub>, bem como a eficiência de conversão dos valores obtidos experimentalmente em relação aos valores teóricos, para os nove diferentes tratamentos estudados.

**TABELA 21:** Produção teórica e experimental de CH<sub>4</sub> para o COT transformado.

Tratamento	Valor teórico (Litros CH <sub>4</sub> )	Valor experimental (Litros CH <sub>4</sub> )	Eficiência de conversão (%)
T1ST1	9,48	9,05	95,5
T2ST1	7,52	7,11	94,6
T3ST1	7,18	1,19	16,5
T1ST2	9,92	9,31	93,8
T2ST2	9,65	8,84	91,6
T3ST2	8,75	3,84	43,8
T1ST3	12,77	9,69	75,9
T2ST3	13,33	6,05	45,4
T3ST3	13,11	5,32	40,6

Pôde-se constatar que dentre os tratamentos estudados, o que apresentou produção experimental mais aproximada à teórica, foram os tratamentos com os substratos contendo 36,2 e 48,5 gST.L<sup>-1</sup> em temperatura ambiente (média 21,5°C) e a 40°C, nos quais foram obtidos valores experimentais correspondendo a mais de 90% do valor teórico. Para os tratamentos envolvendo a temperatura de 50°C foram apresentados valores experimentais inferiores a 44% do valor teórico, indicando possivelmente que a temperatura tenha afetado o desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos. Quanto ao substrato com maior concentração de sólidos totais, observa-se que dentre estes, o que apresentou melhor rendimento foi para a temperatura ambiente (média 21,5°C), indicando que aproximadamente 76% do valor teórico foi obtido com o valor experimental.

## 6 CONCLUSÕES

- O tratamento anaeróbio, com baixa concentração de sólidos totais, constitui-se como alternativa viável para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos vegetais, evitando sua destinação a lixões ou aterros, e aproveitando seu potencial energético com a produção de biogás.
- Os melhores resultados foram obtidos à temperatura ambiente (média 21,5°C), com maiores remoções de DQO e COT.
- A concentração de sólidos totais de 36,2 gST.L<sup>-1</sup>, foi a que propiciou maior eficiência de biodegradação da matéria orgânica, visto que não houve sobrecarga orgânica, enquanto que para os outros substratos, possivelmente, tenha ocorrido sobrecarga orgânica, afetando no metabolismo dos microrganismos.
- A condição de tratamento que apresentou melhores resultados, foi no reator com substrato com concentração de sólidos totais de 36,2 gST.L<sup>-1</sup> a temperatura ambiente (média 21,5°C), tendo em vista apresentar maior biodegradação da matéria orgânica, bem como maior constante cinética de decaimento (k) e taxa de produção de biogás e de CH<sub>4</sub>.
- A maior produção de biogás e de gás CH<sub>4</sub> observada foi para o tratamento do substrato com menor concentração de sólidos totais a temperatura ambiente (média 21,5°C).
- A condição de tratamento em que houve maior recuperação de CH<sub>4</sub> foi para o reator com substrato com concentração de sólidos totais de 36,2 gST.L<sup>-1</sup> a temperatura ambiente (média 21,5°C), indicando percentual de recuperação de 95,5%.

## 7 RECOMENDAÇÕES

As recomendações para outros trabalhos na mesma linha de pesquisa são:

- Realizar este tratamento em escala piloto aplicando as mesmas condições estudadas, para verificar seu comportamento quando aproximada a escalas reais.
- Reduzir a granulometria do substrato, para facilitar o processo de biodegradação.
- Utilizar lodo anaeróbio de reatores que tratam resíduos sólidos orgânicos, tendo em vista melhorar a eficiência do tratamento.
- Estudar melhor combinação dos RSOV que irão compor o substrato, a fim de reduzir a concentração de compostos que possam afetar a etapa metanogênica, reduzindo assim a presença de compostos sulfurados, bem como de resíduos com baixo pH, objetivando elevar o valor pH do substrato, e com isso reduzir a quantidade de  $\text{NaHCO}_3$  a ser adicionada ao substrato, com finalidade de aumentar este pH.

## REFERÊNCIAS

ABBASSI-GUENDOUZ, A., BROCKMANN, D., TRABLY, E., DUMAS, C., DELGENÈS, J-P., STEYER, J-P., ESCUDIÉ, R., **Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation**, Bioresource Technology, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.174

APHA - American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21th ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR – 10.004. **Resíduos Sólidos** – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BERGAMO, C. M.; MONACO, R.; RATUSZNEI, S. A.; RODRIGUES, J. A. D.; ZAIAT, M., FORESTI, E.; **Effects of Temperature at Different Organic Loading Levels on the Performance of Afluidized-bed Anaerobic Sequencing Batch Bioreactor**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2009.

BITTON, G.; **Wastewater Microbiology**, 3rd ed., Canada, Wiley, 2005.

BOER, E. D.; JEDRCZAK, A., KOWALSHI, Z.; KULCZYCKA, J.; **A Review of Municipal Solid Waste Composition and Quantities in Poland.**, Waste Management 30, 369–377, 2010.

BRUNI, E.; **Improved Anaerobic Digestion of Energy Crops and Agricultural Residues**, PhD Thesis, department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2010.

CASADO, A. P. B.; BRASILEIRO, G. M. A.; LIMA, A. P. S.; SOARES, F. J. F.; ALMEIDA, L. C.; MENEZES, M. L. J.; **Diagnóstico da Gestão e Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Pirambu/SE**. 3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos, 2º Seminário da Região Nordeste Sobre Resíduos Sólidos. João Pessoa - PB, 2010.

CHAUDHARY, B. K.; **Dry Continuous Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in Thermophilic Conditions**, thesis for the degree of master, department of Engineering in Environmental Engineering and Management, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology, Thailand, 2008.

CURRY, N.; PILLAY, P.; **Biogas Prediction and Design of a Food Waste to Energy System for the Urban Environment**, Renewable Energy, 41,P.200 – 209, 2012.

DACANAL, M.; **Tratamento de Lixiviado Através de Filtro Aeróbio Associado a Membrana de Microfiltração**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, 2006.

DEUBLIN, D.; SETINHAUSER, A.; **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. Ed.:Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Germany. 2008

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**, dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, USP, São Carlos, São Paulo, 2006.

FDEZ. - GÜELFO, L. A.; ÁLVAREZ-GALLEGO, D.; MÁRQUEZ, S. D.; GARCÍA, L. I. R.; **Biological Pretreatment Applied to Industrial Organic Fraction of Municipal Solid Wastes (OFMSW): Effect on Anaerobic Digestion**, Chemical Engineering Journal, 172, P.321–325, 2011a.

FDEZ. - GÜELFO, L. A.; ÁLVAREZ-GALLEGO, D.; SALES, D.; GARCÍA, L. I. R.; **Determination of Critical and Optimum Conditions for Biomethanization of OFMSW in a Semi-Continuous Stirred Tank Reactor**, Chemical Engineering Journal, 171, p.418–424, 2011b.

FELIZOLA, C. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S.; **Estudo do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**, Agropecuária Técnica, v.27, n1, p.53-62, 2006.

FIRMO, A. L. B.; MELO, E. S. R.L.; GUIMARÃES, L. J. N.; VALLE, G. A.; **Avaliação do Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro da Muribeca**, 3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos, 2º Seminário da Região Nordeste Sobre Resíduos Sólidos. João Pessoa-PB, 2010.

GERARDI, M. H.; **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. ed. John Wiley & Sons Inc, New Jersey, Canadá, 175p, 2003.

GOLUEKE, C. G.; **Biological Processing: Composting and Hydrolysis Solid Waste Management**. V.N. Reinholds Company, p.225,1977.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, Rio de Janeiro, 2008.

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. Coordenação: D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. 2ª edição, São Paulo, 2000.

KHANAL, S. K.; **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications**, Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, USA, 2008.

KOMEMOTO, K.; LIM, Y. G.; NAGAO, N.; ONOUE, Y.; NIWA, C.; TODA, T.; **Effect of Temperature on VFA's and Biogas Production in Anaerobic Solubilization of Food Waste**, Waste Management, 29, p.2950–2955, 2009.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A.; **Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos com Alta e Baixa Concentração de Sólidos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande-PB, 2009.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S. **Tratamento Anaeróbio de Resíduos Orgânicos com Baixa Concentração de Sólidos**. Revista de Engenharia sanitária e ambiental. Vol. 9 – Nº 4. 280-284, 2004.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J.; **Comportamento dos Sólidos Totais no Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos e Industriais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 3, nº 2, p. 229-232, 1999.

LIANHUA, L.; DONG, L.; YONGMING,S.; LONGLONG, M.;ZHENHONG, Y.; XIAOYING, K.; **Effect of Temperature and Solid Concentration on Anaerobic Digestion of Rice Straw in South China**. International Journal of Hydrogen Energy, 35, p.7261 e7266, 2010.

LIBÂNIO, P. A. C.; **Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2002.

LOPES, W. S.; **Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos Inoculados com rumem bovino.** Dissertação de mestrado - Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, UFPB/UEPB, 2000.

LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S.; **Avaliação dos Impactos Ambientais Causados por Lixões: um Estudo de Caso** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2000.

LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; SOUZA, J. T.; JÚNIOR, G. B. A.; SILVA, S. A.; SOUSA, M. A.; **Influência da Umidade na Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos,** XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancun, México, 2002.

MANAHAN, S. E.; **Environmental Chemistry,** 7<sup>th</sup> ed, New York, USA, Lewis Publishers, 2000.

METCALF & EDDY; **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse,** 4<sup>a</sup> ed, New York – USA, McGraw-Hill, 2003.

NGUYEN, P.H.L; KURUPARAN, P.; VISVANATHAN, C.; **Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste as a Treatment Prior to Landfill.** Bioresource Technology 98,p. 380–387, 2007.

PARAWIRA, W.; **Anaerobic Treatment of Agricultural Residues and Wastewater: Application of High-Rate Reactors,** Doctoral Dissertation - Department of Biotechnology, Lund University, Sweden, 2004.

PICANÇO, A. P.; **Influência da Recirculação de Percolado em Sistemas de Batelada de uma Fase e Híbrido na Digestão da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos de Urbanos,** tese de doutorado, USP, São Carlos, 2004.

RAMOS, R. A.; **Avaliação da Influência da Operação de Descarte de Lodo no Desempenho dos Reatores UASB em Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM - 117/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133p, 2008.

RAPOSO, F.; de la RUBIA, M. A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R.; **Anaerobic Digestion of Solid Organic Substrates in Batch Mode: An Overview relating to Methane Yields and Experimental Procedures**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, p.861–877, 2011.

SANTOS, G. O.; MOTA, F. B. S.; **Potencial Teórico de Geração de Biogás (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) dos Resíduos Sólidos Domésticos de Fortaleza-Ceará**. 3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos, 2º Seminário da Região Nordeste Sobre Resíduos Sólidos. João Pessoa-PB, 2010.

SANTOS, L. C.; **A Questão do Lixo Urbano e a Geografia**. 1º Simpósio de Pós-Graduação em Geografia do Estado de São Paulo, Rio Claro – SP, 2008.

SANTOS, M. T. L.; **Contribuição para o Estudo da Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos**. Tese de Doutorado – Engenharia Sanitária, Universidade de Lisboa, 2010.

SILVA, W. R.; **Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Vegetais**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba, 2009.

SOUTO, G. D. B.; **Efeito da Variação Gradual da Taxa de Recirculação do Lixiviado em Reatores Anaeróbios Híbridos na Digestão da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia da São Carlos, Área: Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 2005.

STAMS, A. J. M.; PLUGGE, C. M.; **Electron Transfer in Syntrophic Communities of Anaerobic Bacteria and Archaea**. Nat. Rev. Microbiol., vol. 7, 2009.

SUBTIL, E. L.; **Avaliação da Redução de Sulfato e Produção de Sulfeto Dissolvido em Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) Tratando Esgoto Sanitário em Escala Real**. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

van HAANDEL. A.; MARAIS, G.; **O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado: Teoria e Aplicação para Projetos e Operação.** ed.: EPGRAF, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 1999.

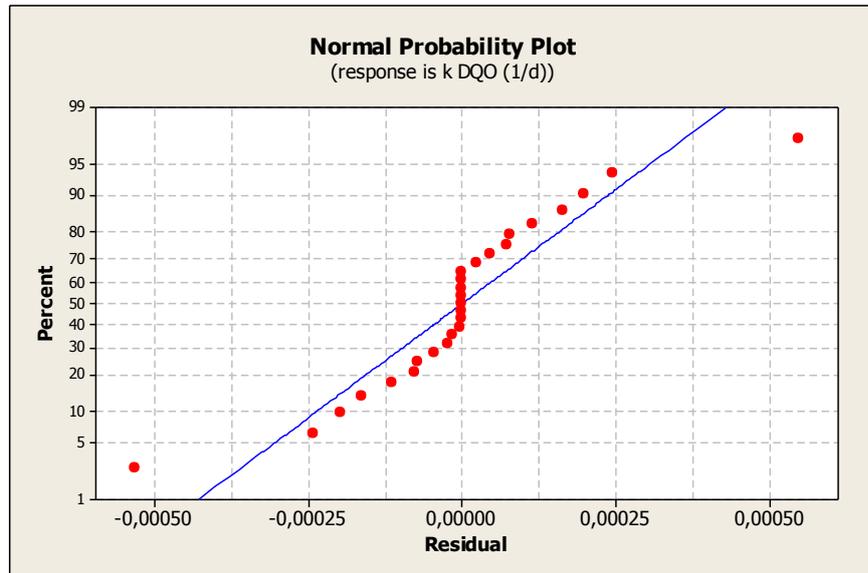
VERSIANI, B. M.; **Desempenho de um Reator UASB Submetido a Diferentes Condições Operacionais Tratando Esgotos Sanitários do Campus da UFRJ,** dissertação de mestrado, programas de pós-graduação de engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ZHANGH, J.; SUN, K.; WU, M., ZHANG, L.; **Influence of Temperature on Performance of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste.** Journal of Environmental Sciences Vol. 18, No. 4 pp. 810-815, 2006.

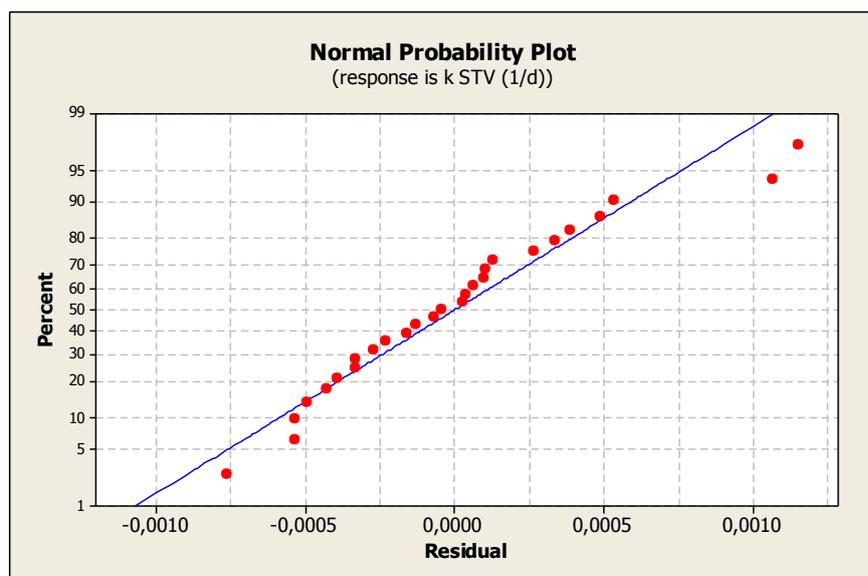
ZHU, B.; CIKAS, P.; ZHANG.; LORD, J.; JENKINS, B.; LI, X.; **Characteristics and biogas Production Potential of Municipal Solid Wastes Pretreated with a Rotary Drum Reactor.** Bioresource Technology 100, 1122–1129, 2009.

## APÊNDICE A

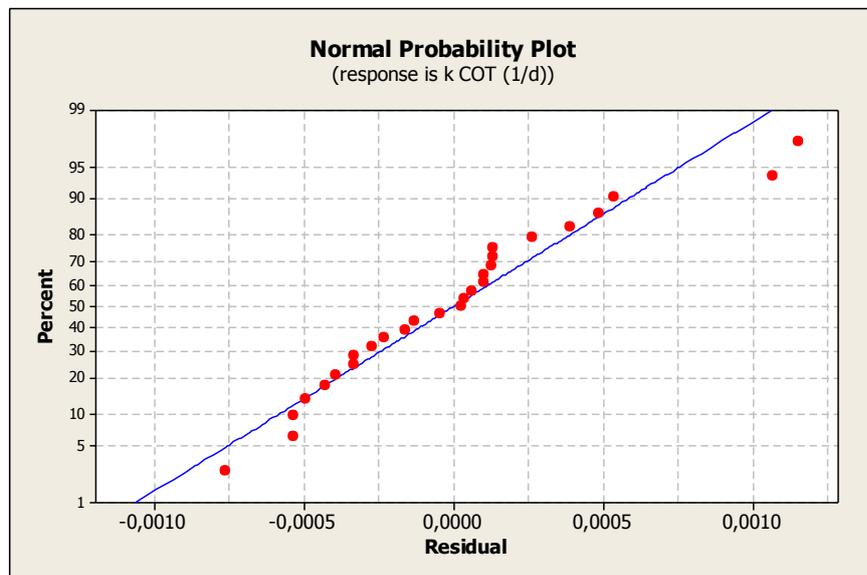
**FIGURA 26:** Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da DQO (k DQO).



**FIGURA 27:** Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da STV (k STV).



**FIGURA 28:** Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento do COT ( $k_{COT}$ ).



**FIGURA 29:** Tendência de distribuição normal dos dados da constante de decaimento da NTK ( $k_{NTK}$ ).

