

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**BRUNA MAYER**

**CARACTERIZAÇÃO E BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO  
ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA CENTRAL DE  
ABASTECIMENTO S.A – UNIDADE DE FOZ DO IGUAÇU**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**MEDIANEIRA**

**2016**

BRUNA MAYER

**CARACTERIZAÇÃO E BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO  
ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA CENTRAL DE  
ABASTECIMENTO S.A – UNIDADE DE FOZ DO IGUAÇU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira.

Orientador: Prof. Me. Thiago Edwiges

MEDIANEIRA

2016



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Medianeira  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental



---

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO E BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA  
DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA CENTRAL DE ABASTECIMENTO S.A  
– UNIDADE DE FOZ DO IGUAÇU

por

BRUNA MAYER

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 13:30 h do dia 20 de junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Thiago Edwiges  
Prof. Orientador

---

Laercio Mantovani Frare  
Membro titular

---

Eduardo Eyng  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por ter me dado saúde e força para enfrentar as dificuldades.

A UTFPR pela oportunidade de realização do curso.

Aos meus professores, em especial ao meu orientador, professor Thiago Edwiges, pelo conhecimento, dedicação, ajuda e correções.

Aos meus colegas de Iniciação Científica, João Alino, Paula Remor e Mariana Menoncin que permitiram que esse projeto se tornasse possível.

A todos os meus colegas de graduação que tornaram a vida acadêmica mais divertida.

Agradeço aos meus pais, Pedro e Jane, e ao meu irmão Matheus pelo amor, incentivo e paciência.

A todos que de alguma maneira fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

## RESUMO

MAYER, Bruna. **Caracterização e biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos gerados na Central de Abastecimento S.A – Unidade de Foz do Iguaçu**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

As centrais de abastecimento são grandes geradoras de resíduos sólidos orgânicos. Estes resíduos geralmente não têm uma destinação adequada, fazendo com que sejam enviados diretamente a aterros controlados e a lixões, causando desperdício de material e energia. A biodigestão anaeróbia é uma alternativa para o tratamento destes resíduos e possibilita a recuperação energética e de material através da geração de metano e biofertilizante. Assim esse trabalho objetivou caracterizar e avaliar a variação da composição e das características físico-químicas dos resíduos orgânicos gerados na Central de Abastecimento S.A (CEASA) na unidade de Foz do Iguaçu, biodigerir estes resíduos anaerobicamente e mensurar a geração de biogás, além de monitorar a estabilidade do reator. A composição dos Resíduos de Frutas e Legumes (RFL) foi variável ao longo dos meses. Estes apresentam caráter ácido, baixa alcalinidade e elevado teor de sólidos voláteis (SV). Na maioria dos meses, o teor de sólidos totais (ST) e a relação carbono/nitrogênio (C/N) dos RFL apresentaram valores ideais para a biodigestão anaeróbia. Porém, o pH e alcalinidade total (AT) demonstraram ser abaixo do recomendado em todas as leituras. O reator demonstrou-se estável ao longo de todo o monitoramento, mantendo valores abaixo de 0,16 para as relações alcalinidade intermediária (AI): alcalinidade parcial (AP) e ácidos voláteis (AV) / alcalinidade total (AT). A produção média volumétrica de biogás tendeu a subir com o aumento da carga orgânica volátil (COV) aplicada, alcançando uma geração de  $711 \text{ mL}_N \text{ L}^{-1} \text{ reator d}^{-1}$  com teor de 66% de metano.

**Palavras-chave:** Frutas. Legumes. Biogás. Estabilidade.

## ABSTRACT

MAYER, Bruna. **Anaerobic digestion and characterization of the organic fraction of solid waste generated in the Central de Abastecimento S.A. - Foz do Iguaçu Unit.** 2016. 50 f. Work Completion of course (Bachelor of Environmental Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

Supply centers are great generators of organic waste. These wastes usually do not have a proper allocation, causing them to be sent directly to controlled landfills and dumps, causing material waste and energy. Anaerobic digestion is an alternative for the treatment of this waste and provides energy and material recovery through the generation of methane and fertilizer. Thus, this study aimed to characterize and evaluate the variation of composition and physico-chemical characteristics of organic waste generated in the Central de Abastecimento S.A. (CEASA) in the Foz do Iguaçu Unit, digest these anaerobically waste and measuring the generation of biogas, and monitor the stability of the reactor. The composition of Fruits and Vegetables Waste (FVW) has been variable over the months. These have acid character, low alkalinity and high content of volatile solids (VS). In most months total solids content (TS) and carbon / nitrogen ratio (C / N) of the FVW had ideal values for anaerobic digestion. However, the pH and total alkalinity (TA) shown below is recommended for all readings. The reactor proved to be stable throughout the entire monitoring, maintaining values below 0.16 for the intermediate alkalinity relationship (IA): partial alkalinity (PA) and volatile acids (VA) / Total Alkalinity (TA). The average volumetric biogas production tended to rise with the increase in Volatile Organic content (VOC) applied, reaching a generation of 711 mL<sub>N</sub> L<sup>-1</sup> reactor d<sup>-1</sup> with a content of 66% methane.

**Keywords:** Fruit. Vegetables. Biogas. Stability.

## LISTA DE ABREVIATURAS

AI - Alcalinidade intermediária  
AP – Alcalinidade parcial  
AT – Alcalinidade total  
AV – Ácidos voláteis  
CE – Condutividade elétrica  
COT – Carbono orgânico total  
COV – Carga orgânica volátil  
CV – Coeficiente de variação  
NTK – Nitrogênio total Kjeldahl  
pH – Potencial hidrogeniônico  
RFL – Resíduos de frutas e legumes  
RSU – Resíduos sólidos urbanos  
ST – Sólidos totais  
SV – Sólidos voláteis  
TA – Testes de aclimação  
T1, T2 e T3 – Tratamento 1, 2 e 3  
TRH – Tempo de retenção hidráulico

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Hierarquia na gestão dos resíduos sólidos proposta pela PNRS.....                                       | 13 |
| Figura 2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados em 2008 no Brasil .....                  | 15 |
| Figura 3a e 3b – a) Conversão biológica nos sistemas aeróbios; b) Conversão biológica nos sistemas anaeróbios..... | 17 |
| Figura 4 - Vista área da CEASA - Unidade de Foz do Iguaçu.....   | 22 |
| Figura 5 - Composição gravimétrica dos resíduos gerados na CEASA – Foz do Iguaçu .....                             | 23 |
| Figura 6 - <i>Container</i> de armazenamento dos resíduos orgânicos na CEASA.....                                  | 24 |
| Figura 7a e 7b – a) Resíduos picados manualmente; b) Resíduos liquidificados .....                                 | 25 |
| Figura 8 - Reator CSTR .....   | 27 |
| Figura 9 - Número de resíduos encontrados em cada mês .....  | 33 |
| Figura 10 - Variação do pH ao longo dos meses .....  | 34 |
| Figura 11 - CE ao longo dos meses .....  | 35 |
| Figura 12 - Comportamento dos ST e SV ao longo dos meses .....   | 36 |
| Figura 13 - Relação C/N ao longo dos meses.....  | 37 |
| Figura 14 - Produção volumétrica diária de biogás .....  | 39 |
| Figura 15 - AT e AP ao longo dos tratamentos .....   | 41 |
| Figura 16 - Relação AI:AP ao longo dos tratamentos .....   | 41 |
| Figura 17 - Relação AV/AT e acidez ao longo dos tratamentos.....   | 42 |
| Figura 18–pH ao longo dos tratamentos .....  | 43 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Destinação final dos RSU .....  | 14 |
| Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do processo anaeróbio .....                              | 17 |
| Quadro 3 - Metodologias utilizadas na caracterização .....                                   | 24 |
| Quadro 4 - Componentes e proporção utilizados na alimentação .....                           | 26 |
| Quadro 5 - COV e TRH aplicado em cada tratamento .....                                       | 28 |
| Quadro 6 - Parâmetros e metodologias utilizadas no monitoramento da estabilidade .....       | 30 |
| Quadro 7 - RFL identificados mensalmente pelo período de 12 meses .....                      | 32 |
| Quadro 8 - Frequência de geração dos tipos de RFL .....                                      | 33 |
| Quadro 9 - Resultados médios mensais da caracterização físico-química .....                  | 34 |
| Quadro 10 - Características físico-químicas do inóculo e do substrato .....                  | 38 |
| Quadro 11 - Composição da amostra utilizada como substrato .....                             | 38 |
| Quadro 12 - Produção de biogás nos diferentes tratamentos .....                              | 39 |
| Quadro 13 - Teor de metano nos tratamentos .....   | 40 |
| Quadro 14 - Valores médios de cada parâmetro avaliado no monitoramento da estabilidade ..... | 44 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                              | <b>13</b> |
| 3.1 GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS NO BRASIL .....            | 13        |
| 3.2 A FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS .....                         | 14        |
| 3.3 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA .....                                 | 16        |
| 3.4 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA .....                                  | 16        |
| 3.5 ESTABILIDADE NO REATOR .....                                 | 21        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                               | <b>22</b> |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....                        | 22        |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ..... | 23        |
| 4.3 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM REGIME SEMI-CONTÍNUO .....          | 26        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                            | <b>32</b> |
| 5.1 VARIABILIDADE DAS CARACTERÍSTICAS DOS RFL.....               | 32        |
| 5.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA .....                                  | 37        |
| <b>6 CONCLUSÃO .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>46</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As centrais de abastecimento (CEASA) são centros distribuidores e comercializadores de hortifrutigranjeiros que estão presentes em quase todos os estados brasileiros. Só o estado do Paraná conta com cinco unidades, que juntas comercializam mais de um milhão de toneladas por ano de produtos.

Essas centrais, como os outros centros distribuidores e comercializadores de frutas e vegetais, geram elevadas quantidades de resíduos sólidos orgânicos, que geralmente não são aproveitados e enviados diretamente aos aterros sanitários. No entanto, não é indicada a destinação dos resíduos gerados nas CEASA para sistemas tradicionais, pois estes apresentam alto teor de umidade e de matéria orgânica biodegradável, que podem causar efeitos adversos nos sistemas. Outro problema na gestão dos resíduos gerados nas CEASA é a variabilidade da composição e das características destes, que dependem dos ciclos de produção, clima, região, dificultando na escolha do melhor tratamento.

Segundo Cunha (2006) a questão ambiental é a maior fragilidade nas CEASA brasileiras, já que estas não incorporam a gestão dos resíduos.

Desde a implantação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) estes resíduos não podem mais ser vistos apenas como um problema ambiental, mas sim como uma alternativa para a geração de energia.

Nesse contexto, a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos se apresenta como um método promissor para a recuperação energética e de material, além de solucionar um problema ambiental já que alia o tratamento dos resíduos com a produção de energia elétrica e/ou térmica e gera ainda um fertilizante natural.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar e biodigerir anaerobicamente a fração orgânica dos resíduos sólidos gerados na Central de Abastecimento S.A – Unidade de Foz do Iguaçu.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar a frequência de geração de cada tipo de resíduo orgânico;
- Determinar a variabilidade das características físico-químicas dos resíduos;
- Utilizar os resíduos como substrato na biodigestão anaeróbia;
- Quantificar a geração de biogás;
- Avaliar a estabilidade do tratamento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS NO BRASIL

A geração *per capita* de resíduos vem crescendo tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento. No Brasil, o desenvolvimento econômico, juntamente à grande dimensão e ao alto contingente populacional criam um cenário favorável para o aumento da geração de resíduos. No País a geração *per capita* de resíduos sólidos tem aumentado mais rápido do que a população, e a geração de resíduos sólidos tem crescido mais do que o PIB nacional (CAMPOS, 2012). Em 2014 a geração *per capita* de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foi de 0,963 kg.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> e a geração total foi de aproximadamente 79 milhões de toneladas, representando um aumento de 2,9% se comparado a geração de 2013 (ABRELPE, 2014).

Cerca de 42% dos RSU gerados não têm destinação final adequada, fazendo com que aproximadamente 81 mil toneladas.dia<sup>-1</sup> sejam encaminhadas para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2014).

Segundo a PNRS esse tipo de disposição final é inadequado, pois não segue normas operacionais específicas, traz riscos e danos à saúde pública, à segurança e gera impactos ambientais adversos. A PNRS prevê a destinação final ambientalmente adequada para os resíduos, que pode ser realizada através da reutilização, da reciclagem, da compostagem, da recuperação e do aproveitamento energético. Propõe ainda, que a disposição final seja aplicada apenas para os rejeitos.

Na Figura 1 tem-se a representação da ordem de prioridade proposta pela PNRS para a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos.



**Figura 1 - Hierarquia na gestão dos resíduos sólidos proposta pela PNRS**  
Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

A coleta seletiva é a maneira de conduzir os municípios ao atendimento da hierarquia na gestão dos resíduos sólidos. No entanto, no Brasil apenas 65% dos municípios registraram alguma iniciativa de coleta seletiva em 2014. Em muitos casos, estas iniciativas consistiram apenas na disponibilização de pontos de entrega voluntária ou convênios com cooperativas de catadores, nem chegando a abranger todo o município ou a população (ABRELPE, 2014).

A hierarquia proposta pela PNRS praticamente não é aplicada na gestão dos RSU já que a maior parte destes é encaminhado diretamente a disposição final (Quadro 1).

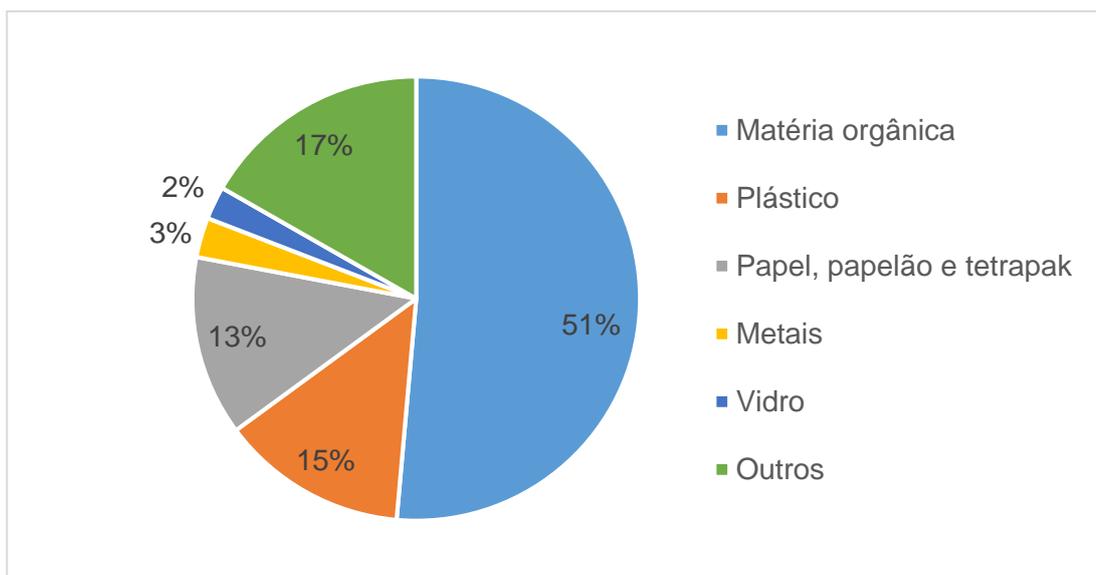
| Destinação final       | Quantidade (t.d <sup>-1</sup> ) | %    |
|------------------------|---------------------------------|------|
| Aterro sanitário       | 110.044,4                       | 58,2 |
| Aterro controlado      | 36.673,2                        | 19,4 |
| Vazadouro a céu aberto | 37.360,8                        | 19,7 |
| Unidade de compostagem | 1.519,5                         | 0,8  |
| Unidade de triagem     | 2.952,0                         | 1,6  |
| Unidade de incineração | 64,8                            | <0,1 |
| Áreas alagadas         | 35,0                            | <0,1 |
| Outras unidades        | 525,5                           | 0,3  |

**Quadro 1 - Destinação final dos RSU**  
**Fonte: Adaptado de IPEA (2011).**

### 3.2 A FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS

Conhecer a composição dos resíduos é fundamental para o gerenciamento destes. A fração de matéria orgânica dos mesmos auxilia na escolha do tratamento mais adequado (BARCELOS, 2009).

De modo geral, os resíduos produzidos no Brasil apresentam uma predominância de matéria orgânica (Figura 2). Segundo Barcelos (2009) esta pode compor de 50 a 80% do total de RSU gerados no país.



**Figura 2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados em 2008 no Brasil**  
Fonte: Adaptado de BRASIL (2012).

As centrais de abastecimento, como os outros centros distribuidores e comercializadores de frutas e vegetais, geram grandes quantidades de resíduos sólidos orgânicos, que geralmente não são aproveitados e enviados diretamente aos aterros sanitários (PERIM; ALMEIDA, 2013). Alguns dos produtos orgânicos comercializados podem chegar a ter perdas superiores a 40% do total produzido até chegarem aos consumidores finais, causando um grande desperdício energético (TANABE; CORTEZ, 2004). Em 2012, apenas 5% dos resíduos sólidos orgânicos gerados no país foram tratados (CEMPRE, 2012).

De acordo com Liu *et al.* (2012), não é indicada a destinação destes resíduos para sistemas tradicionais pois estes apresentam um alto teor de umidade e de matéria orgânica biodegradável, que podem causar efeitos adversos nos sistemas, como a elevada geração de lixiviado no aterro e a queima instável na incineração, com a liberação de dioxinas.

Além disso, o aterramento não se apresenta como uma solução para o problema, apenas adia essa por algum tempo. É necessária a aplicação de tratamentos que possam reduzir a quantidade de resíduos e ainda tragam benefícios adicionais, como a geração de receitas através da comercialização dos produtos gerados. Nesse contexto, a recuperação energética se apresenta como uma alternativa promissora (EPE, 2008).

### 3.3 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

Com a matriz energética baseada na energia hidráulica, o Brasil enfrentou em 2015 a maior crise energética da história (GARCIA, 2015). Em meio a isso surge a necessidade da busca de fontes alternativas.

O aproveitamento energético de RSU se apresenta como uma ótima alternativa para a geração de energia. Embora esta não tenha potencial suficiente para sustentar a expansão da oferta de energia elétrica do país a longo prazo, esta é fator importante de uma estratégia regional ou local (EPE, 2008).

A recuperação energética está prevista na PNRS como uma das formas de destinação ambientalmente adequada para os resíduos. Esta permite resgatar uma fração da energia ainda presente nos resíduos através de métodos e processos industriais. A partir da criação da hierarquia na gestão dos resíduos sólidos, estes não podem mais ser vistos apenas como um problema ambiental, mas sim como uma alternativa para a geração de energia (ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012).

Os resíduos sólidos gerados em feiras livres e centrais de abastecimento apresentam características favoráveis para o aproveitamento em processo de bioestabilização anaeróbia (LEITE *et al.*, 2003) pois estes apresentam uma boa degradabilidade (ONUUDI, 2013).

Nesse contexto, a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos se apresenta como um método promissor para a recuperação energética e de material (HIDAKA *et al.*, 2015), além de solucionar um problema ambiental já que alia o tratamento dos resíduos com a produção de energia elétrica e/ou térmica e gera ainda um fertilizante natural (ONUUDI, 2013).

### 3.4 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

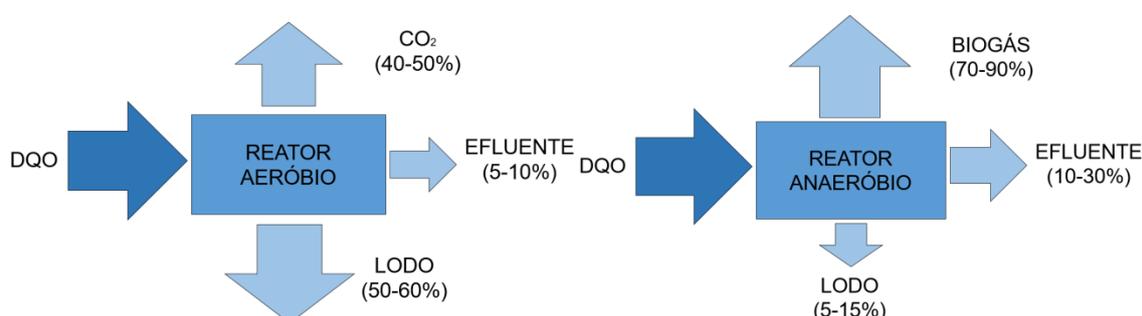
A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica através da ação de microrganismos e tem como produto o biogás, um gás rico em energia, que pode ser uma fonte alternativa de

energia renovável (RAPOSO *et al.*, 2011), além de apresentar diversas vantagens (Quadro 2).

| Vantagens                                      | Desvantagens   |
|--|--|
| Baixa geração de sólidos;                      | Bactérias anaeróbias são sensíveis a diversos compostos;               |
| Pequeno consumo de energia;                    | Partida do processo pode ser demorada, se o lodo não estiver adaptado; |
| Pequenas áreas;                                | Bioquímica e microbiologia do processo são complexas;                  |
| Geração de metano;                             | Produção de maus odores;   |
| Suporta grandes cargas orgânicas;              | Baixa remoção de nitrogênio e fósforo.                                 |
| Pode ser aplicado em pequena ou grande escala. |  |

**Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do processo anaeróbio**  
Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

Essas vantagens ficam ainda mais claras quando o processo anaeróbio é comparado ao processo aeróbio, principalmente no que se refere a geração de metano e a reduzida produção de sólidos. No processo aeróbio a maior parte da matéria orgânica é incorporada a biomassa microbiana, sendo apenas de 40 a 50% do total biodegradado (Figura 3a). Já no processo anaeróbio ocorre a degradação de 70 a 90% da matéria orgânica. Apenas uma pequena parte desta é incorporada a biomassa microbiana (Figura 3b) (CHERNICHARO, 1997).



**Figura 3a e 3b – a) Conversão biológica nos sistemas aeróbios; b) Conversão biológica nos sistemas anaeróbios**

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).

Além disso, o biogás gerado na digestão anaeróbia tem uma elevada percentagem de metano se comparado a outros tratamentos (SITORUS, 2012). O

efluente obtido pode ainda ser utilizado como condicionador de solo, permitindo a recuperação energética e de material (CONVERTI *et al.*, 1999).

Porém o alto teor de matéria orgânica biodegradável dos resíduos faz com que este sistema apresente limitações, como a acidificação rápida no reator e a maior produção de ácidos voláteis, que podem inibir a atividade metanogênica das bactérias (BOUALLAGUI *et al.*, 2004).

Uma alternativa para aumentar o rendimento da digestão anaeróbia destes resíduos é através da adição de um inóculo, que permite o equilíbrio de nutrientes, o efeito sinérgico entre os microrganismos e eleva a produção de biogás. A combinação de RFL com lodos provenientes de reatores pode aumentar significativamente a eficiência da digestão, além de aumentar a alcalinidade e o tamponamento do sistema (BOUALLAGUI *et al.*, 2009).

Para a digestão anaeróbia acontecer, diferentes grupos de bactérias estão envolvidos. Estes grupos seguem uma sequência, onde os produtos gerados em um grupo servirão de substrato para outro, fazendo com que um grupo seja dependente do outro (GERARDI, 2003).

Segundo Chernicharo (1997) as bactérias que atuam nesse processo podem ser divididas em três grupos:

- Fermentativas: quebram, através da hidrólise, os polímeros em monômeros (açúcares, aminoácidos e peptídeos);
- Acetogênicas: geram o hidrogênio que será responsável pela transformação dos produtos gerados pelas bactérias fermentativas em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Metanogênicas: usam os produtos gerados pelas acetogênicas para produzir metano e dióxido de carbono.

As bactérias metanogênicas podem ser divididas em dois grupos: as bactérias acetoclásticas, que geram metano a partir do acetato, e as hidrogenotróficas, que geram metano a partir do hidrogênio (ONUDI, 2013).

#### 3.4.1 Fases da biodigestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é dividida em 4 etapas: Fase de Hidrólise, Fase Acidogênica, Fase Acetogênica e Fase Metanogênica. O processo de digestão

anaeróbia só ocorrerá de maneira eficiente se as taxas de degradação de todas etapas forem iguais (GERARDI, 2003).

A primeira etapa na degradação é a hidrólise. Nesta as partículas complexas, conhecidas como polímeros, serão quebrados, pela ação de enzimas liberadas pelas bactérias fermentativas, em pequenas moléculas, possibilitando a passagem destas pela parede celular das bactérias fermentativas (CHERNICHARO, 1997). Materiais lignocelulósicos podem limitar esta etapa, pois a lignina é de difícil degradação pelos microrganismos anaeróbios (ONUUDI, 2013).

A segunda etapa é a acidogênese, onde os monômeros gerados na etapa anterior são metabolizados por bactérias fermentativas e degradados em compostos ainda mais simples, como ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

A terceira etapa é a acetogênese, nela as bactérias acetogênicas convertem os produtos gerados na etapa anterior em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato (CHERNICHARO, 1997). As pequenas moléculas orgânicas, principalmente os ácidos graxos voláteis, são convertidos em acetato (ONUUDI, 2013).

A última etapa consiste na geração de metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997). Todos os produtos gerados até essa etapa têm que ser convertidos em compostos passíveis de uso, direto ou indireto, das bactérias metanogênicas, pois as substâncias não consumidas por essas bactérias acabam se acumulando no reator (GERARDI, 2003).

Caso haja enxofre presente no reator, pode ainda acontecer uma quinta fase, a sulfetogênese, onde ocorre a redução do sulfato e a formação de sulfetos (CHERNICHARO, 1997).

#### 3.4.2 Parâmetros que interferem na biodigestão

Os produtos gerados durante o processo podem variar de acordo com as bactérias presentes no reator. Portanto as condições operacionais devem ser bem controladas para que as bactérias certas dominem o processo e permitam o desempenho efetivo do reator (GERARDI, 2003).

- Temperatura: A temperatura é o fator físico que mais afeta o crescimento microbiano, esta é uma das responsáveis pela seleção das espécies (CHERNICHARO, 1997). Temperaturas na faixa mesofílica (próximas a

37°C) são consideradas boas para a biodigestão, pois a maior parte dos microrganismos metanogênicos vive nessa faixa (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008);

- Tempo de retenção hidráulico (TRH): O TRH é o período de permanência necessário para que o efluente seja digerido. Quando maior esse tempo, maior será a produção de metano no reator. Sistemas de aquecimento e agitação e adição de inóculo podem auxiliar na redução deste tempo (FUKAYAMA, 2008);
- pH: grande parte das bactérias produtoras de metano apresentam um pH ótimo de produção na faixa entre 7 e 8. Caso o pH esteja fora dessa faixa, a produção pode ser inibida (RAPOSO *et al.*, 2011);
- Alcalinidade: Segundo Raposo *et al.* (2011) a alcalinidade é a capacidade de neutralizar ácidos, e acontece devido a presença de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Esta possui um efeito tampão, que evita que rápidas mudanças afetem o pH. Valores entre 2.500 e 5.000 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> são os mais indicados para garantir o efeito tampão, no entanto valores acima de 1.500 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> de alcalinidade devido aos bicarbonatos já são aceitáveis (ONUDI, 2013);
- Oxigênio: qualquer mínima presença de oxigênio pode prejudicar o processo de degradação, inibindo a biodigestão anaeróbia (GERARDI, 2003).

O reator também tem forte influência sobre a eficiência da digestão (WILLIAN; DAVID, 1999 *apud* BOUALLAGUI, 2004).

O reator *Continuous Stirred Tank Reactor*- CSTR ou reator de mescla completa é de simples funcionamento, e dispõe de um dispositivo para homogeneizar o conteúdo do digestor continuamente. Podem ser alimentados de forma contínua ou semi-contínua, ou seja, recebendo o substrato periodicamente ou continuamente. Neste sistema não há acúmulo de biomassa suspensa, nem recirculação do lodo, fazendo com que o tempo de retenção de sólidos seja o mesmo de retenção hidráulica, e, portanto, ocasionando que estes sejam altos (ONUDI, 2013). O digestor CSTR tem um melhor desempenho se acompanhado de um sistema de

### 3.5 ESTABILIDADE NO REATOR

Para uma eficiente digestão é importante manter os bicarbonatos e evitar os ácidos voláteis (RIPLEY, 1986). Caso a produção de ácidos seja maior que o consumo, o sistema perde sua estabilidade e há a redução do pH, fazendo com que as bactérias metanogênicas inibam suas atividades (RIBAS, 2007). As relações AI:AP e AV/AT possibilitam a análise da estabilidade da digestão.

No método titulométrico desenvolvido por Jenkins *et al.* (1983), a alcalinidade parcial (AP) corresponde a aproximadamente 80% do bicarbonato presente na amostra e a alcalinidade intermediária (AI) corresponde a alcalinidade devido aos ácidos voláteis. Assim, relações com valores abaixo de 0,3 revelam a predominância do bicarbonato e o sucesso na biodegradação (RIPLEY, 1986)

DiLallo e Albertson (1961) sugerem mensurar a alcalinidade devido aos ácidos voláteis (AV) através da titulação da amostra fervida e acidificada. A acidificação da amostra destruirá o bicarbonato, já a fervura removerá os ácidos carbônicos e dióxido de carbono ainda presentes, restando apenas os ácidos voláteis. Se a relação ácidos voláteis/alcalinidade permanecer menor que 0,25, garante-se a capacidade tampão do sistema (WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION, 1998; ENERGIA DA BIOMASSA, 2010 *apud* ONUDI, 2013).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

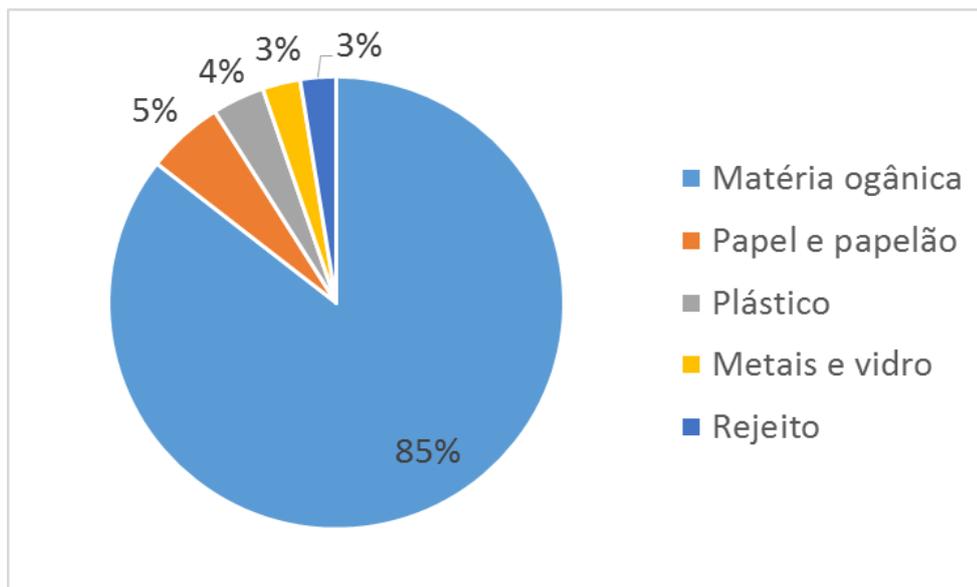
O estudo foi realizado utilizando a fração orgânica dos resíduos sólidos gerados na Central de Abastecimento do Paraná S.A- Unidade de Foz do Iguaçu, localizada na Avenida Juscelino Kubitschek, 1254, no município de Foz do Iguaçu – PR (Figura 4).



**Figura 4 - Vista área da CEASA - Unidade de Foz do Iguaçu**  
Fonte: CEASA (2015).

A unidade conta com uma estrutura de comercialização e distribuição de produtos hortigranjeiros, pescados e outros perecíveis. Está instalada em um terreno de 80.415 m<sup>2</sup>, com uma área construída de 8.005 m<sup>2</sup>. A unidade comercializa 70.551 t/ano de produtos e conta com 37 produtores, 159 boxes de comercialização, 2 peixarias, uma lanchonete, uma caixaria e uma loja de embalagem (CEASA, 2015).

A geração diária de resíduos é de aproximadamente 2.800 kg de resíduos sólidos todos os dias (UEM, 2012). A composição gravimétrica dos resíduos gerados pode ser visualizada na Figura 5.



**Figura 5 - Composição gravimétrica dos resíduos gerados na CEASA – Foz do Iguaçu**  
Fonte: Adaptado de Universidade Estadual de Maringá (2012).

A unidade conta com um programa de coleta seletiva, onde se faz a separação e o acondicionamento do material orgânico e reciclável. A segregação é feita pelos próprios permissionários, e a coleta é realizada pela equipe de limpeza (UEM, 2012).

A fração orgânica dos resíduos sólidos é coletada pela Prefeitura Municipal e destinada ao Aterro Municipal de Foz do Iguaçu. Já o material reciclável é vendido (UEM, 2012).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

### 4.2.1 Coleta e amostragem

A coleta da fração orgânica dos resíduos sólidos foi realizada mensalmente, durante o período de setembro/2014 a agosto/2015, na central de armazenamento temporário de resíduos da CEASA – Unidade de Foz do Iguaçu (Figura 6).



**Figura 6 - Container de armazenamento dos resíduos orgânicos na CEASA**

Para a amostragem foram coletados aproximadamente 4,5 L de cada quadrante do *container*, armazenados em frascos de polietileno e enviados para processamento em laboratório.

A análise da frequência de coleta dos resíduos foi realizada a partir do registro de cada tipo de fruta, legume e vegetal identificado na amostra.

A determinação dos parâmetros físico-químicos foi realizada considerando amostras em triplicata e utilizando os parâmetros e as metodologias apresentadas no Quadro 3.

| <b>Parâmetro</b>                       | <b>Metodologia</b>             |
|--|--------------------------------|
| <b>Potencial hidrogeniônico (pH)</b>   | Kiehl (1985)                   |
| <b>Alcalinidade total (AT)</b>         | Ripley <i>et al.</i> (1986)    |
| <b>Condutividade elétrica (CE)</b>     | APHA (2005)                    |
| <b>Sólidos totais (ST)</b>             | APHA (2005)                    |
| <b>Sólidos totais fixos (SF)</b>       | APHA (2005)                    |
| <b>Sólidos totais voláteis (SV)</b>    | APHA (2005)                    |
| <b>Carbono orgânico total (COT)</b>    | Kiehl (1985)                   |
| <b>Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)</b> | Malavolta <i>et al.</i> (1989) |

**Quadro 3 - Metodologias utilizadas na caracterização**

A análise da variabilidade das características físico-químicas foi baseada na classificação feita por Pimentel Gomes (2000).

#### 4.2.2 Preparação da amostra

Visando preparar as amostras para a caracterização e, ainda, permitir a comparação das características dos RFL ao longo dos 12 meses, foi necessário processar o material para redução do tamanho da partícula.

Tal processo consistiu na fragmentação manual dos resíduos até um diâmetro de aproximadamente 15 mm (Figura 7a). Em seguida os resíduos foram processados, sem adição de água, em liquidificador industrial até um diâmetro aproximado de 2,5 mm (Figura 7b).



**Figura 7a e 7b – a) Resíduos picados manualmente; b) Resíduos liquidificados**

A determinação de pH, AT, CE, ST e SV foi realizada com a amostra natural, ou seja, em base úmida. Já a determinação do COT e NTK foi realizada com base em amostra seca.

O processo de secagem foi realizado a 65° C em estufa com recirculação de ar, por aproximadamente 72 horas ou até peso constante. A amostra seca foi moída com moinho tipo Willey.

### 4.3 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM REGIME SEMI-CONTÍNUO

#### 4.3.1 Inóculo

Consistiu em uma mistura em uma relação volumétrica de 1:0,5:0,5 de efluente de biodigestor suíno, efluente de biodigestor bovino e dejetos bovinos brutos, respectivamente, proveniente das Unidades de demonstração do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás). Este foi armazenado em um reator de aço inoxidável com volume de 100 L e mantido em agitação de 100 RPM e temperatura de 37,5° C. A alimentação era realizada uma vez por semana e utilizava os componentes e as proporções apresentadas no Quadro 4.

| <b>Componente</b>       | <b>%</b> |
|-------------------------|----------|
| <b>Leite em pó</b>      | 25       |
| <b>Proteína de soja</b> | 10       |
| <b>Farinha de milho</b> | 20       |
| <b>Gramma seca</b>      | 25       |
| <b>Óleo vegetal</b>     | 20       |

**Quadro 4 - Componentes e proporção utilizados na alimentação**

#### 4.3.2 Substrato

O substrato utilizado foi composto pelos RFL coletados em uma amostra única no mês de novembro de 2015. A caracterização físico-química foi realizada seguindo os parâmetros e metodologias indicadas no Quadro 3. Os RFL foram processados, como na caracterização, e congelados em pequenas porções dentro de sacos plásticos.

#### 4.3.3 Operação

O processo de biodigestão anaeróbia foi realizado em reator *Continuous Stirred Tank Reactor* – CSTR (B Braun Biotec – Bioestat B), encamisado, com volume operacional de 4 L (Figura 8). O reator foi preenchido com 3 L de inóculo, 1L de

solução salina (0,85% de cloreto de sódio) e 0,5 g SV L<sup>-1</sup>. A agitação foi mantida em 70 rpm e a temperatura em 36°C.

A solução salina tem como objetivo igualar a pressão osmótica dentro e fora das células microbianas, não permitindo que estas sejam danificadas.

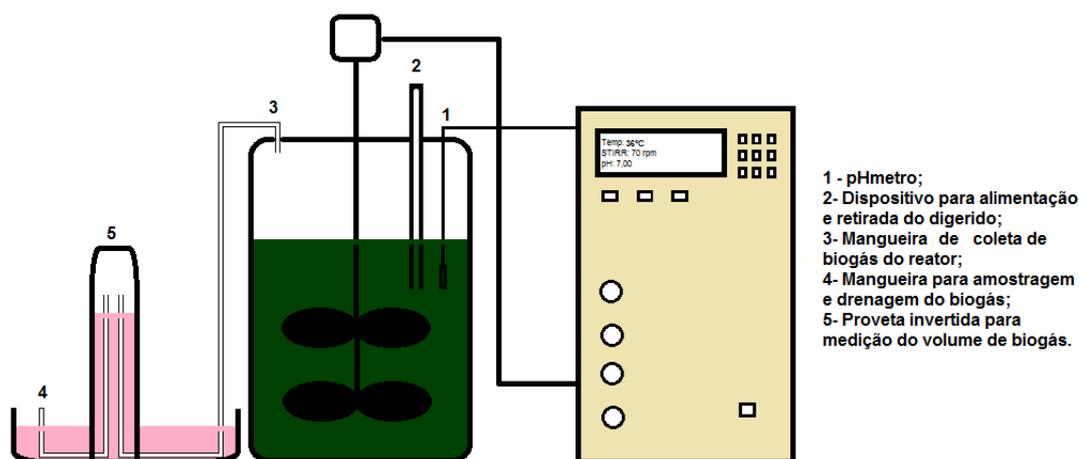


Figura 8 - Reator CSTR

Durante os 8 primeiros dias de operação foram realizados testes de aclimação (TA). A alimentação foi realizada em batelada e foi baseada na produção de biogás, quando esta se reduzia uma nova carga era aplicada. Assim, no 1º e no 4º dia, COV de 0,5 e 1,0 g SV L<sup>-1</sup> reator d<sup>-1</sup>, respectivamente foram aplicadas.

Após o período de TA a alimentação foi mantida em regime semi-contínuo, onde diariamente se alimentou o reator com substrato e removeu-se o digerido, na mesma proporção volumétrica. A COV aplicada no reator foi baseada no estudo feito por Shen *et al.* (2013): na fase de partida foi aplicada COV de 0,5 g SV L<sup>-1</sup> reator d<sup>-1</sup> e TRH de 40 dias. Após a estabilização, a carga foi sendo gradativamente aumentada e o TRH passou para 30 dias. O Quadro 5 contém a COV e o TRH aplicado em cada um dos tratamentos.

Antes de iniciar cada tratamento foi realizada uma “rampa”, onde a cada dia a COV era aumentada até chegar ao valor definido para o tratamento. A rampa levava 5 dias para ser realizada e a COV era aumentada 0,1 g SV L<sup>-1</sup> reator d<sup>-1</sup>.

| Tratamento   | COV (g SV L <sup>-1</sup> reator d <sup>-1</sup> ) | TRH (d) |
|--------------|--|---------|
| Partida      | 0,5  | 40      |
| Tratamento 1 | 0,5  | 30      |
| Tratamento 2 | 1,0  | 30      |
| Tratamento 3 | 1,5  | 30      |
| Tratamento 4 | 2,0  | 30      |

**Quadro 5 - COV e TRH aplicado em cada tratamento**

Para estimar a vazão utilizada em cada TRH foi utilizada a Equação (1).

$$TRH = V.Q^{-1} \quad (1)$$

Em que:

TRH = Tempo de retenção hidráulico (dias);

V = Volume do reator (mL);

Q= Vazão (mL.d<sup>-1</sup>).

A vazão utilizada foi de 100 mL para o TRH de 40 dias e de 133,3 mL para o TRH de 30 dias.

Para alcançar a vazão estimada, era adicionada a COV do tratamento que estava sendo aplicado e completado com água destilada.

Os tratamentos foram trocados baseados na produção de biogás do reator e na estabilidade, assim que estes apresentavam uma estabilização, um novo tratamento era iniciado.

#### 4.3.4 Produção de biogás

Os gases produzidos pelo reator eram armazenados em provetas ligadas por mangueiras ao reator (Figura 8). As provetas encontravam-se invertidas dentro de um recipiente preenchido com solução barreira. O ar foi retirado das provetas para que a solução barreira ocupasse seu interior. Assim que o gás era produzido este era encaminhado a proveta, empurrando a solução barreira para fora. O deslocamento da solução barreira possibilitava a mensuração da produção de biogás. As leituras foram realizadas diariamente.

A solução barreira garantia que o biogás ficasse retido dentro da proveta e foi preparada de acordo com a DIN 38414(1985). A solução consistiu na adição de 200 g de sulfato de sódio decahidratado ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) em uma solução de 30 mL de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) completado para 1 L de água destilada. Após foram adicionadas 3 gotas de solução de alaranjado de metila.

Para a normalização dos dados foi feita diariamente a leitura da pressão e da temperatura ambiente. A normalização do volume de biogás gerado foi realizada a partir da Equação (2).

$$V_0 = V \cdot (P_L - P_W) \cdot T_0 / (P_0 \cdot T) \quad (2)$$

Em que:

$V_0$  = volume de biogás padronizado,  $L_N$ ;

$V$  = volume de biogás registrado no eudiômetro, L;

$P_L$  = pressão atmosférica no momento do registro, mbar;

$P_W$  = pressão de vapor da água, mbar;

$T_0$  = temperatura padronizada,  $T_0 = 273 \text{ K}$ ;

$P_0$  = pressão padronizada,  $P_0 = 1.013 \text{ mbar}$ ;

$T$  = temperatura ambiente, K.

O cálculo da pressão de vapor de água pode ser realizado a partir da Equação (3).

$$P_W = 10^{8,1962 - (1,730,63/T - 39,724)} \quad (3)$$

Em que:

$P_W$  = pressão de vapor, mbar;

$T$  = temperatura ambiente, K.

O teor de metano no biogás foi estimado através de cromatografia gasosa.

#### 4.3.5 Estabilidade do reator

O monitoramento da estabilidade foi realizado de duas a três vezes por semana, utilizando o efluente retirado antes da alimentação, por meio do pH, da

alcalinidade, da acidez e das relações AI:AP e AV/AT. O Quadro 6 traz as metodologias adotadas para cada parâmetro monitorado.

| Parâmetro                       | Metodologia  |
|---------------------------------|--|
| pH                              | Kiehl (1985)   |
| Alcalinidade total (AT)         | Ripley <i>et al.</i> (1986)                                |
| Alcalinidade parcial (AP)       | Ripley <i>et al.</i> (1989) e Jenkins <i>et al.</i> (1983) |
| Alcalinidade intermediária (AI) | Ripley <i>et al.</i> (1989) e Jenkins <i>et al.</i> (1983) |
| Acidez (AV)                     | Dillalo e Albertson (1961)                                 |

**Quadro 6 - Parâmetros e metodologias utilizadas no monitoramento da estabilidade**

#### 4.3.5.1 AP, AI e AT

A AP foi determinada considerando o volume gasto de solução ácida (ácido sulfúrico 0,05 M) para alcançar o pH de 5,75 (Equação 4) e a AI considerou o volume gasto do pH 5,75 até o pH 4,3 (Equação 5).

$$AP = [(V1 \times C) / VA] \times 100.000 \quad (4)$$

$$AI = [(V2 \times C) / VA] \times 100.000 \quad (5)$$

Em que:

V1= volume de ácido gasto até o pH de 5,75 (mL);

V2= volume de ácido gasto do pH de 5,75 até 4,3 (mL);

C= concentração do ácido (M);

VA= volume da amostra (mL).

A AT foi mensurada através da soma da alcalinidade parcial com a intermediária, ou ainda, do volume de solução ácida gasto até o pH 4,3.

#### 4.3.5.2 AV

Foi determinada pela titulação da amostra com hidróxido de sódio 0,05 N do pH 4 até o 7. Antes de titular foi necessário ferver, por pelo menos 3 minutos, a amostra acidificada. A AV pode ser estimada pela equação (6).

$$\text{Acidez} = (V3 \times 2.500) / VA \quad (6)$$

Em que:

V3= Volume gasto de Hidróxido de sódio 0,05 N (mL);

VA= volume da amostra (mL).

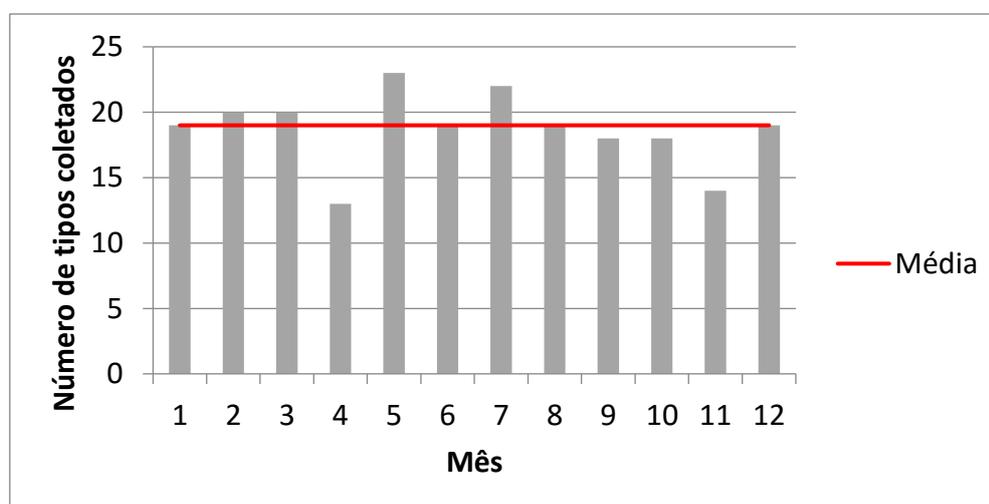


nas coletas, por outro lado, tipos como o coco, apresentaram baixas frequências (Quadro 8).

| Frequência | Tipos  |
|------------|--|
| 0-20%      | Almeirão, batata-salsa, coco, couve-flor, hortelã, mandioca, nectarina, pimenta, salsa, salsão, abacate, batata, caqui, goiaba, jiló, maracujá, pêssigo, rúcula. |
| 20-40%     | Agrião, bergamota, beterraba, brócolis, morango, quiabo, uva, vagem, acelga, alface, maçã, melão.  |
| 40-60%     | Banana, batata-doce, manga, abacaxi, abóbora, ameixa, chuchu.  |
| 60-80%     | Cebola, mamão, melancia, pepino, abobrinha, berinjela, cenoura, limão, pimentão, repolho.  |
| 80-100%    | Couve, laranja, tomate.  |

**Quadro 8 - Frequência de geração dos tipos de RFL**

Também foi variável o número de resíduos coletados em cada mês. Em média foram encontrados 19 tipos (Figura 9).



**Figura 9 - Número de resíduos encontrados em cada mês**

Os resultados médios mensais de cada parâmetro avaliado na caracterização físico-química podem ser visualizados no Quadro 9.

| Parâmetro                 | Meses |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| pH                        | 4,3   | 4,2  | 4,3  | 4,2  | 4,1  | 4,1  | 4,5  | 3,9  | 4,2  | 4,3  | 4,0  | 4,0  |
| CE (mS.cm <sup>-1</sup> ) | 1,7   | 1,6  | 2,2  | 2,0  | 1,9  | 2,2  | 0,9  | 1,1  | 2,8  | 1,3  | 1,4  | 1,4  |
| ST (% bu)                 | 9,2   | 11,9 | 8,1  | 7,9  | 9,5  | 8,2  | 9,7  | 7,2  | 7,6  | 8,7  | 13,8 | 11,6 |
| SV (% bs)                 | 91,3  | 93,3 | 89,9 | 90,3 | 92,7 | 92,3 | 93,3 | 90,2 | 92,6 | 91,1 | 93,5 | 93,1 |
| SF (% bs)                 | 8,7   | 6,7  | 10,1 | 9,7  | 7,3  | 7,7  | 6,7  | 9,8  | 7,4  | 8,9  | 6,6  | 6,9  |
| COT (% bs)                | 50,7  | 51,8 | 49,9 | 50,2 | 51,5 | 51,3 | 51,8 | 50,1 | 51,5 | 50,6 | 51,9 | 51,7 |
| NTK (% bs)                | 2,1   | 1,4  | 2,5  | 2,1  | 2,0  | 3,3  | 2,3  | 2,7  | 1,8  | 1,8  | 1,4  | 1,5  |
| C/N                       | 24    | 37   | 20   | 24   | 26   | 16   | 23   | 19   | 29   | 29   | 36   | 35   |

bs= base seca; bu= base úmida.

#### Quadro 9 - Resultados médios mensais da caracterização físico-química

- pH e AT

O pH (Figura 10) apresentou caráter ácido e baixa variabilidade ao longo dos 12 meses (coeficiente de variação (CV) de 3,2%), com média de 4,2.

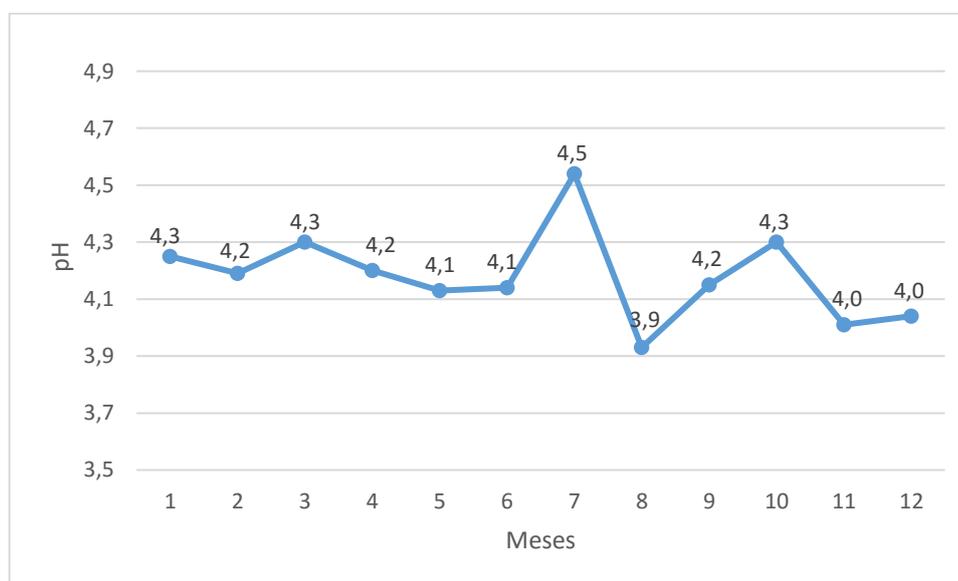


Figura 10 - Variação do pH ao longo dos meses

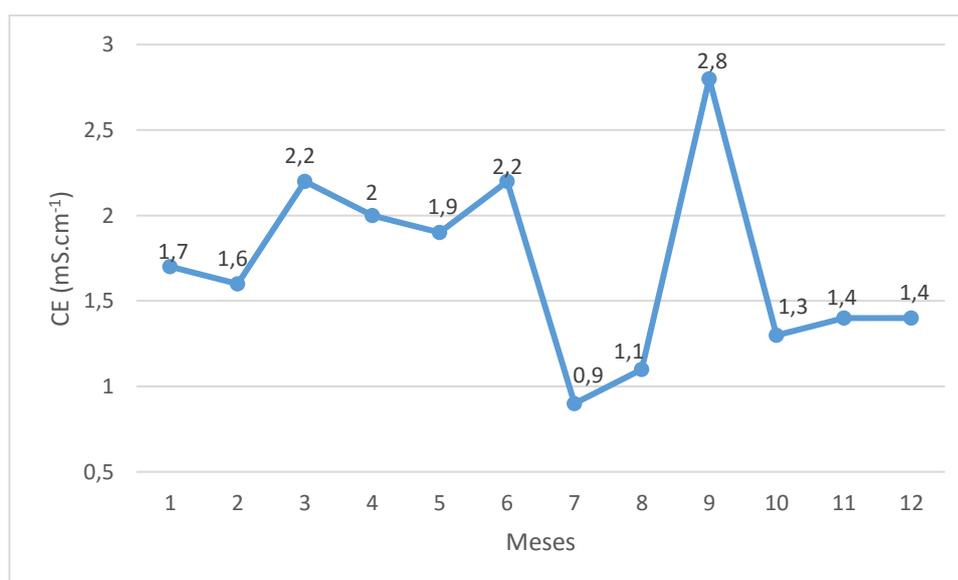
Valores semelhantes foram encontrados por Bouallagui *et al.* (2003) e Cabbai *et al.* (2013). No entanto, os valores ideais para a biodigestão anaeróbia situam-se próximos a neutralidade, na faixa de 7 a 8 (RAPOSO *et al.*, 2011).

Para evitar mudanças bruscas no reator o pH do substrato pode ser neutralizado antes da alimentação.

Para garantir o efeito tampão e minimizar alterações bruscas de pH durante a biodegradação, sugere-se que a AT seja de pelo menos  $1.500 \text{ mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$ , porém, esta foi menor que  $20 \text{ mg CaCO}_3\text{L}^{-1}$  em todo o período de caracterização.

- CE

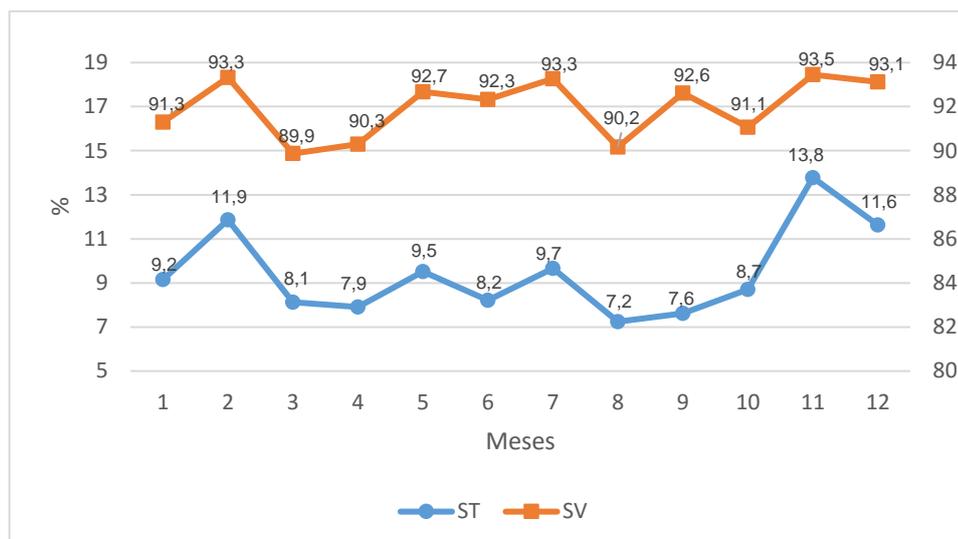
Com relação à CE (Figura 11) observou-se alta variação (CV de 31,5%), demonstrando a heterogeneidade dos resíduos. Atualmente existe uma carência de trabalhos que exploram valores ideais deste parâmetro para a biodigestão anaeróbia.



**Figura 11 - CE ao longo dos meses**

- ST e SV

O teor de ST (Figura 12) apresentou alta dispersão (CV de 21,1%) e média de 9,5%. Valores próximos (10% ST e 90% umidade) foram encontrados por Garcia-Peña *et al.* (2011) ao caracterizar RFL do maior mercado do México.



**Figura 12 - Comportamento dos ST e SV ao longo dos meses**

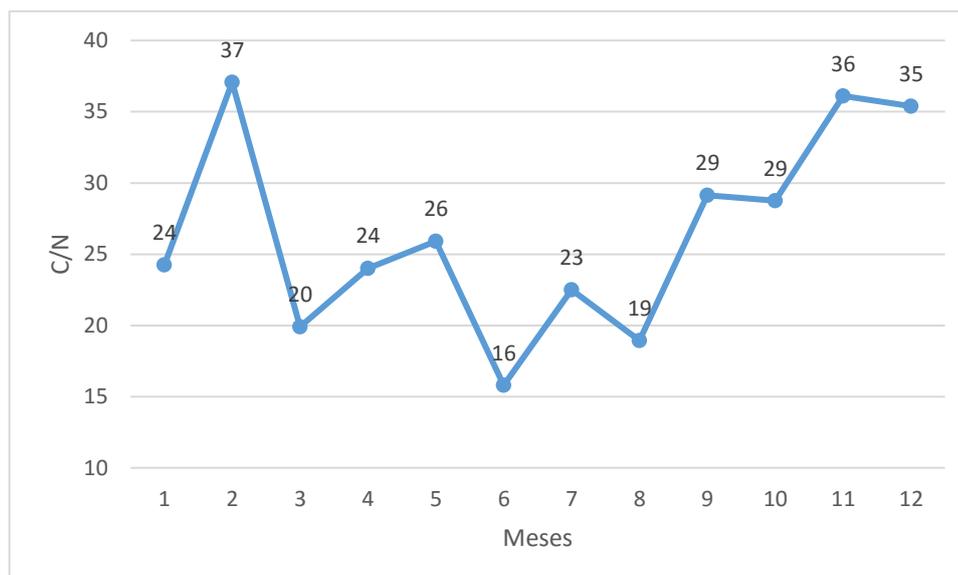
A norma VDI 4630 (2006) recomenda para a biodigestão anaeróbia um teor de ST de até 10%, como pode ser observado na maior parte dos meses, exceto em fevereiro, novembro e dezembro.

Segundo Wang *et al.* (2014) uma característica desses resíduos é o alto teor de SV, que pode ser comprovada durante este estudo, apresentando valores próximos aos 90% (Figura 12) e baixa variabilidade (CV=1,46%).

Boullagui *et al.* (2004) encontraram um teor de SV de 87% nos resíduos orgânicos de uma rede de mercados na Tunísia.

- Relação C/N

A relação C/N (Figura 13) apresentou alta variabilidade (CV=26,4%) e média de 26, valor acima do obtido por Wang *et al.* (2014), que encontrou uma relação C/N de 17 para RFL da cantina da Universidade de Beijing, na China.



**Figura 13 - Relação C/N ao longo dos meses**

Para processos biológicos os valores recomendados são entre 20 e 30. Não se recomenda que esta relação exceda o valor de 35, como ocorreu nos meses fevereiro e novembro, pois demonstra a falta de nitrogênio nos resíduos, responsável pela geração de enzimas que assimilam o carbono nas bactérias. Também não são recomendados valores abaixo de 20, como nos meses de junho e agosto, pois a grande quantidade de carbono induzirá uma grande geração de bactérias (ONUDI, 2013).

## 5.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

As características físico-químicas do inóculo e do substrato utilizado na biodigestão podem ser visualizadas no Quadro 10. Os RFL que compuseram o substrato e suas quantidades na amostra podem ser observados no Quadro 11.

| Parâmetro                                  | Inóculo | Substrato |
|--|---------|-----------|
| pH   | 8,3     | 3,9       |
| CE (mS.cm <sup>-1</sup> )                  | N.I     | 1,7       |
| AT (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> ) | 10.000  | <20       |
| ST (%)                                     | 5,8     | 12,91     |
| SF (%)                                     | 2,2     | 6,32      |
| SV (%)                                     | 97,8    | 93,68     |
| C/N  | 20,4    | 22,5      |

**Quadro 10 - Características físico-químicas do inóculo e do substrato**

| Tipo        | Peso (g) | %<br>Composição | Tipo      | Peso (g) | %<br>Composição |
|-------------|----------|-----------------|-----------|----------|-----------------|
| Melancia    | 1470     | 6,5             | Repolho   | 550      | 2,4             |
| Mamão       | 1353     | 6               | Pepino    | 544      | 2,4             |
| Maçã        | 1323     | 5,9             | Pêssego   | 498      | 2,2             |
| Laranja     | 1233     | 5,5             | Manga     | 463      | 2,1             |
| Jaca        | 1204     | 5,4             | Abóbora   | 441      | 2               |
| Goiaba      | 1125     | 5               | Ameixa    | 435      | 1,9             |
| Acelga      | 1111     | 4,9             | Brócolis  | 356      | 1,6             |
| Batata doce | 1009     | 4,5             | Couve     | 345      | 1,5             |
| Abóbora     | 976      | 4,3             | Beterraba | 317      | 1,4             |
| Berinjela   | 964      | 4,3             | Alface    | 289      | 1,3             |
| Abacaxi     | 944      | 4,2             | Uva       | 282      | 1,3             |
| Chuchu      | 871      | 3,9             | Quiabo    | 255      | 1,1             |
| Couve-flor  | 735      | 3,3             | Lichia    | 202      | 0,9             |
| Abobrinha   | 662      | 2,9             | Banana    | 197      | 0,9             |
| Limão       | 656      | 2,9             | Kiwi      | 192      | 0,9             |
| Tomate      | 643      | 2,9             | Morango   | 179      | 0,8             |
| Pimentão    | 633      | 2,8             |           |          |                 |

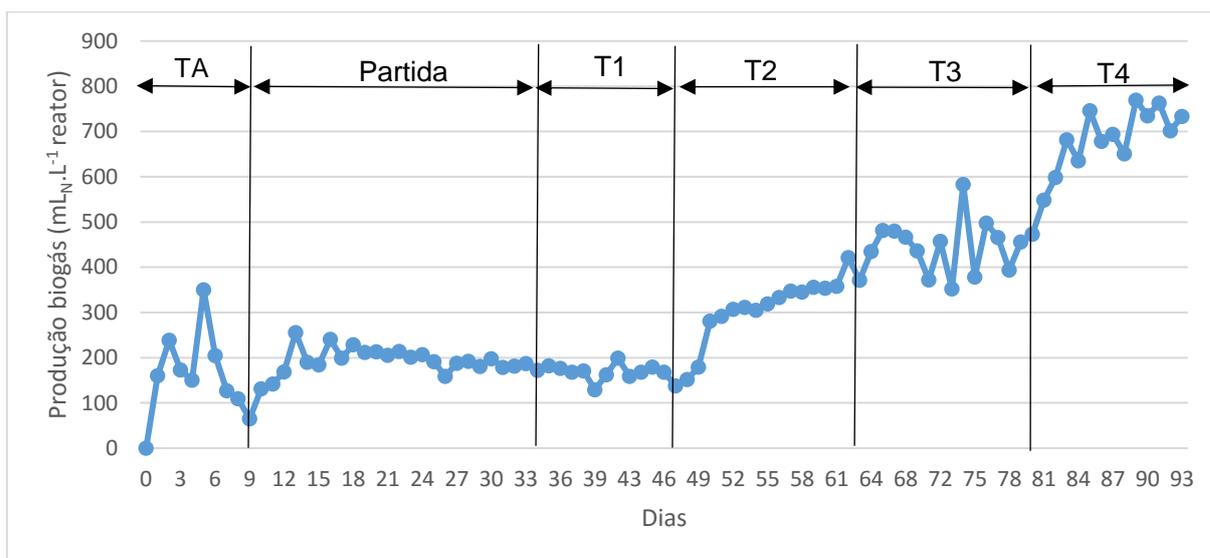
**Quadro 11 - Composição da amostra utilizada como substrato**

### 5.2.1 Produção de biogás

Durante os testes, a alimentação ocorreu em batelada, fazendo com que a produção de biogás fosse, naturalmente, irregular. Já durante a partida, a produção

volumétrica diária foi baixa nos 4 primeiros dias (Figura 14), mas após este período apresentou estabilidade, com produção diária média de  $198 \text{ mL}_N\text{L}^{-1}$  reator.

No tratamento 1, a produção volumétrica média caiu, provavelmente causada pela redução do TRH, de 40 para 30 dias. Com o aumento das COV nos tratamentos 2, 3 e 4 observou-se também aumento nas produções médias de biogás para 330, 445 e  $711 \text{ mL}_N\text{L}^{-1}$  reator, respectivamente.



**Figura 14 - Produção volumétrica diária de biogás**

A produção na partida e nos tratamentos 1, 2 e 4 apresentou baixa variabilidade, porém esta foi média no tratamento 3 (Quadro 12). O tratamento 3 também apresentou a menor produção específica diária.

| Tratamento | Produção volumétrica diária ( $\text{mL}_N\text{L}^{-1}$ reator) | Produção específica diária ( $\text{mL}_N\text{g}^{-1}$ SV) | CV (%) |
|------------|--|---|--------|
| TA         | $189 \pm 308,0$  | -   | 162,6  |
| Partida    | $198 \pm 18,7$   | 99  | 9,5    |
| T1         | $170 \pm 16,3$   | 85  | 9,6    |
| T2         | $330 \pm 23,7$   | 82  | 7,2    |
| T3         | $445 \pm 64,2$   | 74  | 14,4   |
| T4         | $711 \pm 46,2$   | 89  | 6,5    |

**Quadro 12 - Produção de biogás nos diferentes tratamentos**

A maior produção volumétrica média diária foi observada no tratamento 4, provavelmente causado pela maior carga orgânica aplicada. Porém, foi a partida que apresentou a maior produção específica média, demonstrando que a geração de biogás não aumenta proporcionalmente à medida que se aumenta a COV.

A produção de biogás foi baixa se comparada a outros estudos que também utilizaram RFL como substrato, como o de Shen *et al.* (2013), que alcançou um volume diário de 437 mL.L<sup>-1</sup> reator com uma COV de 0,5 g SV L<sup>-1</sup> e TRH de 40 dias, enquanto nesse estudo o volume alcançado nessas condições foi de 198 mL<sub>N</sub> L<sup>-1</sup> reator d<sup>-1</sup>.

O teor de metano aumentou ao longo dos tratamentos (Quadro 13), alcançando seu ápice no tratamento 4, com 66%.

| Tratamento | Metano (%) | CV (%) |
|------------|------------|--------|
| Partida    | 37         | -      |
| T1         | 42         | 8      |
| T2         | 61         | 9      |
| T3         | 57         | 17     |
| T4         | 66         | 2      |

Quadro 13 - Teor de metano nos tratamentos

### 5.2.2 Estabilidade do reator

- Alcalinidade

O processo iniciou com alcalinidade mais elevada, característica do próprio inóculo. A alimentação em batelada permitiu sua recuperação durante os testes. No entanto, a partir da partida observou-se declínio, com leve estabilização no tratamento 4 (Figura 15).

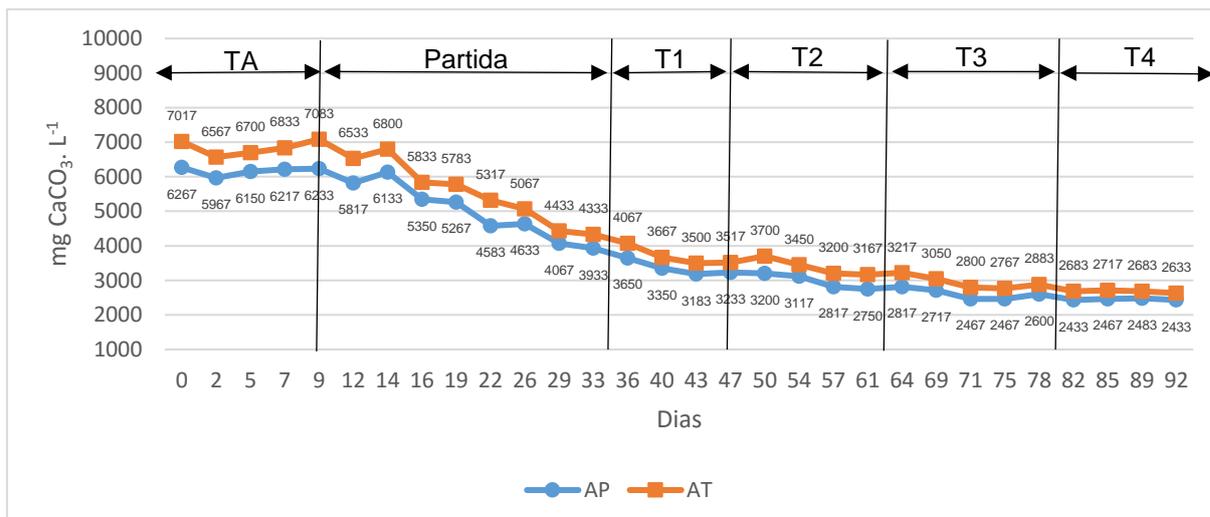


Figura 15 - AT e AP ao longo dos tratamentos

Essa redução pode ter sido influenciada pela retirada diária de efluente do reator e adição de um substrato pobre em alcalinidade.

Em todo o período de monitoramento a alcalinidade não chegou a ultrapassar o valor mínimo recomendado para a digestão anaeróbia, de 1.500 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>.

- Al:AP

O valor médio da relação Al:AP (Figura 16) subiu durante a partida e o tratamento 2 (Quadro 14) revelando aumento da instabilidade do sistema durante esses tratamentos.

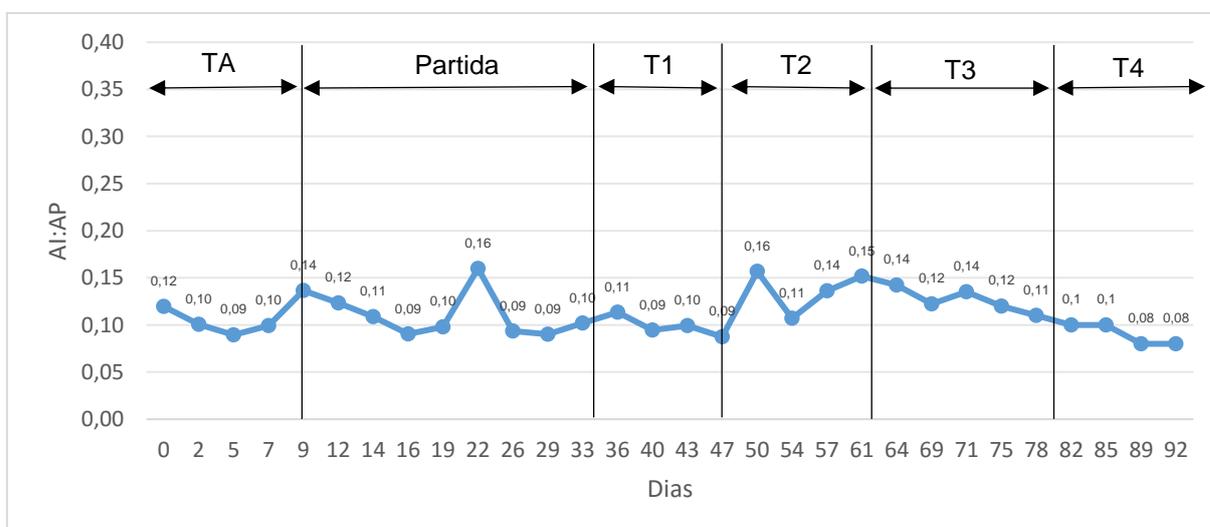


Figura 16 - Relação Al:AP ao longo dos tratamentos

Esta instabilidade pode ter sido causada pela introdução do regime semi-contínuo de alimentação durante a partida e pela duplicação da COV aplicada no tratamento 2, que passou de 0,5 para 1,0 g SVL<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>. Com o sistema já adaptado a essas mudanças, a relação AI:AP voltou a cair a partir do tratamento 3.

Mesmo com o aumento da instabilidade, a relação se manteve abaixo de 0,3 em todo o monitoramento, demonstrando que a biodigestão ocorreu de forma estável. A partir desses resultados, pode-se afirmar que o sucesso da biodegradação anaeróbia de RFL neste estudo ocorreu em valores menores que 0,16 para esta relação.

- Acidez e relação AV/AT

A acidez aumentou no início da partida, voltando à estabilidade após o 16º dia. Esta subiu novamente ao final dos tratamentos 1 e 2 e a partir do tratamento 3 caiu constantemente (Figura 17).

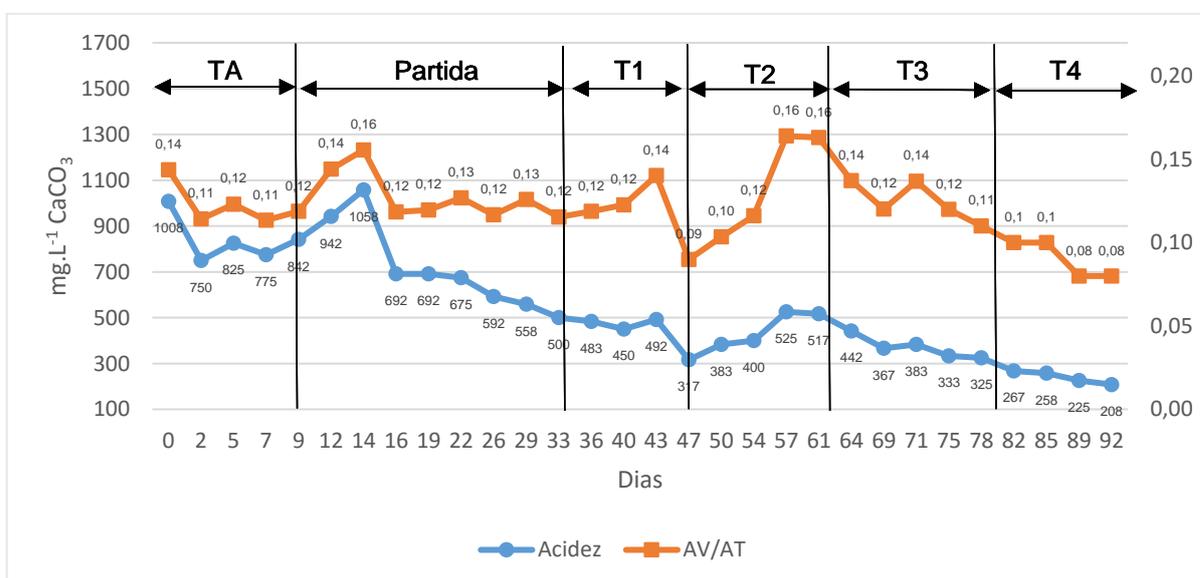


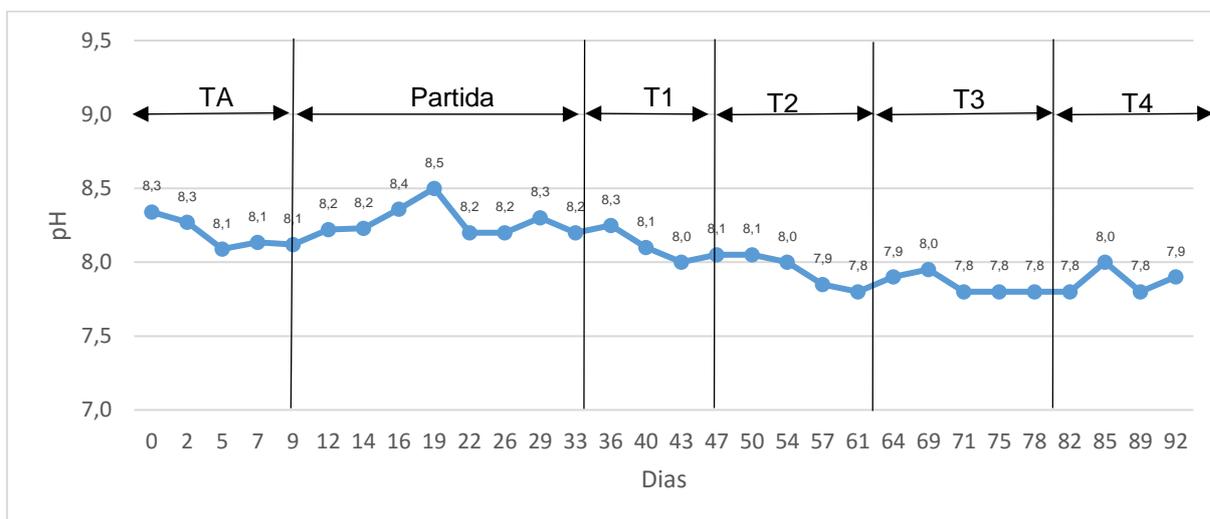
Figura 17 - Relação AV/AT e acidez ao longo dos tratamentos

De acordo com Castro e Silva (2014) o consumo de acidez pode revelar que a biodegradação está ocorrendo de forma efetiva, pois as bactérias metanogênicas consomem a mesma para a geração de metano.

A relação AV/AT foi fortemente influenciada pela acidez presente no reator (Figura 17). Esta se manteve abaixo de 0,25 durante todo o estudo revelando a estabilidade do sistema (ONUUDI, 2013). Pode-se considerar que a degradação anaeróbia estável de RFL neste caso foi alcançada em valores de até 0,16.

- pH

O pH (Figura 18) tendeu ao decaimento durante quase todo o processo (Quadro 14), provavelmente devido a adição diária do substrato ácido. Este demonstrou que o sistema tinha boa capacidade tampão, pois durante os picos de acidez não chegou a ser reduzido.



**Figura 18–pH ao longo dos tratamentos**

O pH ficou acima do recomendado por Raposo (2011) na maior parte do experimento, o que não parece ter afetado a biodigestão anaeróbia. Em nenhum momento ultrapassou o valor mínimo recomendado.

| Tratamento   | pH  | AT<br>(mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> ) | Al:AP | Acidez<br>(mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> ) | AV/AT |
|--------------|-----|---|-------|---|-------|
| TA           | 8,2 | 6.779   | 0,10  | 840   | 0,12  |
| Partida      | 8,3 | 5.687   | 0,11  | 728   | 0,13  |
| Tratamento 1 | 8,1 | 3.690   | 0,11  | 425   | 0,12  |
| Tratamento 2 | 7,9 | 3.258   | 0,13  | 471   | 0,15  |
| Tratamento 3 | 7,8 | 2.875   | 0,12  | 352   | 0,12  |
| Tratamento 4 | 7,9 | 2.454   | 0,09  | 240   | 0,09  |

**Quadro 14 - Valores médios de cada parâmetro avaliado no monitoramento da estabilidade**

O tratamento 2 não se adaptou ao regime aplicado, apresentando aumento na relação Al:AP, na acidez e na relação AV/AT.

Todos os parâmetros avaliados na estabilidade apresentaram valores dentro do recomendado durante todos os tratamentos, podendo-se considerar que a biodigestão ocorreu de maneira estável.

## 6 CONCLUSÃO

Durante a caracterização foi possível observar a variação na composição dos resíduos gerados.

O pH, AT e SV apresentaram baixa variação durante a caracterização, revelando que os resíduos apresentam caráter ácido, baixa alcalinidade e elevado teor de SV. Já os ST, CE e relação C/N tiveram uma alta variação. Em 75% dos meses o teor de ST e a relação C/N dos RFL apresentaram valores ideais para a biodigestão anaeróbia. Porém, o pH e AT demonstraram ser abaixo do recomendado. Assim, para a biodegradação anaeróbia dos RFL faz-se necessária a adição um inóculo capaz de equilibrar o pH e garantir nível adequado de alcalinidade para proporcionar efetiva biodegradação.

Os RFL demonstraram um aumento da produção média volumétrica de biogás com o aumento da COV, chegando a atingir produção de 711 mL<sub>N</sub>.L<sup>-1</sup> reator com carga de 2,0 g SV.L<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>.

Durante o monitoramento houve o aumento da instabilidade do sistema, mas esta permaneceu dentro dos limites recomendados. A medida que a COV foi aumentada a AT, o pH e a acidez apresentaram tendência ao decaimento. O reator demonstrou-se estável durante todos os tratamentos, sendo assim, novos tratamentos ainda poderiam ser aplicados antes do colapso do sistema. Pode-se concluir que neste estudo a biodegradação anaeróbia ocorreu de maneira estável com relações AI:AP e AV/AT menores que 0,16.

Recomenda-se que em trabalhos futuros maiores cargas orgânicas e diferentes TRH sejam testados para se conhecer o limite do reator e a produção de biogás, como também seja analisada a potencialidade do digerido como biofertilizante.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2014.

ABRELPE – Associação Brasileira de empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais PLASTIVIDA. Recuperação energética - **Resíduos sólidos urbanos**. 2012. Disponível em: <[http://www.abrelpe.org.br/\\_download/informativo\\_recuperacao\\_energetica.pdf](http://www.abrelpe.org.br/_download/informativo_recuperacao_energetica.pdf)> Acesso em: Abril, 2016.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: American Water Works Association, 2005. 1368 p.

BARCELOS, B.R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. Brasília: Universidade de Brasília, 2009.

BOUALLAGUI, H.; CHEIKH, R.B.; MAROUANI, L; HAMDIA, M. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. **Bioresource Technology**, 2003.

BOUALLAGUI, H.; LAHDHEB, H.; BEN ROMDAN, E.; RACHDI, B; HAMDIA, M. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. **Journal of Environmental Management**, 2009.

BOUALLAGUI, H.; TORRIJOS, M.; GODONC, J.J.; MOLETTA, R.; BEN CHEIKH, R.; TOUHAMI, Y.; DELGENES, J.P; HAMDIA, M. Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance. **Biochemical Engineering Journal**, 2004.

BOUALLAGUI, H.; TOUHAMI, Y.; BEN CHEIKH, R.; HAMDIA, M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. **Process Biochemistry**, 2004.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos**.

CABBAL, V.;BALLICO, M.; ANEGGI, E.; GOI, D.BMP testsofsourcelected OFMSW toevaluateanaerobiccodigestionwithsewagesludge. **Waste Management**, 2013.

CAMPOS, H.K.T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenhariasanitária e ambiental**, 2012.

CASTRO e SILVA, P. **Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como unidade de tratamento para efluente de suinocultura**. Universidade Federal de Lavras, 2014.

CEASA - CENTRAIS DE ABASTECIMENTO DO PARANÁ. Institucional – Histórico. Disponível em: <<http://www.ceasa.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1>>. Acesso em: Agosto, 2015.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios**. 5 v. Belo Horizonte: UniversidadeFederal de Minas Gerais, 1997.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. FichasTécnicas: compostourbano. Disponívelem: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/10/composto-urbano>>. Acessoem: Maio, 2016.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM.**Review 2013**.

CONVERTI, A; DEL BORGHI, A; ZILLI, M.; ARNI, S.; DEL BORGHI, M. Anaerobicdigestionofthevegetablefractionof municipal refuses: mesophilic versus thermophilicconditions. **BioprocessEngineering**, 1999.

CUNHA, A.R.A.A. Dimensões estratégicas e dilemas das Centrais de Abastecimento no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, 2006.

DEUBLEIN D.; STEINHAUSER, A. **BiogasfromWasteandRenewableResources**. WILEY-VCH VerlagGmbH&Co., 2008.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN 38414**: Determination of the amenability to anaerobic digestion: Sludge and Sediments (group S). Berlin, 1985.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O.E.Volatileacidsbydirecttitration. **Journal WPCF**, 1961.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS.** Rio de Janeiro: MINISTÉRIO DE MINHAS E ENERGIA, 2008. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf)>. Acesso em: Maio, 2016.

GARCIA, G. Brasil enfrenta pior crise energética da história. Globo, 2015. Disponível em: <<http://noblato.globo.com/geral/noticia/2015/01/brasil-enfrenta-pior-crise-energetica-da-historia.html>>. Acesso em Junho, 2016.

FUKAYAMA, E.H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante.** Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2008.

GARCIA-PEÑA, E.I.; PARAMESWARAN, P.; KANG D.W.; CANUL-CHAN, M.; KRAJMALNIK-BROWN, R. Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology. **Bioresource Technology**, 2011.

GERARDI, M.H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

HIDAKA, T.; WANG, F.; TSUMORI, J. Comparative evaluation of anaerobic digestion for sewage sludge and various organic wastes with simple modeling. **Waste Management**, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Caderno diagnóstico - resíduos sólidos urbanos.** Brasília: IPEA, 2011. 87 p. Disponível em: <[http://cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/01\\_CADDIAG\\_Re\\_Sol\\_Urbanos.pdf](http://cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/01_CADDIAG_Re_Sol_Urbanos.pdf)>. Acesso em: Junho, 2016.

JENKINS, S.R.; MORGAN, J.M.; SAWYER, C.L. Measuring anaerobic sludge digestion and growth by a simple alkalimetric titration. **Journal WPCF**, 1983.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos.** 1ª edição. São Paulo: Editora CERES, 1985.

LEITE, V.D.; SOUSA, J.T.; PRASAD, S.; LOPES, W.S.; ATHAYDE JÚNIOR, J.B.; DANTAS, A.M.M. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e

feiras livres em reator anaeróbio de batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2003.

LIU, X.; WANG W.; SHI, Y.; ZHENG, L.; GAO, X; QIAO, W.;ZHOU, Y. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: Effect of organic loading rate. **Waste Management**: 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, 2012.

ONUDI - OBSERVATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE. **Programa de capacitação em energias renováveis: O biogás**. 2013.

PERIM, J.M.; ALMEIDA, T.L. Diagnóstico de Resíduos Sólidos da CEASA – JAÚ. Anais – 5º Simpósio de Tecnologia em Meio Ambiente e Recursos Hídricos – FATEC, 2013.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000.

RAPOSO F., 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 Review**, 2011.

RIBAS, M.M.F.; MORAES, E.M.; FORESTI, E. Avaliação da acurácia de diversos métodos para determinação de ácidos graxos voláteis e alcalinidade a bicarbonato para monitoramento de reatores anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2007.

RIPLEY, L.E; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal WPCF**, 1986.

SITORUS, B.; SUKANDAR; PANJAITAN, S.D. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit-vegetable wastes. International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, 2012.

SHEN, F.; YUAN, H; PANG, Y; CHEN, S.; ZHU, B.; ZOU, D.; LIU, Y.; MA, J; YU, L; LI, X. Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase. **Bioresource Technology**, 2013.

TANABE, C.S.; CORTEZ, L.A.B. Perspectivas da cadeia do frio para frutas e hortaliças no Brasil. Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, 2004.

UEM - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ. **Plano de gestão integrada de resíduos da unidade da Ceasa de Foz do Iguaçu.** Foz do Iguaçu, 2012.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4630:** Fermentation of organic materials Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf, 2006.

WANG, L.; SHEN, F.; Yuan, H.; ZOU, D.; LIU, Y.; ZHU, B.; LI, X. aa: Lab-scale and pilot-scale studies. **Waste Management**, 2014.