

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ**  
**CAMPUS DE CASCAVEL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE CAMA DE AVIÁRIO COM RECIRCULAÇÃO DE  
DIGESTATO**

**MICHAEL STEINHORST ALCANTARA**

**CASCAVEL – Paraná – Brasil**

**Fevereiro - 2016**

**MICHAEL STEINHORST ALCANTARA**

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE CAMA DE AVIÁRIO COM RECIRCULAÇÃO DE  
DIGESTATO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Simone Damasceno Gomes

**CASCAVEL – Paraná - Brasil**

**Fevereiro – 2016**

1 DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO (CIP)

A319b

Alcantara, Michael Steinhorst

Biodigestão anaeróbia de cama de aviário com recirculação de digestato. Michael Steinhorst Alcantara. Cascavel, 2016.

65 p.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Hermínia Ferreira Tavares

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Damasceno Gomes

Revisão de português, inglês e normas: Ana Maria Martins Alves Vasconcelos

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2016

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

1. Biogás. 2. Processo – Controle estatístico. 3. Processo – Índice de capacidade. 4. Índice de viabilidade energética operacional. 5. Reutilização de digestato. I. Tavares, Maria Hermínia Ferreira. II. Gomes, Simone Damasceno. III. Vasconcelos, Ana Maria Martins Alves, Rev. IV. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. V. Título.

CDD 21.ed. 665.776  
CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9<sup>a</sup>/965

**MICHAEL STEINHORST ALCANTARA**

**"BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE CAMA DE AVIÁRIO COM RECIRCULAÇÃO DO DIGESTATO"**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação "*Stricto Sensu*" em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:



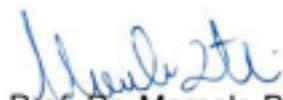
Orientadora: Prof.ª Dra. Maria Herminia Ferreira Tavares

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Cascavel



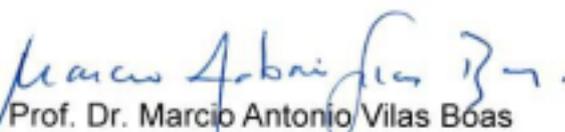
Prof. Dr. Eduardo Eyng

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/ Medianeira



Prof. Dr. Marcelo Bortoli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/ Francisco Beltrão



Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Cascavel



Prof.ª Dra. Luciana Pagliosa Carvalho Guedes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Cascavel

## **BIOGRAFIA RESUMIDA**

Brasileiro, nascido em Campo Grande – MS, 29 anos. Técnico em Eletrônica (2007) pelo Centro Estadual de Educação Profissional (CEEP) de Cascavel (PR). Graduado (2009) em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Mestre (2012) e doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UNIOESTE.

## DEDICATÓRIA

A Deus, pela vida.

À minha mãe, Milda Catarina Steinhorst, que me apoiou de todas as formas em minha formação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo.

Agradeço com muito carinho à minha mãe que me apoiou de maneira especial ao ter contribuído com o desenvolvimento do projeto em sua propriedade e por ter acreditado junto comigo no processo de biodigestão anaeróbia, investindo na construção dos biodigestores com recurso próprio.

Ao amor demonstrado por minha família em todo tempo que fiquei determinado para o doutorado: minha mãe, Milda Catarina Steinhorst, minha avó, Erna Pantle Steinhorst, minha irmã, Greyce Kelly Steinhorst Alcantara e minha namorada, Camila Daiane Cancelier.

À Professora Doutora Maria Hermínia Ferreira Tavares, pela orientação, dedicação e todas às suas contribuições para comigo. Saliento que sou muito grato à minha orientadora pela oportunidade de estudar a biodigestão anaeróbia, no período de 2005 a 2009 na graduação, 2010 a 2012 no mestrado e até o hoje no doutorado.

À Professora Doutora Franciele Ani Caovilla Follador, pela ajuda prestada no pedido de uso dos laboratórios da UNIOESTE, Campus Francisco Beltrão, para analisar as amostras do experimento. A possibilidade de uso dos laboratórios na cidade em que o biodigestor foi implantado viabilizou o estudo, devido à rotina intensa de análises.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos do Doutorado em Engenharia Agrícola.

Ao PGEAGRI e à UNIOESTE, pelo conhecimento repassado e infraestrutura disponível.

Ao programa de pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA, UNIOESTE), pelo empréstimo do analisador de gás GEM 5000 Plus marca Landtec.

A todos que de alguma forma ajudaram na minha formação.

## BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE CAMA DE AVIÁRIO COM RECIRCULAÇÃO DE DIGESTATO

O crescimento da produção de frangos tem concentrado resíduos nas regiões produtoras, cama de aviário e aves mortas, gerando um grande problema ambiental para a indústria avícola. A cama de aviário, rica em matéria orgânica, comumente aplicada no solo sem tratamento, acidifica o mesmo por liberar íons de hidrogênio ao estabilizar sua matéria orgânica e por ser um fertilizante nitrogenado. Portanto, outras aplicações para a cama de aviário são necessárias e devem ser estudadas, como o seu uso para geração de energia pela biodigestão anaeróbia. Este processo é um atrativo para o setor por tratar o resíduo e gerar biogás que pode substituir a energia usada na criação dos frangos. Existe, porém, um entrave ambiental neste sistema por necessitar de grande quantidade de água para hidrolisar a cama de aviário. Por isso, esse trabalho avaliou a biodigestão anaeróbia da cama de aviário em um biodigestor construído com caixas de fibra de vidro no volume total de 40 m<sup>3</sup> com sistema de reutilização do digestato do biodigestor na diluição da próxima alimentação, para reduzir o consumo de água no processo. O digestato foi reutilizado pela recirculação do mesmo no momento da alimentação do biodigestor com uma motobomba, em sistema semi-contínuo (uma vez ao dia). A biodigestão anaeróbia foi estabilizada nas cargas orgânicas de alimentação de 0,5 e 1,0 kg sólidos totais voláteis por m<sup>3</sup> de biodigestor, para a construção das avaliações 1 e 2, respectivamente. O tempo de retenção hidráulica foi de 10 dias para as duas avaliações. A estabilização procedeu-se pelo gráfico de Shewhart e a análise do processo pelo índice de capacidade do processo e pelo índice de viabilidade energética operacional do sistema. Na avaliação 2, o processo se apresentou como capaz e viável nas operações energéticas, com produção de energia na forma de metano 4,41 vezes maior que a energia elétrica gasta nas operações do sistema de tratamento, sendo 0,0182 m<sup>3</sup> metano kg<sup>-1</sup> STV<sup>-1</sup> adicionados. O digestato produzido não se caracterizou como biofertilizante adequado para as culturas por ter pequeno teor de nutrientes. Porém, o lodo é aplicável como adubo orgânico devido à grande parte dos nutrientes ter sedimentado no biodigestor. No período final, após a avaliação 2, o biodigestor e a motobomba não apresentaram mais fluxo de alimentação devido à quantidade de sólidos no digestato e por este motivo, não se conseguiu mais operar o biodigestor. No entanto, o pH (próximo a 7,00) e a relação entre a acidez volátil e a alcalinidade total do digestato (abaixo de 0,3) no período final indicavam que a biodigestão anaeróbia tinha potencial para ser continuada. Tal fato ressalta a importância de outros estudos sobre mecanismos de diluição da cama de aviário no afluente do biodigestor.

**Palavras-chave:** biogás, controle estatístico de processos, índice de capacidade de processo, índice de viabilidade energética operacional, reutilização de digestato.

## ANAEROBIC DIGESTION OF POULTRY LITTER WITH RECYCLING EFFLUENT

Poultry farming has increased and so does the amount of residues from producing areas with poultry litter and dead broilers, consequently, there is a major environmental problem for the poultry industry. Poultry litter, rich in organic matter, commonly applied on soil without treatment, acidifies it by releasing hydrogen ions since it stabilizes organic matter and also because it is a nitrogen fertilizer. Therefore, other applications for poultry litter are needed and should be studied, as for example, its use for power generation by anaerobic digestion. This process is attractive for the sector by treating waste and generating biogas that may replace the energy used in poultry. There is, however, an environmental restriction to this system because it requires a large amount of water to hydrolyze poultry litter. Therefore, this study has evaluated the anaerobic digestion of poultry litter in a digester built with glass fiber boxes whose total volume was 40.0 m<sup>3</sup>. There was a system of effluent reuse from the digester to dilute its next feeding and reduce water consumption during this process. The effluent was reused with its recirculation at the feeding moment with a motor pump, in a semi-continuous system (once a day). The anaerobic digestion has been stabilized at the organic feeding charges of 0.5 and 1.0 kg total volatile solids by m<sup>3</sup> digester, so, the evaluations 1 and 2 were created, respectively. There was a hydraulic retention time of 10 days for both evaluations. The stabilization process occurred by Shewhart charts while the process analysis occurred by the process capacity and operational energy viability of the system indexes. At the evaluation number 2, the process was capable and viable for power operations, whose energy production as methane was 4.41 times superior to the electric energy consumed on operations of the treating system, 0.0182 m<sup>3</sup> methane kg<sup>-1</sup> VTS<sup>-1</sup><sub>added</sub>. The produced effluent was not characterized as an adequate biofertilizer for crop yield because it showed small amounts of nutrients content. On the other hand, the sludge is available as organic manure since a great amount of nutrients has sedimented on the bottom of the digester. At the final period, after evaluation number 2, the digester and motor pump did not present any adequate feeding flux due to the large content of solids in the effluent; so, it was not possible to operate the digester. However, pH (close to 7.00) and the ratio between volatile acidity and total alkalinity of the effluent (below 0.3) at the final period indicated that anaerobic digestion showed some potential to be continued. This fact highlights the importance of other studies about dilution of poultry litter mechanism on the effluent of digester.

**Keywords:** biogas, effluent reuse, operational energy viability index, process capacity index and statistical process control.

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| LISTA DE TABELAS.....                              | viii |
| LISTA DE FIGURAS.....                              | ix   |
| LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....              | x    |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                  | 1    |
| 2 OBJETIVOS .....                                  | 3    |
| 2.1 Objetivo geral .....                           | 3    |
| 2.2 Objetivos específicos.....                     | 3    |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                       | 4    |
| 3.1 Produção de frangos .....                      | 4    |
| 3.2 Cama de aviário (CA).....                      | 4    |
| 3.3 Biodigestão anaeróbia .....                    | 6    |
| 3.4 Etapas da biodigestão anaeróbia .....          | 6    |
| 3.5 Fatores da biodigestão anaeróbia .....         | 7    |
| 3.6 Biogás .....                                   | 9    |
| 3.7 Estabilidade da biodigestão anaeróbia .....    | 10   |
| 3.8 Controle estatístico de processo (CEP).....    | 11   |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS .....                         | 15   |
| 4.1 Experimento .....                              | 15   |
| 4.2 Sistema de tratamento .....                    | 16   |
| 4.3 Cama de aviário (CA).....                      | 17   |
| 4.4 Biodigestor .....                              | 17   |
| 4.5 Condução do experimento.....                   | 19   |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                     | 25   |
| 5.1 Caracterização .....                           | 25   |
| 5.2 Monitoramento do processo .....                | 26   |
| 5.3 Estabilidade.....                              | 29   |
| 5.4 Produção de biogás.....                        | 31   |
| 5.5 IVEO e índices de capacidade do processo ..... | 35   |
| 5.6 Remoção de sólidos .....                       | 35   |
| 6 CONCLUSÕES.....                                  | 38   |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                  | 39   |
| 8 ANEXOS.....                                      | 48   |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> Fases do trabalho e seus respectivos períodos .....   | 20 |
| <b>Tabela 2</b> Parâmetros e metodologias de monitoramento.....   | 23 |
| <b>Tabela 3</b> Caracterização química da cama de aviário, do inóculo e do digestato .....  | 25 |
| <b>Tabela 4</b> Valores de pH e relações Av/Ap, Av/At e Ap/At da cama de aviário (CA) e do inóculo (IN) .....   | 26 |
| <b>Tabela 5</b> Teste de normalidade de Anderson Darling dos valores da eficiência de produção de biogás ( $\text{m}^3$ biogás $\text{kg}^{-1}$ $\text{STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ ) dos períodos de avaliação com 5% de significância .....         | 29 |
| <b>Tabela 6</b> Teor de metano ( $\text{CH}_4$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e outros gases em amostras de biogás dos períodos de monitoramento..... | 32 |
| <b>Tabela 7</b> Eficiência de produção de biogás e de metano do presente estudo e de outras pesquisas .....   | 34 |
| <b>Tabela 8</b> Índice de viabilidade energética operacional médio (IVEO) .....   | 35 |
| <b>Tabela 9</b> $C_{\text{pl}}$ versus IVEO .....   | 35 |
| <b>Tabela 10</b> Dados relativos ao abastecimento do biodigestor .....  | 48 |
| <b>Tabela 11</b> Dados relativos ao abastecimento do biodigestor .....  | 49 |
| <b>Tabela 12</b> Dados relativos ao abastecimento do biodigestor .....  | 50 |
| <b>Tabela 13</b> Dados relativos ao abastecimento do biodigestor .....  | 51 |
| <b>Tabela 14</b> Dados relativos ao abastecimento do biodigestor .....  | 52 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na biodigestão anaeróbia.....   | 7  |
| <b>Figura 2</b> Local de implantação do experimento: propriedade rural em Francisco Beltrão, PR.<br>.....   | 15 |
| <b>Figura 3</b> Sistema de tratamento. ....   | 16 |
| <b>Figura 4</b> Esquema do sistema de tratamento. ....  | 16 |
| <b>Figura 5</b> a) Reservatórios de digestato; b) Sistema de agitação do digestato armazenado.  | 17 |
| <b>Figura 6</b> Dimensões das caixas de fibra de vidro utilizada na construção do biodigestor. ...  | 18 |
| <b>Figura 7</b> Biodigestor. ....   | 19 |
| <b>Figura 8</b> Fluxograma do sistema de biodigestão anaeróbia. ....  | 21 |
| <b>Figura 9</b> Fluxograma do reuso de digestato como afluente do biodigestor. ....   | 22 |
| <b>Figura 10</b> Valores de pH e condutividade elétrica do digestato do biodigestor. ....   | 26 |
| <b>Figura 11</b> Valores das relações $A_v/A_t$ , $A_v/A_p$ e $A_p/A_t$ do digestato do biodigestor. ....   | 27 |
| <b>Figura 12</b> Valores de temperatura média do líquido do biodigestor e de temperatura máxima e mínima ambiente. ....   | 28 |
| <b>Figura 13</b> Valores de temperatura máxima e mínima do líquido do biodigestor. ....   | 28 |
| <b>Figura 14</b> Gráfico de autocorrelação amostral da eficiência de produção de biogás ( $m^3 kg^{-1} STV_{adicionado}^{-1}$ ): a) período referente à avaliação 1 ( $0,5 kg STV m_{biod.}^{-3} dia^{-1}$ ); b) período referente à avaliação 2 ( $1,0 kg STV m_{biod.}^{-3} dia^{-1}$ ). .... | 29 |
| <b>Figura 15</b> Produção de biogás ( $m^3 biogás kg^{-1} STV_{adicionado}^{-1}$ ) do período referente à avaliação 1. ....   | 30 |
| <b>Figura 16</b> Produção de biogás ( $m^3 biogás kg^{-1} STV_{adicionado}^{-1}$ ) do período referente à avaliação 2. ....   | 30 |
| <b>Figura 17</b> Valores de ST e STV reduzidos referente à avaliação 1. ....  | 36 |
| <b>Figura 18</b> Valores de ST e STV reduzidos referentes à avaliação dois. ....  | 37 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- $A_v/A_t$ : relação entre a acidez volátil pela alcalinidade total;
- $A_v/A_p$ : relação entre a acidez volátil e a alcalinidade parcial;
- $A_p/A_t$ : relação entre a alcalinidade parcial e a alcalinidade total;
- c: constante:  $[16 \text{ g CH}_4 \text{ mol}^{-1} * (1000 \text{ L m}^{-3} / 22,4 \text{ L mol}^{-1}) / 3600 \text{ s h}^{-1}] = 0,1984 \text{ g m}^{-3}$ ;
- CEP: controle estatístico de processos;
- CA: cama de aviário;
- COA: Carga orgânica de alimentação ( $\text{kg STV m}^{-3} \text{ biod.}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ );
- $C_{pl}$ : índice de capacidade;
- H: número de horas diárias de funcionamento da motobomba ( $\text{h dia}^{-1}$ );
- IVEO: índice de viabilidade energética operacional médio;
- k: um número específico de desvios padrão amostral;
- LIC: limite inferior de controle estatístico.
- LIE: limite inferior de especificação ( $\text{m}^3 \text{ biogás kg}^{-1} \text{STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ );
- LMC: limite médio de controle estatístico;
- LSC: é o limite superior de controle estatístico;
- pH: potencial hidrogeniônico;
- $P_{\text{padrão}}$ : pressão padrão equivalente a 1019,82 cm c. a.;
- $P_{\text{atm}}$ : pressão atmosférica local (cm C. A.);
- PW: pressão do interior da câmara de biogás (cm c. a.);
- $P_{\text{biogás}}$ : produção média de biogás ( $\text{m}^3 \text{ biogás dia}^{-1}$ );
- P: potência da bomba de recirculação de digestato em W ( $5 \text{ Hp} * 735,7 \text{ J s}^{-1} \text{ Hp}^{-1} = 3678,5 \text{ J s}^{-1}$ );
- Q: volume de alimentação ( $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ );
- ST: sólidos totais;
- STV: sólidos totais voláteis;
- ST \* STV: redução de sólidos totais voláteis em relação à matéria natural;
- T: temperatura do biogás ( $^{\circ}\text{C}$ );
- V: volume de biogás diário (L);
- $V_{\text{biod.}}$ : volume do biodigestor ( $V_{\text{biod.}}$ );
- $\mu$ : média populacional;
- $\sigma$ : desvio padrão amostral da variável em estudo;
- [ ] STV: concentração de STV no afluente do biodigestor ( $\text{kg STV m}^{-3}$ );
- [ ]  $\text{CH}_4$ : concentração média de metano, índice percentual (volume);
- $\rho$ : poder calorífico inferior do metano ( $\text{CH}_4$ );
- $\bar{X}$ : média amostral;

## 2 INTRODUÇÃO

Atualmente, a produção de frangos é praticada no sistema intensivo com controle automatizado de iluminação, ventilação negativa, temperatura e umidade, para se obter melhor conversão alimentar em menor período de tempo. Todo esse controle faz um lote de frangos ter elevada demanda por energia, tanto como energia calorífica para o aquecimento dos pintainhos na fase inicial do lote, quanto como energia elétrica na automação das atividades do aviário.

O sistema intensivo de produção fez a indústria avícola estar em grande desenvolvimento no Brasil, porém o aumento da produção ocasionou seu maior problema ambiental, a geração de cama de aviário e aves mortas. A magnitude do problema ambiental da produção de frangos de corte no Brasil pode ser entendida com a classificação rotineira do País como o terceiro maior produtor mundial, representando entre 12 e 14% da produção mundial. Isto ainda se agrava, pois, metade da produção avícola brasileira provém atualmente de dois Estados, Paraná e Santa Catarina, conseqüentemente, há maior concentração de resíduos nessas regiões.

A cama de aviário é composta da mistura de substrato utilizado sobre o piso dos aviários como leito para as aves, o dejetos, restos de penas e em algumas situações, restos de aves mortas que não foram devidamente coletadas para compostagem e se degradaram no local. É um resíduo sólido comumente utilizado na fertilização da agricultura, porém sua aplicação direta contribui para a acidificação do solo, pois libera íons hidrogênio durante a fase ácida da estabilização de sua matéria orgânica e é um fertilizante nitrogenado. Assim, é necessário o estudo de outras aplicações para a cama de aviário.

Uma alternativa é o uso da cama de aviário para produzir energia com a biodigestão anaeróbia. Assim, além de se tratar o resíduo, pode-se substituir a energia usada na criação dos frangos, com o emprego do biogás. O biogás tem composição variável com o processo de biodigestão anaeróbia. É altamente influenciado pelos microrganismos e composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). Em adição ao biogás, nesse processo, o digestato do biodigestor, aplicável à agricultura, é gerado com baixo teor de matéria orgânica e microrganismos vivos resultantes do processo.

Um questionamento ambiental no tratamento da cama de aviário pela biodigestão anaeróbia, por ser um resíduo sólido, é o uso de água limpa necessária ao processo. A questão pode ser solucionada pelo uso do digestato do biodigestor como diluente no preparo da alimentação do biodigestor. Esta recirculação também beneficia o processo por recircular os microrganismos do processo que ainda contribuiriam e seriam eliminados.

Haja vista a biodigestão anaeróbia ser um processo biológico, diversos fatores podem interferir na produção de biogás, como a carga orgânica de alimentação, a temperatura, o pH, os microrganismos, a concentração de inibidores, a composição do

substrato, o tipo de biodigestor, o meio suporte, a relação C/N, etc..

Nesse sentido, a biodigestão anaeróbia, a qual é um processo biológico vulnerável às variações do processo, deve ser monitorada periodicamente para evitar instabilidades em sua produção. Para isso, uma ferramenta do controle estatístico de processos, chamada de gráfico de controle, apresenta-se muito útil na verificação da estabilidade de um biodigestor. Essa ferramenta estabelece limites de controle para os valores das variáveis de análise em que o processo se encontra estabilizado e, com isso, determina índices de capacidade do processo, relacionados à sua viabilidade.

Neste sentido, um biodigestor em escala piloto foi implantado e avaliado, nas condições reais de uso, a fim de se obter o potencial energético em duas taxas de alimentação de cama de aviário com reuso do digestato no processo. A partir do controle estatístico de processos a estabilidade foi verificada e o biodigestor classificado com índices de capacidade do processo. Devido ao fato de o processo demandar energia no reuso do digestato na alimentação do sistema, um novo índice foi determinado para o processo, índice de viabilidade energética operacional, a fim de se relacionar a energia despendida pela energia produzida na forma de metano.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de geração de biogás da biodigestão anaeróbia de cama de aviário em um biodigestor construído com caixas de fibra de vidro, em escala de campo, e nas taxas de alimentação de 0,5 e 1,0 kg STV  $m_{\text{biol.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ .

#### 3.2 Objetivos específicos

Monitorar o pH e as relações entre a acidez volátil e a alcalinidade do digestato.

Monitorar a temperatura ambiente e a temperatura do líquido do biodigestor.

Verificar a estabilização do biodigestor com o controle estatístico de qualidade em relação à produção de biogás.

Verificar a produção de biogás na unidade:  $m^3$  de biogás por kg de sólidos totais voláteis adicionados.

Verificar a redução de sólidos totais e a redução de sólidos totais voláteis.

Determinar índices de capacidade para o processo e relacionar com a viabilidade energética operacional do processo.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Produção de frangos**

Ao longo dos últimos anos, a propagação das crises econômicas levou a uma forte demanda por produtos mais baratos de carne, como a carne de frango e seus derivados (COSTA et al., 2012). O crescimento da demanda por produtos de proteína animal tem levado a intensificação da indústria avícola e ao confinamento das aves sob um aumento da densidade de aves e a acumulação de grandes volumes de esterco em áreas concentradas para produzir carne e ovos com um custo menor que os métodos tradicionais (LYNCH et al., 2013).

O Brasil foi o terceiro maior produtor mundial de carne de frangos em 2013, antecedendo apenas os Estados Unidos da América e a China, com 12,4, 18,4 e 14,3% da produção mundial, respectivamente (FAO, 2015). No ano de 2014, o Brasil produziu 12,52 Mt de frangos abatidos e o Paraná, com 29,2% deste montante, contribuiu com 3,65 Mt (IBGE, 2015). De janeiro de 1997 a janeiro de 2015, o Brasil aumentou em peso de carcaça de frango abatido 5,2 vezes e o Paraná 3,3 vezes a produção de frangos abatidos (IBGE, 2015).

A indústria avícola é uma das maiores e de mais rápido crescimento industrial de base agrícola. Entretanto, enfrenta um grande problema com a acumulação em grande escala de seus resíduos, incluindo a cama de aviário e dejetos, que podem causar problemas de disposição e poluição se não forem envolvidas tecnologias de gerenciamento ambiental economicamente sustentáveis (BOLAN et al., 2010).

A intensificação da criação de frangos nos países em desenvolvimento está ocorrendo rapidamente à medida que a carne de aves e ovos são alimentos acessíveis (RAO et al., 2013). A demanda por energia aumenta com a intensificação das explorações animais, sendo que as atuais formas de produção de energia normalmente constituem-se da utilização de combustíveis fósseis ou geram impactos negativos para o meio ambiente e a população envolvida (AUGUSTO, 2007).

### **4.2 Cama de aviário (CA)**

Utilizada na criação de aves de corte, a cama de aviário (CA), que está sobre o piso dos galpões, tem finalidade de proporcionar um ambiente sanitariamente seguro ao plantel, para que esse não tenha contato com umidade nem com microrganismos que possam comprometer a saúde do animal (SUZUKI et al., 2012). É composta pelo dejetos animal mais o material utilizado como cama para as aves (maravalha), resíduos de ração (SHARMA;

ESPINOSA-SOLARES e HUBER, 2013) e penas das aves e é um dos fertilizantes mais volumosos e secos produzidos na agricultura intensiva (LYNCH et al., 2013).

No entanto, a CA é um material complexo que contém elevada fração do substrato usado na cama das aves, como palha, serragem, maravalha, papel picado e cascas de amendoim ou de arroz (COSTA et al., 2012). Segundo Tessaro (2011), a CA da Região Sudoeste do Paraná é composta por ST, dos quais correspondem: N ( $26,6 \text{ g kg}^{-1}$ ), P ( $13,6 \text{ g kg}^{-1}$ ), K ( $26,3 \text{ g kg}^{-1}$ ), Ca ( $23,6 \text{ g kg}^{-1}$ ) e Mg ( $5,0 \text{ g kg}^{-1}$ ). A relação C/N da CA também foi determinada em 9,3 e 13,5, o pH em 7,1 e 8,4 e o teor de umidade em 75,0 e 75,5% por Turan (2009) e Guo, Tongtavee e Labreveux (2009), respectivamente.

Por muitos anos, a CA tem sido usada como fertilizante orgânico barato e rico em nutrientes. Entretanto, sabe-se atualmente que, se aplicada em excesso, essa prática pode ser associada a problemas ambientais (SINGH; REYNOLDS e DAS, 2011) tais como odores, patógenos, eutrofização de recursos hídricos superficiais, contaminação da água subterrânea, escoamento superficial, deterioração da estrutura biológica do solo, etc. (YETILMEZSOY, 2012).

A disposição da CA no solo é uma preocupação ambiental frequentemente associada ao excesso de fósforo (SZOGI e VANOTTI, 2009). Segundo Tessaro (2011), a utilização da CA como fertilizante é motivo de preocupações com a poluição dos solos e dos recursos hídricos por nutrientes, microrganismos patogênicos e resíduos químicos usados na produção avícola.

Nos sistemas de plantio direto, a CA não é incorporada ao solo e, devido ao contato limitado, a liberação de nutrientes para o solo deve-se principalmente ao intemperismo natural e à lixiviação (GUO; TONGTAVEE; LABREVEUX, 2009). Além disso, seu uso tem sido limitado a poucos quilômetros do lugar de geração por causa de sua baixa densidade (BERNHART et al., 2010) e o transporte que se torna menos econômico com o aumento das distâncias (SZOGI e VANOTTI, 2009).

Entretanto, assim como as demais atividades agropecuárias, a avicultura de corte gera uma quantidade muito grande de resíduos (cama de aviário e aves mortas) que, se bem manejados, poderão tornar-se não apenas uma importante fonte de renda e agregação de valor à atividade, mas também um modelo de produção sustentável (ORRICO JÚNIOR; ORRICO e LUCAS JÚNIOR, 2010).

Portanto, outros usos para a cama de aviário além da aplicação no solo são necessários para alcançar a sustentabilidade da produção de frangos (QIU e GUO, 2010). Recentemente, a biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos tem atraído mais interesse por causa dos atuais problemas ambientais, em específico os relacionados ao aquecimento global (NASIR, GHAZI e OMAR, 2012). A CA pode ser uma fonte potencial de energia se submetida à biodigestão anaeróbia (SINGH; REYNOLDS e DAS, 2011) e seu biogás pode substituir a energia elétrica ou ser utilizado no aquecimento dos pintainhos (ALCANTARA,

2012).

### **4.3 Biodigestão anaeróbia**

A biodigestão anaeróbia é um processo bioquímico que converte uma variedade de matéria orgânica com microrganismos que se desenvolvem naturalmente na ausência de oxigênio para produzir o biogás (BOTHEJU e BAKKE, 2011) e um efluente clarificado mais estabilizado química e microbiologicamente (LOPES da SILVA et al., 2012), o digestato. A biodigestão anaeróbia para produção de biogás tem se tornado um foco de pesquisa em todo o Planeta porque produz energia renovável e é ambientalmente correta (NASIR, GHAZI e OMAR, 2012).

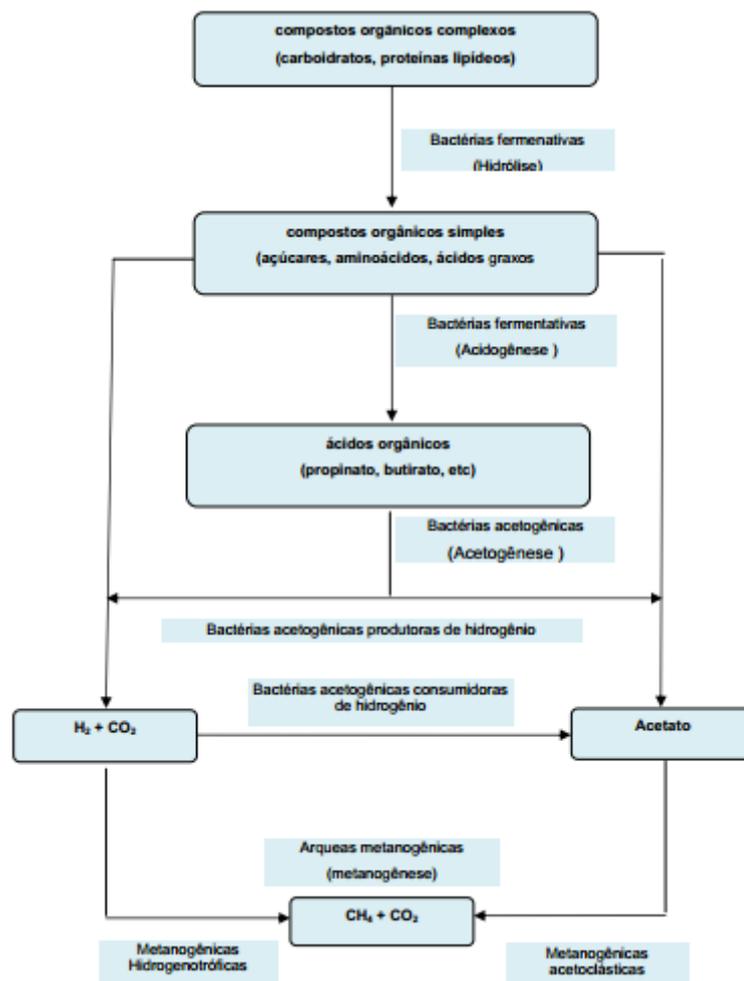
O interesse na utilização de biogás como combustível decorre do seu elevado conteúdo de metano, de ser uma energia renovável, do custo relativamente baixo de sua matéria-prima de alimentação e do aumento potencial do recurso energético (TRENDEWICZ e BRAUN, 2013). O biogás pode ser utilizado para geração de calor e eletricidade pelas propriedades rurais ou industriais e trazer ganhos econômicos e ambientais (SUNADA et al., 2012), além de poder contribuir para a redução do consumo de combustíveis fósseis convencionais (ABOUELENIEN et al., 2010) como o gás natural e o óleo diesel (ELLERSDORFER e WEYß, 2012).

O princípio fundamental da biodigestão anaeróbia é a conversão da biomassa em biogás por microrganismos em quatro etapas com crucial regulação adequada do processo por parâmetros físicos e químicos (GASCH, HILDEBRANDT e RÖSKE, 2013). É um processo complexo que requer a operação cuidadosa e acompanhamento (YETILMEZSOY, 2012), pois o início de seu funcionamento e operação é uma questão delicada (DONOSO-BRAVO et al., 2011). São várias as combinações de processos em que os resíduos são transformados para produzir energia relacionada aos compostos (VALLE-GUADARRAMA et al., 2011).

### **4.4 Etapas da biodigestão anaeróbia**

A primeira fase da biodigestão anaeróbia é a hidrólise, em que moléculas orgânicas complexas são quebradas em açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos com a adição de grupos hidroxilas (MOJIRI et al., 2012). Em sequência, na acidogênese, os produtos da hidrólise são convertidos em ácidos para a terceira fase (CYSNEIROS et al., 2011). Na acetogênese, os ácidos graxos voláteis e alguns produtos orgânicos de cadeia curta (ex.: etanol) são convertidos para acetato (BOTHEJU e BAKKE, 2011). Por fim, na metanogênese, os produtos intermediários das fases ácidas, principalmente ácido acético e hidrogênio mais gás carbônico, são convertidos em metano (JAIN e SHARMA, 2011). As

três primeiras fases da biodigestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese e acetogênese) ocorrem pelo consórcio de diferentes bactérias, enquanto a quarta fase, a metanogênese, é conduzida por grupos especializados de *Archaeas* metanogênicas (ZIGANSHIN et al., 2013). As rotas metabólicas descritas em cada fase acima são descritas na Figura 1.



**Figura 1** Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na biodigestão anaeróbia.  
**FONTE:** Chernicharo, 2007.

Os microrganismos processadores da biodigestão anaeróbia desempenham um papel-chave na produção de biogás e correspondentemente na qualidade do digestato (YUE et al., 2013). De fato, a eficiência do processo pode ser influenciada pelas variações na comunidade microbiológica que ocorrem durante a fermentação (LIGUORI, AMORE e FARACO, 2013) e os digestores anaeróbios podem ser conduzidos de maneira a ter uma ampla faixa de capacidade de produção.

Segundo Traversi et al. (2014), as *Archaeas* são a chave biológica para o processo porque acompanham as reações de formação de metano, mas isso também é uma regra crucial devido ao microbioma de dentro do biodigestor ser mal compreendido.

#### 4.5 Fatores da biodigestão anaeróbia

A produção de biogás pela biodigestão anaeróbia é influenciada por fatores tais como temperatura, pH, acidez volátil, composição do substrato e sua relação C/N (YIN et al., 2014). Assim, para o dimensionamento deste sistema, devem-se considerar os seguintes fatores: disponibilidade de resíduos, distribuição espacial, condições de terreno e estradas, custo específico de transporte de biomassa, infraestrutura existente de energia, sazonalidade de biomassa e fatores de conversão e eficiência (PANTALEO; GENNARO e SHAH, 2013).

A eficiência do processo de biodigestão anaeróbia depende da comunidade microbiológica, das mudanças de uma ou mais condições operacionais (BOONAPATCHAROEN et al., 2007; TRENDEWICZ e BRAUN, 2013), carga orgânica, composição do biogás (YETILMOEZSOY, 2012), modelo do digestor, temperatura, relação C/N do resíduo, tempo de retenção hidráulico, (HASSAN e NELSON†, 2012), pH, alcalinidade, acidez volátil (AV) (APPELS et al., 2008) e do material a ser digerido (KACPRZAK; KRZYSZEK; LEDAKOWICZ, 2010).

Segundo Amorim, Zaiat e Forest (2005), o modelo de biodigestor horizontal de biomassa fixa tem assegurado importantes avanços para os processos anaeróbios e apresentado boas respostas a choques de alimentação e inibidores.

A temperatura é um fator comum de estresse em ambientes extremos e afeta o desempenho de digestores anaeróbios. Entretanto, existem microrganismos adaptados ao frio (psicrófilos) que habitam ambientes naturais e artificiais de baixa temperatura e contribuem para a bioatividade do ecossistema na reciclagem do carbono e outros nutrientes (CATA-SAADY e MASSÉ, 2013).

Segundo Labatut, Angenent e Scott (2014), a temperatura e o substrato aflente podem ser os parâmetros mais importantes para o desempenho da estabilidade da biodigestão anaeróbia, pois influenciam a estrutura da comunidade microbiana, as vias de conversão bioquímica, os balanços cinético e termodinâmico das reações bioquímicas e a estequiometria dos produtos formados.

A relação C/N do substrato de alimentação de um digestor é um importante indicador para o controle de sistemas de tratamento biológico (WANG et al., 2012), porém ainda permanece com sua faixa ótima altamente debatida, cuja faixa mais aceitável está entre 20/1 e 30/1 (ZHONG et al., 2012). Em relação ao conteúdo de sólidos totais (ST) dos resíduos, desenvolveram-se três principais tecnologias: processo líquido ( $\leq 10\%$  ST), semi-seco (10 - 20% ST) e seco ( $\geq 20\%$  ST) (ABBASSI-GUENDOUZ et al., 2012).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) tem efeito significativo sobre a quantidade e diversidade das populações microbiológicas (HASSAN e NELSON†, 2012), pois a água é essencial para os processos biológicos e em particular para a biodigestão anaeróbia, pois promove a hidrólise do substrato (BOLLON et al., 2013).

A acumulação de ácidos voláteis pode levar à acidificação, diminuição do pH e

inibição do processo (JIANG, HEAVEN e BANKS, 2012). O poder tampão de um resíduo muitas vezes estabiliza o valor do pH, o qual aumenta com a acumulação de amônia durante a degradação de proteínas e diminui com a acumulação de ácidos voláteis (WEILAND, 2010).

As bactérias metanogênicas envolvidas na biodigestão anaeróbia têm baixa taxa de crescimento e são sensíveis para inibidores como o pH baixo causado por excessivas concentrações de ácidos voláteis, por isso, é essencial manter o balanço das quatro fases (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) (BROWN; SHI e LI, 2012). Assim, o processo deve ser bem adaptado às propriedades do substrato para alcançar a completa degradação sem o processo falhar (WEILAND, 2010).

Também existe ampla variedade de substâncias inibidoras que podem levar à falha da biodigestão anaeróbia, como a amônia, o sulfeto, sais (Na, K, Mg, Ca e Al), metais pesados e componentes orgânicos (CHEN, CHENG e CREAMER, 2008). Entretanto, tais inibidores não são controlados na maioria dos processos de biodigestão anaeróbia em nível de campo, devido à dificuldade e complexidade da determinação dessas substâncias.

Tendo em vista que a característica do resíduo é particular de cada atividade geradora e que, dentro da mesma atividade geradora, esse pode apresentar propriedades diferentes devido ao manejo adotado (material de cama, alimentação), torna-se importante avaliar a biodigestão anaeróbia nas peculiaridades de cada manejo (CESTONARO, 2013) para alcançar um processo bem adaptado e estável.

Um grande entrave para a utilização da biodigestão anaeróbia como tratamento dos dejetos provenientes da avicultura de corte é a quantidade de água necessária para diluir o material e obter o meio adequado para o processo. Por tal motivo, há a necessidade de estudos que visem à reutilização da fração líquida do digestato no próprio processo (AUGUSTO, 2011).

A biodigestão anaeróbia traz benefícios ambientais e econômicos ao capturar o metano e utilizá-lo como fonte energética, reduz a poluição atmosférica e reduz o potencial poluente orgânico do resíduo. Sua tecnologia é bastante amadurecida, mas ainda há diversas oportunidades para aperfeiçoar o processo e, conseqüentemente, melhorar sua importância econômica nos diferentes setores (ADU-GYAMFI, RAVELLA e HOBBS, 2012).

#### **4.6 Biogás**

Produto da biodigestão anaeróbia composto da mistura de metano (CH<sub>4</sub>), gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e traços de outros componentes gasosos, o biogás é utilizado diretamente para geração de calor com a queima do gás bruto ou parcialmente purificado antes de ser convertido em calor e energia elétrica (ÁCS et al., 2013).

A inflamabilidade do metano (CH<sub>4</sub>) permite que o biogás seja utilizado como

combustível (LEE; HUANG e CHEN, 2013), já o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) deve ser separado por não ser combustível e diminuir o poder calorífico (LANGE, 2012). Sua utilização é principalmente em mecanismos baseados na combinação de plantas de geração de eletricidade e calor, devido ao fato de as microturbinas a gás e as células de combustível serem alternativas caras que precisam ser mais desenvolvidas para reduzir custos e aumentar a confiabilidade (WEILAND, 2010).

A produção de metano pela tecnologia de biodigestão anaeróbia tem sido avaliada como uma das maneiras favoráveis mais eficientes de forma energética e ambiental para a produção de combustível veicular (KRISHANIA et al., 2013) e esta prática está aumentando mundialmente (GOULDING e POWER, 2013). Tessaro (2011) verificou potenciais de produção de biogás com CA diluída no próprio digestato de 0,4106 m<sup>3</sup> de biogás por quilograma de matéria seca adicionada, em biodigestor indiano e sistema batelada.

Kleerebezem et al. (2015) apontam duas vantagens para a produção de biogás: o fato que o metano é pouco solúvel em água e contribui para a separação do produto final e também, que a produção de biogás requer baixa quantidade de energia na operação do biodigestor, comparado à aeração ativa em processos aeróbios de resíduos.

No entanto, o biogás contém vários poluentes formados durante a biodigestão anaeróbia da matéria orgânica. O sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) é o principal poluente e um composto tóxico que forma os óxidos de enxofre durante a combustão, altamente corrosivo, reduz a vida útil de equipamentos e gera odores ao redor das instalações em que é produzido (DÍAZ et al., 2011). Esses componentes devem ser removidos para obter um biogás de qualidade aceitável, e um dos métodos mais comuns de remoção simultânea de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) é por absorção química: a penetração do biogás em fase líquida (GAWEL, 2012). Junto ao aumento da utilização de biogás como fonte de energia, cresceu a necessidade de novos materiais e métodos para purificar e limpar o biogás, com destaque nos últimos anos na purificação por adsorção e/ou absorção (ROTHER et al., 2012).

#### **4.7 Estabilidade da biodigestão anaeróbia**

Para o monitoramento da estabilidade, os parâmetros mais comuns usados para verificar o desempenho de biodigestores anaeróbios são: a acidez volátil, nitrogênio amoniacal, pH, alcalinidade e produção de metano (AYMERICH, ESTEBAN-GUTIÉRREZ e SANCHO, 2013).

Segundo Martín-Gonzalez, Font e Vicent (2013), vários estudos incluem taxas de alcalinidade como parâmetros de monitoramento (ex.: relação entre a alcalinidade parcial e a alcalinidade total,  $A_p/A_t$ ), considerada atualmente como análise de rotina por operadores de biodigestores. Entretanto, eles não consideram as taxas de alcalinidade como

parâmetro-chave para o monitoramento de tratamentos de resíduos sólidos municipais.

Segundo Aymerich, Esteban-Gutierrez e Sancho (2013), a relação entre a acidez volátil e a alcalinidade bicarbonato representa boa aproximação para estimar a capacidade da digestão anaeróbia e prevenir acidificações e baixas eficiências de consumo. Ainda, recomendam que biodigestores de baixa taxa de sólidos usem tal índice em 0,8 como valor limite para trabalhar em condições estáveis.

A medida de pH é considerada menos considerável que a relação entre a acidez volátil e a alcalinidade total por representar grandes alterações na alcalinidade com pequenas variações em sua escala logarítmica. Resultados experimentais têm apresentado que em eventos de queda acentuada do pH, nos processos causados pela acumulação de ácidos voláteis, nem sempre é possível conduzir a biodigestão anaeróbia para voltar a operar normalmente somente pelo controle do pH (MÉNDEZ-ACOSTA et al., 2010). Segundo Zickefoose e Hayes (1976), a relação entre a acidez volátil e a alcalinidade total pode variar desde menos de 0,1 até próximo de 0,35 sem alterações significantes na biodigestão anaeróbia.

Os atributos de baixo custo, baixa manutenção, de facilidade de uso, resposta rápida e boa precisão estão continuamente sendo procurados para sistemas de monitoramento (PURSER et al., 2014). Nesse contexto, o controle estatístico de processos pode ser usado como teste de estabilidade da biodigestão anaeróbia por possibilitar avaliar a estabilidade do processo com a variável direta de interesse (produção de biogás) e resultar com a confiança de uma técnica já estabelecida.

#### **4.8 Controle estatístico de processo (CEP)**

As grandes mudanças tecnológicas, sociais e o conseqüente aumento competitivo na maioria dos setores da economia fazem necessária uma gestão eficiente e eficaz. Nesse âmbito, o uso de ferramentas robustas é essencial para o monitoramento e a avaliação de processos produtivos (CAMARGO et al., 2012). O controle estatístico de processo é usualmente o método preferido para controlar a qualidade porque essa característica é construída no processo (MAICZUK e ANDRADE JÚNIOR, 2013).

Um processo pode ser compreendido como um sistema de transformação de 'entradas' (cama de aviário) em produtos com características de qualidade que, dentro da perspectiva do CEP, são influenciados pelas causas naturais ou aleatórias, representadas por pequenas variações, inevitáveis, dificilmente rastreáveis e resultantes de fatores naturais ao processo, e pelas causas especiais ou não aleatórias, caracterizadas por alterações identificáveis, planejadas ou não, responsáveis por uma mudança real no processo, como nos materiais, no meio ambiente ou no método utilizado (TAKAHASHI et al., 2012).

Entre as ferramentas mais utilizadas no controle de processos estão as Cartas de

Controle, definidas por gráficos de análise e monitoramento de um processo em função do tempo a partir de duas características básicas: sua centralização, verificada pela média do processo e a sua dispersão, estimada pelo desvio-padrão ou amplitude dos dados (CHRISTINO; BONDUELLE e IWAKIRI, 2010).

O objetivo do gráfico de controle estatístico de processo é detectar sinais fora de controle que indiquem a existência de causas especiais que afetam a estabilidade do processo pela identificação visual do comportamento das variáveis críticas de qualidade (HACHICHA e GHORBEL, 2012). É uma técnica estatística usada para medição e análise do comportamento de um processo (NOMELINE; FERREIRA e SILVA de OLIVEIRA, 2009).

O gráfico de controle Shewhart (sem testes adicionais) é usado para detectar causas especiais em informações, preferencialmente para grandes mudanças no processo (ABBAS et al., 2013), com sucesso alcançado por sua simplicidade e facilidade na regra de decisão que se baseia apenas no exame do último ponto observado (WALTER et al., 2013).

De acordo com os fundamentos de Shewhart, sempre que um ponto é inserido no gráfico deve-se ir à procura de possíveis causas especiais que estejam afetando a qualidade do processo (MACHADO; de MAGALHÃES e COSTA, 2008). Basicamente, ele é uma representação gráfica do comportamento da característica de qualidade X medida em relação à ordem de coleta com uma região limitante em que os valores observados devem permanecer enquanto o processo estiver sob a condição de 'controle estatístico' (MINGOTI e YASSUKAWA, 2008).

Segundo Montgomery (2009), quando o tamanho da amostra usada para o processo de monitoramento é único, ou seja, quando as amostras consistem em unidades individuais, o gráfico de Shewhart para medidas individuais é útil no monitoramento da média do processo e muito aplicado com a média móvel de duas observações sucessivas para estimar a variabilidade do processo, de acordo com as Equações 1, 2, 3 e 4, de Montgomery (2009), para cálculo dos limites de controle:

$$LSC = \mu + k \sigma \quad \text{Eq. (1)}$$

$$LMC = \mu \quad \text{Eq. (2)}$$

$$LIC = \mu - k \sigma \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

$\mu$ : média populacional;

k: um número específico de desvios padrão amostral;

$\sigma$ : desvio padrão amostral da variável em estudo;

LSC: é o limite superior de controle estatístico;

LMC: limite médio de controle estatístico;

LIC: limite inferior de controle estatístico.

Segundo Montgomery (2009), o padrão para construção deste gráfico usa  $\bar{X}$  (média amostral) para  $\mu$ ,  $k = 3$ ,  $\overline{AM}/d_2$  ( $w$ ) para  $\sigma$ ,  $d_2 =$  fator para o limite médio de controle estatístico (MINITAB 15) e  $w = 2$  (o número de observações usadas no cálculo da amplitude móvel).

Sendo que:

$$\overline{AM} = \frac{\sum_{i=2}^n |X_i - X_{i-1}|}{n} \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

$\overline{AM}$ : média da amplitude móvel de duas observações sucessivas;

$i$ : 1, 2, ...,  $n$  observações.

Quando as causas especiais de variação são eliminadas de um processo com características de qualidade, avaliadas como normais, diz-se que o processo está sob controle estatístico ou que se trata de um processo estável. A análise do gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais e de amplitude móvel é de acordo com um ou mais critérios, de acordo com o rigor desejado para o controle da estabilidade do processo.

Os critérios para classificação do processo como fora do controle estatístico são sugeridos por Western Electric Rules (1956), critérios de 1 a 4, e os outros por Montgomery (2009):

1. Um ou mais pontos fora dos limites de controle (três sigmas);
2. Dois de três pontos consecutivos fora dos limites de perigo (dois sigmas), mas ainda dentro dos limites de controle;
3. Quatro de cinco pontos consecutivos além do limite de um sigma;
4. Oito pontos consecutivos em um lado do LMC;
5. Seis pontos em linha constantemente aumentando ou diminuindo;
6. Quinze pontos em linha entre o LMC e um sigma, acima e abaixo do LMC;
7. Quatorze pontos consecutivos, ora acima e abaixo do LMC;
8. Oito pontos em linha em ambos os lados do LMC, mas nenhum entre o LMC e um sigma;
9. Um ponto não usual;
10. Um ou mais pontos próximos ao limite de controle ou de perigo.

Entretanto, mesmo quando um processo se encontra estável, ainda é possível ter situações de produção fora de conformidade. Assim, faz-se necessário avaliar a capacidade do processo em atender às especificações estabelecidas (GONÇALEZ e WERNER, 2009).

Índices de capacidade de processo são medidas desenvolvidas por conveniência de engenharia para quantificar o desempenho do processo e têm apresentado bons resultados na avaliação de processos univariados, como  $C_p$ ,  $C_{pu}$ ,  $C_{pl}$ ,  $C_{pk}$ ,  $C_{pm}$  e  $C_{pmk}$  (SHIAU et al., 2013).

O índice  $C_p$ , chamado de índice potencial do processo, considera que o processo está centrado no valor nominal da especificação e relaciona a variabilidade permitida ao processo com a variabilidade natural do processo (GONÇALEZ e WERNER, 2009). Já o índice  $C_{pu}$  compara a distância entre a média do processo e o limite superior especificado para uma distribuição unilateral à esquerda e, similarmente,  $C_{pl}$  compara a distância entre a média do processo e o limite inferior especificado para uma distribuição unilateral à direita (ABDOLSHAH et al., 2011).  $C_{pk}$  foi inicialmente desenvolvido para processos descentralizados, sendo o mínimo entre  $C_{pl}$  e  $C_{pu}$  (MONTGOMERY, 2009).  $C_{pk}$ ,  $C_{pm}$  e  $C_{pmk}$  são índices de capacidade para processos univariados que consideram a média e o desvio padrão do processo simultaneamente na determinação do desempenho do processo (EBADI e SHAHRIARI, 2013).  $C_{pm}$  e  $C_{pmk}$  consideram também o valor nominal da especificação (valor alvo), sendo que  $C_{pmk}$  refina mais a análise, por considerar a menor distância entre a média do processo em relação aos limites de especificação em seu numerador (GONÇALEZ e WERNER, 2009).

Nesse contexto, o monitoramento da estabilidade da biodigestão anaeróbia é importante, pois como outros processos, está sujeito à variabilidade natural e esporádica de seus produtos (biogás e digestato) e o CEP contribui para essa verificação com o gráfico de controle e a determinação de limites de fácil interpretação (ALCANTARA, 2012) junto com o índice de capacidade.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Experimento

O experimento foi realizado na propriedade rural localizada na Vila Rio Tuna em Francisco Beltrão (Figura 2) e as análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus Cascavel e nos laboratórios de Biofísica, de Microbiologia, Biologia Celular e Bioquímica e de Química Geral da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus Francisco Beltrão.



**Figura 2** Local de implantação do experimento: propriedade rural em Francisco Beltrão, PR.  
**Fonte:** GOOGLE EARTH, 2013.

A propriedade investiu na construção de quatro biodigestores canadenses para tratar toda a cama de aviário gerada nos dois aviários de criação de frangos, 12 x 100 m e 12 x 125 m, os quais geram biogás para substituir a lenha queimada nos aquecedores dos aviários.

Este empreendimento foi realizado via financiamento pelo programa ABC – Agricultura de Baixo Carbono, com a finalidade de tratar dejetos e resíduos da produção animal, geração de energia e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, oriundas da atividade e do desmatamento pela substituição da lenha utilizada no aquecimento dos frangos pelo biogás. O prazo para o retorno do capital foi estipulado de acordo com o fluxo de receitas da propriedade e dividido em cinco anos após três anos de carência.

Durante o período de carência do financiamento, a propriedade cedeu um biodigestor para a pesquisa de Doutorado em Engenharia Agrícola de Michael Steinhorst Alcantara, a fim de contribuir para o desenvolvimento científico e implantar uma pesquisa local que investigue um maior desempenho de produção de biogás para condução dos biodigestores durante o período vigente do retorno de capital financiado.

## 5.2 Sistema de tratamento

Para este processo, foi construído um barracão de 13 x 21 x 7 m (largura x comprimento x altura) de chão batido com cobertura de fibrocimento para armazenagem da CA. Também foi instalado o biodigestor, uma caixa de fibra de vidro de 1 m<sup>3</sup> para o controle da vazão de alimentação, três caixas de fibra de vidro de 20 m<sup>3</sup> para armazenagem do digestato e uma bomba autoaspirante de marca Schneider, modelo BCA-41, para recirculação do digestato do biodigestor.

Para melhor acompanhamento do processo, o sistema de tratamento foi dividido em armazenagem e pesagem da CA (estação 1), biodigestão anaeróbia (estação 2) e armazenagem do digestato e bomba hidráulica (estação 3), conforme apresentado nas Figuras 3 e 4.

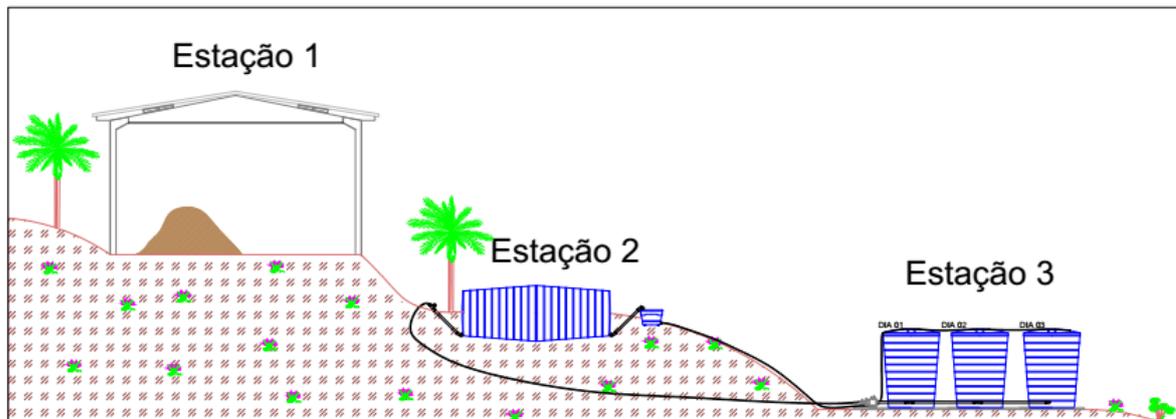


Figura 3 Sistema de tratamento.

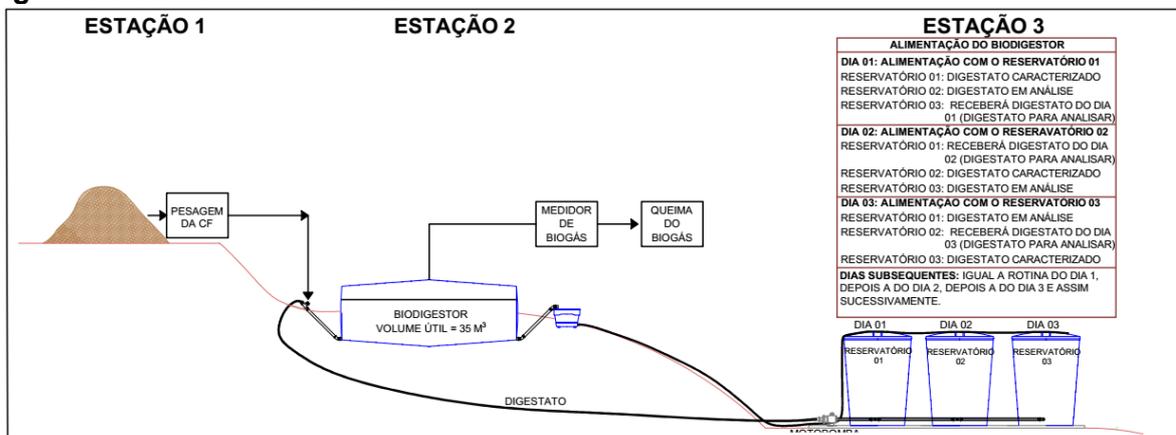


Figura 4 Esquema do sistema de tratamento.

Todas as estações foram dispostas em sequência de terreno para facilitar o fluxo entre as etapas do processo. Com isso, o digestato do biodigestor saía direto para um dos

três reservatórios.

Cada reservatório de digestato continha um sistema de agitação hidráulico formado pela ligação de um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro ao ramal de recalque da bomba hidráulica com uma curva de 90° curta e conectado em um registro e no reservatório. A agitação do digestato formou-se por sucção e recalque do mesmo no interior do reservatório. A injeção foi feita rente ao piso e em direção à parede do reservatório para gerar o vórtice no digestato armazenado. Os reservatórios e seus sistemas de agitação são apresentados nas Figuras 5-a e 5-b, respectivamente.

a)



b)



**Figura 5** a) Reservatórios de digestato; b) Sistema de agitação do digestato armazenado.

### 5.3 Cama de aviário (CA)

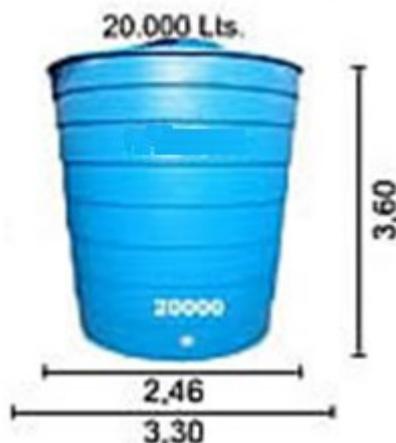
O substrato em estudo é composto de maravalha, serragem, dejetos de frango e restos de penas, obtidos dos aviários da propriedade. O sistema de criação é intensivo, em sistema *dark house*, visando à engorda de frangos até 2,7 kg a cada 45 dias mais 11 dias de intervalo entre lotes para preparação do aviário para receber o próximo lote.

A propriedade trabalha integrada com cooperativa, que orienta tecnicamente o manejo adequado para a criação das aves. Assim, a cada treze lotes, recomenda-se a retirada de toda a cama do aviário, além de lavar e desinfetar as instalações para garantir a sanidade para os frangos. Devido ao período de vazio sanitário ter ocorrido no mês de janeiro de 2013, a propriedade armazenou 80 t de CA para o experimento, estocada sob cobertura de lona na estação 1 até a construção do barracão em 06/08/2014.

### 5.4 Biodigestor

Inicialmente, um biodigestor modelo Canadense feito com geomembrana de polietileno foi instalado na estação 2 para estudo. Todavia, por dificuldades técnicas construtivas, alterou-se o estudo para um biodigestor feito de fibra de vidro pela praticidade da técnica de implantação.

O biodigestor de fibra de vidro foi construído pela união de duas caixas de fibra de vidro de 20 m<sup>3</sup> por ligação parafusada, vedada com borracha interposta entre as mesmas e prensada pela junção, na direção horizontal. A ligação parafusada foi distanciada a cada 10 cm, com arruela lisa e porca autofrenante. As dimensões das caixas de fibra de vidro utilizadas estão apresentadas na Figura 6.



**Figura 6** Dimensões das caixas de fibra de vidro utilizada na construção do biodigestor.

Uma vala foi escavada para instalação do biodigestor e todas as pedras, raízes e materiais pontiagudos retirados. Na sequência, as caixas unidas foram colocadas na direção horizontal com auxílio de um guindaste hidráulico. Em seguida, foram conectados tubos de PVC de 200 mm de diâmetro em cada lado das caixas para a entrada e saída do biodigestor. Por último, as laterais da vala e das caixas foram preenchidas com terra para o assentamento do biodigestor.

Um Tê de 250 mm de diâmetro foi conectado ao tubo de entrada do biodigestor para misturar a CA com o afluente. Vale ressaltar que o afluente era bombeado na extremidade do Tê e CA era colocada na parte superior do Tê. No tubo de saída do biodigestor, conectou-se um joelho de 45° para se obter o caimento do digestato dentro da caixa de controle da vazão de alimentação do biodigestor.

Uma estrutura foi construída ao lado do biodigestor com um esteio e dois goivos de fibrocimento de 5 mm de espessura para suporte e proteção contra chuvas dos instrumentos de medição: um medidor de volume de gás, um termômetro com registro das temperaturas mínima, instantânea e máxima ambiente e do líquido do biodigestor e um manômetro tubo em "U".

O termômetro de monitoramento das temperaturas-ambiente e do líquido do biodigestor é da marca Incoterm, modelo 7427.02.0.00, alocado a aproximadamente 10 cm da cobertura da estrutura de suporte. Seu sensor externo foi instalado próximo à lateral do biodigestor e imerso a aproximadamente 30 cm da superfície do líquido. Também foi instalado um termômetro de mercúrio da marca Incoterm, modelo 5040, com o bulbo dentro da câmara de biogás do biodigestor. O biodigestor descrito acima é apresentado na

Figura 7.

**Figura 7** Biodigestor.

### 5.5 Condução do experimento

No período entre outubro de 2013 e setembro de 2014, o biodigestor feito com geomembrana de polietileno foi implantado em uma vala com geometria trapezoidal nas dimensões de 21,00 metros de comprimento, 3,20 metros de profundidade, 3,50 metros de largura maior, 1,90 metro de largura menor,  $0,25 \text{ m m}^{-1}$  de declividade e volume de  $180 \text{ m}^3$ . O revestimento da vala foi feito com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 1,00 milímetro de espessura e a cobertura com geomembrana de polietileno linear de baixa densidade (PELBD) de 1,25 milímetros de espessura.

Por motivos de vedação, problemas de instalação e soldagem da geomembrana de polietileno, optou-se por construir um biodigestor com caixas de fibra de vidro. Assim, em 02/12/2014, o processo de biodigestão anaeróbia foi iniciado com o abastecimento do biodigestor de fibra de vidro com  $3 \text{ m}^3$  de inóculo proveniente de biodigestor de dejetos de suínos e mais  $32 \text{ m}^3$  de CA diluída em água na concentração de 0,5% de sólidos totais voláteis (STV). A concentração de 5% (v/v) referente à adição de inóculo foi determinada em função da quantidade de inóculo que se conseguiu obter no município e o valor de 0,5% referente à adição de STV com CA foi determinado para se igualar a concentração do volume restante à da alimentação da primeira avaliação. Com isto, o volume útil do biodigestor resultou em  $35 \text{ m}^3$  e o volume total em  $40 \text{ m}^3$ .

A estabilização do biodigestor em cada tratamento foi obtida pelo aumento gradativo da carga orgânica na alimentação até a concentração avaliada para se obter

melhor adaptação dos microrganismos.

Os períodos de cada avaliação do biodigestor e os períodos de adaptação do biodigestor nas cargas orgânicas de alimentação estão apresentados na Tabela 1. Os detalhes de cada dia de alimentação do biodigestor estão apresentados nos anexos, Tabelas 10, 11, 12, 13 e 14.

**Tabela 1** Fases do trabalho e seus respectivos períodos

| Fases do trabalho                          | Período                 |
|--|-------------------------|
| Período inicial<br>(1 a 141 dias)          | 02/12/2014 a 22/04/2015 |
| Avaliação 1<br>(142 a 174 dias)            | 23/04/2015 a 25/05/2015 |
| Período de Adaptação 1<br>(175 a 209 dias) | 26/05/2015 a 29/06/2015 |
| Avaliação 2<br>(210 a 241 dias)            | 30/06/2015 a 31/07/2015 |
| Período de Adaptação 2<br>(242 a 261 dias) | 01/08/2015 a 20/08/2015 |
| Período final<br>(262 a 289 dias)          | 21/08/2015 a 17/09/2015 |

O biodigestor foi estabilizado de acordo com a produção de biogás e considerado como tal quando esteve sob controle estatístico de qualidade pelo gráfico de Shewhart de medidas individuais, com três desvios da média, construído no programa MINITAB 15. Previamente à construção do gráfico de controle de Shewhart, os requisitos foram testados em relação à variável de análise: normalidade pelo Teste de Anderson Darling (5% de significância), independência amostral pelo gráfico de autocorrelação amostral (5% de significância). A aleatoriedade amostral foi visualizada no próprio gráfico de Shewhart.

Dentre os critérios de verificação de padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle, apresentados por Montgomery (2009), foram escolhidos para determinação da estabilidade do processo: um ou mais valores fora dos limites de controle (três desvios da média); oito valores consecutivos, abaixo ou acima do limite médio de controle estatístico; seis valores em linha, constantemente aumentando ou diminuindo.

A relação entre a acidez volátil e a alcalinidade total ( $Av/At$ ) também foi monitorada para se obter melhor acompanhamento do processo biológico em relação ao potencial do biodigestor para suportar as cargas avaliadas.

O volume de alimentação do biodigestor foi fixado em  $3,5 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  e controlado por graduação volumétrica calibrada na caixa de controle de vazão. A alimentação do

biodigestor foi realizada em relação à quantidade de carga orgânica de STV de cada avaliação, conforme a Equação 5.

$$COA = \frac{[ ] \text{ STV (kg STV m}^{-3}\text{) } Q \text{ (m}^3 \text{ dia}^{-1}\text{)}}{V_{\text{biod.}} \text{ (m}^3\text{)}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que:

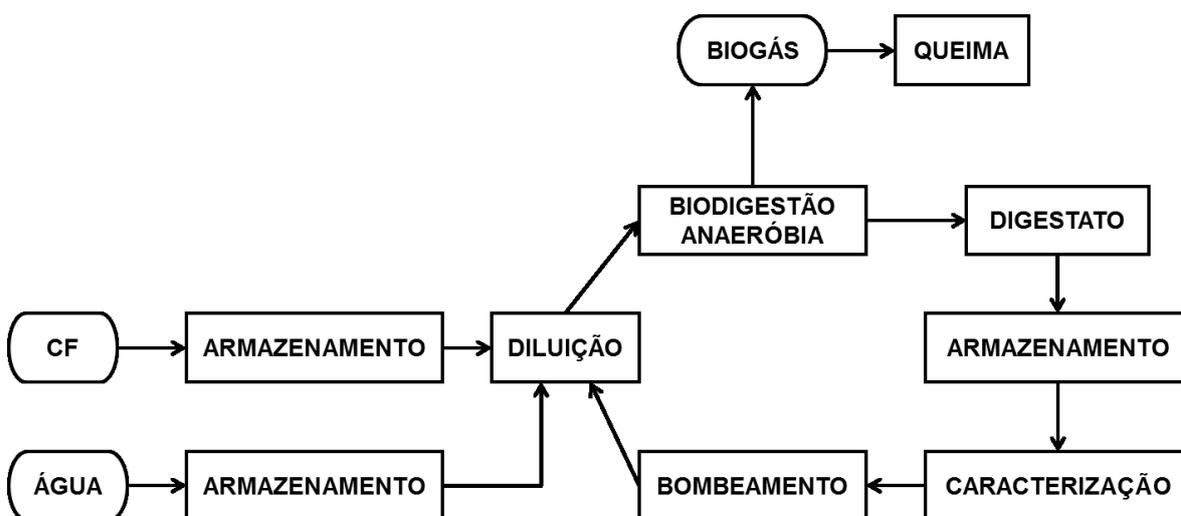
COA: Carga orgânica de alimentação (kg STV m<sup>-3</sup> biod.<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>);

[ ] STV: concentração de STV no afluente do biodigestor (kg STV m<sup>-3</sup>);

Q: volume de alimentação (m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>);

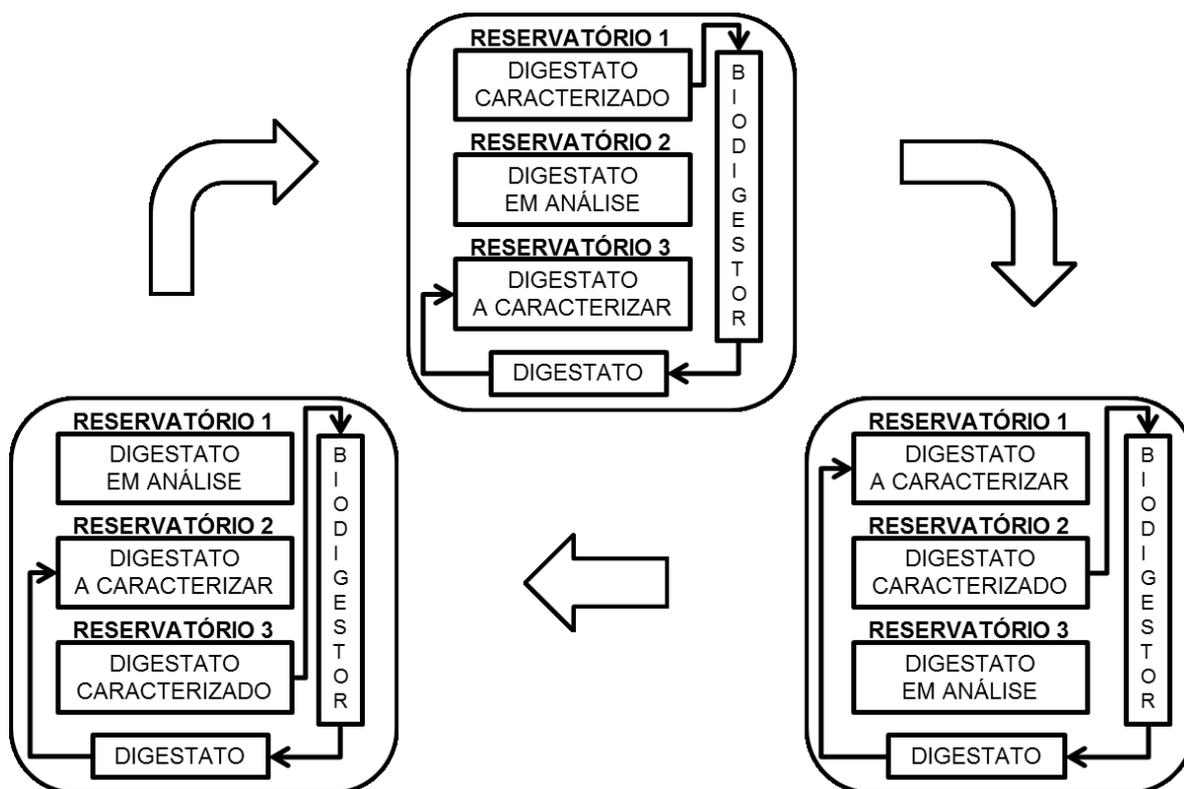
V<sub>biod.</sub>: volume do biodigestor (V<sub>biod.</sub>).

Nesse sistema, a CA do local amostrado era destorroada, pesada em sacos e colocada no tubo de entrada do biodigestor junto ao afluente. A quantidade de CA dependia do teor de STV do afluente para compor a carga orgânica de alimentação do biodigestor e, por isso, o digestato era armazenado para caracterização antes de ser reutilizado, de acordo com o fluxograma da Figura 8.



**Figura 8** Fluxograma do sistema de biodigestão anaeróbia.

O digestato do biodigestor foi caracterizado em triplicata diariamente quanto aos sólidos totais (ST), STV, pH, à condutividade elétrica; e a CA foi caracterizada em triplicata diariamente pelos teores de ST e STV. A amostragem da CA para caracterização foi realizada apenas em uma parte do monte da CA, relativamente à quantidade necessária para uma alimentação do biodigestor. A coleta do digestato para análise procedeu-se diretamente no tubo de saída do biodigestor durante a alimentação. Após dois dias de caracterização da CA e do digestato, o digestato era reutilizado como afluente junto a uma nova quantidade de CA, de acordo com o fluxograma da Figura 9.



**Figura 9** Fluxograma do reuso de digestato como afluente do biodigestor.

Periodicamente, o digestato armazenado nos reservatórios era agitado antes da alimentação para evitar o acúmulo de material no piso dos reservatórios.

O biodigestor foi estabilizado em duas cargas orgânicas de alimentação (0,5 e 1,0 kg STV  $m_{\text{biol.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ ), referentes à variável produção diária de biogás (variável de interesse), por 30 dias e em cada taxa de alimentação. No início do experimento e ao final de cada tratamento, o digestato gerado foi caracterizado quanto aos teores de NTK, P, K, Ca, Mg, Na, Mn, Cu, Zn, Fe, Pb e Cd.

Durante as avaliações, foram monitorados o pH e a condutividade elétrica do digestato, as temperaturas mínima, instantânea (durante a alimentação) e máxima do ambiente e do líquido do biodigestor e os percentuais de ST e STV consumidos. As medidas das temperaturas instantâneas foram efetuadas no início da alimentação do biodigestor.

O biogás também foi caracterizado em cada avaliação quanto aos teores de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) com o analisador de gás GEM 5000 Plus marca Landtec.

A análise da composição do biogás foi feita a partir de uma amostra de 20 L coletada em um amostrador de polietileno. O amostrador continha dois registros: um para a entrada e outro para a saída do biogás, o qual era saturado de biogás por sua circulação durante uma hora. A análise da composição do biogás procedia após 3,5 horas da coleta do biogás em função do tempo de transporte da amostra até o analisador Gem 5000 Plus.

A análise dos parâmetros físico-químicos seguiu as metodologias das fontes

descritas na Tabela 2.

**Tabela 2** Parâmetros e metodologias de monitoramento

| Parâmetros físico-químicos              | Metodologia                 |
|---|-----------------------------|
| Sólidos totais                          | Método 2540B (APHA, 1998)   |
| Sólidos totais voláteis                 | Método 2540E (APHA, 1998)   |
| Metais                                  | Método 3111A (APHA, 1998)   |
| Nitrogênio total Kjeldahl               | Método 4800C (APHA, 1998)   |
| pH, Acidez Volátil e Alcalinidade Total | (SILVA, 1977)               |
| Fósforo                                 | Método 4500P E (APHA, 1998) |

O volume de biogás produzido foi quantificado diariamente com medidor de gás marca LAO (modelo G 0,6) e corrigido para as Condições Padrão de Temperatura e Pressão (CPTP) de  $10^5$  Pa ou 1019,82 cm de coluna de água e 0 °C, conforme Equação 6. Na correção do volume de biogás, para a CPTP, foi utilizado o termômetro de marca IncoTerm, modelo 5040 e um manômetro tubo em “U” com coluna de água para as medidas do biogás. Também se padronizou o horário da leitura para depois da alimentação do biodigestor. A medida da pressão atmosférica local ( $P_{atm}$ ) diária foi cedida pelo Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR (2015).

$$V \text{ (CNTP)} = \frac{273}{273+T} \frac{P_{atm} + PW}{P_{padr\tilde{a}o}} V \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que:

T: temperatura do biogás (°C);

$P_{padr\tilde{a}o}$ : pressão padrão equivalente a 1019,82 cm c. a.;

$P_{atm}$ : pressão atmosférica local (cm C. A.);

PW: pressão do interior da câmara de biogás (cm c. a.);

V: volume de biogás diário (L).

A partir do teor de metano foi determinado o índice de viabilidade energética operacional médio do processo (IVEO): relação entre energia produzida na forma de metano pela energia consumida pela bomba de recirculação/agitação de digestato, de acordo com a Equação 7.

$$IVEO = \frac{P_{biog\tilde{a}s} \cdot [CH_4] \cdot \rho \cdot c}{H \cdot P} > 1 = \text{viável} \quad \text{Eq. (7)}$$

Em que:

IVEO: índice de viabilidade energética operacional médio;

$P_{biog\tilde{a}s}$ : produção média de biogás ( $m^3$  biogás  $dia^{-1}$ );

[CH<sub>4</sub>]: concentração média de metano, índice percentual (volume);

$\rho$ : poder calorífico inferior do metano ( $\text{CH}_4$ ), igual a  $50156 \text{ J g}^{-1} \text{ CH}_4^{-1}$  (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008);

H: número de horas diárias de funcionamento da motobomba ( $\text{h dia}^{-1}$ );

P: potência da bomba de recirculação de digestato em W ( $5 \text{ Hp} * 735,7 \text{ J s}^{-1} \text{ Hp}^{-1} = 3678,5 \text{ J s}^{-1}$ );

c: constante:  $[16 \text{ g CH}_4 \text{ mol}^{-1} * (1000 \text{ L m}^{-3} / 22,4 \text{ L mol}^{-1}) / 3600 \text{ s h}^{-1}] = 0,1984 \text{ g m}^{-3}$ .

Em seguida, o índice de capacidade do processo ( $C_{pl}$ ) de cada avaliação da biodigestão anaeróbia foi determinado, utilizando em seu cálculo o limite inferior de especificação igual à eficiência de produção de biogás ( $P_{\text{biogás}}$ ) equivalente a um IVEO igual a 1, conforme a Equação 8. Assim, para o cálculo de  $C_{pl}$ , o limite inferior de especificação ( $P_{\text{biogás}}$ ) foi determinado previamente pela Equação 9. Os valores da concentração de metano e das horas de funcionamento da motobomba foram respectivos de cada avaliação. Por fim, o  $C_{pl}$  foi relacionado com o IVEO a partir da tabela junto às classificações do processo.

$$C_{pl} = \frac{\bar{X} - \text{LIE}}{k \sigma} \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que:

$C_{pl}$ : índice de capacidade

$\bar{X}$ : média amostral;

LIE: limite inferior de especificação ( $\text{m}^3 \text{ biogás kg}^{-1} \text{STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ );

k: um número específico de desvios padrão amostral;

$\sigma$ : desvio padrão amostral da variável em estudo;

$$\text{LIE} = \frac{P_{\text{biogás}}}{\text{STV}_{\text{adicionados}}} = \frac{H * P}{1 * [\text{CH}_4] * \rho * c} \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que:

LIE: limite inferior de especificação ( $\text{m}^3 \text{ biogás kg}^{-1} \text{STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ );

$P_{\text{biogás}}$ : produção média de biogás ( $\text{m}^3 \text{ biogás dia}^{-1}$ );

$[\text{CH}_4]$ : concentração média de metano, índice percentual (volume);

$\rho$ : poder calorífico inferior do metano ( $\text{CH}_4$ ),  $50156 \text{ J g}^{-1} \text{ CH}_4^{-1}$  (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008);

H: número de horas diárias de funcionamento da motobomba ( $\text{h dia}^{-1}$ );

P: potência da bomba de recirculação de digestato em W ( $5 \text{ Hp} * 735,7 \text{ J s}^{-1} \text{ Hp}^{-1} = 3678,5 \text{ J s}^{-1}$ ).

c: constante:  $[16 \text{ g CH}_4 \text{ mol}^{-1} * (1000 \text{ L m}^{-3} / 22,4 \text{ L mol}^{-1}) / 3600 \text{ s h}^{-1}] = 0,1984 \text{ g m}^{-3}$ .

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização

A caracterização da CA, do IN e do digestato produzido é apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3** Caracterização química da cama de aviário, do inóculo e do digestato

|                         | <b>NTK</b> | <b>P</b>  | <b>K</b>     | <b>Ca</b> | <b>Mg</b> | <b>Na</b> |
|-------------------------|------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|                         |            |           | (g/100 g ST) |           |           |           |
| CA                      | 1,18       |           | 0,60         | 1,67      | 0,74      | 0,15      |
|                         |            |           | (ppm ST)     |           |           |           |
| IN                      | 4,89       |           | 3,17         | 4,35      | 2,12      | 1,17      |
| Digestato<br>(97 dias)  | 0,82       | 0,05      | 0,47         | 0,16      | 0,16      | 0,04      |
| Digestato<br>(171 dias) | 1,98       | 0,27      | 0,51         | 40,70     | 3,82      | 0,09      |
| Digestato<br>(245 dias) | 2,57       | 9,80      | 25,42        | 186,52    | 26,97     | 1,65      |
|                         | <b>Mn</b>  | <b>Cu</b> | <b>Zn</b>    | <b>Cd</b> | <b>Fe</b> | <b>Pb</b> |
|                         |            |           | (ppm ST)     |           |           |           |
| CA                      | 707,94     | 125,79    | 432,20       | 8,98      | 4169,56   | 40,87     |
| IN                      | 0,03       | 0,04      | 0,11         | 0,00      | 0,32      | 0,03      |
| Digestato<br>(97 dias)  | 0,00       |           | 0,00         |           | 0,00      |           |
| Digestato<br>(171 dias) | 0,00       | 0,00      | 0,01         | 0,00      | 0,01      | 0,00      |
| Digestato<br>(245 dias) | 0,07       | 0,01      | 0,13         | 0,00      | 0,73      | 0,00      |

De acordo com a Tabela 3 verificou-se o aumento no teor de nutrientes ao se relacionar com o período de operação do biodigestor, que se deve à reutilização do digestato na alimentação do biodigestor e ao aumento da carga orgânica de alimentação.

Digestatos anaeróbios têm sido identificados como uma rica fonte de nutrientes essenciais para as plantas (ALFA et al., 2014). Contudo, nesta pesquisa, o digestato produzido teve os maiores teores de macronutrientes, com destaque para o Cálcio, porém, sem expressar concentrações consideráveis, menos de 0,02%. O valor muito baixo de concentração de nutrientes no digestato indica que eles podem ter se depositado no fundo do biodigestor junto ao lodo, tornando o lodo rico em nutrientes, como explicam Wu et al. (2016): nutrientes, sais e metais não podem ser efetivamente removidos na biodigestão anaeróbia e esses podem se acumular intensamente durante a utilização em longo prazo do líquido do digestato por recirculação.

## 6.2 Monitoramento do processo

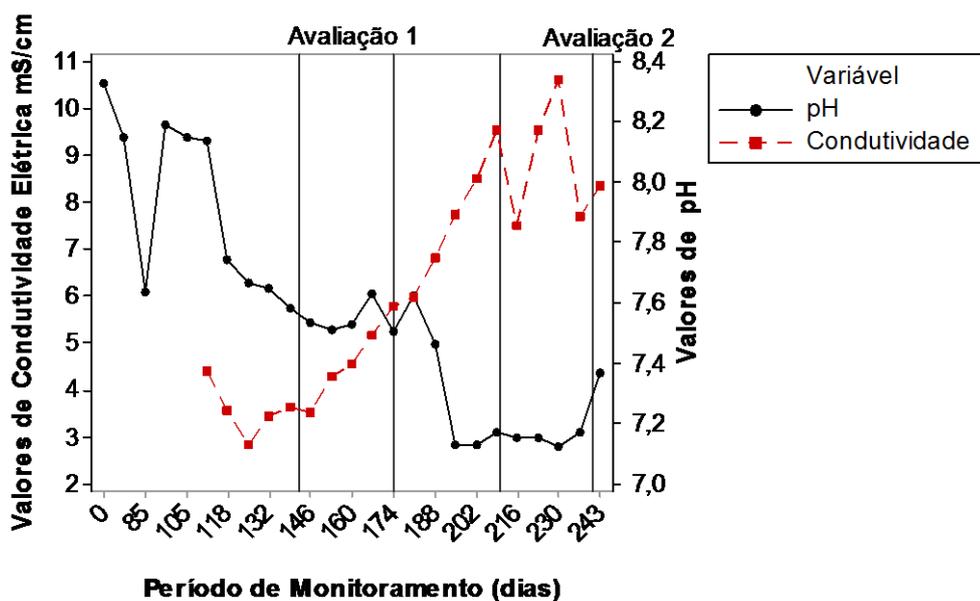
No presente estudo, verificou-se que a CA e o IN utilizados apresentavam diferenças de pH, Av/Ap (relação entre a acidez volátil e a alcalinidade parcial), Av/At (relação entre a acidez volátil e a alcalinidade total) e Ap/At (relação entre a alcalinidade parcial e a alcalinidade total). Porém, a diferença de pH entre a CA (6,76) e o IN (8,33) não causou choque de pH no biodigestor, pois o pH do digestato do biodigestor se manteve próximo ao do inóculo (acima de 8,15), desde o abastecimento do biodigestor até 78 dias de operação do biodigestor. As relações são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4** Valores de pH e relações Av/Ap, Av/At e Ap/At da cama de aviário (CA) e do inóculo (IN)

| Material | pH   | Av/Ap | Av/At | Ap/At |
|----------|------|-------|-------|-------|
| CA       | 6,76 | 5,29  | 0,39  | 0,07  |
| IN       | 8,33 | 0,24  | 0,09  | 0,38  |

Aos 85 dias de operação do biodigestor, o pH do digestato reduziu para 7,64. Entretanto, o pH aumentou para 8,15 novamente por um efeito tampão alcalino, no período entre 97 e 111 dias. Em seguida, o pH estabilizou-se na faixa entre 7,60 e 7,70 até o início da avaliação um (1), aos 142 dias.

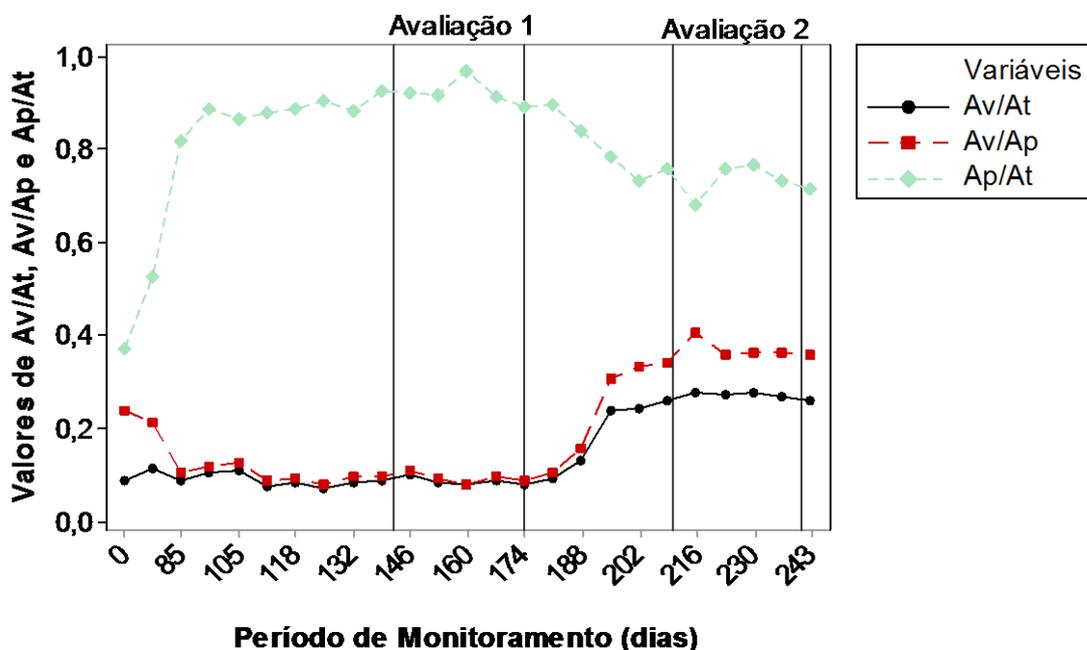
Houve uma tendência de redução do pH durante o monitoramento do biodigestor, com valores médios de pH em 7,54 e 7,15 durante as avaliações um e dois (1 e 2), respectivamente. Tal comportamento é apresentado na Figura 10. Ao contrário do pH, a condutividade elétrica do digestato tendeu a aumentar até o início da avaliação dois (2), quando oscilou entre 7,55 a 7,81 mS cm<sup>-1</sup>. O aumento da condutividade elétrica deve-se ao acúmulo de sais pela recirculação do digestato no biodigestor em seu reuso como afluente.



**Figura 10** Valores de pH e condutividade elétrica do digestato do biodigestor.

Valores muito próximos às relações  $Av/Ap$  e  $Av/At$  foram obtidos entre 85 e 188 dias devido à alcalinidade parcial representar aproximadamente 90% da alcalinidade total neste período, conforme apresentado na Figura 11.

Durante os 113 dias iniciais, o biodigestor foi operado com aumento gradativo de sua taxa de alimentação até atingir  $0,5 \text{ kg STV m}_{\text{biol.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ , entretanto, a produção de metano ocorreu somente aos 135 dias de operação do biodigestor.

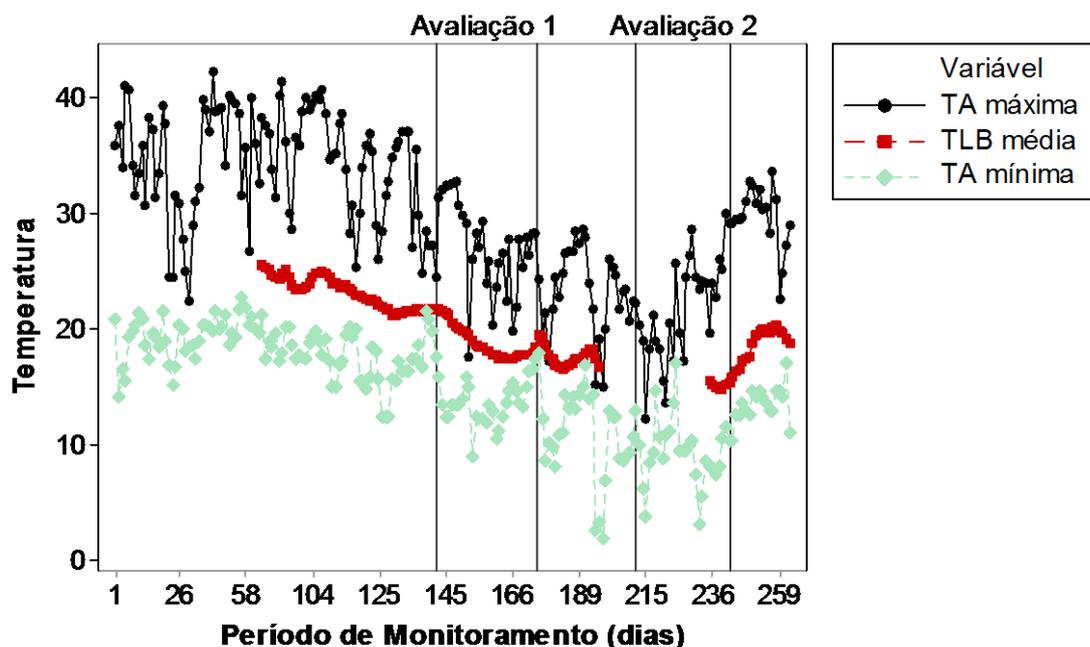


**Figura 11** Valores das relações  $Av/At$ ,  $Av/Ap$  e  $Ap/At$  do digestato do biodigestor.

As três relações apresentaram menores oscilações no período da avaliação um (1) e da avaliação dois (2). Tal fato indica um processo estabilizado durante as avaliações e oscilações maiores nos índices durante o aumento gradativo da carga orgânica de alimentação. Apesar das oscilações nos índices apresentados, houve pequena faixa de variação em seus valores, o que indica pouca expressividade em suas respostas, se utilizados na avaliação da estabilidade da biodigestão anaeróbia.

Nesta pesquisa, a alimentação do biodigestor foi sempre no primeiro horário do dia, próximo das 8 horas da manhã, para que fossem possíveis todas as análises diárias do digestato do biodigestor em laboratório após operar o biodigestor e coletar as amostras de digestato e CA.

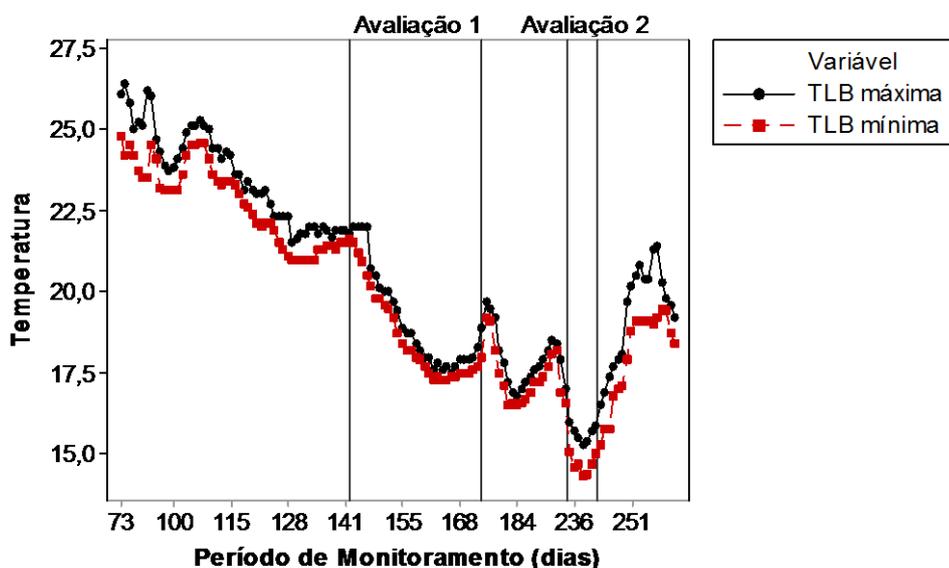
Em função do horário de alimentação e das áreas de sombra do biodigestor no decorrer do dia, a temperatura média do líquido do biodigestor comportou-se pouco abaixo da média, entre a temperatura máxima e a mínima do ambiente externo ao biodigestor, conforme apresentado na Figura 12.



Variáveis: Temperatura do Líquido do Biodigestor (TLB) e Temperatura Ambiente (TA)

**Figura 12** Valores de temperatura média do líquido do biodigestor e de temperatura máxima e mínima ambiente.

Houve uma pequena amplitude entre os valores de temperatura máxima e mínima do líquido do biodigestor diariamente, o que comprovou boa estabilidade térmica diária da biodigestão anaeróbia. O modelo do biodigestor favoreceu manter a temperatura do líquido do biodigestor, pois a temperatura local tinha variação diária próxima de 20 °C. A estabilidade térmica diária também comprova que não houve impacto térmico pela alimentação do biodigestor. Apenas a sazonalidade influenciou em variações maiores na temperatura do líquido do biodigestor, conforme apresentado na Figura 13.



Variável: Temperatura do Líquido do Biodigestor (TLB)

**Figura 13** Valores de temperatura máxima e mínima do líquido do biodigestor.

### 6.3 Estabilidade

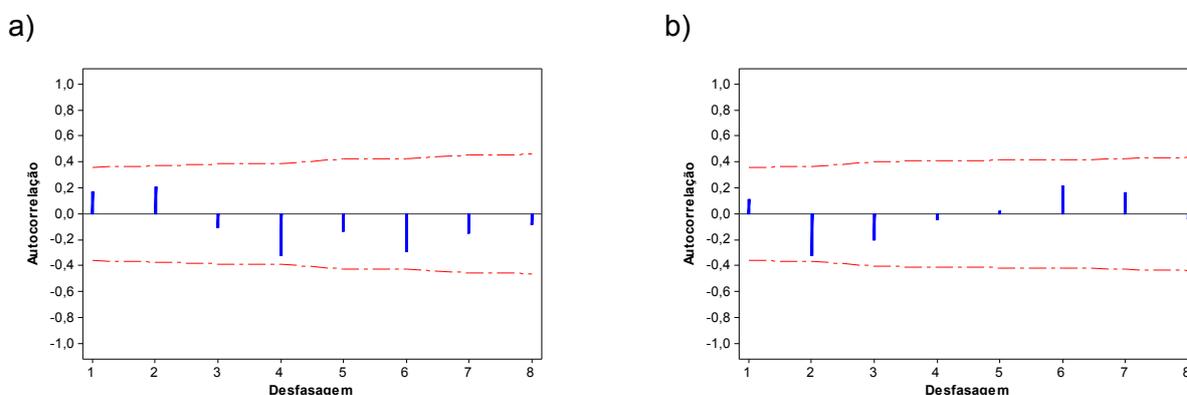
A verificação da estabilidade do biodigestor em cada período de avaliação pelo gráfico de Shewhart de medidas individuais se iniciou pela análise das premissas normalidade, independência e aleatoriedade da variável de avaliação: produção de biogás.

Os valores avaliados apresentam distribuição normal pelo teste de Anderson Darling ao nível de 5% de significância ( $\beta$ ), pois o p-valor de cada avaliação é maior do que 0,05, conforme a Tabela 5.

**Tabela 5** Teste de normalidade de Anderson Darling dos valores da eficiência de produção de biogás ( $\text{m}^3 \text{ biogás kg}^{-1} \text{ STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ ) dos períodos de avaliação com 5% de significância

| Tratamentos   | p-valor |
|---|---------|
| Avaliação 1 ( $0,5 \text{ kg STV m}_{\text{biod.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ ) | 0,966   |
| Avaliação 2 ( $1,0 \text{ kg STV m}_{\text{biod.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ ) | 0,192   |

A independência dos valores de produção de biogás das avaliações um e dois (1 e 2) foi visualizada nos gráficos da função de autocorrelação amostral, apresentados nas Figuras 14-a e 14-b, respectivamente, em que os coeficientes de autocorrelação amostral das avaliações não excedem os limites de dois desvios padrões (linhas tracejadas).

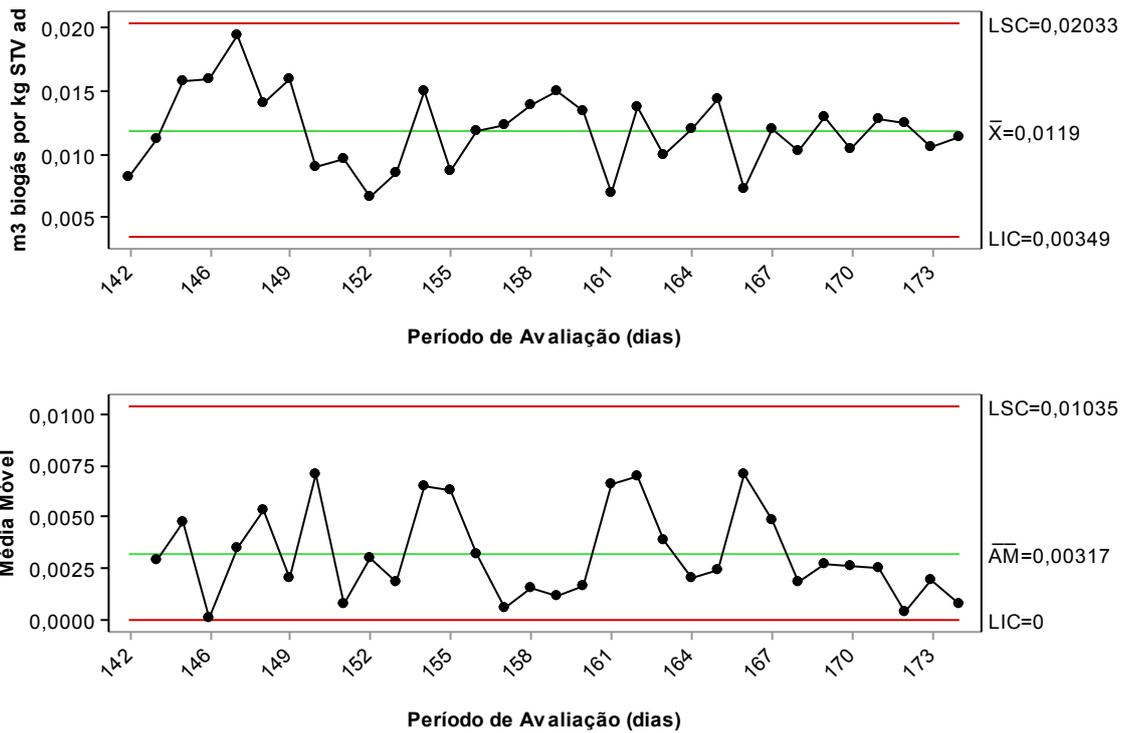


**Figura 14** Gráfico de autocorrelação amostral da eficiência de produção de biogás ( $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ ): a) período referente à avaliação 1 ( $0,5 \text{ kg STV m}_{\text{biod.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ ); b) período referente à avaliação 2 ( $1,0 \text{ kg STV m}_{\text{biod.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ ).

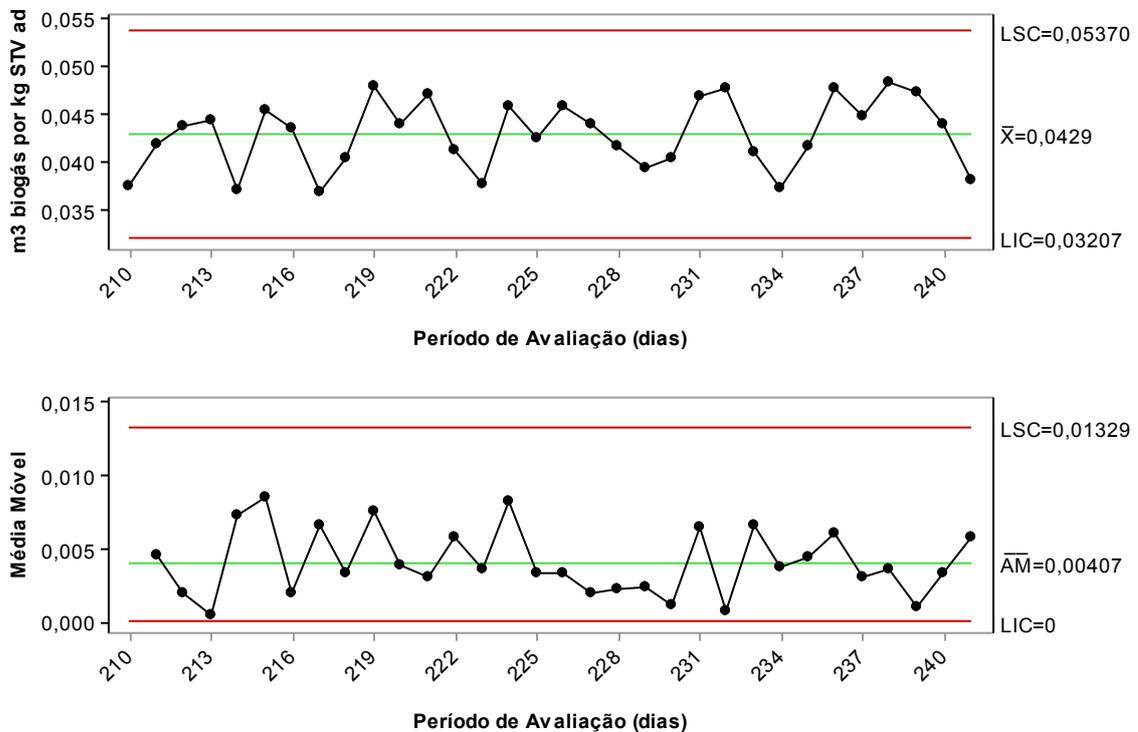
A premissa de aleatoriedade dos valores avaliados é suposta como verdadeira devido à coleta das amostras ter sido realizada em instantes aleatórios de tempo durante a alimentação do biodigestor. No entanto, é possível confirmar a premissa de aleatoriedade pelo gráfico de Shewhart com a verificação de valores sem tendências e oscilantes em torno da média.

Os valores diários observados de produção de biogás atenderam às suposições estatísticas e por isso os gráficos de Shewhart foram construídos para a verificação da

estabilidade do biodigestor, conforme apresentado nas Figuras 15 e 16.



**Figura 15** Produção de biogás ( $m^3$  biogás  $kg^{-1}$   $STV_{adicionado}^{-1}$ ) do período referente à avaliação 1.



**Figura 16** Produção de biogás ( $m^3$  biogás  $kg^{-1}$   $STV_{adicionado}^{-1}$ ) do período referente à avaliação 2.

Os gráficos de Shewhart em relação à produção diária de biogás por STV adicionados não apresentam padrão de não aleatoriedade, portanto, o processo se

encontrava estabilizado nos períodos de avaliação do biodigestor.

#### **6.4 Produção de biogás**

A produção e a composição do biogás foram analisadas em cada período da operação para que se determinasse a quantidade de metano produzida e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** Teor de metano (CH<sub>4</sub>), gás carbônico (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), oxigênio (O<sub>2</sub>) e outros gases em amostras de biogás dos períodos de monitoramento

| Período                           | Data da análise | Marca   | CH <sub>4</sub><br>(%) | CO <sub>2</sub><br>(%) | CO<br>(ppm) | H <sub>2</sub> S<br>(%) | O <sub>2</sub><br>(%) | Gases não<br>identificados (%) |
|-----------------------------------|-----------------|---------|------------------------|------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Avaliação 1<br>(142 a 174 dias)   | 28/05/2015      | LANDTEC | 49,25                  | 6,95                   | 2,00        | 0,02                    |                       | 43,78                          |
| Período de Adaptação 1            | 24/06/2015      | LANDTEC | 56,00                  | 20,10                  | 5,00        | 0,22                    | 4,00                  | 19,68                          |
| Avaliação 2<br>(210 a 241 dias)   | 01/07/2015      | LANDTEC | 42,40                  | 27,60                  | 5,00        | 0,41                    | 4,10                  | 25,49                          |
| Período de Adaptação 2            | 07/08/2015      | LANDTEC | 57,10                  | 27,90                  | 7,00        | 0,00                    | 2,15                  | 12,85                          |
| Período final<br>(262 a 289 dias) | 25/08/2015      | LANDTEC | 69,30                  | 29,47                  | 1,67        | 0,00                    | 0,50                  | 0,73                           |

No período de adaptação 2, o digestato começou a ficar pastoso e as configurações físicas do biodigestor não suportaram continuar a operação sem a retirada parcial do lodo. Em todos os períodos monitorados, o tempo de uso da motobomba aumentou em 15,56 minutos na avaliação um (1) e em 23,40 minutos na avaliação dois (2), durante a alimentação do biodigestor. Por isso, foi necessário agitar o afluente e bombeá-lo para o biodigestor, porém, no período final, o aumento do tempo de agitação foi muito intenso (50 min) e a motobomba não trabalhava mais adequadamente. Por esse motivo, além da redução do fluxo de bombeamento da alimentação do biodigestor, não se conseguiu mais operar o biodigestor no período final e a produção de biogás reduziu até estagnar aos 289 dias de operação do biodigestor.

A concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ) diminuiu em 13,60% com o aumento de carga orgânica da avaliação um (1) para a avaliação dois (2). No período de adaptação um (1), a concentração de metano aumentou junto com o aumento de carga orgânica de alimentação, porém, foi somente até a produção de biogás se estabilizar em um teor menor de metano (avaliação dois (2)). No período de adaptação dois (2) e no período final, a concentração de metano, no biogás, aumentou pelo acúmulo de material orgânico no biodigestor.

A eficiência média de produção de biogás da biodigestão anaeróbia obtida a partir do gráfico de Shewhart foi comparada com a eficiência alcançada por outros pesquisadores na Tabela 7.

**Tabela 7** Eficiência de produção de biogás e de metano do presente estudo e de outras pesquisas

| <b>Autor</b>      | <b>Biodigestor</b>             | <b>Tratamento</b>  | <b>Material</b>                | <b>m<sup>3</sup> biogás<br/>kg<sup>-1</sup> STV<sup>-1</sup><sub>adicionado</sub></b> | <b>m<sup>3</sup> metano<br/>kg<sup>-1</sup> STV<sup>-1</sup><sub>adicionados</sub></b> |
|-------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|---|--|
| Presente estudo   | Mistura completa               | Avaliação 1  | Cama de aviário e digestato    | 0,0119  | 0,0059   |
| Presente estudo   | Mistura completa               | Avaliação 2  | Cama de aviário e digestato    | 0,0429  | 0,0182   |
| Augusto (2011)    | Batelada - 10 L - 50 dias      | Tratamento 1 –<br>4 a 6% ST <sub>adicionados</sub>                                 | Cama de Aviário                | 0,0185  |  |
| Rao et al. (2013) | Alta taxa e auto<br>misturador | 4 kg STV m <sub>biod.</sub> <sup>-3</sup> dia <sup>-1</sup> e<br>TRH de 24 dias    | Cama de Aviário e<br>digestato | 0,23  | 0,15   |
| Rao et al. (2013) | Convencional de cúpula<br>fixa | 2,15 kg STV m <sub>biod.</sub> <sup>-3</sup> dia <sup>-1</sup> e<br>TRH de 40 dias | Cama de Aviário e<br>digestato | 0,128   | 0,083  |

A avaliação dois (2) do presente estudo destacou-se comparativamente à avaliação um (1) pela produção de  $0,0429\text{m}^3$  biogás  $\text{kg}^{-1}$   $\text{STV}^{-1}_{\text{adicionado}}$  e  $0,0182\text{ m}^3$  metano  $\text{kg}^{-1}$   $\text{STV}^{-1}_{\text{adicionado}}$ , respectivamente. No entanto, o trabalho de RAO (2013), Tabela 7, obteve maior produção de biogás por avaliar uma elevada taxa de alimentação. Neste contexto, ressalta-se a importância de mais estudos sobre a biodigestão anaeróbia que avaliem elevadas cargas orgânicas de alimentação em baixos TRH e que utilizem mecanismos de diluição da CA no afluente, visando aumentar o limite da configuração física do biodigestor (assoreamento do biodigestor com lodo).

## 6.5 IVEO e índices de capacidade do processo

De acordo com os resultados obtidos, o IVEO de cada avaliação foi calculado e resultou que as duas avaliações são viáveis. Porém, a avaliação dois (2) destacou-se com a produção de energia na forma de metano 4,41 vezes maior que a energia elétrica gasta nas operações do sistema de tratamento com a motobomba. A avaliação um (1) foi classificada como viável, entretanto, a energia produzida na forma de metano foi pouco maior que a energia operacional. O IVEO e seus respectivos valores utilizados no cálculo para cada tratamento estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** Índice de viabilidade energética operacional médio (IVEO)

| Tratamento  | $P_{\text{biogás}}$ ( $\text{m}^3$ biogás $\text{dia}^{-1}$ ) | [ ] $\text{CH}_4$ (%) | H (h) | IVEO |
|-------------|---|-----------------------|-------|------|
| Avaliação 1 | 0,2084  | 49,25                 | 0,26  | 1,07 |
| Avaliação 2 | 1,5010  | 42,40                 | 0,39  | 4,41 |

O índice  $C_{\text{pl}}$  do processo foi estimado com limite inferior de especificação (LIE) calculado para o IVEO igual a um (1) para relacionar o limite de especificação com o limite do IVEO. Segundo Montgomery (2009), um processo considerado novo, como uma pesquisa sobre biodigestão anaeróbia, é capaz se seu índice de capacidade  $C_{\text{pl}}$  for maior que 1,45. Com isto, os índices  $C_{\text{pl}}$  e IVEO foram relacionados na Tabela 9 com as respectivas classificações.

**Tabela 9**  $C_{\text{pl}}$  versus IVEO

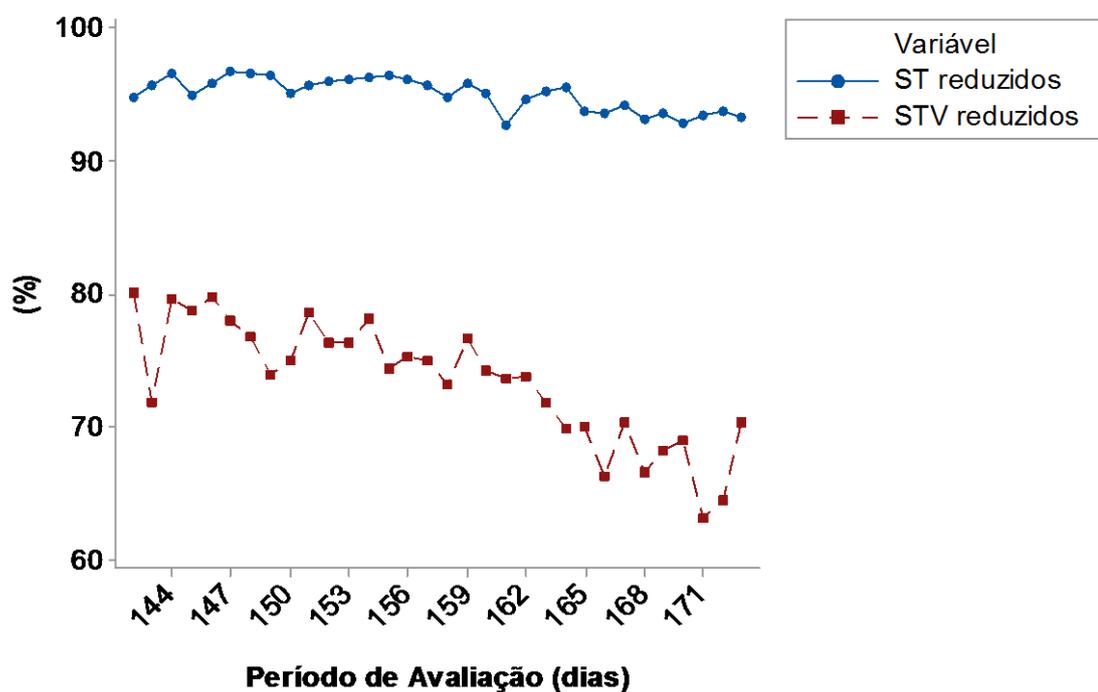
| Tratamento  | LIE<br>( $\text{m}^3$ biogás $\text{kg}^{-1}$ $\text{STV}_{\text{adicionado}}^{-1}$ ) | IVEO | Classificação | $C_{\text{pl}}$ | Classificação |
|-------------|---|------|---------------|-----------------|---------------|
| Avaliação 1 | 0,0112  | 1,07 | viável        | 0,08            | não capaz     |
| Avaliação 2 | 0,0097  | 4,41 | Viável        | 3,07            | capaz         |

## 6.6 Remoção de sólidos

No período da avaliação 1, o biodigestor removeu em média 95% e 73% de ST e STV, respectivamente, conforme apresentado na Figura 17. O elevado valor de remoção de

ST pode ser atribuído pela fração sólida da CA que tenha sedimentado no fundo do biodigestor e não devido ao efeito tratamento. Este fato proporcionou considerar os  $STV_{adicionados}$  no divisor da relação da análise da eficiência de produção de biogás ao invés de os STV removidos.

Farias et al. (2012) avaliaram a biodigestão anaeróbia de dejetos de poedeiras de 1 a 22 dias de acúmulo em um biodigestor batelada e, independente do tratamento testado, a eficiência de redução de STV entre 59,9 e 74,9%. Também comentam que esses valores podem ser considerados elevados e não correspondentes à produção de biogás, devido à fração sólida dos dejetos de aves sedimentar rapidamente no biodigestor e sua determinação estar sempre sujeita a ser subestimada.



**Figura 17** Valores de ST e STV reduzidos referente à avaliação 1.

Os valores médios de remoção de ST e STV durante a avaliação dois (2) foram 84% e 43%, respectivamente, conforme apresentado na Figura 18. No entanto, a baixa remoção de sólidos da avaliação dois (2) pode não ser correspondente direta à avaliação, pela deposição de material no biodigestor, visto que o biodigestor se encontrou cheio de lodo e inoperante depois de mais 21 dias após a avaliação dois.

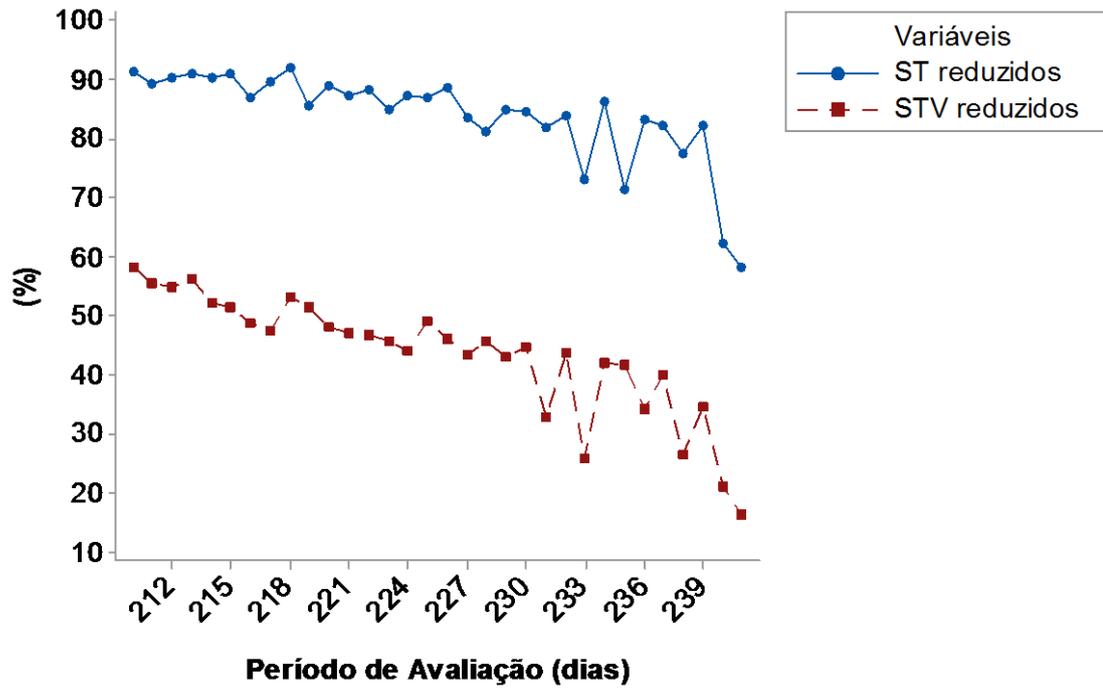


Figura 18 Valores de ST e STV reduzidos referentes à avaliação dois.

## 7 CONCLUSÕES

A biodigestão anaeróbia apresentou-se com potencial energético na avaliação dois (2) com produção de energia na forma de metano 4,41 vezes maior que a energia elétrica operacional.

No período da avaliação dois (2), o processo de biodigestão anaeróbia da cama de aviário foi classificado como viável em suas operações energéticas pelo IVEO e capaz pelo índice de capacidade de processo ( $C_{pi}$ ) e, no período da avaliação um (1), o processo foi classificado como viável e não capaz.

As maiores produções de biogás e de metano obtidas durante a avaliação dois (2) ( $1,0 \text{ kg STV m}_{\text{biod.}}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ ) foram de  $0,0429 \text{ m}^3 \text{ biogás kg}^{-1} \text{ STV}^{-1}_{\text{adicionado}}$  e de  $0,0182 \text{ m}^3 \text{ metano kg}^{-1} \text{ STV}^{-1}_{\text{adicionado}}$ .

O gráfico de Shewhart apresentou eficácia na verificação da estabilidade operacional da biodigestão anaeróbia em função de seus critérios e permitiu obter uma média representativa de produção de biogás em cada avaliação.

O digestato produzido não se caracterizou como um biofertilizante adequado para as culturas por ter baixo teor de nutrientes.

Os valores das relações  $Av/At$ ,  $Av/Ap$  e  $Ap/At$  indicaram quando houve aumento da taxa de alimentação no processo, porém de maneira pouco expressiva.

Houve uma tendência de redução do pH durante a operação do biodigestor, porém não foram encontrados valores menores que 7,00.

Não houve indicativos de inibição do processo pelo aumento da condutividade elétrica.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, N.; ZAFAR, R. F.; RIAZ, M.; HUSSAIN, Z. Progressive Mean Control Chart for Monitoring Process Location Parameter. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 29, p. 357-367, 2013.

ABBASSI-GUENDOUZ, A.; BROCKMANN, D.; TRABLY, E.; DUMAS, C.; DELGENÈS, J.; STEYER, J.; ESCUDIÉ, R. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 55-61, 2012.

ABDOLSHAH, M.; YUSUFF, R. M.; HONG, T. S.; ISMAIL, M. Y. B. SADIGH, A. N. Measuring process capability index  $C_{pmk}$  with fuzzy data and compare it with other fuzzy process capability indices. **Expert Systems with applications**, v. 38, p. 6452-6457, 2011.

ABOULENIEN, F.; FUJIWARA, W.; NAMBA, Y.; KOSSEVA, M.; NISHIO, N.; NAKASHIMADA, Y. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 6368-6373, 2010.

ÁCS, N.; KOVÁCS, E.; WIRTH, R.; BAGI, Z.; STRANG, Z.; HERBEL, Z.; RÁKHELY, G.; KÓVACS, K. L. Changes in the Archaea microbial community when the biogas fermenters are fed with protein-rich substrates. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 121-127, 2013.

ADU-GYAMFI, N.; RAVELLA, S. R.; HOBBS, P. J. Optimizing anaerobic digestion by selection of the immobilizing surface for enhanced methane production. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 248-255, 2012.

ALCANTARA, M. S. **Avaliação de biodigestor tubular na degradação anaeróbia de cama de frango de corte**. 2012. 27 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.

ALFA, M. I.; ADIE, D. B.; IGBORO, S. B.; ORANUSI, U. S.; DAHUNSI, S. O.; AKALI, D. M. Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. **Renewable Energy**, v. 63, p. 681-686, 2014.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: American Public Health Association, 1998.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principle and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, Rio de Janeiro, v. 34, p. 755-781, 2008.

AUGUSTO, K. V. Z. **Tratamento e reuso do efluente de biodigestores no processo de biodigestão anaeróbia da cama de frango**. 2011. 72 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola em Água e Solo) – Universidade Estadual de Campinas, 2011.

AUGUSTO, K. V. Z. **Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos em sistemas de produção de ovos: compostagem e biodigestão anaeróbia**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, 2007.

AYMERICH, E.; ESTEBAN-GUTIÉRREZ, M.; SANCHO, L. Analysis of the stability of high-solids anaerobic digestion of agro-industrial waste and sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 107-114, 2013.

BERNHART, M.; FASINA, O. O.; FULTON, J.; WOOD, C. W. Compaction of poultry litter. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 234-238, 2010.

BOLAN, N. S.; SZOGI, A. A.; CHUASAVATHI, T.; SESHADRI, B.; ROTHROCK JR., M. J.; PANNEERSELVAM, P. Uses and management of poultry litter. **World's Poultry Science Journal**, v. 66, p. 673-698, dez. 2010.

BOLLON, J.; BENBELKACEM, H.; GOURDON, R.; BUFFIÈRE, P. Measurement of diffusion coefficients in dry anaerobic digestion media. **Chemical Engineering Science**, v. 89, p. 115-119, 2013.

BOONAPATCHAROEN, N.; MEEPIAN, K.; CHAIPRASERT, P.; TECHKARNJANARUK, S. Molecular monitoring of microbial population dynamics during operational periods of anaerobic hybrid reactor treating cassava starch wastewater. **Microbial Ecology**, v. 54, n. 1, p. 21-30, 2007.

BOTHEJU, D. e BAKKE, R. Oxygen Effects in Anaerobic Digestion – A Review. **The Open Waste Management Journal**, v. 4, p. 1-19, 2011.

BROWN, D.; SHI, J.; LI, Y. Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 379-386, 2012.

CAMARGO, M. E.; GASSEN, I. M.; CEREZER, M. A. de O.; ROSSO, S. L. Controle de qualidade de processo: uma combinação híbrida de redes neurais e lógica fuzzy para a construção de cartas de controle. **Revista Gestão, Inovação e Tecnologias**, v. 2, n. 2, p. 108-119, 2012.

CATA-SAADY, N. M.; MASSÉ, D. I. Psychrophilic anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: A characterization study. **Bioresource Technology**, v. 142, p. 663-671, 2013.

CESTONARO, T. **Adição de dejetos de bovinos de corte em processos biológicos de estabilização de cama de ovinos**. 2013. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4044-4064, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbio**. 5a. Ed. Belo Horizonte: EdUFMG, 2007.

CHRISTINO, E. M.; BONDUELLE, G. M.; IWAKIRI, S. Aplicação de cartas de controle no processo de fabricação de pisos sólidos de tauari (*Couratari oblongifolia*). **Cerne**, v. 16, n. 3, p. 299-304, 2010.

COSTA, J. C.; BARBOSA, S. G.; ALVES, M. M.; SOUZA, D. Z. Thermochemical pre- and biological co-treatments to improve hydrolysis and methane production from poultry litter. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 141-147, 2012.

CYSNEIROS, D.; BANKS, C. J.; HEAVEN, S.; KARATZAS, K. G. The role of phase separation and feed cycle length in leach beds coupled to methanogenic reactors for digestion of a solid substrate (Part 2): Hydrolysis, acidification and methanogenesis in a two-phase system. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 7393-7400, 2011.

DÍAZ, I.; PÉREZ, S. I.; FERRERO, E. M.; FDZ-POLANCO, M. Effect of oxygen dosing point and mixing on the microaerobic removal of hydrogen sulphide in sludge digesters. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 3768-3775, 2011.

DONOSO-BRAVO, A.; MAILIER, J.; MARTIN, C.; RODRÍGUEZ, J.; ACEVEZ-LARA, C. A.; VOUWER, A. V. Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review. **Water Research**, v. 45, p. 5347-5364, 2011.

EBADI, M.; SHAHRIARI, H. A capability index for simple linear profile. **International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, p. 857-865, 2013.

ELLERSDORFER, M.; WEIß, C. Integration of biogas plants in the building materials industry. **Renewable Energy** (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.056>

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. In: Production – livestock primary. **Banco de dados FAOSTAT**. 2015. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

FARIAS R. M. de; ORRICO JUNIOR, M. A. P.; AMORIM ORRICO, A. C.; GARCIA, R. G.; CENTURION, S. R.; MENDES FERNANDES, A. R. Biodigestão anaeróbia de dejetos de poedeiras coletados após diferentes períodos de acúmulo. **Ciência Rural**, v. 42, n. 6, p. 1089-1094, 2012.

GASCH, C.; HILDEBRANDT, I.; REBBE, F.; RÖSKE, I. Enzymatic monitoring and control of a two-phase batch digesting system with integrated anaerobic filter. **Energy, Sustainability and Society**, v. 3, n. 10, p. 1-11, 2013.

GAWEL, R. A. Design simulations for a biogas purification process using aqueous amine solutions. **Chemical Papers**, v. 66, n. 11, p. 1010-1018, 2012.

GOOGLE EARTH 7.1.1.1888: imagem de satélite. United States: Departamento de Geografia do Estado. 2013. Data da imagem: 06/06/2010.

GONÇALEZ, P. U.; WERNER, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 1, p. 121-132, 2009.

GOULDING, D.; POWER, N. Which is the preferable biogas utilisation technology for anaerobic digestion of agricultural crops in Ireland: Biogas to CHP or biomethane as a transport fuel? **Renewable Energy**, v. 53, p. 121-131, 2013.

GUO, M.; TONGTAVEE, N.; LABREVEUX, M. Nutrient dynamics of field-weathered Delmarva poultry litter: implications for land application. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 45, n. 8, p. 829-838, 2009.

HACHICHA, W; GHORBEL, A. A survey of control-chart pattern-recognition literature (1991-2010) based on a new conceptual classification scheme. **Computers & Industrial Engineering**, v. 63, p. 204-222, 2012.

HASSAN, A. N.; NELSON†, B. K. Invited review: anaerobic fermentation of dairy food wastewater. **American Dairy Science Association**, v. 95, p. 6188-6203, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. In: Pesquisa Trimestral de abate de animais - Resultados Mensais. **Banco de dados SIDRA**. 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

JAIN, J.; SHARMA, M. P. Power generation from MSW of Haridwar city: A feasibility study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 69-90, 2011.

JIANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS, C. J. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. **Renewable Energy**, v. 44, p. 206-214, 2012.

KACPRZAK, A.; KRZYTEK, L.; LEDAKOWICZ, S. L. Co-digestion of agricultural and industrial wastes. **Chemical Papers**, v. 64, n. 2, p. 127-131, 2010.

KLEEREBEZEM, R.; JOOSSE, B.; ROZENDAL, R.; LOOSDRECHT, M. C. M. V. Anaerobic digestion without biogás? **Rev Environ Sci Biotechnol**, v. 14, p. 787-801, 2015.

KRISHANIA, M.; KUMAR, V.; VIJAY, V. K.; MALIK, A. Analysis of different techniques used for improvement of biomethanation process: A review. **Fuel**, v. 106, p. 1-9, 2013.

LABATUT, R. A.; ANGENENT, L. T.; SCOTT, N. R. Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: A trade-off between performance and stability? **Water Research**, v. 53, p. 249-258, 2014.

LANGE, T. Highly selective polymer membranes purify biogas. **Filtration+Separation**, v. 49, n. 1, p. 32-33, 2012.

LEE, T.; HUANG, S.; CHEN, C. The experimental study on biogas power generation enhanced by using waste heat to preheat inlet gases. **Renewable Energy**, v. 50, p. 342-347, 2013.

LIGUORI, R.; AMORE, A.; FARACO, V. Waste valorization by biotechnological conversion into added value products. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, p. 6129-6147, 2013.

LOPES da SILVA, W. T. L. da; NOVAES, A. P. de; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. de A.; MAGNONI JÚNIOR, L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Química Nova**, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2012.

LYNCH, D.; HEN HAN, A. M.; BOWEN, B.; LYNCH, D.; McDONNELL, K.; KWAPINSKI, W.; LEAHY, J. J. Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. **Biomass and Bioenergy**, v. 49, p. 197-204, 2013.

MACHADO, M. A. G.; MAGALHÃES, M. S. de; COSTA, A. F. B. Gráfico de controle de VMAX para o monitoramento da matriz de covariâncias. **Produção**, v. 18, n. 2, p. 222-239, 2008.

MAICZUK, J.; ANDRADE JÚNIOR, P. P. Aplicação de ferramentas de melhoria de qualidade e produtividade nos processos produtivos: um estudo de caso. **Qualit@s Revista Eletrônica**, v. 14, n. 1, p. 1-14, 2013.

MARTÍN-GONZALEZ, L.; FONT, X.; VICENT, T. Alkalinity ratios to identify process imbalances in anaerobic digesters treating source-sorted organic fraction of municipal wastes. **Biochemical Engineering Journal**, v. 76, p. 1-5, 2013.

MERLIN, G.; KOHLER, F.; BOUVIER, M.; LISSOLO, T.; BOILEAU, H. Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 59-67, 2012.

MÉNDEZ-ACOSTA, H. O.; PALACIOS-RUIZ, B.; ALCARAZ-GONZÁLEZ, V.; GONZÁLEZ-ÁLVAREZ, V.; GARCÍA-SANDOVAL, J. P. A robust control scheme to improve the stability of anaerobic digestion processes. **Journal of Process Control**, v. 20, p. 375-383, 2010.

MINGOTI, S. A.; YASSUKAWA, F. R. S. Uma comparação de gráficos de controle para a média de processos autocorrelacionados. **Sistemas & Gestão**, v. 3, n. 1, p. 55-73, 2008.

MINITAB. Minitab for Windows - version 15.0. PA, USA: State College: Programa estatístico.

MOJIRI, A.; AZIZ, H. A.; ZAMAN, N. Q.; AZIZ, S. Q. A review on anaerobic digestion, bio-reactor and nitrogen removal from wastewater and landfill leachate by bio-reactor. **Advances in Environmental Biology**, v. 6, n. 7, p. 2143-2150, 2012.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**, 6. ed., E.U.A.: Elm Street Publishing Services, 2009.

NASIR, I. M.; GHAZI, T. I. M.; OMAR, R. Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 95, p. 321-329, 2012.

NOMELINE, Q. S. S.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. de. Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle de Shewhart: um enfoque probabilístico. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 3, p. 414-421, 2009.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. de. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 546-554, mai/jun. 2010.

PANTALEO, A.; GENNARO, B. de; SHAH, N. Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 57-70, 2013.

JOBLING PURSER, B. J.; THAI, S. -M.; FRITZ, T.; ESTEVES, S. R.; DINSDALE, R. M.; GUWY, A. J. An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste, **Water Research**, v. 61, p. 162-170, 2014.

QIU, G.; GUO, M. Quality of poultry litter-derived granular activated carbon. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 379-386, 2010.

RAO, A. G.; GANDU, B.; KRANTI, S. K. K.; AHUJA, S.; SWAMY, Y. V. Decentralized Application of Anaerobic Digesters in Small Poultry Farms: Performance Analysis Of High Rate Self Mixed Anaerobic Digester And Conventional Fixed Dome Anaerobic Digester. **Bioresource Technology** (2013), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.076>

RAO, A. G.; REDDY, T. S. K.; PRAKASH, S. S.; VANAJAKSHI, J.; JOSEPH, J.; JETTY, A.; REDDY A. R.; SARMA, P. N. Biomethanation of poultry litter leachate in UASB reactor coupled with ammonia stripper for enhancement of overall performance. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 8679-8684, 2008.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. de M.; CRUZ, D. O. de A.; GUERRA, D. R. da S.; MACÊDO, E. M.; ICHIHARA, J. de A. **Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia. ISBN 978-85-98341-05-7, 2008.

RIBEIRO, M.deF.dosS., RAIHER, A.P., Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná. **Energy Policy** (2013), Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.004>>. Acesso em: 15/07/2013

ROTHER, J.; FIEBACK, T.; SEIF, R.; DREISBACH, F. Characterization of solid and liquid sorbent materials for biogas purification by using a new volumetric screening instrument. **Review of Scientific Instruments**, v. 83, p. 055112-1-055112-7, 2012.

SHARMA, D.; ESPINOSA-SOLARES, T.; HUBER, D. H. Thermophilic anaerobic co-digestion of poultry litter and thin stillage. **Bioresource Technology**, v. 136, p. 251-256, 2013.

SHIAU, J. H.; YEN, C.; PEARN, W. L.; LEE, W. Yield-related process capability indices for processes of multiple quality characteristics. **Quality and Reliability, Engineering International**, v. 29, p. 487-507, 2013.

SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná ©, 2015. Mensagem recebida por <[davila@simepar.br](mailto:davila@simepar.br)> em 28/07/2015.

SINGH, M.; REYNOLDS, D. L.; DAS, K. C. Microalgal system for treatment of effluent from poultry litter anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 10841-10848, 2011.

SUNADA, N. da S.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; VARGAS JUNIOR, F. M. de; GARCIA, R. G.; MENDES FERNANDES, A. R. Potential of biogas and methane production from anaerobic digestion of poultry slaughterhouse effluent. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 11, p. 2379-2383, 2012.

SUZUKI, A. B. P.; FEIDEN, A.; FERNANDES, D. M.; MARTINS, G. I.; FARIA, R. A. P. Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores para geração de biogás. **Ambiência**, v. 8, n. 3, p. 809-820, 2012.

SZOZI, A. A.; VANOTTI, M. B. Prospects for phosphorus recovery from poultry litter. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5461-5465, 2009.

TAKAHASHI, F. H.; CASSOLI, L. D.; ZAMPAR, A.; MACHADO, P. F. Variação e monitoramento da qualidade do leite através do controle estatístico de processos. **Ciência Animal**, v.13, n. 1, p. 99-107, 2012.

TESSARO, A. A. **Potencial energético da cama de aviário produzida na região Sudoeste do Paraná utilizada como substrato para a produção de biogás**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado Profissional - Desenvolvimento de Tecnologia), Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Instituto de Engenharia do Paraná - IEP, 2011.

TRAVERSI, D.; CAPONE, C.; VILLA, S.; VALERIA, R.; PIETRANGELI, B.; GILLI, G. Assessing archeal indicators of performance by RT-qPCR methods during anaerobic

co-digestion of organic wastes. **Bioenergy Research**, v. 7, p. 720-727, 2014.

TRENDEWICZ, A. A.; BRAUN, R. J. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities. **Journal of Power Sources**, v. 233, p. 380-393, 2013.

TURAN, N. G. Nitrogen availability in composted poultry litter using natural amendments. **Waste Management Research**, v. 27, n. 1, p. 19-24, 2009.

VALLE-GUADARRAMA, S.; ESPINOSA-SOLARES, T.; LÓPEZ-CRUZ, I. L.; DOMASCHKO, M. Modeling temperature variations in a pilot plant thermophilic anaerobic digester. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 34, p. 459-470, 2011.

WALTER, O. M. F. C.; HENNING, E; CARDOSO, M. E.; SAMOBYL, R. W. Aplicação individual e combinada dos gráficos de controle Shewhart e CUSUM: uma aplicação no setor metal mecânico. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 2, p. 271-286, 2013.

WANG, X.; YANG, G.; FENG, Y.; REN, G.; HAN, X. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 78-83, 2012.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 85, p. 849-860, 2010.

WU, S.; NI, P.; LI, J; SUN, H.; WANG, Y.; LUO, H.; DACH, J.; DONG, R. Integrated approach to sustain biogas production in anaerobic digestion of chicken manure under recycled utilization of liquid digestate: dynamics of ammonium accumulation and mitigation control. **Bioresource Technology**, v. 205, p. 75-81, 2016.

Western Electric Company. **Statistical Quality Control Handbook**, 1. ed. Pennsylvania, E.U.A.: Mack Printing Company, 1956.

YETILMEZSOY, K. Integration of kinetic modeling and desirability function approach for multi-objective optimization of UASB reactor treating poultry manure wastewater. **Bioresource Technology**, v. 118, p. 89-101, 2012.

YIN, D.; LIU, W.; ZHAI, N.; YANG, G.; WANG, X.; FENG, Y.; REN, G. Anaerobic digestion of pig and dairy manure under photo-dark fermentation condition. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 373-380, 2014.

YUE, Z.; CHEN, R.; YANG, F.; MACLELLAN, J.; MARSH, T.; LIU, Y.; LIAO, W. Effects of dairy manure and corn stover co-digestion on anaerobic microbes and corresponding digestion performance. **Bioresource Technology**, v. 128, p. 65-71, 2013.

ZIGANSHIN, A. M.; LIEBETRAU, J.; PRÖTER, J.; KLEINSTEUBER, S. Microbial community

structure and dynamics during anaerobic digestion of various agricultural waste materials. **Bioenergy and Biofuels**, v. 97, p. 5161-5174, 2013.

ZICKEFOOSE, C.; HAYES, R. Anaerobic Sludge Digestion: Operations Manual. **Office of Water Program Operations**, US Environmental Protection Agency, 1976.

ZHONG, W.; ZHANG, Z.; LUO, Y.; QIAO, W.; XIAO, M.; ZHANG, M. Biogas productivity by co-digesting Taihu blue algae with corn straw as an external carbon source. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 281-286, 2012.

## 9 ANEXOS

**Tabela 10** Dados relativos ao abastecimento do biodigestor

| Dia    | Carga orgânica de Alimentação<br>(kg STV m <sup>-3</sup> biod. <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) |                    | ST <sub>reduzidos</sub> | STV <sub>reduzidos</sub> |
|--------|--|--------------------|-------------------------|--------------------------|
|        | CA   | Reuso de Digestato |                         |                          |
| 0 - 30 | 0,00   | 0,00               | -                       | -                        |
| 31     | 7,00   | 0,00               | 97,27                   | 83,22                    |
| 32     | 7,00   | 0,00               | 97,31                   | 74,37                    |
| 33     | 5,67   | 1,33               | 97,81                   | 83,21                    |
| 34     | 5,07   | 1,93               | 96,67                   | 82,46                    |
| 35     | 5,70   | 1,30               | 97,25                   | 78,31                    |
| 36     | 5,58   | 1,42               | 97,14                   | 76,59                    |
| 37     | 5,33   | 1,67               | 96,23                   | 81,37                    |
| 38     | 5,21   | 1,79               | 97,35                   | 74,98                    |
| 39     | 5,48   | 1,52               | 97,88                   | 77,45                    |
| 40     | 5,11   | 1,89               | 97,13                   | 73,81                    |
| 41     | 5,31   | 1,69               | 96,99                   | 75,82                    |
| 42     | 5,02   | 1,98               | 97,92                   | 72,74                    |
| 43     | 5,15   | 1,85               | 96,5                    | 81,95                    |
| 44     | 4,99   | 2,01               | 96,42                   | 82,61                    |
| 45     | 5,54   | 1,46               | 97,61                   | 76,12                    |
| 46     | 5,58   | 1,42               | 97,32                   | 79,34                    |
| 47     | 5,20   | 1,80               | 97,41                   | 73,22                    |
| 48     | 5,40   | 1,60               | 97,84                   | 71,34                    |
| 49     | 4,99   | 2,01               | 97,45                   | 80,68                    |
| 50     | 4,89   | 2,11               | 97,33                   | 79,10                    |
| 51     | 5,50   | 1,50               | 96,84                   | 73,51                    |
| 52     | 5,39   | 1,61               | 97,21                   | 82,95                    |
| 53     | 8,48   | 2,02               | 97,44                   | 84,51                    |
| 54     | 9,14   | 1,36               | 96,13                   | 79,24                    |
| 55     | 8,65   | 1,85               | 98,23                   | 80,11                    |
| 56     | 8,00   | 2,50               | 97,38                   | 78,36                    |
| 57     | 8,26   | 2,24               | 95,39                   | 76,99                    |
| 58     | 8,01   | 2,49               | 96,51                   | 73,52                    |
| 59     | 7,71   | 2,79               | 97,75                   | 81,38                    |
| 60     | 7,45   | 3,05               | 97,31                   | 75,69                    |
| 61     | 8,35   | 2,15               | 97,25                   | 78,13                    |
| 62     | 7,73   | 2,77               | 98,03                   | 72,63                    |
| 63     | 7,98   | 2,52               | 96,85                   | 87,69                    |
| 64     | 7,48   | 3,02               | 97,19                   | 81,35                    |
| 65     | 8,92   | 1,58               | 98,02                   | 84,53                    |
| 66     | 8,30   | 2,20               | 97,33                   | 79,81                    |
| 67     | 8,70   | 1,80               | 96,54                   | 75,67                    |
| 68     | 8,16   | 2,34               | 97,83                   | 79,23                    |
| 69     | 7,67   | 2,83               | 98,26                   | 81,59                    |
| 70     | 8,14   | 2,36               | 98,01                   | 83,44                    |
| 71     | 8,42   | 2,08               | 97,54                   | 75,71                    |
| 72     | 8,59   | 1,91               | 97,33                   | 81,24                    |
| 73     | 7,75   | 2,75               | 97,84                   | 88,36                    |
| 74     | 8,30   | 2,20               | 97,18                   | 74,61                    |
| 75     | 9,08   | 1,42               | 96,98                   | 79,14                    |
| 76     | 7,61   | 2,89               | 97,47                   | 82,26                    |
| 77     | 8,06   | 2,44               | 97,96                   | 84,51                    |
| 78     | 8,42   | 2,08               | 97,85                   | 71,98                    |
| 79     | 8,69   | 1,81               | 97,84                   | 78,29                    |

**Tabela 11** Dados relativos ao abastecimento do biodigestor

| Dia | Carga orgânica de Alimentação<br>(kg STV m <sup>-3</sup> biod. <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) |                    | ST <sub>reduzidos</sub> | STV <sub>reduzidos</sub> |
|-----|--|--------------------|-------------------------|--------------------------|
|     | CA   | Reuso de Digestato |                         |                          |
| 80  | 7,40   | 3,10               | 96,89                   | 80,39                    |
| 81  | 8,04   | 2,46               | 97,92                   | 87,30                    |
| 82  | 8,18   | 2,32               | 98,15                   | 83,21                    |
| 83  | 12,48  | 1,52               | 96,84                   | 84,72                    |
| 84  | 12,08  | 1,92               | 97,67                   | 72,38                    |
| 85  | 11,49  | 2,51               | 97,56                   | 79,27                    |
| 86  | 9,90   | 4,10               | 97,45                   | 72,18                    |
| 87  | 10,83  | 3,17               | 98,43                   | 87,21                    |
| 88  | 9,85   | 4,15               | 97,97                   | 63,14                    |
| 89  | 12,02  | 1,98               | 96,96                   | 88,41                    |
| 90  | 8,66   | 5,34               | 97,24                   | 79,82                    |
| 91  | 12,00  | 2,00               | 97,65                   | 73,15                    |
| 92  | 10,87  | 3,13               | 97,88                   | 81,94                    |
| 93  | 10,00  | 4,00               | 97,57                   | 76,55                    |
| 94  | 11,23  | 2,77               | 98,32                   | 89,33                    |
| 95  | 10,46  | 3,54               | 97,15                   | 81,35                    |
| 96  | 12,30  | 1,70               | 96,93                   | 84,91                    |
| 97  | 11,06  | 2,94               | 98,01                   | 87,57                    |
| 98  | 11,52  | 2,48               | 97,54                   | 86,53                    |
| 99  | 12,02  | 1,98               | 97,74                   | 83,41                    |
| 100 | 11,82  | 2,18               | 97,16                   | 89,89                    |
| 101 | 11,41  | 2,59               | 97,14                   | 89,57                    |
| 102 | 12,23  | 1,77               | 99,35                   | 87,32                    |
| 103 | 12,18  | 1,82               | 96,36                   | 83,63                    |
| 104 | 12,15  | 1,85               | 97,47                   | 84,35                    |
| 105 | 11,28  | 2,72               | 96,80                   | 87,26                    |
| 106 | 11,51  | 2,49               | 95,84                   | 74,79                    |
| 107 | 11,83  | 2,17               | 96,53                   | 81,19                    |
| 108 | 10,04  | 3,96               | 97,37                   | 75,04                    |
| 109 | 10,97  | 3,03               | 95,09                   | 71,66                    |
| 110 | 10,23  | 3,77               | 96,52                   | 74,21                    |
| 111 | 9,54   | 4,46               | 89,09                   | 75,47                    |
| 112 | 10,03  | 3,97               | 94,93                   | 72,59                    |
| 113 | 12,91  | 4,59               | 94,56                   | 71,09                    |
| 114 | 13,15  | 4,35               | 96,53                   | 71,61                    |
| 115 | 11,76  | 5,74               | 93,99                   | 71,62                    |
| 116 | 12,10  | 5,40               | 94,90                   | 78,39                    |
| 117 | 11,78  | 5,72               | 96,15                   | 80,38                    |
| 118 | 13,02  | 4,48               | 97,02                   | 77,45                    |
| 119 | 13,53  | 3,97               | 95,97                   | 76,03                    |
| 120 | 13,15  | 4,35               | 97,12                   | 85,44                    |
| 121 | 12,77  | 4,73               | 96,09                   | 77,30                    |
| 122 | 14,52  | 2,98               | 97,31                   | 77,74                    |
| 123 | 13,00  | 4,50               | 96,37                   | 80,89                    |
| 124 | 13,24  | 4,26               | 95,97                   | 77,66                    |
| 125 | 13,64  | 3,86               | 97,37                   | 86,68                    |
| 126 | 13,04  | 4,46               | 98,23                   | 83,56                    |
| 127 | 14,77  | 2,73               | 96,87                   | 82,55                    |
| 128 | 14,36  | 3,14               | 97,57                   | 82,70                    |
| 129 | 13,99  | 3,51               | 96,45                   | 73,41                    |
| 130 | 14,12  | 3,38               | 96,65                   | 83,86                    |
| 131 | 12,39  | 5,11               | 96,75                   | 80,57                    |
| 132 | 14,18  | 3,32               | 96,20                   | 84,04                    |

**Tabela 12** Dados relativos ao abastecimento do biodigestor

| Dia | Carga orgânica de Alimentação<br>(kg STV m <sup>-3</sup> biod. <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) |                    | ST <sub>reduzidos</sub> | STV <sub>reduzidos</sub> |
|-----|--|--------------------|-------------------------|--------------------------|
|     | CA   | Reuso de Digestato |                         |                          |
| 133 | 13,64  | 3,86               | 95,98                   | 81,03                    |
| 134 | 14,15  | 3,35               | 97,54                   | 80,82                    |
| 135 | 13,61  | 3,89               | 96,10                   | 81,36                    |
| 136 | 13,80  | 3,70               | 96,46                   | 83,00                    |
| 137 | 13,68  | 3,82               | 97,38                   | 86,74                    |
| 138 | 14,01  | 3,49               | 97,16                   | 79,26                    |
| 139 | 14,78  | 2,72               | 95,51                   | 79,47                    |
| 140 | 13,48  | 4,02               | 96,75                   | 78,62                    |
| 141 | 13,28  | 4,22               | 95,71                   | 80,06                    |
| 142 | 13,31  | 4,19               | 94,83                   | 80,00                    |
| 143 | 13,41  | 4,09               | 95,73                   | 71,86                    |
| 144 | 13,28  | 4,22               | 96,59                   | 79,68                    |
| 145 | 12,04  | 5,46               | 95,01                   | 78,79                    |
| 146 | 13,47  | 4,03               | 95,87                   | 79,82                    |
| 147 | 13,10  | 4,40               | 96,70                   | 77,90                    |
| 148 | 13,39  | 4,11               | 96,54                   | 76,75                    |
| 149 | 13,18  | 4,32               | 96,47                   | 73,99                    |
| 150 | 12,97  | 4,53               | 95,09                   | 75,02                    |
| 151 | 12,49  | 5,01               | 95,72                   | 78,58                    |
| 152 | 12,48  | 5,02               | 96,05                   | 76,31                    |
| 153 | 13,16  | 4,34               | 96,13                   | 76,37                    |
| 154 | 12,83  | 4,67               | 96,26                   | 78,05                    |
| 155 | 12,85  | 4,65               | 96,51                   | 74,36                    |
| 156 | 13,15  | 4,35               | 96,21                   | 75,27                    |
| 157 | 12,56  | 4,94               | 95,76                   | 74,93                    |
| 158 | 12,67  | 4,83               | 94,85                   | 73,12                    |
| 159 | 12,56  | 4,94               | 95,83                   | 76,63                    |
| 160 | 12,14  | 5,36               | 95,13                   | 74,15                    |
| 161 | 12,85  | 4,65               | 92,75                   | 73,59                    |
| 162 | 12,34  | 5,16               | 94,63                   | 73,83                    |
| 163 | 11,94  | 5,56               | 95,32                   | 71,76                    |
| 164 | 12,23  | 5,27               | 95,62                   | 69,89                    |
| 165 | 11,97  | 5,53               | 93,76                   | 70,07                    |
| 166 | 11,70  | 5,80               | 93,54                   | 66,21                    |
| 167 | 11,50  | 6,00               | 94,15                   | 70,24                    |
| 168 | 10,84  | 6,66               | 93,09                   | 66,49                    |
| 169 | 11,57  | 5,93               | 93,67                   | 68,22                    |
| 170 | 10,83  | 6,67               | 92,87                   | 68,95                    |
| 171 | 11,18  | 6,32               | 93,49                   | 63,04                    |
| 172 | 11,21  | 6,29               | 93,73                   | 64,40                    |
| 173 | 10,31  | 7,19               | 93,59                   | 67,44                    |
| 174 | 10,56  | 6,94               | 93,24                   | 70,35                    |
| 175 | 11,05  | 6,45               | 92,42                   | 62,06                    |
| 176 | 11,48  | 6,02               | 91,75                   | 66,14                    |
| 177 | 10,04  | 7,46               | 92,75                   | 64,81                    |
| 178 | 10,62  | 6,88               | 94,78                   | 70,15                    |
| 179 | 28,02  | 6,98               | 97,05                   | 81,19                    |
| 180 | 29,14  | 5,86               | 97,08                   | 80,42                    |
| 181 | 27,58  | 7,42               | 97,49                   | 78,66                    |
| 182 | 27,33  | 7,67               | 94,49                   | 78,05                    |
| 183 | 26,84  | 8,16               | 96,92                   | 78,90                    |
| 184 | 25,81  | 9,19               | 96,13                   | 77,15                    |
| 185 | 26,76  | 8,24               | 96,62                   | 74,20                    |

**Tabela 13** Dados relativos ao abastecimento do biodigestor

| Dia | Carga orgânica de Alimentação<br>(kg STV m <sup>-3</sup> biod. <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) |                    | ST <sub>reduzidos</sub> | STV <sub>reduzidos</sub> |
|-----|--|--------------------|-------------------------|--------------------------|
|     | CA   | Reuso de Digestato |                         |                          |
| 186 | 25,96  | 9,04               | 95,68                   | 76,94                    |
| 187 | 25,09  | 9,91               | 95,06                   | 67,36                    |
| 188 | 25,76  | 9,24               | 95,21                   | 75,12                    |
| 189 | 22,41  | 12,59              | 94,83                   | 72,26                    |
| 190 | 25,03  | 9,97               | 94,47                   | 72,01                    |
| 191 | 23,98  | 11,02              | 95,12                   | 71,21                    |
| 192 | 23,81  | 11,19              | 94,53                   | 67,87                    |
| 193 | 23,71  | 11,29              | 93,09                   | 61,87                    |
| 194 | 22,46  | 12,54              | 88,16                   | 60,86                    |
| 195 | 20,16  | 14,84              | 91,27                   | 61,32                    |
| 196 | 18,78  | 16,22              | 89,53                   | 63,29                    |
| 197 | 19,59  | 15,41              | 94,12                   | 65,15                    |
| 198 | 19,83  | 15,17              | 92,35                   | 63,67                    |
| 199 | 21,46  | 13,54              | 94,79                   | 65,94                    |
| 200 | 20,58  | 14,42              | 95,35                   | 65,92                    |
| 201 | 21,88  | 13,12              | 92,42                   | 62,55                    |
| 202 | 22,00  | 13,00              | 92,31                   | 63,55                    |
| 203 | 20,23  | 14,77              | 93,23                   | 61,91                    |
| 204 | 20,53  | 14,47              | 92,07                   | 62,18                    |
| 205 | 20,20  | 14,80              | 92,46                   | 60,87                    |
| 206 | 20,04  | 14,96              | 91,12                   | 58,50                    |
| 207 | 19,70  | 15,30              | 91,62                   | 60,19                    |
| 208 | 18,66  | 16,34              | 91,11                   | 57,81                    |
| 209 | 19,30  | 15,70              | 93,40                   | 51,86                    |
| 210 | 18,43  | 16,57              | 91,33                   | 58,28                    |
| 211 | 16,95  | 18,05              | 89,20                   | 55,39                    |
| 212 | 18,63  | 16,37              | 90,32                   | 54,91                    |
| 213 | 17,29  | 17,71              | 91,10                   | 56,30                    |
| 214 | 17,36  | 17,64              | 90,38                   | 52,13                    |
| 215 | 17,95  | 17,05              | 91,05                   | 51,40                    |
| 216 | 16,49  | 18,51              | 86,88                   | 48,68                    |
| 217 | 16,38  | 18,62              | 89,54                   | 47,46                    |
| 218 | 14,80  | 20,20              | 91,99                   | 53,20                    |
| 219 | 14,87  | 20,13              | 85,55                   | 51,36                    |
| 220 | 17,13  | 17,87              | 89,14                   | 48,06                    |
| 221 | 15,38  | 19,62              | 87,26                   | 47,06                    |
| 222 | 15,00  | 20,00              | 88,16                   | 46,78                    |
| 223 | 14,37  | 20,63              | 85,07                   | 45,71                    |
| 224 | 14,43  | 20,57              | 87,40                   | 43,93                    |
| 225 | 13,61  | 21,39              | 86,84                   | 49,02                    |
| 226 | 13,44  | 21,56              | 88,62                   | 45,88                    |
| 227 | 14,90  | 20,10              | 83,67                   | 43,31                    |
| 228 | 14,23  | 20,77              | 81,33                   | 45,65                    |
| 229 | 12,68  | 22,32              | 85,09                   | 43,06                    |
| 230 | 12,99  | 22,01              | 84,73                   | 44,79                    |
| 231 | 12,83  | 22,17              | 81,78                   | 32,91                    |
| 232 | 13,28  | 21,72              | 84,00                   | 43,60                    |
| 233 | 9,42   | 25,58              | 73,18                   | 25,63                    |
| 234 | 12,82  | 22,18              | 86,15                   | 41,89                    |
| 235 | 6,56   | 28,44              | 71,43                   | 41,47                    |
| 236 | 12,63  | 22,37              | 83,15                   | 34,04                    |
| 237 | 10,37  | 24,63              | 82,14                   | 40,00                    |
| 238 | 9,91   | 25,09              | 77,47                   | 26,39                    |

**Tabela 14** Dados relativos ao abastecimento do biodigestor

| Dia       | Carga orgânica de Alimentação<br>(kg STV m <sup>-3</sup> biod. <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) |                    | ST <sub>reduzidos</sub> | STV <sub>reduzidos</sub> |
|-----------|--|--------------------|-------------------------|--------------------------|
|           | CA   | Reuso de Digestato |                         |                          |
| 239       | 11,50  | 23,50              | 82,31                   | 34,63                    |
| 240       | 7,16   | 27,84              | 62,33                   | 20,85                    |
| 241       | 9,98   | 25,02              | 58,12                   | 16,13                    |
| 242       | 8,05   | 30,45              | 48,96                   | 31,21                    |
| 243       | 6,78   | 31,72              | 39,53                   | 26,19                    |
| 244       | 5,88   | 32,62              | 42,33                   | 20,90                    |
| 245       | 3,99   | 34,51              | 37,60                   | 27,45                    |
| 246       | 3,41   | 35,09              | 46,21                   | 24,13                    |
| 247       | 3,97   | 34,53              | 42,39                   | 28,97                    |
| 248       | 4,29   | 34,21              | 36,15                   | 24,58                    |
| 249       | 4,73   | 33,77              | 28,97                   | 29,27                    |
| 250       | 3,42   | 35,08              | 41,35                   | 30,18                    |
| 251       | 3,26   | 35,24              | 46,65                   | 27,23                    |
| 252       | 4,80   | 33,70              | 39,40                   | 24,51                    |
| 253       | 4,89   | 33,61              | 34,58                   | 28,93                    |
| 254       | 3,72   | 34,78              | 40,78                   | 29,72                    |
| 255       | 3,85   | 34,65              | 36,23                   | 27,11                    |
| 256       | 4,67   | 33,83              | 32,17                   | 26,83                    |
| 257       | 3,78   | 34,72              | 38,21                   | 24,31                    |
| 258       | 3,32   | 35,18              | 29,16                   | 23,77                    |
| 259       | 3,58   | 34,92              | 33,89                   | 28,41                    |
| 260       | 2,67   | 35,83              | 31,23                   | 25,14                    |
| 261       | 3,71   | 34,79              | 27,70                   | 23,51                    |
| 262       | 3,02   | 35,48              | 31,30                   | 26,58                    |
| 263       | 2,51   | 35,99              | 29,71                   | 24,56                    |
| 264       | 3,20   | 35,30              | 32,94                   | 21,44                    |
| 265       | 2,81   | 35,69              | 30,71                   | 28,75                    |
| 266       | 2,72   | 35,78              | 28,63                   | 30,14                    |
| 267       | 3,40   | 35,10              | 26,91                   | 23,60                    |
| 268       | 3,32   | 35,18              | 27,84                   | 20,21                    |
| 269       | 2,45   | 36,05              | 27,38                   | 24,13                    |
| 270       | 2,17   | 36,33              | 28,69                   | 28,44                    |
| 271       | 2,54   | 35,96              | 30,14                   | 23,70                    |
| 272 - 281 | 0,00   | 0,00               | -                       | -                        |
| 282       | 0,00   | -                  | 29,21                   | 21,37                    |
| 283       | 0,00   | -                  | 28,34                   | 23,44                    |
| 284       | 2,40   | 36,10              | 30,56                   | 25,11                    |
| 285       | 2,56   | 35,94              | 29,12                   | 21,37                    |
| 286       | 2,95   | 35,55              | 26,15                   | 19,95                    |
| 287       | 2,40   | 36,10              | 27,38                   | 21,56                    |
| 288       | 2,01   | 36,49              | 21,94                   | 23,78                    |
| 289       | 2,27   | 36,23              | 26,14                   | 22,81                    |