

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

JÚLIO CÉSAR DE SOUZA MATOS

**INFLUÊNCIA DO ELETROMAGNETISMO NA
BIODIGESTÃO ANAERÓBIA**

Rio Claro - SP

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

JÚLIO CÉSAR DE SOUZA MATOS

INFLUÊNCIA DO ELETROMAGNETISMO NA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro

Coorientadora: Prof. Dra. Sandra Imaculada Maintinguer

Rio Claro - SP

2017

537.1 Matos, Júlio César de Souza
M433i Influência do eletromagnetismo na biodigestão anaeróbia
 / Júlio César de Souza Matos. - Rio Claro, 2017
 105 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
 Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Orientador: Marcus César Avezum Alves de Castro
 Coorientador: Sandra Imaculada Maintinguer

 1. Eletromagnetismo. 2. Campo magnético. 3. Sistemas
 anaeróbios. 4. Metanogênese. 5. Campo eletromagnético. 6.
 Biogás. 7. Bioestimulação. I. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro - UNESP

Prof. Dr. Michel Brienzo – UNESP

Prof. Dr. Reinaldo Pizani Júnior – Universidade de Ribeirão Preto

Aprovado, Rio Claro – SP, 06 de Setembro de 2017

RESUMO

O processo de biodigestão anaeróbia pode ser utilizado no tratamento de resíduos orgânicos, com destaque para recuperação energética do biogás. Estudos recentes apontam aumento na eficiência da atividade microbiológica em processos de biodegradação anaeróbia de compostos orgânicos sob campo magnético. Desse modo, tecnologias que resultem em melhorias desse processo podem contribuir para o avanço do tratamento de resíduos orgânicos e da produção de biogás, via digestão anaeróbia. Nesse sentido, o presente trabalho verificou a influência da aplicação de campo eletromagnético constante sobre o processo de decomposição anaeróbia da glicose. A pesquisa consistiu na operação de reatores (1 L) anaeróbios em batelada, mantidos a 37 ± 2 °C, sem agitação, sob a influência de diferentes intensidades de campo eletromagnético de 5, 7,5 e 10 mT. Foi usado, como inóculo lodo granular proveniente de estação de tratamento anaeróbio, nos reatores, em meio nutricional sintético não seletivo. A avaliação do desempenho do processo de degradação foi obtida pela estimativa de produção de biogás e metano, bem como da análise da redução da demanda química de oxigênio e da remoção de sólidos. Os resultados demonstraram diferença positiva na produção de gás metano, aumento de 21,5 % com 7,5 mT e aumento de 15 % da remoção de DQO, nas intensidades de 7,5 mT. Esses resultados sinalizam para possível viabilidade de uso de campo magnético constante na bioestimulação de consórcios microbianos anaeróbios.

PALAVRAS CHAVE: metanogênese, campo eletromagnético, biogás, bioestimulação.

Abstract

Anaerobic digestion processes with biogas production are largely used for organic waste treatment, with emphasis for energy recovery. Some recent studies have demonstrated magnetism influence on microbiological activity, these indicates possible influence on the efficiency of anaerobic digestion. By these means, technologies that act in anaerobic digestion enhancement can contribute for the improvement of organic compounds treatment. The present study aims to verify the influence of constant electromagnetic field on the glucose anaerobic digestion. The research comprises comparison of biogas production in 1 L batch reactors, kept static under 37 ± 2 °C. In each experiment, reactors were operated with and without the influence of constant electromagnetic field of 5, 7,5 and 10 mT. The inoculum was granular sludge from anaerobic treatment plant in non-selective media culture. Biogas production, COD and solid removal were measured during the experiments. Results show positive difference on methane production of 21,5 % and on COD removal of 15 % in the tests with electromagnetic field of 7,5 mT. These results sign for the viability of the application of constant magnetic field as a bioetimulation agent.

KEYWORDS: metanogenesis; electromagnetic field, biogas, bioestimulation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS	8
3. REVISÃO DA LITERATURA	9
3.2. Principais parâmetros da biodigestão anaeróbia.....	13
3.3. Biogás	16
3.4. Considerações gerais sobre magnetismo	19
3.5. Magnetismo na água e em sistemas biológicos	21
3.6. Magnetismo em sistemas anaeróbios	24
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1. Testes preliminares com lodos granulares e meio de cultura	29
4.2. Montagem da bobina e do reator magnetizado.....	33
4.3. Operação dos reatores com biomassa enriquecida	35
4.4. Ensaio com lodo bruto	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1. Testes preliminares com lodos granulares e meio de cultura	42
5.2. Montagem da bobina e do reator magnetizado.....	46
5.3. Operação dos reatores magnetizados.....	47
6. CONCLUSÃO.....	73
7. REFERÊNCIAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As quatro fases da digestão anaeróbia	10
Figura 2 - Resumo das relações dos microrganismos anaeróbios, indicando as relações de sintropia dentro do consócio.....	12
Figura 2 – Campo magnético em um ímã	20
Figura 3 – Visualização do campo magnético no interior da espira circular	21
Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	28
Figura 6 - Confeção da água anaeróbia e do meio de cultura.	31
Figura 7 – Equipamento utilizado para a medição da pressão no interior dos reatores.	31
Figura 8- Analisador de gás LandTec GEM-2000.	32
Figura 9 – Reator no interior da bobina.....	33
Figura 10 - Aferição do campo magnético dentro do reator magnetizado. (1) Fonte regulável de corrente contínua; (2) Multímetro; (3) Banho Maria; (4) Bobina com frasco reagente; (5) Teslameter.	34
Figura 11 – Adição de N ₂ no headspace.....	35
Figura 12 - Inóculo centrifugado.	36
Figura 13 - Curva de calibração da bobina.....	46
Figura 14 - Variação do pH em ensaio com biomassa enriquecida, 31 dias de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	48
Figura 15 – Variação do pH em ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	48
Figura 16 – Variação do pH no primeiro ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas de operação, sob campo eletromagnético de 10 mT.	49
Figura 17 – Variação do pH no segundo ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas de operação, sob campo eletromagnético de 10 mT	49
Figura 18 - Variação do pH no primeiro ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.....	50
Figura 19 - Variação do pH, segundo ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	51
Figura 20 - Variação do pH, primeiro ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.	51
Figura 21 - Variação do pH, segundo ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.	52
Figura 22 - Variação do pH, primeiro ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	52
Figura 23 – Variação do pH, segundo ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT	53
Figura 24 – Estimativa da produção acumulada de biogás e de gás metano no ensaio com biomassa enriquecida em 31 dias de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.....	57
Figura 25 – Estimativa de produção acumulada de biogás, ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	57
Figura 26 – Estimativa de produção acumulada de gás metano, ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	58

Figura 27 – Estimativa de produção acumulada de biogás, primeiro ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	58
Figura 28 – Estimativa de produção acumulada de gás metano, primeiro ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	59
Figura 29 – Estimativa de produção acumulada de biogás, segundo ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	59
Figura 30 – Estimativa de produção acumulada de gás metano, segundo ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	60
Figura 31 – Estimativa de produção acumulada de biogás e de metano, média dos dois ensaios em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	61
Figura 32 – Taxa de produção de biogás e de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.....	61
Figura 33 - Taxa de produção de biogás e de metano, segundo ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	62
Figura 34 – Estimativa de produção acumulada de biogás e de metano, média dos dois ensaios com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.	62
Figura 35 – Taxa de produção de biogás e de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.....	63
Figura 36 – Taxa de produção de biogás e de metano, segundo ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.....	63
Figura 37 – Estimativa de produção acumulada de biogás e de metano, média dos dois ensaios com lodo granular bruto em 144 horas de operação e campo eletromagnético de 10 mT. ..	64
Figura 38 – Taxa de produção estimada de biogás e de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	64
Figura 39 - Taxa de produção estimada de biogás e de metano, segundo ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.	65
Figura 40 - Variação da DQO durante o ensaio com biomassa enriquecida por 31 dias de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	68
Figura 41 – Conversão da glicose no ensaio com biomassa enriquecida com 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre sistemas mesofílico e termofílico, baseados em parâmetros de controle e operação	14
Tabela 2 – Composição do biogás	17
Tabela 3 – Estudos com aplicação de magnetismo em sistemas anaeróbios para diferentes substratos e intensidades.....	26
Tabela 4 - Condições nutricionais avaliadas na etapa de testes preliminares.	29
Tabela 5 – Condição nutricional dos reatores do ensaio de 31 dias com biomassa enriquecida.	36
Tabela 6 – Condição nutricional dos reatores do ensaio de 66 horas com biomassa enriquecida e campo eletromagnético de 5 mT.	37
Tabela 7 – Condição nutricional dos reatores de dois ensaios de 66 horas com biomassa enriquecida e campo eletromagnético de 10 mT.	39
Tabela 8 – Condição nutricional dos reatores de seis ensaios de 144 horas com lodo bruto.	40
Tabela 9 – Intervalos de medição de porcentagem de metano e pH.	40
Tabela 10 - Resultados das análises da série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) dos lodos granulares analisados no pré-ensaio.	42
Tabela 11 – Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M1 (10 g/L de glicose; 5 g/L de peptona; 5 g/L de extrato de levedura; 5 g/L de extrato de carne).	43
Tabela 12 – Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M2 (2 g/L de glicose; 1 g/L de peptona; 1 g/L de extrato de levedura; 1 g/L de extrato de carne).	43
Tabela 13 - Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M3 (1,0 g/L de glicose; 0,5 g/L de peptona; 0,5 g/L extrato de levedura; 0,5 g/L extrato de carne).....	43
Tabela 14 - Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M4 (0,67 g/L de glicose; 0,33 g/L de peptona; 0,33 g/L de extrato de levedura; 0,33 g/L de extrato de carne).....	44
Tabela 15 – Série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) no início e final dos ensaios com biomassa enriquecida.	54
Tabela 16 - Análise da série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) do lodo granular proveniente da avícola Dacar.	55
Tabela 17 - Resultados da série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) para os ensaios com lodo granular bruto, por 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.	56
Tabela 18 - Resultados obtidos através do modelo de gompertz para produção de biogás .	66
Tabela 19 - Resultados obtidos através do modelo de gompertz para produção de metano	66
Tabela 20 - DQO inicial e final dos ensaios com biomassa enriquecida com 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT e 10 mT.	69
Tabela 21 - DQO inicial e final dos ensaios com lodo granular bruto com 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT, 7,5 mT e 10 mT.....	69

Tabela 20 – Resultados da conversão de açúcar para os 6 ensaios utilizando lodo granular bruto.....	72
---	----

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro e coorientadora Dra. Sandra Imaculada Maintinguer pelos ensinamentos, oportunidades e paciência para realização desse trabalho.

Agradeço aos professores Dr. Michel Brienzo e Dr. Reinaldo Pizani junior pelas revisões e apontamentos para o amadurecimento do trabalho.

Agradeço, também, à agência de fomento à pesquisa CAPES, pela bolsa de pesquisa, com a qual se viabilizou essa pesquisa.

Gratidão, as empresas Avícola Dacar, Abatedouro Aves Ideal e a estação de tratamento Esgoto Sanitário de São Carlos – SP pelos lodos anaeróbios cedidos.

Agradeço ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP Rio Claro e sua equipe técnica, pela infraestrutura e apoio cedido via o programa de pós graduação em Geociências.

Agradeço ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia e sua equipe técnica pela infraestrutura e apoio cedido.

Agradeço aos amigos Denício Andrade Coelho, Rodolfo Mendes Lima, Elisa Fonseca Horta, Ana Paula Bortolucci, Carol Varella, Kamili Oliveira Santana pelas trocas de artigos, conversas e estudos que levaram ao amadurecimento dessa pesquisa.

Ao Cleber Ronaldo Bressani, assistente operacional do IPBEN pelas ajudas prestadas com os equipamentos e ferramentas.

Ao Geraldo Ap. de Lima Sobrinho e o Departamento de Física da Unesp-Rio Claro pelo empréstimo da fonte de corrente contínua utilizada nesse trabalho, e a acessória técnica disponibilizada.

Ao Vladimir Barbosa Junior e ao Laboratório de preparação de amostras DRX por ceder o espaços equipamentos para análises das amostras.

Ainda, agradeço à Fernanda Giffoni Fernandes Luz, minha companheira, por compartilhar as agonias e felicidades, apoio emocional e psicológico, assim como compartilhar seu conhecimento acadêmico.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte da energia utilizada no mundo é, nos dias atuais, proveniente de fontes não renováveis. Essencialmente, essas fontes se tornarão escassas e a obtenção de energia por meio de tecnologias renováveis será fundamental para suprir a demanda crescente. A utilização do biogás proveniente da digestão anaeróbia aumenta a oferta de energia e possibilita a geração de energia descentralizada próxima aos centros consumidores.

Nesse contexto, os biodigestores anaeróbios se destacam como fonte de biogás para aproveitamento energético e, também, como tecnologia para o tratamento de rejeitos orgânicos provenientes de indústrias e cidades. A digestão anaeróbia é um conjunto de ações ordenadas, realizadas por um consórcio microbiológico capaz de transformar compostos orgânicos em biogás.

Nos últimos anos, muitos trabalhos foram desenvolvidos a respeito dos diversos parâmetros que afetam os resultados do processo de biodegradação anaeróbia, os quais geraram sólidos conhecimentos, principalmente aqueles aplicados ao tratamento de esgoto sanitário (BUYUKKAMACI; FILIBELI, 2004; APPELS *et al.*, 2011; KIM; OH, 2011; SCHATTAUER *et al.*, 2011; ZESHAN; VISVANATHAN, 2012; PALATSI *et al.*, 2012; ZHONG *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, muitos esforços são direcionados ao melhoramento da eficiência do processo de digestão anaeróbia, como otimização das condições do processo (abastecimento do reator, mistura eficiente, diferentes arranjos de reatores), aumento na temperatura de trabalho, pré-tratamento, codigestão de resíduos, entre outros. Todos com o mesmo objetivo, aumentar a produção de biogás, diminuir o tempo de retenção hidráulica e aumentar a eficiência de remoção de sólidos.

Estudos a respeito da aplicação de campo magnético constante sobre processos de digestão de lodos ativados demonstraram a ocorrência de modificações nos parâmetros monitorados e identificaram influência do magnetismo sobre a atividade de consórcios microbianos. A faixa de influência positiva do campo magnético constante apresentado nas pesquisas para tratamento aeróbio esteve entre 7 a 490 mT (JUNG *et al.* 1993; JUNG; SOFER, 1997; YAVUZ; ÇELEBI, 2000; TOMSKA; WOLNY, 2008).

Recentemente, alguns estudos comprovaram a influência do magnetismo em sistemas de tratamentos de resíduos orgânicos sob condições anaeróbias, fazendo com que esta técnica desponte como avanço no aumento da produção de biometano, fonte de energia renovável (ZIELINSKI *et al.*, 2014; DEBOWSKI *et al.*, 2014; DEBOWSKI *et al.*, 2016).

Plantas de biogás estão espalhadas pelo mundo, porém a baixa eficiência empregada no processo tem dificultado a expansão dessa tecnologia. Pequenas melhorias tecnológicas podem tornar o processo mais acessível, como consequência, a produção em grande escala de biogás seria mais difundida (HARITWALL *et al.*, 2015; BAGHER *et al.*, 2015).

Dessa forma, com a finalidade de aumentar a eficiência de sistemas anaeróbios de biodegradação orgânica com produção de biogás, são necessários estudos que indiquem tecnologias capazes de reduzir o tempo de retenção hidráulica dos compostos no interior de reatores e, com isso, minimizar custos com redução de equipamentos.

Diante do exposto, essa pesquisa teve por finalidade a investigação da influência da aplicação de campo eletromagnético na atividade microbiana, por processos anaeróbios, na geração de metano. Para tanto, reatores anaeróbios em batelada, foram operados com substrato sintético, com o intuito de contribuir para a ampliação da compreensão sobre a produção de biogás combustível proveniente da degradação de compostos orgânicos via biodegradação anaeróbia.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral dessa pesquisa foi analisar a contribuição da aplicação de campo eletromagnético constante sobre a biodigestão anaeróbia e, conseqüentemente, sobre a produção de biogás e de gás metano, a partir de meio de cultura não seletivo e lodos anaeróbios, em reatores em batelada.

Para atender ao objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar a produção de biogás e a atividade metanogênica para diferentes tipos de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes;
- Comparar a produção de biogás e de gás metano em reatores anaeróbios operados com e sem a influência de diferentes intensidades de campo eletromagnético constante.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo, estão apresentados temas relevantes à pesquisa. Esses temas estão relacionados à caracterização do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica por microrganismos, bem como do biogás produzido durante o processo. Ainda, compõe esse item, uma revisão sobre os estudos realizados a respeito da ação do magnetismo na água, em sistemas biológicos e no processo de digestão anaeróbia.

3.1. Biodegradação anaeróbia

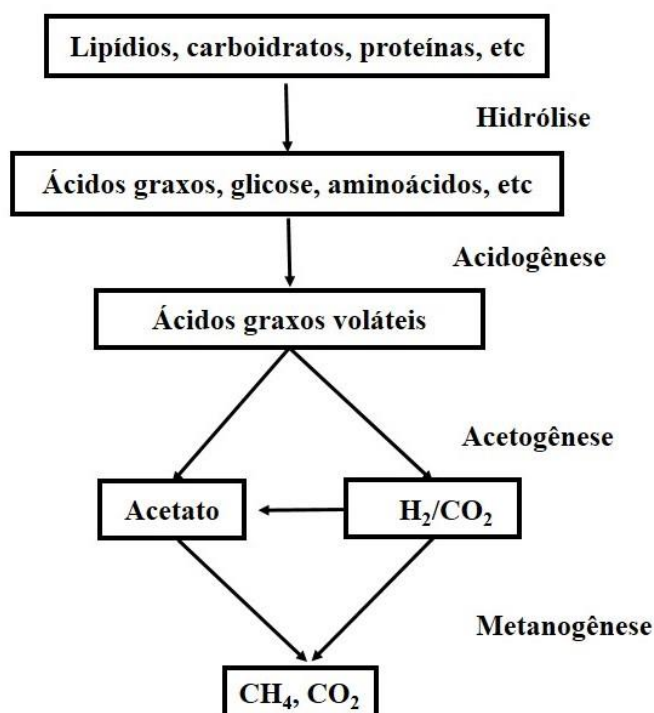
O processo de biodegradação anaeróbia ocorre na natureza em condição de ausência de oxigênio e está sujeito a atividades coordenadas de microrganismos específicos de cada uma das fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Durante o processo de degradação da matéria orgânica, diversas vias podem ocorrer dependendo das condições. O resultado da efetivação e interação das diversas fases é a transformação do material orgânico em dióxido de carbono e metano (APPELS *et al.*, 2008).

O processo de digestão anaeróbia ocorre em quatro fases principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Apples *et al.*, 2008),). A síntese do processo é mostrada na Figura 1.

A hidrólise é o primeiro estágio, quando substâncias orgânicas complexas de longas cadeias carbônicas são transformadas em novas substâncias de menor massa molar. Nesse momento, ocorre a degradação de compostos de elevadas massas molares e substratos orgânicos insolúveis, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, que são metabolizados em compostos de baixa massa molecular e substratos orgânicos solúveis como ácidos graxos, glicose e aminoácidos.

Geralmente, a hidrólise é considerada a fase limitante da biodegradação anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos (VEEKEN; HAMELERS, 1999; APPELS *et al.*, 2008; COELHO *et al.*, 2011). Essa etapa está intimamente associada à fase posterior acidogênica, quando ocorre a formação de ácidos graxos voláteis (LYND *et al.*, 2002).

Figura 1 - As quatro fases da digestão anaeróbia



Fonte: Traduzido de Zhang *et al.*, 2014.

O segundo estágio do processo de biodegradação anaeróbia é caracterizado pela degradação de pequenas moléculas em ácidos graxos voláteis de cadeia curta (ex.: ácidos acético, propiônico e butírico). A acidogênese ocorre no interior das células de bactérias fermentativas, em conjunto com a geração de subprodutos como NH₃, CO₂, H₂S. Diversos grupos de bactérias fermentativas efetuam a acidogênese, principalmente as espécies *Clostridium* e *Bacteroides*, particularmente *Clostridium*, são importantes devido à sua capacidade de sobrevivência em ambientes adversos (REIS, 2012).

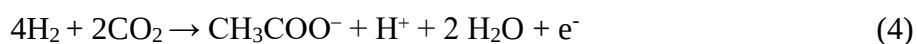
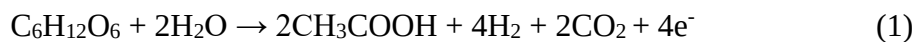
Durante a acetogênese, os produtos gerados na fase anterior, como ácidos graxos voláteis, álcoois, alguns aminoácidos e compostos aromáticos são oxidados, sintropicamente, para H₂ (hidrogenogênese), CO₂, acetato e outros. As bactérias acetogênicas são responsáveis pelo consumo dos produtos gerados na acidogênese, quando metabolizam ácidos como acético e propiônico. Nessa fase ocorre também a formação de hidrogênio, o que faz com que o pH do meio diminua, sendo necessário que a fase seguinte ocorra simultaneamente para que o H₂ seja consumido pelas hidrogenotróficas. Portanto, os substratos orgânicos produzidos na segunda fase são adicionalmente digeridos em acetato, H₂, CO₂ que são usados

pelas arqueas metanogênicas para produção de metano durante a última fase do processo (SLOBODKIN; NOZHEVNIKOVA, 1990; ZHANG *et al.*, 2014).

O complexo processo de decomposição da matéria orgânica é completado pelas arqueas metanogênicas, que usam H_2 , CO_2 , acetato e compostos metilados como principais substratos para produção de metano (GUJER; ZEHNDER, 1983). Geralmente, o substrato utilizado pelas metanogênicas pode ser de três tipos (i) ácidos graxos de cadeia curta; (ii) álcool; (iii) gases (CO , CO_2 , H_2 e H_2S). Com isso, gás metano é obtido através de dois grupos de arqueas metanogênicas: (i) acetogênicas que usam principalmente ácido acético como matéria-prima para produção de CH_4 e; (ii) hidrogenotróficas que utilizam H_2 , CO_2 , formiato, metanol e monóxido de carbono para a transformação desses produtos em metano (APPELS *et al.*, 2008; APPELS *et al.*, 2011).

Na biodegradação anaeróbia de substratos simples, como a glicose, esses são metabolizados diretamente em acetato, gás carbônico e gás hidrogênio ou gás metano nos primeiros estágios da digestão anaeróbia, a degradação é completada nas primeiras 50 horas de reação (GAJARAJ *et al.*, 2017).

A degradação anaeróbia da glicose ocorre através das seguintes reações possíveis: fermentação (equação 1) que forma acetato, hidrogênio e gás carbônico; metanogênese acetoclástica, quando ocorre a quebra do acetato para formar metano e dióxido de carbono (equação 2); os processos realizados pelas arqueas hidrogenotróficas convertem hidrogênio em metano (equação 3) ou, sob alta pressão o hidrogênio reage com dióxido de carbono formando íon acetato, que pode ser consumido pelas metanogênicas acetoclásticas (equação 4) (GRADY *et al.*, 1999).

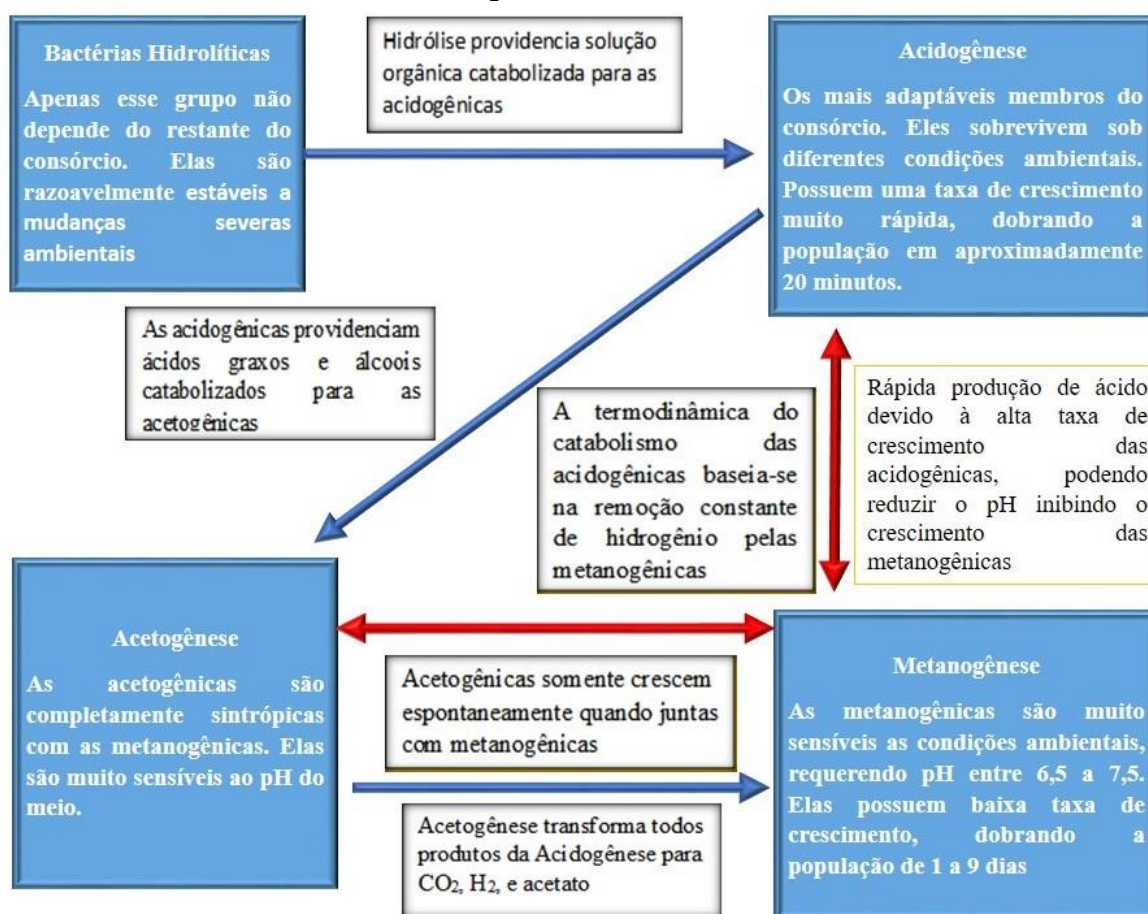


Na Figura 2 está apresentado o resumo das principais relações existentes no consórcio microbiano envolvido no processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos.

Para que o processo ocorra de maneira eficiente, é necessária a efetivação de todas as etapas. O sucesso do consórcio microbiano durante as fases envolvidas depende de diversos parâmetros que influenciam o desenvolvimento do processo. Por exemplo, o pH e a

temperatura afetam fortemente a eficiência de degradação, a fase metanogênica é afetada significativamente pelas condições de operação, fenômenos como acumulação de ácidos voláteis devem ser evitados, pois podem reduzir o pH abaixo da faixa suportada pelos microrganismos metanogênicos (RAJESHWARI *et al.*, 2000).

Figura 2 - Resumo das relações dos microrganismos anaeróbios, indicando as relações de sintropia dentro do consócio.



Fonte: STUART, 2006.

Diante do exposto, é possível observar que a biodegradação anaeróbia é o resultado de uma complexa associação sinérgica de um consócio microbiológico que abriga diversos grupos de microrganismos. Ainda, diversos fatores podem afetar os resultados da biodegradação anaeróbia, sendo portanto, importante que estudos sejam realizados com o intuito de otimizar as tecnologias existentes para aumento da produção de biogás e minimização de custos operacionais.

3.2. Principais parâmetros da biodigestão anaeróbia

Diversos aspectos podem influenciar os resultados da digestão anaeróbica, alguns parâmetros que interferem na atividade e a eficiência da biodegradação anaeróbia são: temperatura, pH, alcalinidade e nutrientes presentes, contudo ainda, parâmetros como relação inóculo/substrato, agitação e tempo de detenção também podem influenciar a eficiência do processo. Zhang *et al.* (2014) consideram parâmetros chave para o sucesso da biodegradação anaeróbia: concentração de amônia livre, ácidos graxos de cadeia longa, relação C/N e concentração de elementos metálicos. Esses parâmetros são descritos a seguir:

Temperatura

Dentre os diversos parâmetros que afetam a biodegradação anaeróbia, a temperatura tem papel importante no resultado do processo. Esse parâmetro atua diretamente sobre a atividade das enzimas e co-enzimas e interfere na produção de metano e na qualidade do digestato (EL-MASHAD *et al.*, 2003).

As bactérias podem ser divididas em três grupos: psicrófilas (0 a 20 °C); mesófilas (20 a 42 °C) e termófilas (42 a 75 °C). No campo de atuação das mesófilas, a velocidade de decomposição cai pela metade a cada diminuição de 10 °C quando abaixo dos 35 °C (RAJESHWARI *et al.*, 2000). A digestão anaeróbia convencional é realizada na faixa de temperatura mesofílica, entre 35 e 37 °C (KIM *et al.*, 2006), apesar disso, a performance do processo aumenta com a elevação da temperatura, operando em faixa termofílica (SÁNCHEZ *et al.*, 2001; VINDIS *et al.*, 2009).

Dentro da faixa termofílica, a biodegradação anaeróbia possui taxas metabólicas mais elevadas, maior facilidade de degradação de sementes mais difíceis de decompor (EL-MASHAD *et al.*, 2003), produção de biogás mais elevada e diminuição do tempo de retenção do material orgânico no reator, em comparação com a faixa mesofílica (KIM *et al.*, 2006; VINDIS *et al.*, 2009). O processo sofre menor inibição pelo acúmulo de amônia quando submetido à faixa termofílica, em comparação com a mesofílica (GALLERT *et al.*, 1998).

Contudo, as desvantagens da ocorrência do processo de biodegradação anaeróbia executado sob altas temperaturas estão relacionadas (i) à maior sensibilidade do consórcio microbiano às mudanças ambientais, quando comparado aos consórcios submetidos a

condições de temperatura mesofílica; (ii) à taxa global de solubilização do substrato, que pode ser consideravelmente menor a 55° e a 65 °C do que em condições mesofílicas; (iii) ao fato da faixa termofílica necessitar de mais energia para a manutenção da temperatura (ZHANG *et al.*, 2014).

A comparação entre os principais parâmetros de controle e de operação em sistemas de tratamento de esgoto sanitário em diferentes temperaturas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre sistemas mesofílico e termofílico, baseados em parâmetros de controle e operação

Parâmetros	Sistema mesofílico	Sistema termofílico
Faixa de temperatura (°C)	35-40	55-60
Faixa de pH	7,2-8,0	7,2-8,5
Flutuação de temperatura tolerada pelo sistema (°C)	3-5	1-2
Tempo de retenção hidráulica (d)	15-20	3-10
Máxima redução de DQO (%)	65-80	80-90
Máxima redução de material orgânico (%)	45-55	55-70
Produção de Biogás (Nm ³ /1000 kg de material orgânico seco)	920-980	950-1000
Conteúdo de gás metano no biogás (%)	60-70	70-85
Produção de ácidos voláteis (mg CH ₃ COOH/dm ³)	1500-2500	3000-4000
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /dm ³)	4000-6000	3000-5000

Fonte: KARDOS *et al.*, 2011.

Moset *et al.* (2015) estudaram o tratamento anaeróbio de dejetos bovino sob duas condições distintas de temperatura, 35°C e 50 °C, encontraram maior degradação da matéria orgânica (especialmente as fibras), aumento do pH e aumento da produção de metano no processo termofílico quando comparado ao processo mesofílico. Além disso, encontraram menor diversidade microbológica nos reatores termofílicos, especialmente para bactérias, onde ocorreu intensificação dos membros da classe Clostridia.

Rodríguez *et al.*, (2013) compararam reatores em condições mesofílicas (35 °C) e termofílicas (55° C) abastecidos com fração orgânica dos resíduos urbanos, através de análise cinética. O modelo apresentou superperiodicidade de 107% de produção de metano em regime termofílico

em comparação ao mesofílico, encontraram também valores de taxas de crescimento de microorganismos maiores para o processo termofílico.

Potencial hidrogeniônico - pH

A concentração de ácidos graxos voláteis influencia significativamente o pH do meio, dos parâmetros que afetam a digestão anaeróbia, o pH está entre os principais (ZHANG *et al.*, 2014). Em estudo realizado por Kerroum *et al.* (2014), reatores anaeróbios de tratamento de resíduo líquido de laticínio, em temperatura de 55°C, sob quatro condições de pH, resultaram em taxas, consideravelmente, maiores de produção de metano e de taxa de decomposição da matéria orgânica com pH igual a 7,0. Lay *et al.* (1997) obtiveram valores ótimos de crescimento dos organismos metanogênicos sob pH igual a 6,8.

O controle do pH influencia também a concentração e o tipo de ácidos graxos gerados na acidogênese. Baixo pH favorece a concentração de ácido butírico, enquanto pH igual a 8 contribuiu para formação dos ácidos acético e propiônico (HORIUCHI *et al.*, 1999; HOUJIUCHI *et al.*, 2002). O pH ideal para produção de metano está na faixa entre 6,8 a 7,2, enquanto pH mais baixo é recomendável na fase ácida (MUDRAK; KUNST, 1986). Para Zhang *et al.* (2014), o intervalo de 6,5 a 7,2 é favorável à proliferação das metanogênicas, já as bactérias anaeróbias fermentativas necessitam de pH na faixa de 4,0 a 8,5 para o crescimento.

Relação mássica carbono/nitrogênio

A relação mássica carbono/nitrogênio está intimamente associada à performance do processo de biodegradação anaeróbia. Ótima relação C/N é necessária para propiciar o balanço apropriado de nutrientes, requerido pelas bactérias, bem como a manutenção de um ambiente estável. Geralmente, a relação C/N na faixa de 20 a 30 é considerada ótima para o processo de biodigestão anaeróbia (LI *et al.*, 2011).

Wang *et al.* (2012) realizaram a co-digestão anaeróbia de três tipos de material orgânico (resíduo de laticínio, esterco de galinha e palha de trigo), encontrando a máxima produção de metano com relação C/N igual a 27,2, com pH estável e baixa concentração de nitrogênio amoniacal. Resultado similar foi encontrado por Zeshan e Visvanathan (2012) que realizaram co-digestão de diferentes tipos de resíduos vegetais e papel, encontrando o

resultado de maior produção de biogás e 30% menos amônia nos digestores com relação C/N igual 27,2, em comparação aos digestores com relação C/N igual a 32,0.

Porém, estudos recentes demonstraram que a digestão anaeróbia procede de forma satisfatória com a relação C/N nos valores de 15 até 20 (ZHANG *et al.*, 2014). Zhong *et al.* (2013) realizaram diferentes testes com digestão anaeróbia de algas azuis (*Microcystis spp.*) e co-digestão de algas com palha de milho, obtendo melhores resultados com a relação C/N nos digestores iguais a 20.

A relação C/N imprópria pode resultar no aumento da concentração de nitrogênio amoniacal e/ou acumulação de ácidos graxos voláteis no reator. Ambos, são importantes produtos intermediários, contudo são potenciais inibidores do processo, devido ao fato da alta concentração desses dois elementos no reator conduzir ao decaimento da atividade metanogênica (PARKIN; OWEN, 1986).

Ácidos graxos voláteis

Os ácidos graxos voláteis, principalmente ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico e ácido valérico, são importantes componentes intermediários durante o processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Entre esses quatro, os ácidos acético e propiônico são dominantes na produção de biogás. Geralmente, os ácidos graxos voláteis produzidos por bioprocessos anaeróbios podem ser transformados em CH₄ e CO₂ pelos microrganismos sintróficos acetotróficos e metanogênicos. Porém, se presentes em altas concentrações, causam estresse no consórcio microbiano, fato que conduz a diminuição do pH e consequente inibição das últimas etapas do processo (BUYUKKAMACI; FILIBELI, 2004).

A interrupção do processo de biodigestão anaeróbia pode ser ocasionada quando concentrações de ácido acético excedem 0,8 g/L ou a relação entre ácido propiônico e ácido acético for superior a 1,4 g/L. Acima de 0,8 g/L, o operador pode tomar ações corretivas, porém, quando a relação entre ácido propiônico e ácido acético estiver acima de 1,4 o prejuízo já foi concretizado (HILL *et al.*, 1987).

3.3. Biogás

O biogás é produto do processo de biodegradação anaeróbia da matéria orgânica por microrganismos. Esse processo ocorre em condições estritamente anóxicas e depende da

atividade coordenada de uma complexa associação microbológica para a transformação de material orgânico em dióxido de carbono e metano (APPELS *et al.*, 2008). Assim, o biogás é, principalmente, constituído de gás metano, dióxido de carbono, e quantidades traços de hidrogênio, nitrogênio e monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e vapor d'água, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição do biogás

Metano	CH ₄	45% - 75%
Dióxido de Carbono	CO ₂	25% - 50%
Água (vapor)	H ₂ O	2% - 7%
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	0,05% - 1%
Traços de outros componentes	N ₂ , H ₂ , O ₂ , NH ₃ , CO	<5%

Fonte: Adaptado de FRICKE *et al.*, 2015.

O biogás pode ser utilizado de diferentes maneiras:

- biogás para aquecimento: talvez seja a maneira mais simples de utilização do biogás, pois para esse propósito, não há necessidade de tratamento prévio, apenas remoção da umidade. O biogás é utilizado comumente para aquecimento de edificações e o excesso de calor é enviado para rede de calefação (ALKHAMIS *et al.*, 2000).
- geração de energia elétrica: A energia contida no biogás pode ser convertida em eletricidade e calor, são produzidas por geradores gás. A proporção de produção de energia e calor depende da configuração da planta, mas geralmente é ao redor de 35% de eletricidade e 65% de calor (JOHANSSON *et al.*, 1993)
- biogás como combustível automível: o biogás para uso automotivo necessita de significantes processos de purificação. O teor de metano no biogás deve estar entre 95% e 99%. Impurezas, partículas e umidade devem ser removidas, para evitar danificações mecânicas nas peças automotivas e danos ambientais. No fim de 2007, aproximadamente 4000 automóveis rodavam na Suécia utilizando biogás como combustível (PAPACZ, 2011).
- redes de distribuição de gás: o biogás purificado pode ser injetado na rede de distribuição de gás, em Estocolmo, por exemplo, há redes de gás natural para

utilização em fogões de cozinha, aquecedores de água, fornos, etc. (JIANG, 2011).

- biogás na indústria: muitas refinarias de cana de açúcar, destilaria, laticínios, fábricas de papel aproveitam os resíduos de processos de produção para recuperação energética via digestão anaeróbia, o biogás obtido pode ser utilizado na própria planta para aquecimento e produção de energia elétrica (WEILAND, 2010).

Atualmente, é crescente a busca pela ampliação da participação de fontes de energia renovável na matriz energética dos países. Por exemplo, a União Européia definiu que 20% das suas necessidades energéticas, a partir de 2020, devem ser provenientes de sistemas de energia renovável (PARLAMENTO EUROPEU, 2015). A maior parte das fontes de energia renovável desse continente, atualmente, é proveniente da agricultura e da silvicultura. No entanto, no futuro, pelo menos 25% da bioenergia poderão ser originados de biogás, produzido a partir de materiais orgânicos úmidos (HOM-NIELSEN *et al*, 2009).

No Brasil, a resolução ANP nº 685 de 29/06/2017 estabelece as especificações do biometano de origem nacional a ser comercializado em todo o território nacional, oriundo de aterros sanitários e de estação de tratamento de esgoto destinados ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais.

O material residual orgânico como restos alimentares, esgoto sanitário, lodo de estações de tratamento, resíduos da indústria alimentícia e química, esterco animal, resíduos da agricultura, resíduos orgânicos de podas municipais constituem fontes abundantes e renováveis. Esse material está disponível nos países e pode ser convertido em biogás pelo processo de biodegradação anaeróbia (BUDZIANOWSKI, 2012; LINO; ISMAIL, 2015).

Diante do exposto, é possível considerar que o processo de biodegradação anaeróbia de compostos orgânicos, com produção de biogás para aproveitamento energético, constitui uma atrativa tecnologia para atender a crescente demanda energética dos países. Especialmente, nas regiões tropicais que possuem elevadas temperaturas médias e grandes produções de material orgânico.

A bioestimulação do consórcio anaeróbio microbiano por exposição de campo magnético pode vir a contribuir com a evolução da eficiência dos digestores, na remoção de sólidos e produção de biogás, fazendo que essa tecnologia se torne mais atrativa.

3.4. Considerações gerais sobre magnetismo

Há relatos, na Grécia antiga, que descrevem as “maravilhosas” propriedades de uma rocha que tinha “alma” de origem divina. Essa rocha, teria sido encontrada por um pastor chamado Magnes, dando origem ao nome, magnetita ($\text{FeO.Fe}_2\text{O}_3$). Contudo, também existem evidências de que o nome magnetita foi utilizado devido ao fato dessa rocha ter sido encontrada em abundância em uma região da Turquia chamada Magnésia. Assim, o fenômeno que permite que certos materiais atraiam partículas de ferro, recebeu o nome de magnetismo. A primeira grande aplicação tecnológica do magnetismo, surgiu na renascença e foi a bússola, instrumento amplamente utilizado por navegantes e viajantes (NOVAK, 1999).

Nos dias atuais, o magnetismo está presente nos projetos de quase todos os equipamentos eletroeletrônicos usados na indústria, comércio, residências e hospitais. Campos magnéticos estão também presentes em nossas vidas de forma mais sutil, a Terra é um gigantesco corpo magnetizado. Outros objetos celestes como estrelas, quasares, pulsares, bem como estruturas muito maiores, como galáxias também possuem, cada um, seus campos magnéticos (GUIMARÃES, 2011).

A ampla utilização de forças magnéticas pela indústria tecnológica em geral provém da estreita relação do magnetismo com os fenômenos elétricos. A primeira relação entre o magnetismo e o movimento de cargas elétricas foi estabelecida em 1819, pelo dinamarquês Hans Christian Oersted que verificou o desvio da agulha de uma bússola quando aproximada a um condutor percorrido por corrente elétrica. Anos depois, Michael Faraday e Joseph Henry descobriram que o movimento de um ímã nas proximidades de uma espira condutora induz corrente elétrica pela espira. Este fato conduziu à compreensão de que a atração e a repulsão magnéticas são produzidas, fundamentalmente, pelo efeito de interação magnética dos elétrons dos átomos no interior dos corpos (PETRACONI FILHO, 2009).

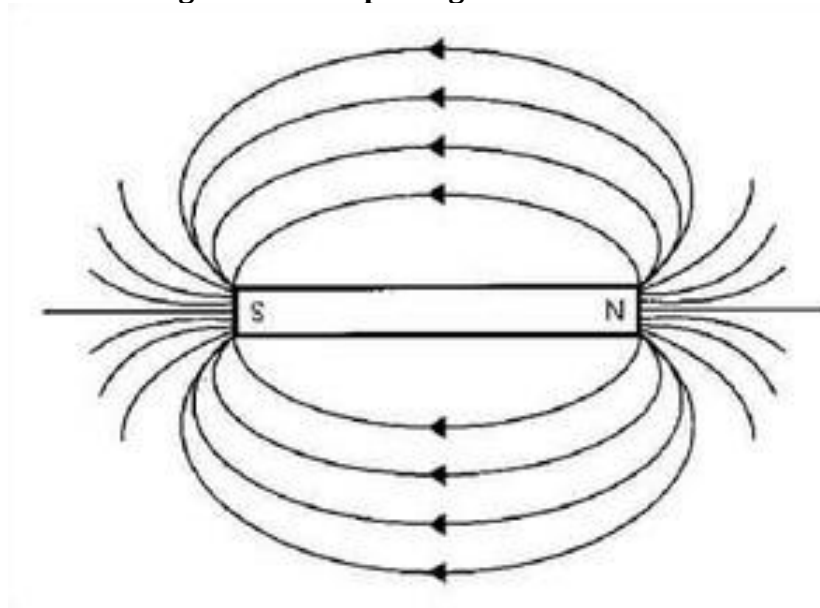
Assim como a força gravitacional e a força elétrica, a força magnética não necessita de contato. Dessa forma, fenômenos magnéticos são medidos pela intensidade do campo, assim como nos fenômenos elétricos. Consequentemente, diz-se que um ímã gera no espaço ao seu redor um campo, o qual se denomina campo magnético. O campo magnético interage com outros ímãs, com as substâncias que possuem características magnéticas (ex: prótons e elétrons) e com correntes elétricas. Por convenção, considera-se que, no campo exterior a um

ímã, as linhas de campo saem pelo polo norte e entram pelo polo sul do ímã (SANTOS, 2016), como ilustrado na Figura 3.

Um campo eletromagnético pode ser criado através do movimento de cargas elétricas, tal como o fluxo de corrente num condutor. Esse campo magnético é originado pelo momento de giro do dipolo magnético (referente ao spin do elétron) e pelo momento da órbita do dipolo magnético de um elétron dentro de um átomo. A esse campo magnético originado por uma corrente elétrica é denominado de Campo Eletromagnético.

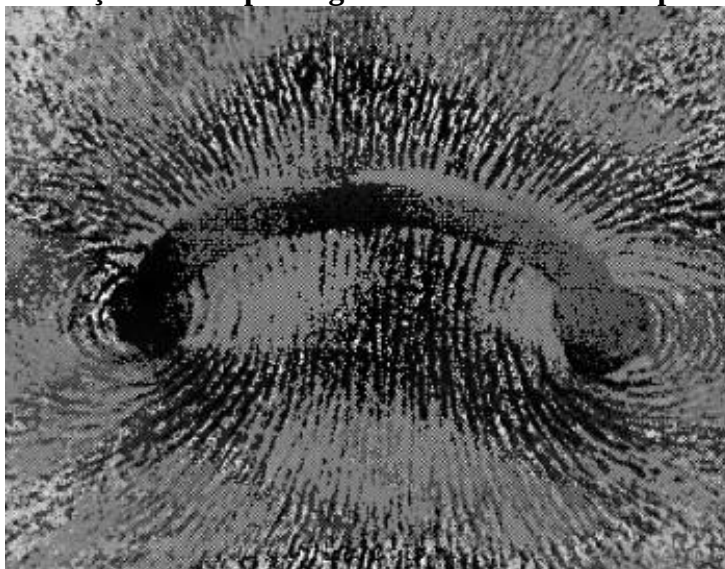
O condutor em forma de espira circular quando percorrido por corrente elétrica é capaz de concentrar as linhas de campo eletromagnético no interior da espira, como mostrado na Figura 4, formando uma área densamente magnetizada do interior da espira (MUSSOI, 1996).

Figura 1 – Campo magnético em um ímã



Fonte: SANTOS, 2016

Figura 2 – Visualização do campo magnético no interior da espira circular



Fonte: GOZZI, 1996

Portanto, trata-se de um fenômeno que influencia diversos outros processos tanto no universo, como sobre a superfície terrestre.

3.5. Magnetismo na água e em sistemas biológicos

Com o intuito de compreender a interferência de fenômenos magnéticos sobre as propriedades da água, Barboza (2002) cita o modelo proposto por Frank e Wen em 1957, a água como agrupamento de *clusters*, esse modelo sugere que a água é formada por diferentes arranjos de moléculas de água $\{x(\text{H}_2\text{O})_i + y(\text{H}_2\text{O})_j + z(\text{H}_2\text{O})_k + \dots\}$, ou seja, formada por uma população de *clusters* que estão marcados naquele agrupamento de água mesmo esse sofrendo alterações ambientais.

A água deionizada, quando exposta a campos magnéticos da ordem de 0,1T, apresentou alterações em suas propriedades físico-químicas e, principalmente, na absorção da radiação ultravioleta na faixa de 190 a 260 nm, sugerindo que a exposição da água ao campo magnético diminui o tamanho médio dos *clusters* (BARBOZA, 2002).

Porém, Cai *et al.*, (2009) estudaram o efeito do campo magnético nas ligações moleculares de hidrogênio, e concluíram que a exposição da água a 0,5 T tende a aumentar o tamanho médio dos *clusters* e que mais ligações de hidrogênio são formadas.

Ainda, sobre a aplicação de campo magnético sobre sistemas em meio aquoso, verificou-se mudança da condutividade elétrica quando um campo de 15 mT foi aplicado por 5 minutos em água destilada. O efeito foi mantido por 24 horas, esse fenômeno é conhecido como efeito memória ou memória magnética (SZCZEŚ *et al.*, 2011).

Jung e Sofer (1997) demonstraram o aumento da oxidação do fenol por cultura mista na faixa de 0,15 T e 0,35 T, especialmente o reator magnetizado com imã de 0,15 T teve os maiores resultados (7,5 vezes maior do que o reator controle) para taxa de biodegradação e para taxa de consumo de oxigênio (13,5 vezes maior do que o reator controle). Nesse estudo, foi utilizado o polo sul do imã em contato com o reator, contudo, a metodologia da aferição do campo magnético no interior do reator não foi apresentada.

Porém, é sabido que o campo magnético de um imã tem sua intensidade de campo magnético máxima próxima a superfície do imã e diminui com a distância, portanto a intensidade do campo magnético no interior do reator foi efetivamente menor do que os valores relatados e não uniforme no interior do reator.

Em estudo investigando os efeitos do campo eletromagnético sobre a atividade de lodos ativados no tratamento de águas residuais, Yavuz e Çelebi (1999) encontraram máxima diferença (44%) nas taxas de remoção do substrato e pH de 7,5, com vantagem dos reatores magnetizados até 17 mT constantes, acima desse valor foram encontrados resultados piores para os reatores magnetizados. Ainda, no mesmo estudo, os autores aplicaram campo eletromagnético pulsante com 2 s ligado e 2 s desligado, nesse experimento não foi encontrada significativa mudança no processo.

Del Re *et al.* (2004) estudaram o efeito sob a exposição de ondas quadradas pulsantes e ondas magnéticas sinusoidais em colônias de *Escherichia coli*. Os autores encontraram maior viabilidade celular quando exposto às ondas sinusoidais. Ainda, analisaram a exposição dos microrganismos às ondas quadradas magnéticas pulsantes, o que resultou em menor taxa de reprodução celular. Os resultados demonstraram que os efeitos biológicos dos campos magnéticos podem ser dependentes das características físicas do campo magnético, em particular da forma da onda.

Tomska e Wolny (2008) estudaram a degradação de compostos nitrogenados e a taxa de consumo de oxigênio dos microrganismos nitrificantes, expostos ao campo magnético de 40 mT. Nesse estudo, foram utilizados imãs acoplados à tubulação de recirculação do lodo

ativado, novamente o valor de 40 mT é pouco representativo, pois ímãs permanentes não apresentam campo magnético uniforme no interior do tubo. Porém os autores obtiveram os seguintes resultados: (i) a exposição periódica ao campo magnético por meio do uso de ímãs permanentes não afetou a remoção de DQO do esgoto de composição semelhante ao esgoto doméstico; (ii) as transformações dos compostos de nitrogênio obtiveram valores mais elevados para o sistema em que os lodos ativados foram, periodicamente, expostos ao magnetismo de indução de 40 mT; (iii) a exposição periódica dos lodos ativados ao campo magnético intensificou a taxa de captação de oxigênio dos microrganismos nitrificadores.

Em estudo com tratamento biológico por lodos ativados no tratamento de águas residuais, Ji *et al.* (2010) encontraram resultados indicativos de que a indução do campo magnético afetou a taxa de biodegradação de DQO e a curva de crescimento dos microrganismos estudados. A taxa de remoção de DQO atingiu o maior valor (41%) e a curva de crescimento mais elevada ocorreram com campo de 20 mT. A biodegradação de compostos orgânicos sob campo magnético atingiu estados estáveis após 48h.

De acordo com Hunt *et al.* (2009), há três classes primárias de experiências com influências do eletromagnetismo que podem ser distinguidas:

- (i) Campos predominantemente magnéticos: com regime de campo próximo (permanente, mudando lentamente e campos pulsados de bobinas magnéticas);
- (ii) Campos predominantes elétricos: com regime de campo próximo (permanente ou em mudança lenta);
- (iii) Campos com componentes elétricos e magnético: com regime de campo distante (frequências de oscilação típica de 100kHz ou mais);
- (iv) Campos como em (i), (ii), (iii) com única topologia espacial e/ou temporal.

Uma vasta gama de microrganismos, tanto procariotos (eubactérias, arqueas) quanto eucariotos (algas, fungos e protozoários), tem sido estudada sob a condição do grupo (i), os campos magnéticos podem ser estáticos ou oscilantes criados por ímãs permanentes ou eletroímãs, como bobinas helmholtz e bobinas solenoides. Os experimentos biológicos geralmente usam uma configuração bipolar padrão com um campo N/S magnético ou +/- elétrico para estimulação.

Já o grupo (ii) é mais frequentemente usado em eletroporação onde campos elétricos pulsados fortes são utilizados para permeabilização de alguns ingredientes celulares ou moléculas estranhas, facilitando a troca de substâncias entre as células e o meio.

O grupo (iii) é normalmente usado como energia eletromagnética se propagando em forma de onda, considerado como regime de campo distante, pode ser propagado através de uma antena, magnetron ou klynstron. Esta classificação inclui as ondas de rádio não ionizantes e as micro-ondas, bem como as radiações ópticas e ionizantes como visível, ultra violeta, raios X e radiação gama.

A ação do campo magnético na água e em sistemas biológicos, executada de forma sistemática, é considerada promissora, pois diversos estudos confirmaram a influência da ação do campo magnético sobre sistemas que contém água em sua constituição (BARBOZA, 2002).

Portanto, de acordo com os estudos descritos, existem evidências experimentais de que o campo magnético pode alterar o comportamento de sistemas biológicos em meios aquosos. Contudo, ainda não existem estudos que descrevam precisamente qual o mecanismo de ação do campo magnético sobre a atividade biológica.

Diversas configurações são possíveis para aplicação de campo magnético em reatores anaeróbios, variando a intensidade do campo, o tipo de onda e o tempo de exposição. A origem podem ser de ímã naturais ou artificiais e de origem elétrica.

3.6. Magnetismo em sistemas anaeróbios

Recentemente, foram desenvolvidos estudos que apontaram modificações dos parâmetros envolvidos no processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos pela interferência de campos eletromagnéticos. Consequentemente, existem evidências de que a produção de metano pode ser favorecida com desenvolvimento de reatores magnetizados.

No estudo realizado por Banik *et al.* (2006), as arqueas metanogênicas (*Methanosarcina Barkeri* DSM-840) foram expostas à radiação de micro-ondas na faixa de 13,5 – 36,5 GHz. Os resultados dessa pesquisa demonstraram rápido crescimento microbiano e maior volume de biogás produzido pelos microrganismos que foram expostos às micro-ondas. A microscopia da cultura pura revelou que as células expostas às microondas eram maiores em dimensão (20% maiores) e quantidade. Os resultados encontraram maior produção de metano e redução da fase lag.

Dębowski *et al.* (2014) estudaram a ação de ímãs de neodímio (0,38 T a 0,7 mm de distância da superfície do ímã) sobre o processo de biodegradação anaeróbio de águas residuais provenientes de atividades de laticínio. Nesse estudo, foi utilizado campo magnético agiu sobre as fases hidrólise e acidogênese. Os autores encontraram efeito positivo no volume de biogás produzido e na porcentagem de metano no biogás. O estudo ainda encontrou efeito positivo sobre a remoção de DQO (76%).

Resultados similares foram encontrado por Zieliński *et al.* (2014) , que aplicaram campo magnético constante de intensidade de 0,38 T. Nesse estudo, foram utilizados ímãs de neodímio fixados ao frasco reagente. O experimento foi conduzido por 5 dias para o tratamento anaeróbio de resíduo de laticínio, foram usados 0,2 g de leite em pó para cada 200 cm³ de lodo anaeróbio, a temperatura média foi de 35 °C. Os resultados apontaram para variação positiva do reator magnetizado na produção de biogás (4,6% maior comparado ao controle) e na análise de remoção de DQO (14% mais eficiente o reator magnetizado).

Haritwal *et al.* (2015) estudaram a digestão anaeróbia de dejetos bovinos, na proporção de 50% de dejetos e 50% de água, sob influência de campo magnético com intensidade de 0,42 T. O reator estudado tinha 40 L de capacidade volumétrica, porém 30 L de volume de reação, a temperatura foi mantida entre 42 °C a 45 °C, o pH não foi controlado. O inóculo utilizado foi proveniente de tratamento anaeróbio de óleo de palma. Essas condições resultaram em efeito positivo tanto para produção total de biogás, como para porcentagem de metano no biogás produzido pelo reator magnetizado (73,4% de CH₄ no reator magnetizado e 57,8% no reator controle). Com relação à remoção de sólidos totais e sólidos voláteis o reator magnetizado também apresentou melhores resultados (59% e 57% no reator magnetizado e 46% e 40% o reator controle). Além disso, os reatores magnetizados obtiveram melhores resultados na remoção de DQO (14% mais efetiva no reator magnetizado).

Dębowski, *et al.* (2016) estudaram a biodegradação anaeróbia de algas em reatores sob campo magnético de 0,6 T. Nesse experimento foi controlado o tempo de exposição dos reatores ao campo magnético. Os resultados encontrados apontaram influência positiva sobre a atividade microbiológica com tempo de exposição na faixa de 144 a 216 minutos por dia e, também, redução da produção de biogás e de biometano com tempo de exposição acima dessa faixa.

Na Tabela 3 são mostrados diferentes estudos com diversas intensidades de campo magnético sobre reatores com diferentes substratos, bem como alguns resultados atingidos pelos autores.

Tabela 3 – Estudos com aplicação de magnetismo em sistemas anaeróbios para diferentes substratos e intensidades.

Autor	Intensidade do campo	Metodologia de geração do campo	Substrato	Resultado
Banik <i>et al.</i> , 2006	Micro-ondas 13,5 – 36,5 GHz	Oscilador de varredura de potência	Substrato sintético	Rápido crescimento microbiano; maior produção de biogás.
Zieliński <i>et al.</i> , 2014	0,38 T	Imãs de neodímio	Água residual de laticínio	Maior produção de biogás; maior remoção de DQO.
Dębowski, <i>et al.</i> , 2014	0,38 T a 0,7 mm	Imãs de neodímio	Água residual de laticínio	Efeito positivo na produção de biogás, metano e remoção de DQO.
Haritwal <i>et al.</i> , 2015	0,42 T	Núcleo de transformador laminado	Esterco bovino	Maior produção de biogás; maior produção de metano; Maior remoção de DQO e sólidos.
Dębowski, <i>et al.</i> , 2016	0,6 T	Anel magnetizado de cerâmica	Microalgas	Relação entre tempo ideal de exposição ao magnetismo, 144 a 216 minutos por dia.

Os estudos apresentados nessa revisão de literatura demonstram interferência de campos magnéticos sobre sistemas biológicos anaeróbios, contudo, até a presente data, poucos resultados comprovam o mecanismo de atuação da influência do magnetismo em sistemas anaeróbios. De acordo com a literatura estudada, o magnetismo pode atuar de diversas formas, como na disposição das ligações de hidrogênio, nos arranjos das moléculas da água, no pH da solução, na permeabilidade das membranas celulares dos microrganismos e outras.

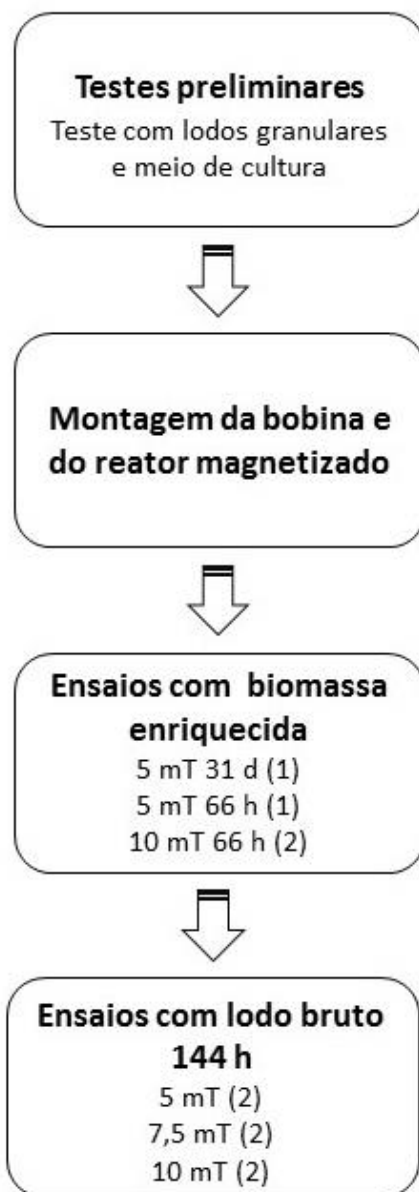
Portanto, é necessário que pesquisas sejam realizadas no sentido de aumentar a informação produzida sobre a atuação de campo eletromagnético em sistemas biológicos. Essas pesquisas devem ser realizadas com o intuito de ampliar a compreensão do poder de ação de reatores magnetizados sobre o aumento da eficiência de tratamento de resíduos e da

produção de biogás como fonte renovável de energia, via digestão anaeróbia de compostos orgânicos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo, estão descritos os equipamentos e o procedimento experimental realizado para o desenvolvimento de cada ensaio. Para o cumprimento dos objetivos propostos foram estipuladas quatro etapas conforme demonstrado no fluxograma apresentado pela Figura 5.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Dados da pesquisa.

4.1. Testes preliminares com lodos granulares e meio de cultura

Na primeira etapa da pesquisa, foram realizados ensaios com quatro lodos granulares distintos. Os testes tinham por finalidade avaliar e selecionar o lodo de maior atividade metanogênica, para a montagem dos reatores com campo eletromagnético.

Para tanto, foram adquiridos quatro lodos granulares, provenientes de reatores anaeróbios UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) de tratamento de efluentes com carga orgânica de três origens distintas:

- (L1) Avícola Dacar, lodo de estação de tratamento de efluente de avicultura (Tietê, SP);
- (L2) Avícola Ideal, lodo de estação de tratamento de efluente de avicultura (Pereiras, SP);
- (L3) Estação de Tratamento anaeróbio de Esgoto Sanitário (São Carlos, SP);
- (L4) Mistura de L1, L2 e L3, na mesma proporção.

A caracterização dos lodos foi realizada pelas análises da série de sólidos que quantificaram sólidos totais fixos (STF), sólidos totais voláteis (STV) e sólidos totais (ST), de acordo com APHA (2005).

Nessa etapa, ainda, foram testadas diferentes condições nutricionais, com a intenção de avaliar a produção de biometano pelo consórcio microbiano presente nos lodos granulares. As condições nutricionais ensaiadas testadas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições nutricionais avaliadas na etapa de testes preliminares.

	Meio de cultura - M			
	M1	M2	M3	M4
Glicose g.L⁻¹	10,00	2,00	1,00	0,67
Peptona g.L⁻¹	5,00	1,00	0,50	0,33
Extrato de levedura g.L⁻¹	5,00	1,00	0,50	0,33
Extrato de carne g.L⁻¹	5,00	1,00	0,50	0,33

Fonte: Dados da pesquisa.

Nessa fase, além da variação das condições nutricionais apresentadas, também foi realizado teste com agente alcalinizante e fonte de potássio nas concentrações de: 0,4 g/L KH₂PO₄ e 0,4 g/L K₂HPO₄, conforme descrito por Dolfing; Bloeman (1985).

No total, foram testadas 25 condições, resultantes da combinação de quatro diferentes concentrações nutricionais (M1, M2, M3, M4), quatro lodos granulares (L1, L2, L3 e L4) e

a presença de agente alcalinizante. As 25 condições foram analisadas em duplicata, o que resultou em 50 reatores anaeróbios em batelada. De cada reator foi extraída apenas uma coleta de dados finais. As combinações estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Configurações dos ensaios testados na etapa de pré-ensaio.

Condição nutricional	M1	M2		M3		M4	
K - Alcalinizante	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
L1 – Lodo Dakar	L1M1K	L1M2K	L1M2	L1M3K	L1M3	L1M4K	L1M4
L2 – Lodo Ideal	L2M1K	L2M2K	L2M2	L2M3K	L2M3	L2M4K	L2M4
L3 – Lodo ETE	L3M1K	L3M2K	L3M2	L3M3K	L3M3	L3M4K	L3M4
L4 – Lodo mistura	L4M1K	L4M2K	-	L4M3K	-	L4M4K	-

Fonte: Dados da pesquisa.

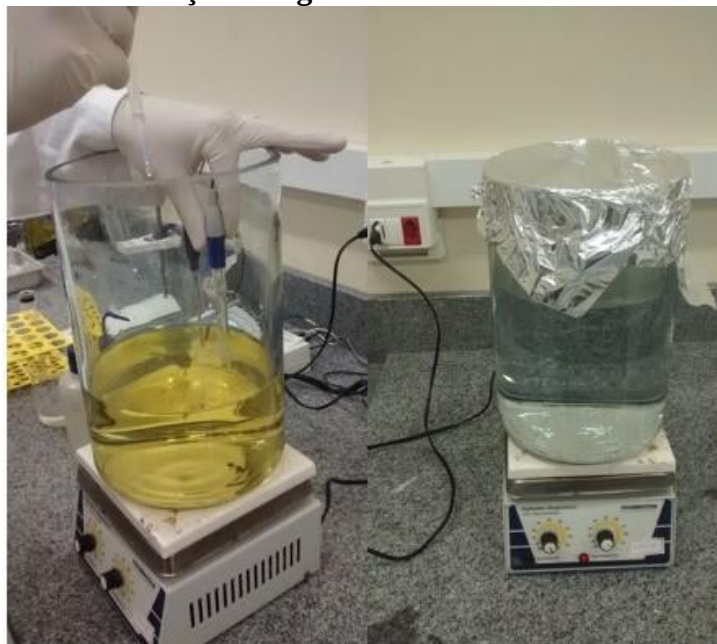
Os reatores foram montados em reatores com volume útil de 100 ml. Cada reator foi alimentado com 45 ml, sendo 20% (v/v) de lodo, que corresponderam em peso seco (sólidos totais) a: L1 – 0,38 mg; L2 – 0,33 mg; L3 – 0,19 mg; L4 – 0,30 mg, os outros 80 % (v/V) foram completados com meio de cultura não seletivo (M1, M2, M3, M4). Os frascos foram mantidos a 37 ± 2 °C, em repouso, por 14 dias.

O pH, de todos os substratos dessa etapa, foi ajustado em 7,0 no início do experimento, pela adição de solução de NaOH (3M) e HCl (5M) e, também, foi medido no final do ensaio.

Para montagem dos reatores utilizados em todas as etapas dessa pesquisa, os reagentes foram pesados em balança de precisão e, posteriormente, diluídos em água anaeróbia por agitador magnético. A água anaeróbia foi obtida por ebulição de água deionizada, mantida a 100°C durante dez minutos, e resfriada até a temperatura ambiente para diluição dos reagentes (Figura 6), sob fluxo de N₂ (99,99%).

Durante todo o desenvolvimento dessa pesquisa, as análises de pH foram realizadas de acordo com APHA (2005), em equipamento Jenway modelo 3510. As amostras foram centrifugadas em centrífuga Hettich, marca Zentrifugen, modelo universal 320 R a 4°C, por 7 minutos a 9000rpm.

Figura 6 - Confecção da água anaeróbia e do meio de cultura.



Fonte: dados da pesquisa.

Também em todos os ensaios dessa pesquisa, a pressão interna dos reatores foi medida com medidor de pressão diferencial marca Labitrix, modelo XL28.1. Na Figura 7 é ilustrada a medição da pressão interna dos reatores com aparelho medidor de pressão, em relação a pressão atmosférica.

Figura 7 – Equipamento utilizado para a medição da pressão no interior dos reatores.



Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda, as análises de laboratório para a determinação do consumo de açúcares pelo consórcio microbiano foram realizadas de acordo com a metodologia proposta por Doboys *et al.*, (1956) e adaptada por Herbert *et al.*, (1971). As análises de DQO, do meio presente no interior de todos os reatores, foram efetuadas de acordo com APHA (2005).

A composição do biogás, produzido no interior dos reatores, foi medida em frações volumétricas de metano, dióxido de carbono e oxigênio com o analisador de gás LANDTEC GEM-2000, com precisão de 3%. Na Figura 8 exibe - se como foi realizada a medição da porcentagem de metano, o equipamento suga o biogás contido dentro do reator até que a pressão interna do reator igualasse a pressão atmosférica, a porcentagem de gás carbônico, metano e oxigênio gerados no *headspace* do reator são fornecidas pelo equipamento utilizado.

Figura 8- Analisador de gás LandTec GEM-2000.



Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos dados de volume do *headspace*, de temperatura no interior do reator e de pressão (manométrica do interior dos reatores somada à pressão atmosférica), foi possível calcular o número estimado de mols de biogás e de gás metano, produzidos por cada reator, por meio da equação de Clapeyron, Equação (5).

(5)

$$p.V = n.R.T$$

Na qual:

P: pressão [atm];

V: volume [L];

n: número de mols [mol];

R: constante universal dos gases perfeitos 0,0820574587 [atm.L/mol.K];

T: temperatura [K].

Para esse trabalho, foi adotada pressão atmosférica de 1 atm sempre que a equação de Clapeyron foi aplicada para estimativa de produção de gás.

4.2. Montagem da bobina e do reator magnetizado

Na etapa de avaliação da influência do campo eletromagnético sobre a atividade biológica, foi desenvolvido um reator magnetizado, composto pelo reator biológico e uma bobina para a geração do campo eletromagnético. O reator biológico foi montado em um frasco de 1 L que, em seguida, foi inserido no interior de uma bobina circular, confeccionada com diâmetro compatível com o frasco, de maneira a criar um campo uniforme e constante no interior do reator (Figura 9).

Figura 9 – Reator no interior da bobina



Fonte: Dados da pesquisa.

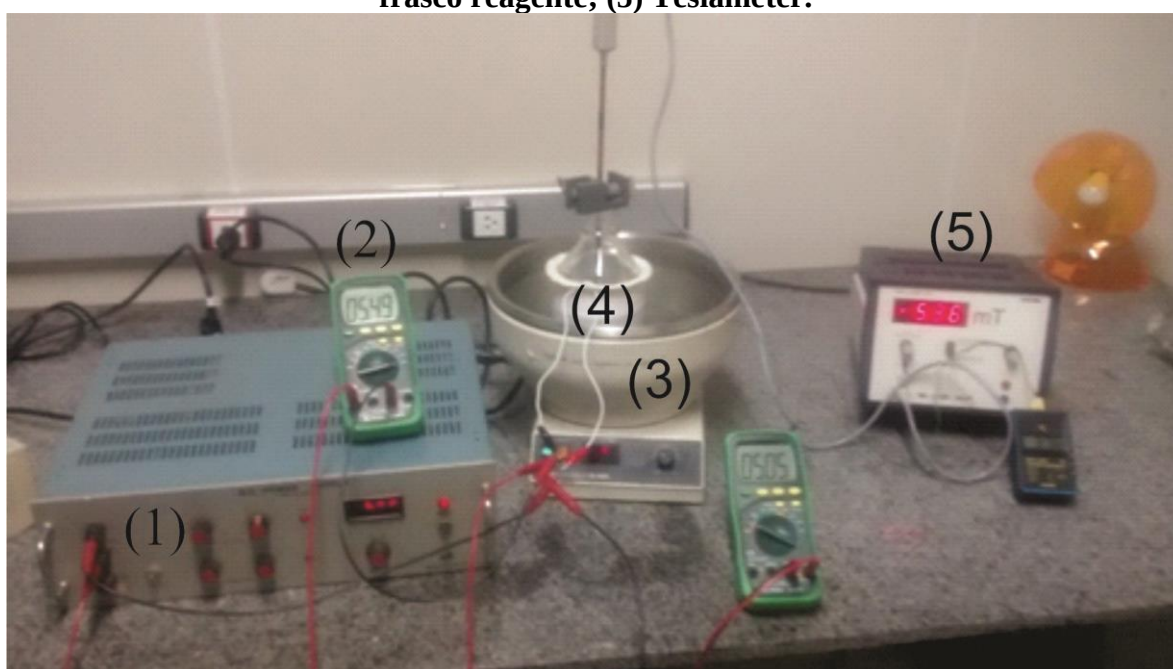
A bobina foi confeccionada com 1,5 kg de fio de cobre encapado 17 AWG com diâmetro de 1,10 mm. A bobina foi ligada a uma fonte, modelo D.C. *power supply* TR-9158,

a qual forneceu corrente contínua e tensão para bobina. A partir do fluxo de corrente elétrica, o campo eletromagnético constante foi criado no interior do frasco reagente.

A intensidade do campo eletromagnético gerado no interior do frasco reagente foi aferida com equipamento *Teslameter* digital marca PHYWE.

A curva de calibração da bobina foi obtida por meio da relação entre tensão e corrente e tensão e campo magnético criado no interior do frasco reagente, mantido em banho maria a 37°C (Figura 10).

Figura 10 - Aferição do campo magnético dentro do reator magnetizado. (1) Fonte regulável de corrente contínua; (2) Multímetro; (3) Banho Maria; (4) Bobina com frasco reagente; (5) Teslameter.



Fonte: Dados da pesquisa.

As correntes utilizadas para calibração foram de 0,5 A; 1,0 A; 1,5 A; 2,0 A e 3,0 A. A partir das curvas de calibração, foi possível ajustar o campo eletromagnético a partir da tensão e da corrente fornecidas pela fonte.

Dessa forma, foi obtido um frasco reagente magnetizado, com o polo sul na parte superior do reator. Em função da potência da fonte utilizada no experimento e do diâmetro do fio, à faixa de valor do campo eletromagnético mantido constante variou de 5 até 10 mT. A bobina operada com campo eletromagnético com intensidade maior que 10 mT apresentou aquecimento do fio devido a elevada amperagem da corrente elétrica.

Os frascos reagentes foram mantidos a 37 ± 2 °C em banho maria, sem agitação, durante o tempo de cada experimento. Durante o tempo de retenção de cada experimento, foram coletadas amostras de 3 ml sempre com seringa, através da tampa de borracha do frasco reagente. Com isso, os reatores não foram abertos durante os experimentos.

O *headspace* de cada reator foi preenchido com N₂ (100%) por injeção de nitrogênio gasoso por 10 minutos, para garantir as condições de anaerobiose (Figura 11).

Figura 11 – Adição de N₂ no headspace.



Fonte: Dados da pesquisa.

4.3. Operação dos reatores com biomassa enriquecida

Nessa etapa do trabalho, foram realizados quatro experimentos: um ensaio de 31 dias, com campo eletromagnético de 5 mT; um ensaio de 66 horas com campo eletromagnético de 5mT; dois ensaios de 66 horas com campo eletromagnético 10 mT. A metodologia adotada em cada um dos quatro experimentos está descrita a seguir.

Ensaio de 31 dias com campo eletromagnético de 5 mT

A avaliação da influência do campo eletromagnético foi avaliada a partir da montagem e comparação de 2 reatores semelhantes, um submetido ao campo eletromagnético constante de 5 mT e um segundo reator operado sem a influência do campo eletromagnético. Ambos os reatores foram colocados sob as mesmas condições operacionais.

A biomassa de inoculação, utilizada nos reatores analisados dessa etapa, foi proveniente da mistura de lodos granulares (L4), selecionada na etapa de ensaios preliminares

e enriquecida em meio de cultura não seletivo. Essa biomassa foi obtida através da centrifugação de duas amostras de 100mL de inóculo enriquecido, totalizando 200 mL para cada reator (Figura 12). O volume do sobrenadante foi descartado e a biomassa foi misturada ao meio de cultura até a obtenção de uma mistura homogênea.

Figura 12 - Inóculo centrifugado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Dessa forma, cada reator foi abastecido com biomassa presente em 20% v/V (3,33 g em massa seca) e 500 mL de meio de cultura. O *headspace* foi preenchido com atmosfera de N₂ (100%).

Os dois reatores, com capacidade volumétrica de 1L, foram alimentados com 500mL de meio de cultura não seletivo com a composição descrita na Tabela 5.

Tabela 5 – Condição nutricional dos reatores do ensaio de 31 dias com biomassa enriquecida.

Glicose g.L⁻¹	4,0
Peptona g.L⁻¹	1,0
Extrato de levedura g.L⁻¹	1,0
Extrato de carne g.L⁻¹	1,0
Fosfato de potássio monobásico anidro g.L⁻¹	0,4
Fosfato de potássio bibásico anidro g.L⁻¹	0,4
Bicarbonato de sódio g.L⁻¹	10,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Os frascos foram mantidos a 37±2 °C em banho maria, sem agitação, por 31 dias. No experimento foram coletadas 10 amostras de 3 mL, em intervalos de 3 dias. As análises realizadas foram pH e DQO, como indicado anteriormente. Os reatores não foram abertos

durante o tempo de retenção. A pressão do biogás de cada reator foi aferida 16 vezes nesse experimento, com o intuito de impedir o rompimento dos frascos, devido à alta pressão no interior dos mesmos.

O pH inicial foi mantido neutro, devido à adição do bicarbonato de sódio como agente tamponante do sistema.

As porcentagens de metano e dióxido de carbono no biogás foram medidas quatro vezes com os equipamentos já descritos. A quantidade de biogás e a quantidade de gás metano produzidas em cada reator foi calculada, como descrito anteriormente, por meio da equação de Clapeyron.

Ensaio de 66 horas com campo eletromagnético de 5 mT

Com o intuito de obter dados das primeiras horas da atuação do consórcio microbiano, foi realizado ensaio de 66 horas, com reator magnetizado sob intensidade de campo de 5mT, e outro sem influência de campo eletromagnético, para controle. Nesse período, ocorrem as fases hidrólise e acidogênese.

A biomassa de inoculação desse ensaio foi proveniente da centrifugação de duas amostras de 100 mL dos reatores analisados no ensaio de 31 dias. A proporção de inóculo foi de 20% (v/V), 2,07 g em massa seca. Cada reator foi abastecido com 500mL de meio de cultura mais inóculo, com 600mL de *headspace* em atmosfera de N₂ (100%).

A partir dos resultados obtidos no ensaio de 31 dias com campo magnético de 5 mT, optou-se pela ampliação da concentração de glicose para 10 g.L⁻¹. Essa opção se deu com o intuito de aumentar a produção de biogás e, com isso, ampliar o número para ser aferido pelo equipamento medidor de gás que possui margem de erro de 3% para aferição da porcentagem de gás metano. A condição nutricional utilizada nesse ensaio está descrita na Tabela 6.

Tabela 6 – Condição nutricional dos reatores do ensaio de 66 horas com biomassa enriquecida e campo eletromagnético de 5 mT.

Glicose g.L⁻¹	10,0
Peptona g.L⁻¹	5,0
Extrato de levedura g.L⁻¹	5,0
Extrato de carne g.L⁻¹	5,0
Fosfato de potássio monobásico anidro	0,4
Fosfato de potássio bibásico anidro	0,4
Bicarbonato de sódio	10,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Durante esse experimento, foram coletadas nove amostras sequenciais em tempos diferentes de 3 mL para análises de consumo de açúcares e pH, como descrito anteriormente. Também, nessas ocasiões, a pressão no interior dos reatores foi medida e, as porcentagens de metano e dióxido de carbono foram analisadas. Nesse ensaio, a frequência de coleta ocorreu de acordo com a produção de gás, sendo que a medição aconteceu sempre que a pressão estava acima de 0,5 mca. A DQO foi analisada no início e no final do ensaio.

O número de mols de biogás e de gás metano produzido em cada reator foi calculado como descrito anteriormente, por meio da equação de Clapeyron.

Esse experimento foi em realizado com tempo de retenção de 66 horas, durante as quais, os reatores foram mantidos sem agitação, em banho maria a 37°C.

Ensaio de 66 horas com campo eletromagnético de 10 mT

Nesse item, está descrito o procedimento empregado em dois ensaios com reator sob influência de campo eletromagnético de intensidade de 10 mT.

A biomassa de inoculação utilizada nesses ensaios foi centrifugada a partir de reatores estudados anteriormente que não foram expostos a campo eletromagnético. Para tanto, a proporção de inóculo utilizada foi de 20% (v/V), 2,3 g em peso seco. Cada reator foi abastecido com 500 mL de meio de cultura mais biomassa centrifugada, o volume do *headspace* foi 600 mL com atmosfera de N₂ (100%).

Nesses ensaios, a concentração de glicose foi dobrada em relação ao ensaio anterior com biomassa enriquecida e campo eletromagnético de 5 mT. Isso ocorreu com o intuito de aumentar a produção de biogás e, com isso, elevar os valores para medida da composição do gás gerado no *headspace* dos reatores. Também, foi dobrada a concentração de bicarbonato de sódio para garantir o tamponamento do sistema e, com isso, a manutenção do pH neutro no interior dos reatores. As condições nutricionais desses dois ensaios estão descritas na Tabela 7.

Durante esses ensaios, foram coletadas nove amostras de 3 mL para análises de consumo de açúcares e pH. A DQO foi examinada no início e no final do experimento. Também, foram medidas nove vezes a pressão no interior dos reatores e analisadas as porcentagens de metano e dióxido de carbono com os equipamentos já descritos. A

quantidade de biogás e de metano produzida em cada reator foi calculada como descrito anteriormente, por meio da equação de Clapeyron.

Tabela 7 – Condição nutricional dos reatores de dois ensaios de 66 horas com biomassa enriquecida e campo eletromagnético de 10 mT.

Glicose g.L⁻¹	20,0
Peptona g.L⁻¹	5,0
Extrato de levedura g.L⁻¹	5,0
Extrato de carne g.L⁻¹	5,0
Fosfato de potássio monobásico anidro	0,4
Fosfato de potássio bibásico anidro	0,4
Bicarbonato de sódio	20,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Nos dois ensaios, descritos nesse item, foi aplicado tempo de retenção de 66 horas, os reatores foram mantidos sem agitação e em banho maria a $37 \pm 2^\circ\text{C}$.

4.4. Ensaios com lodo bruto

Para essa etapa da pesquisa, foram realizados seis experimentos, todos com tempo de retenção de 144 horas: dois ensaios com campo eletromagnético de 5 mT; dois ensaios com campo eletromagnético de 7,5 mT; e dois ensaios com campo eletromagnético de 10 mT. O procedimento adotado para os seis experimentos está descrito a seguir.

Nessa etapa, foram operados 12 reatores em seis testes. Cada teste foi realizado com dois reatores, um sob influência de campo eletromagnético, e outro para comparação, operado sem atuação de magnetismo.

A biomassa de inoculação utilizada nos reatores foi diferente dos testes anteriores. Nesses experimentos foi utilizado lodo granular fresco, coletado no mesmo mês dos ensaios, proveniente da estação de tratamento de efluente de abatedouro de aves (Avícola Dacar, Tietê, SP). Foram utilizadas 100 g (peso úmido) de lodo em cada reator.

Para o abastecimento inicial dos reatores foram pesadas 300 g de lodo granular bruto e misturadas a 1,5 L de meio de meio de cultura, essa solução foi agitada vigorosamente e dividida em 3 partes para o abastecimento dos dois reatores e para amostragem inicial das análises. A condição nutricional utilizada nesses ensaios está descrita na Tabela 8.

Tabela 8 – Condição nutricional dos reatores de seis ensaios de 144 horas com lodo bruto.

Glicose g.L⁻¹	10,0
Peptona g.L⁻¹	5,0
Extrato de levedura g.L⁻¹	5,0
Extrato de carne g.L⁻¹	5,0
Fosfato de potássio monobásico anidro	0,4
Fosfato de potássio bibásico anidro	0,4
Bicarbonato de sódio	10,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao longo da operação dos reatores foram coletadas 18 amostras de 3 mL para análises de pH e consumo de açúcar, com procedimento descrito anteriormente.

A DQO foi analisada no início e no final do experimento. A pressão no interior dos reatores foi monitorada e as porcentagens de gás metano e dióxido de carbono foram analisadas com os equipamentos já descritos nos seguintes tempos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Intervalos de medição de porcentagem de metano e pH.

Tempo (h)																	
4	6,5	9	11,5	14	16,5	19	21,5	26	29,5	32	48	53,5	56	72	95	120,5	144,5

Fonte: Dados da pesquisa.

O volume de biogás e de gás metano produzido em cada reator foi calculado por meio da aplicação da equação de Clapeyron, a partir das medidas de pressão, como descrito anteriormente.

As taxas de produção de biogás e metano foram calculadas dividindo o incremento de biogás ou metano pelo intervalo de tempo entre o tempo da medição menos o tempo da medição anterior.

Os valores médios de biogás e de metano obtidos dos ensaios duplicados foram ajustados usando o software Statistic® (versão 8.0). O valor máximo de produção de metano foi obtido pelo ajuste sigmoidal não-linear da equação de Gompertz modificada (LAY et al., 1999). Utilizando a equação 2.

$$H = P \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{m,e}}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (2)$$

Onde, H é o valor acumulado de biogás ou metano (mmol/gSTV), P é produção de biogás ou metano potencial (mmol/gSTV), λ é o intervalo de tempo da fase Lag (h), e é 2,718 e t é o tempo de incubação (h).

Nesses ensaios, foi realizada análise da série de sólidos com quantificação de sólidos totais fixos (STF), sólidos totais voláteis (STV) e sólidos totais (ST), de acordo com APHA (2005), para o lodo granular e para o substrato dos reatores inicial e final.

Nos seis ensaios, os reatores foram mantidos sem agitação e em banho maria a $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico, estão apresentados os resultados coletados a partir dos ensaios realizados conforme procedimento descrito no capítulo 4. Ainda está apresentada nessa seção a discussão acerca dos resultados encontrados ao longo dessa pesquisa.

5.1. Testes preliminares com lodos granulares e meio de cultura

Com o intuito de verificar a atividade biológica dos lodos granulares para a realização dos ensaios com campo eletromagnético e, também, testar diferentes condições nutricionais do meio de cultura, foram realizados testes preliminares, como descrito no item 4 -Material e métodos. Nesse item, estão expostos os resultados referentes à essa etapa da pesquisa.

Foram testados quatro tipos de lodos granulares, Na Tabela 9 são mostrados os resultados das análises da série de sólidos, realizadas para a caracterização dos lodos avaliados.

Tabela 10 - Resultados das análises da série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) dos lodos granulares analisados no pré-ensaio.

	L1 – Avícola 1	L2 – Avícola 2	L3 – ETE	L4 – L1, L2 e L3
Sólidos totais – ST (g/L)	51,14	44,31	34,17	43,21
Sólidos totais fixos – STF (g/L)	9,27	7,59	12,75	9,87
Sólidos totais voláteis – STV (g/L)	41,87	36,72	21,42	33,34
STV/ST	0,82	0,83	0,63	0,77

Fonte: Dados da pesquisa.

A caracterização dos lodos granulares, analisados no pré-ensaio, revelou que o lodo L1 apresentou a maior concentração de sólidos voláteis. Contrariamente, o lodo proveniente da estação de esgoto sanitário (L3) apresentou os menores valores de sólidos, inclusive para a relação de sólidos totais voláteis por sólidos totais.

Também nesse teste, foram analisadas diferentes condições nutricionais de meio de cultura para a produção de gás metano. Análises de laboratório foram realizadas e os resultados encontrados para pH final, para a estimativa de produção de biogás e para a estimativa de produção de gás metano, gerados sob as diferentes condições nutricionais estudadas (M1, M2, M3 e M4), estão apresentados nas tabelas 11 a 14.

Tabela 11 – Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M1 (10 g/L de glicose; 5 g/L de peptona; 5 g/L de extrato de levedura; 5 g/L de extrato de carne).

Ensaio	pH final	mmol de biogás /gSTV	mmol de metano /gSTV
L1M1K	6,0	14,89	2,24
L2M1K	6,5	18,49	4,22
L3M1K	5,7	29,26	3,76
L4M1K	5,5	16,08	2,16

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 12 – Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M2 (2 g/L de glicose; 1 g/L de peptona; 1 g/L de extrato de levedura; 1 g/L de extrato de carne).

Ensaio	pH final	mmol de biogás /gSTV	mmol de metano /gSTV
L1M2K	7,5	15,33	6,40
L2M2K	7,2	17,07	7,01
L3M2K	7,9	16,80	3,38
L4M2K	7,1	19,18	8,06
L1M2	7,8	14,69	6,27
L2M2	8,1	16,75	6,76
L3M2	7,8	19,94	4,62

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 13 - Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M3 (1,0 g/L de glicose; 0,5 g/L de peptona; 0,5 g/L extrato de levedura; 0,5 g/L extrato de carne).

Ensaio	pH final	mmol de biogás /gSTV	mmol de metano /gSTV
L1M3K	7,4	11,78	4,14
L2M3K	7,6	12,52	4,68
L3M3K	7,6	17,17	3,98
L4M3K	7,1	14,38	3,34
L1M3	7,4	12,00	4,32
L2M3	8,1	12,99	4,49
L3M3	7,3	17,01	3,50

Fonte: dados da pesquisa.

A partir da análise dos resultados apresentados, é possível observar que em todos os reatores houve produção de metano, entretanto o teste com o lodo proveniente da mistura dos outros três lodos, ensaio (L4M2K), foi o que apresentou maior resultado para produção de gás metano.

Tabela 14 - Resultados de pH final, estimativa de produção de biogás e estimativa de produção de gás metano para o meio de cultura denominado M4 (0,67 g/L de glicose; 0,33 g/L de peptona; 0,33 g/L de extrato de levedura; 0,33 g/L de extrato de carne).

Ensaio	pH final	mmol/gSTV de biogás	mmol/gSTV de metano
L1M4K	8,1	10,15	3,05
L2M4K	7,1	11,25	3,41
L3M4K	7,3	15,87	3,57
L4M4K	7,1	14,52	4,87
L1M4	7,1	8,81	2,77
L2M4	7,4	11,22	3,24
L3M4	7,3	18,37	3,76

Fonte: dados da pesquisa.

A análise dos resultados obtidos revelou que, os lodos granulares provenientes de tratamento dos resíduos de matadouros avícolas apresentaram maiores valores para atividade metanogênica, quando comparados ao lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto. Tal diferença ocorre, pois as características dos digestatos variam de acordo com o material tratado e, também, de acordo com o processo empregado, o que faz com que a procedência do lodo determine sua capacidade de digestão.

No caso dos digestatos de tratamentos de avícolas, esses apresentam elevada carga de nitrogênio, como foi concluído por Salminen *et al.* (2001). Esses autores estudaram o digestato oriundo de tratamento de resíduo sólido de matadouro de aves e encontraram o valor de 20% dos sólidos totais na forma de compostos de nitrogênio. A alta concentração de nitrogênio no digestato, geralmente, está ligada a matéria-prima rica em proteína, como resíduos de matadouro de aves (KRYVORUCHKO *et al.*, 2009; MENARDO *et al.*, 2011)

O elevado conteúdo de nitrogênio do digestato, comparado aos outros compostos, é consequência da concentração de nitrogênio causada pela degradação dos compostos de carbono em dióxido de carbono e metano com preservação do nitrogênio, durante a biodigestão anaeróbia (TAMBONE *et al.*, 2009).

Além disso, os lodos provenientes da estação de tratamento de esgoto apresentaram menor quantidade de sólidos voláteis, o que representa menor quantidade de biomassa inicial nos reatores, quando comparados aos reatores inoculados com lodo proveniente dos tratamentos de resíduos das avícolas. Rojas *et al.* (2010) encontraram resultado similar, quando compararam a produção de biogás de reatores alimentados somente com lodo granular e reatores alimentados com mistura de lodo granular e dejetos bovinos, encontraram

diminuição considerável na produção de biogás após a adição de dejetos bovinos, que continha menor relação de STV/ST.

Com isso, similarmente, os resultados dessa pesquisa indicam que o lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto, que contém a menor concentração de biomassa microbiana, foi o que apresentou os valores mais baixos para estimativa de produção de biogás e de gás metano.

Os valores para pH final foram baixos para ótima atividade metanogênica, porém, favorável às bactérias fermentativas, como descrito em Zhang *et al.* (2014). Dessa forma, a elevada carga orgânica pode ter dificultado a metanogênese devido acidificação do meio.

As maiores quantidades de metano ocorreram no meio de cultivo M2, em conjunto com os lodos granulares provenientes das avícolas e, também, o lodo proveniente da mistura dos três lodos.

Ainda, a partir dos resultados de pH, é possível perceber que não houve variação significativa dos valores de pH para os testes com agente alcalinizante. Além disso, nota-se que os valores de pH também não apresentaram diferenças significativas entre as diferentes condições nutricionais.

Considerando os valores de pH final em todos os ensaios, eles variaram desde 5,5 até 8,1. Produções elevadas de metano foram verificadas para pH 7,1 a 7,8, dentro da faixa ótima descrita por Mudrak (1986) e Zhang *et al.* (2014).

No meio de cultivo denominado M1 houve produção mais elevada de biogás, quando comparado com os outros resultados, tal fato evidencia, juntamente com os valores obtidos de pH, que variaram de 5,5 a 6,5, o favorecimento da fermentação.

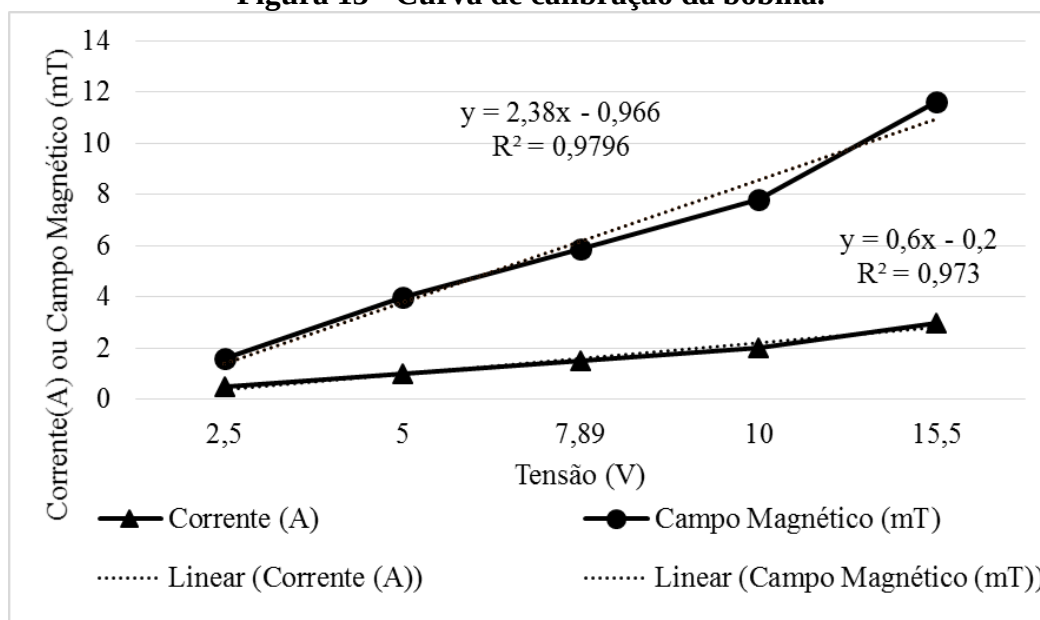
Houve produção de metano em todos os reatores, entretanto os ensaios com concentração de glicose de 2g.L^{-1} e adição de fonte de potássio (agente tamponante), foram os que apresentaram maior média de produção de metano por grama de sólidos voláteis. Isso pode ser devido a concentração de carga orgânica não muito elevada, possibilitando as arqueias consumirem os íons H^+ que são gerados pelas bactérias fermentativas, mantendo o pH na faixa ótima de operação, e com uma concentração não tão baixa, assim produzindo mais gás metano, pois existe mais nutrientes no meio.

5.2. Montagem da bobina e do reator magnetizado

Para a realização dessa pesquisa, foi preparado um frasco reagente envolto por uma bobina capaz de criar campo eletromagnético em seu interior, como descrito no item metodologia. Nesse item, estão descritos os resultados referentes à preparação do reator magnetizado.

Com o intuito de reconhecer o campo eletromagnético criado no interior do frasco reagente, por meio do ajuste da corrente fornecida pela fonte à bobina, foi determinada a curva de calibração que relaciona a corrente e a tensão com o campo eletromagnético gerado uniformemente no interior do reator. A Figura 13 apresenta a curva de calibração da bobina, obtida a partir do procedimento descrito anteriormente.

Figura 13 - Curva de calibração da bobina.



Fonte: Dados da pesquisa.

De posse da curva de calibração, foi possível aplicar as diferentes intensidades de campo eletromagnético no interior do reator magnetizado, em cada um dos dez ensaios realizados durante essa pesquisa.

Os resultados de medição de campo eletromagnético, apresentados nessa pesquisa, são referentes ao valor medido no centro do reator preenchido com ar. O valor exato que atuou nas bactérias foi provavelmente diferente, considerando a Equação 2 de um solenoide ideal, baseada na lei de Ampère:

$$B = \mu.n.i,$$

Na qual: B = Intensidade de campo magnético; μ = permeabilidade magnética do meio; n = números de espiras por unidade de comprimento da espira; i = corrente elétrica.

Nesse estudo, as medições do campo eletromagnético foram feitas com o frasco reagente preenchido por ar, no entanto, a intensidade do campo eletromagnético pode variar em meio preenchido por água e outros compostos. Com isso, a intensidade de campo que realmente atuou sobre o consórcio microbiano pode ter sido diferente da apontada pela medição.

Ainda, com base na literatura consultada, não há padrão nas formas de medir e determinar o valor da intensidade do campo magnético atuante no processo, o que dificulta a comparação entre os diferentes ensaios. Como exemplo desse fato, pode-se destacar os trabalhos de: (i) Dębowski *et al.* (2014) que utilizaram ímãs de neodímio dentro de um reator UASB. O campo apresentado no estudo foi medido a 0,7 mm da superfície do ímã, com valor de 338 mT. Porém é importante ressaltar que o campo magnético diminui com a distância da fonte geradora; (ii) Zieliński *et al.* (2013) que obtiveram variação significativa nos parâmetros com 431 mT. Esse valor também foi medido a 0,7 mm da superfície do ímã de neodímio; (iii) Haritwal *et al.* (2015) que utilizaram intensidade de 420 mT, porém não foi especificada a distância da medição e nem qual método de aferição.

Portanto, existem diferenças na forma de descrever o valor da intensidade do campo magnético. A simples comparação entre valores de intensidade de campo não representa o campo magnético que realmente atuou sobre o consórcio microbiano. Para essa questão, sugere-se que sejam indicadas a temperatura na qual foi medido o campo magnético, a distância da fonte, se o campo magnético é ou não uniforme, e, também em qual meio o campo magnético está inserido durante a medição.

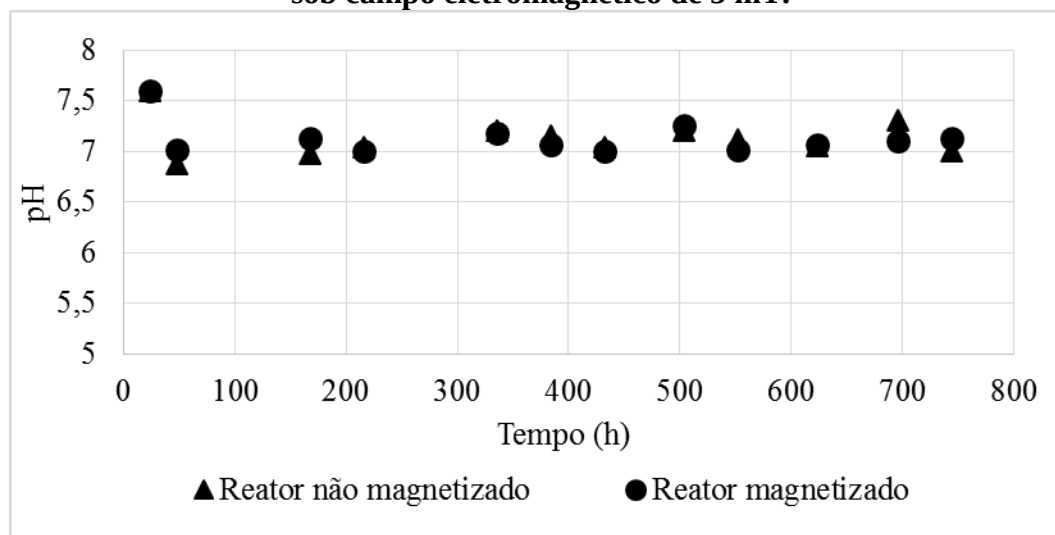
5.3. Operação dos reatores magnetizados

Nessa seção, estão apresentados os resultados encontrados pelos 10 experimentos desenvolvidos ao longo dessa pesquisa agrupados por parâmetros analisados, também está apresentada a discussão relacionada aos resultados encontrados, com referências encontradas na literatura. Os parâmetros analisados foram pH, estimativa de produção de biogás e de gás metano, consumo de DQO, consumo de açúcares e série de sólidos.

pH

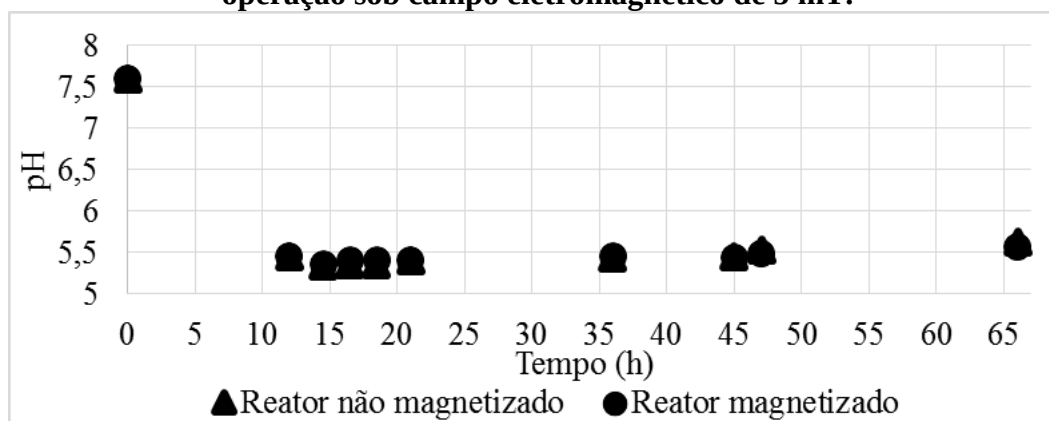
As Figuras 14 a 17 apresentam os resultados obtidos pelas análises de pH para as amostras dos ensaios com biomassa enriquecida. Nessa etapa foram realizados 4 experimentos, como descrito no capítulo Material e métodos.

Figura 14 - Variação do pH em ensaio com biomassa enriquecida, 31 dias de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

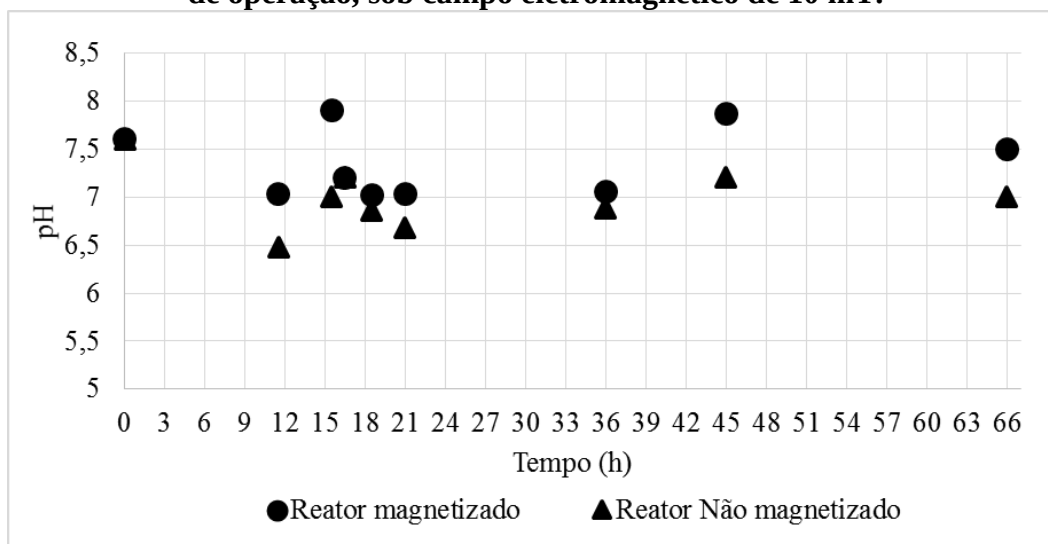
Figura 15 – Variação do pH em ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

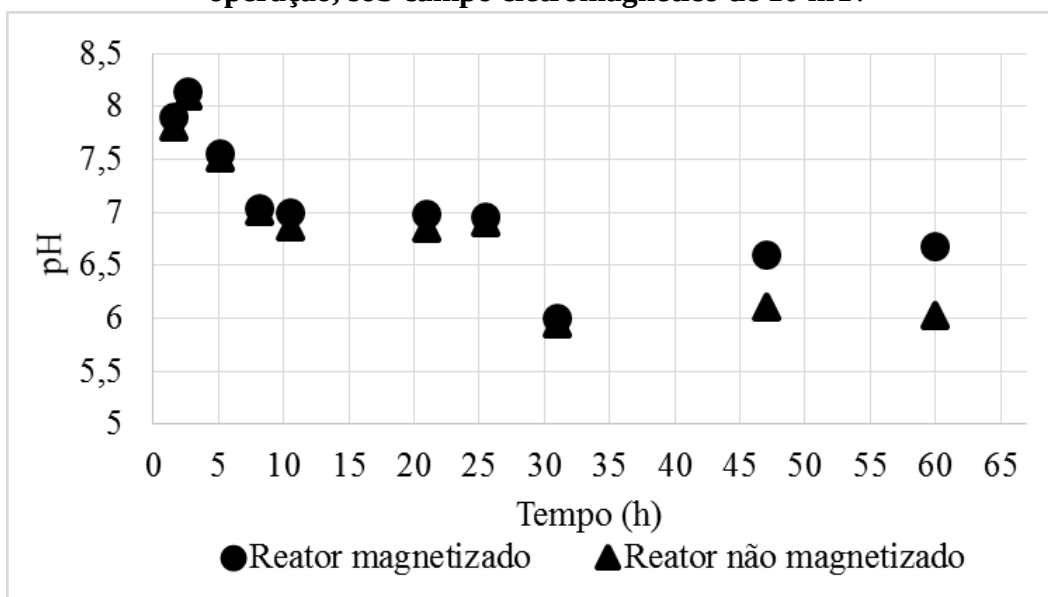
No primeiro ensaio, os resultados indicaram que a variação do pH nos dois reatores, magnetizado e controle, não apresentou diferenças significativas durante todo o tempo de operação. Nota-se que houve queda no pH durante os primeiros dias, contudo, a partir do sexto dia o pH permaneceu ao redor de 7,0 nos dois reatores até o final da operação.

Figura 16 – Variação do pH no primeiro ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas de operação, sob campo eletromagnético de 10 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 17 – Variação do pH no segundo ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas de operação, sob campo eletromagnético de 10 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da análise do gráfico do ensaio com 66 horas e campo eletromagnético de 5 mT, foi possível notar que o pH diminuiu durante as primeiras 12 horas de reação, para em seguida, permanecer acidificado até o final das 66 horas. Esse fato indica que a concentração

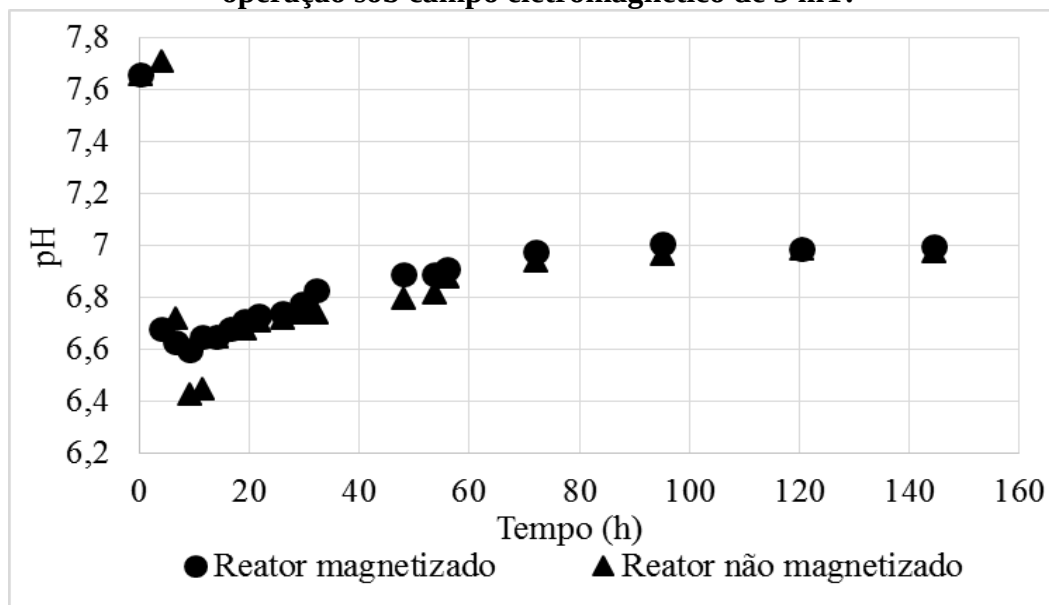
de 10 g/L de bicarbonato de sódio não foi suficiente para manter o pH próximo de 7, necessitando de mais adição de bicarbonato de sódio, ou maior atividade metanogênica.

Os resultados da variação do pH obtidos a partir de dois ensaios com tempo de operação de 66 horas e campo eletromagnético de intensidade 10 mT mostraram que os valores se mantiveram próximos de 7, ou seja, o tamponamento atuou no sentido de manter o pH do meio neutro durante o experimento. Também, observa-se no gráfico de pH desse ensaio, que o reator não magnetizado apresentou valores levemente mais baixos na maior parte das amostras.

No último ensaio com 66 horas de operação e sob intensidade de campo de 10 mT, os dois reatores apresentaram valores similares na maior parte das amostras, porém o reator magnetizado obteve resultados levemente mais alcalinos ao final do tempo de operação.

A seguir estão apresentados os resultados da variação de pH dos seis experimentos realizados com lodo granular bruto e 144 horas (Figuras de 19 a 24).

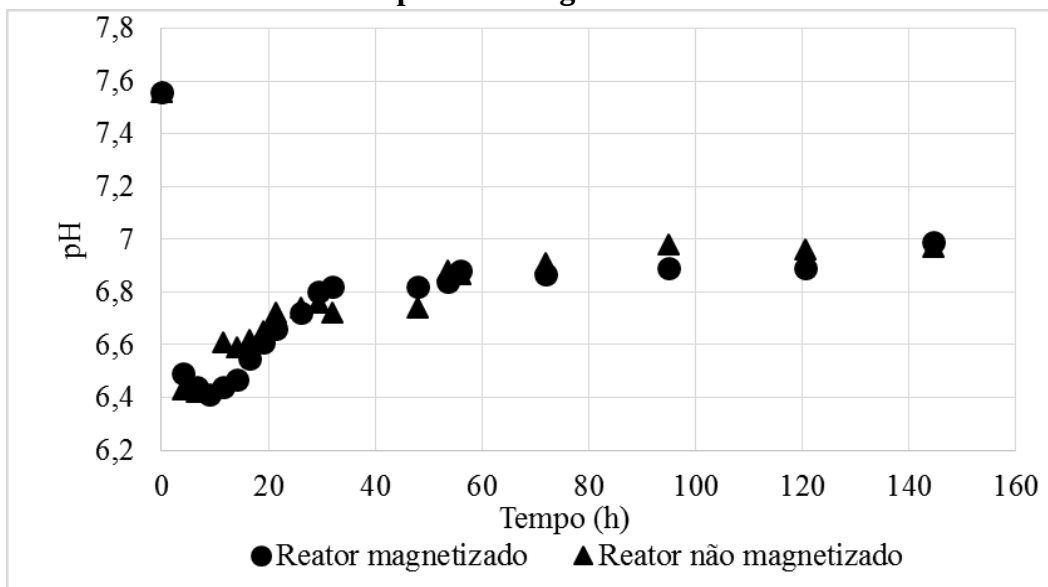
Figura 18 - Variação do pH no primeiro ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

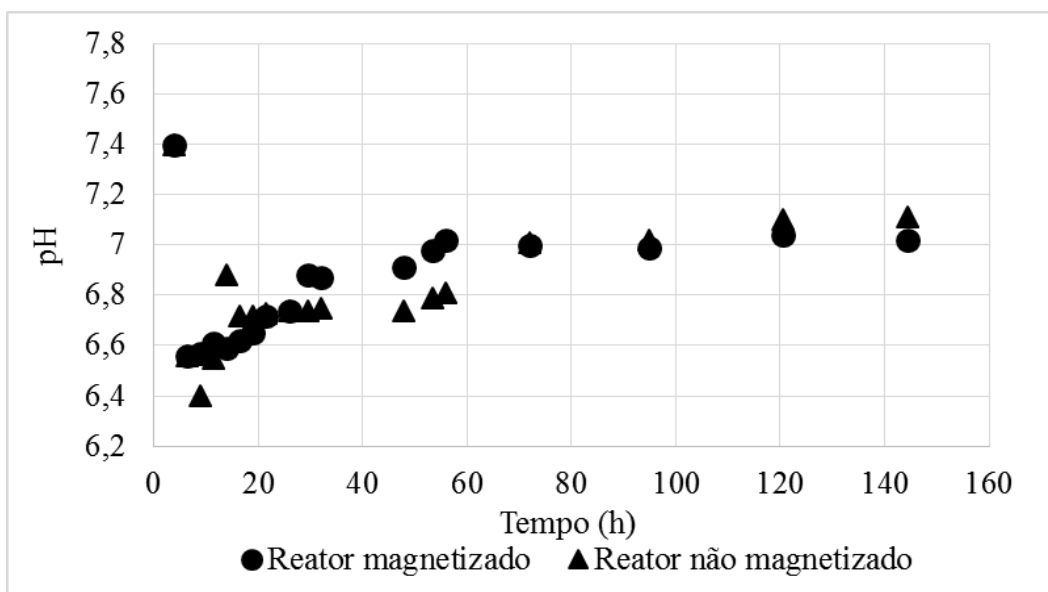
Pela análise dos gráficos dos experimentos com campo eletromagnético de 5 mT, nota-se que os dois reatores apresentaram resultados similares na maior parte das amostras coletadas. Também, observa-se que houve queda do pH durante as primeiras horas de operação, no entanto, em seguida, os valores permanecem próximos de 7.

Figura 19 - Variação do pH, segundo ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 20 - Variação do pH, primeiro ensaio com lodo bruto em 144 horas de



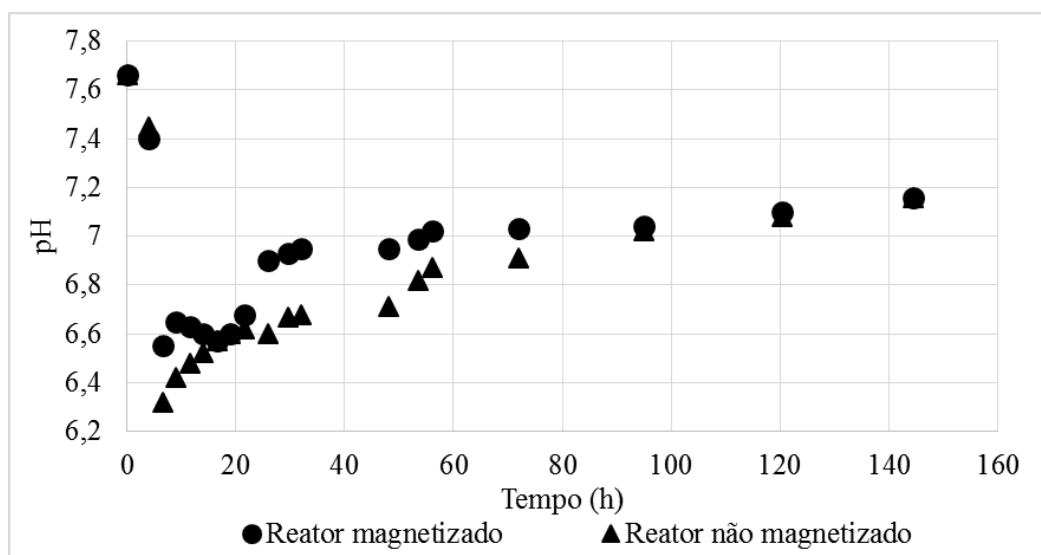
operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados de pH para os reatores dos ensaios com campo eletromagnético de 7,5 mT foram similares na maior parte das amostras coletadas. Como nos experimentos com

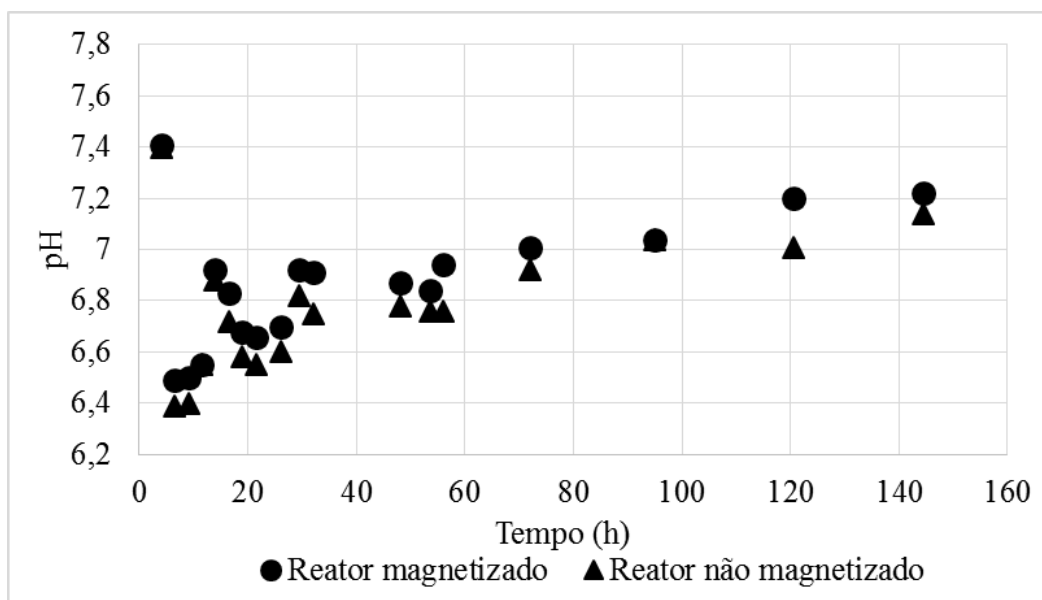
campo eletromagnético de 5 mT, observou-se que houve queda do pH durante as primeiras horas de operação, no entanto, em seguida, os valores permaneceram próximos de 7.

Figura 21 - Variação do pH, segundo ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 22 - Variação do pH, primeiro ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.

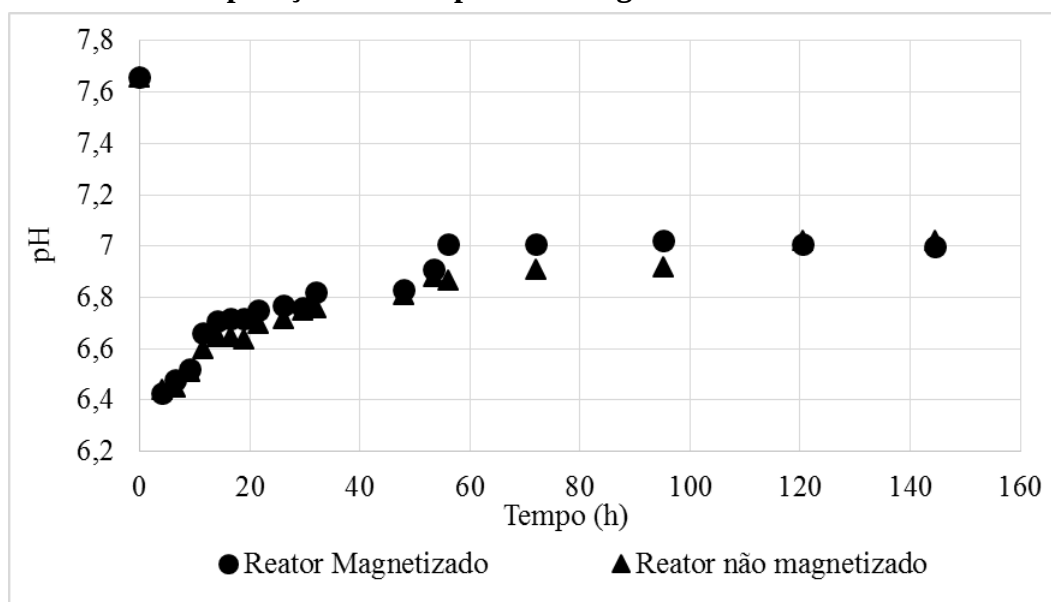


Fonte: Dados da pesquisa.

Os gráficos de pH dos ensaios com diferentes intensidades de campo eletromagnético apresentaram padrão de resultados semelhantes com queda do pH durante as primeiras horas

de experimento e, em seguida, os valores permaneceram ao redor de 7. Os valores pH dos reatores sob 10 mT de campo, foram similares na maior parte das amostras coletadas, no entanto nos ensaios com campo magnético de 10 mT, os reatores magnetizados se mostraram mais alcalinos.

Figura 23 – Variação do pH, segundo ensaio com lodo bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Como descrito por Chang e Lin (1999) e Haritwal *et al.* (2015) a ação das bactérias fermentativas degradam a glicose, formando ácidos graxos voláteis e hidrogênio, tal fato acarreta no rápido decaimento do pH. Os resultados do pré ensaio demonstraram o maior decaimento de pH na condição nutricional mais elevada (M1. Esses, também, foram os piores resultados para estimativa de produção de gás metano, pois a faixa de pH encontrada de 5,5 a 6,5 favoreceu as bactérias fermentativas como descrito por Zhang *et al.* (2014).

Assim, a adição do bicarbonato de sódio como agente tamponante foi adotada com intuito de manter o pH próximo a 7 nos demais ensaios, conforme descrito anteriormente. No entanto, o ensaio de 66 horas de operação sob 5 mT de intensidade magnética foi o que obteve a menor produção de gás metano e, portanto a menor atividade das arqueas hidrogenotróficas, resultando em acidificação do meio. Esse fato foi confirmado com a verificação do pH próximo de 5,5. Portanto, o uso de bicarbonato na relação em 1/1 de glicose (g) / bicarbonato de sódio (g), depende da ação sinérgica da atividade metanogênica das hidrogenotróficas.

Com a atuação da metanogênese e da adição de bicarbonato de sódio, os demais ensaios apresentaram pH próximo a 7. No geral, não foram encontradas diferenças significativas nos valores de pH entre os reatores controles e reatores magnetizados.

Entretanto, efeitos de mudança de pH por aplicação de campo magnético na água, da ordem de + 0,62 unidades foram confirmados por Joshi and Kamat (1966). Porém, Quickenden *et al.* (1971) e Gehr *et al.* (1995) não observaram nenhuma mudança de pH com tratamento magnético da água. Ainda, muitos estudos apresentam mudanças no pH de solução sob campos magnéticos, porém em nenhum estudo, os autores foram capazes de controlar o pH da solução (PARSONS *et al.*, 1997).

Remoção de sólidos

Esse item apresenta os resultados encontrados para as análises das séries de sólidos realizadas ao longo dos 10 experimentos dessa pesquisa. A Tabela 15 apresenta os valores encontrados pelas análises da série de sólidos, com resultados de sólidos totais – ST, sólidos totais fixos – STF, sólidos totais voláteis – STV, realizadas no início e no final de cada experimento realizado com biomassa enriquecida.

Tabela 15 – Série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) no início e final dos ensaios com biomassa enriquecida.

Ensaio	Amostra	ST (g/L)	% de redução	STV (g/L)	% de redução	STF (g/L)	% de redução
31 dias 5 mT	Inicial	28,46		13,73		14,73	
	Controle final	12,07	57,59	4,90	64,31	7,17	51,32
	Magnetizado final	11,61	40,79	4,82	64,89	6,79	54,59
66 h 5 mT	Inicial	34,46		19,13		15,32	
	Controle final	23,81	30,90	15,95	16,62	7,86	48,69
	Magnetizado final	23,36	32,21	15,53	18,82	7,83	48,89
66 h 10 mT 1	Inicial	38,69		23,61		15,08	
	Controle final	29,65	23,36	15,16	35,79	14,48	3,98
	Magnetizado final	29,18	24,58	15,45	34,56	13,73	8,95
66 h 10 mT 2	Inicial	30,84		27,11		3,72	
	Controle final	26,63	13,65	23,67	12,69	2,96	20,43
	Magnetizado final	26,72	13,36	23,13	14,68	3,59	3,49

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores encontrados nas análises da série de sólidos demonstraram redução de 64% nos sólidos voláteis no experimento com 31 dias de operação, ou seja, esse valor de matéria orgânica, presente no substrato inicial dos reatores, foi convertido em biogás pelo consórcio microbiano ao final do experimento. Ambos os reatores apresentaram o mesmo rendimento para o parâmetro de remoção de sólidos.

Nota-se que houve redução de sólidos fixos nos dois ensaios com intensidade de campo 5 mT. Em estudo realizado por Pereira *et al.* (2011), foram encontrados resultados semelhantes de redução de sólidos fixos (51% de redução), com tratamento anaeróbio de resíduos de suinocultura em reator anaeróbio compartimentado. Ainda, o material que pode ser volatilizado e queimado quando inflamado a 500 ± 50 °C é classificado como volátil, entretanto, assume-se que sólidos voláteis são compostos por matéria orgânica. Porém nem todos os materiais orgânicos volatilizam e alguns sólidos inorgânicos podem ser gaseificados sob altas temperaturas (TCHOBANOGLIOUS, 2010).

A Tabela 16 apresenta os resultados das análises da série de sólidos realizadas para o lodo granular utilizado nessa etapa da pesquisa.

Tabela 16 - Análise da série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) do lodo granular proveniente da avícola Dacar.

ST (g/L)	STV (g/L)	STF (g/L)
59,13	49,37	9,75

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da observação dos resultados da série de sólidos desse experimento, foi possível notar que os reatores dos ensaios sob campo magnético de 5 mT apresentaram dinâmica semelhante com relação a remoção de sólidos. Não foram verificadas diferenças significativas entre os reatores magnetizados e os reatores controle.

Os resultados dos ensaios sob campo eletromagnético de 7,5 mT mostraram que a redução nos sólidos voláteis foi mais elevada no reator magnetizado do que no reator controle. Foi verificado acréscimo de remoção na ordem de 51% para os reatores magnetizados com 7,5 mT.

Os valores dos ensaios sob campo eletromagnético de 10 mT também indicaram maior porcentagem de remoção de sólidos nos reatores magnetizados.

Na Tabela 17 são mostrados os valores encontrados pelas análises da série de sólidos, com resultados de sólidos totais – ST, sólidos totais fixos – STF, sólidos totais voláteis – STV, com amostras coletadas no início e no final de cada um dos 6 experimentos com lodo granular bruto durante 144 horas de operação.

Tabela 17 - Resultados da série de sólidos (sólidos totais; sólidos totais fixos; sólidos totais voláteis) para os ensaios com lodo granular bruto, por 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.

Ensaio	Amostra	ST (g/L)	% de redução	STV (g/L)	% de redução	STF (g/L)	% de redução
5 mT 1	Inicial	40,26		27,11		13,14	
	Controle	30,46	75,66	16,61	38,73	13,85	
	Magnetizado	27,62	68,60	16,36	39,65	11,26	14,31
5 mT 2	Inicial	38,54		27,24		11,29	
	Controle	25,09	34,90	15,24	44,05	9,85	12,75
	Magnetizado	24,12	37,41	15,77	42,11	8,34	26,13
7,5 mT 1	Inicial	40,84		26,99		13,84	
	Controle	27,75	32,05	14,71	45,49	13,04	5,78
	Magnetizado	19,10	53,23	7,49	72,24	11,61	16,11
7,5 mT 2	Inicial	41,25		27,55		13,70	
	Controle	26,95	34,67	17,66	35,90	9,29	32,19
	Magnetizado	24,85	39,76	13,24	51,94	11,61	15,25
10 mT 1	Inicial	40,66		29,62		11,04	
	Controle	23,37	42,52	15,78	46,72	7,58	31,34
	Magnetizado	22,01	45,87	14,97	49,46	7,04	36,23
10 mT 2	Inicial	39,60		25,84		13,76	
	Controle	31,95	20,20	19,69	23,80	12,26	10,90
	Magnetizado	27,88	36,68	16,04	37,92	11,84	13,95

Fonte: Dados da pesquisa.

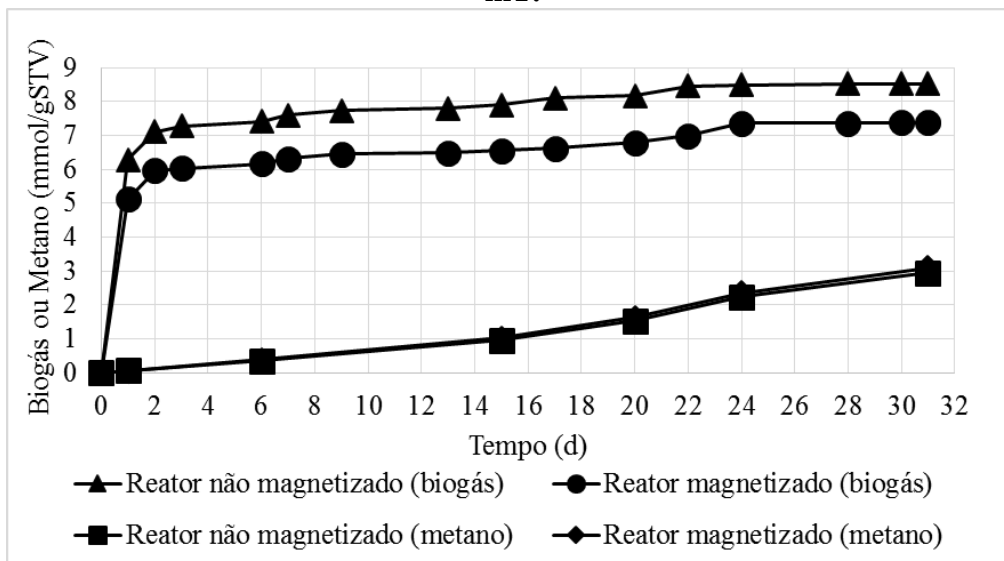
Assim como na remoção da DQO, a maior eficiência de remoção ocorreu no ensaio operado por 31 dias, com 64% de remoção dos sólidos voláteis totais para o reator controle e o reator sob magnetismo.

Estimativa de produção de biogás e de gás metano.

Os ensaios utilizando biomassa enriquecida não apresentaram metanogênese, apenas o primeiro e segundo ensaio com 5 mT apresentaram pequena atividade metanogênica, o restante devido a rápida repicagem, foi diminuindo a biomassa metanogênica do inóculo

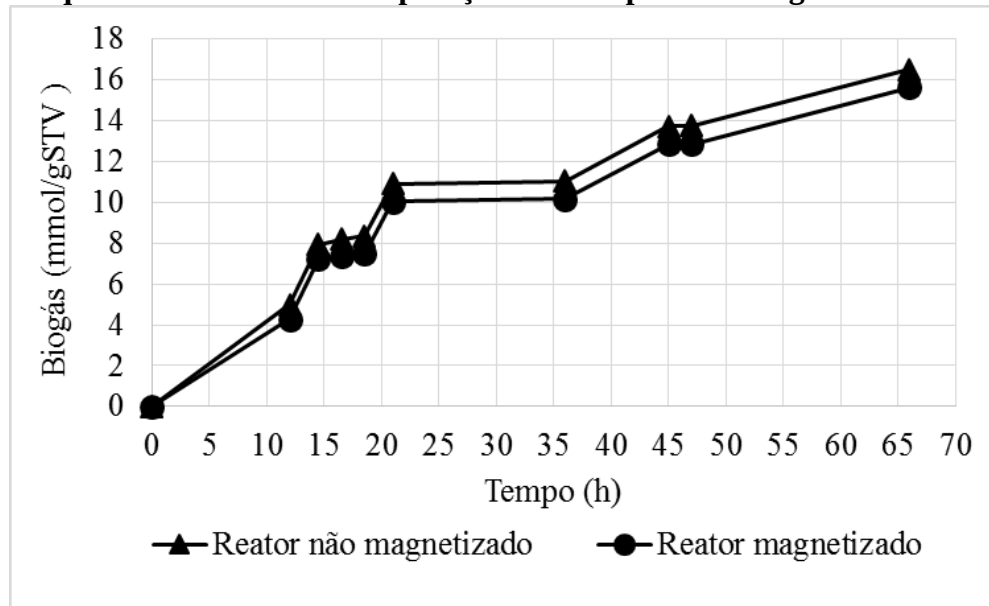
utilizado. Os resultados para a estimativa de produção acumulada de biogás e de gás metano, calculados a partir dos valores medidos no interior dos reatores dos ensaios com biomassa enriquecida, estão apresentados nas Figuras 25 a 31.

Figura 24 – Estimativa da produção acumulada de biogás e de gás metano no ensaio com biomassa enriquecida em 31 dias de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



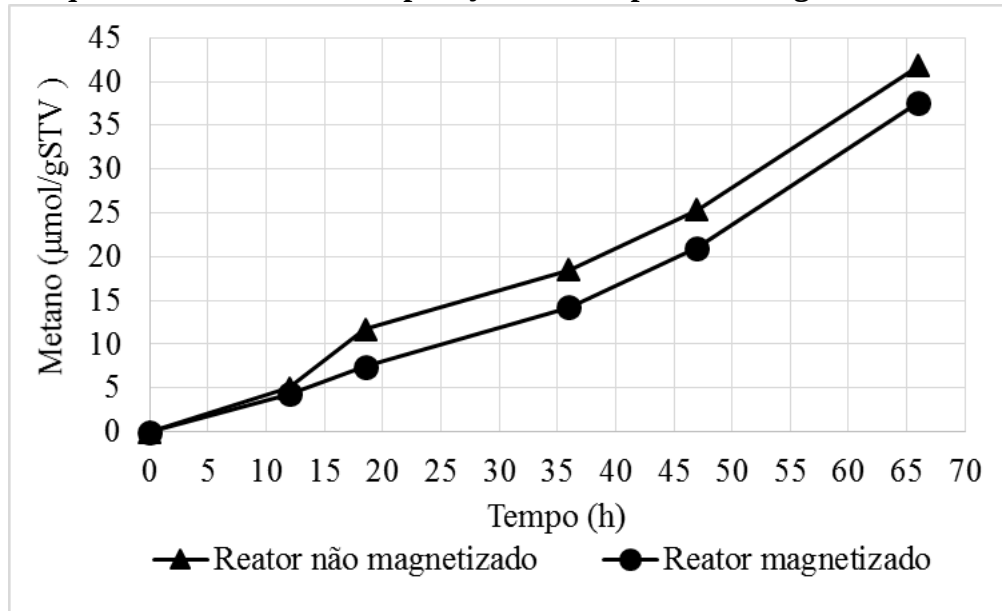
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 25 – Estimativa de produção acumulada de biogás, ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



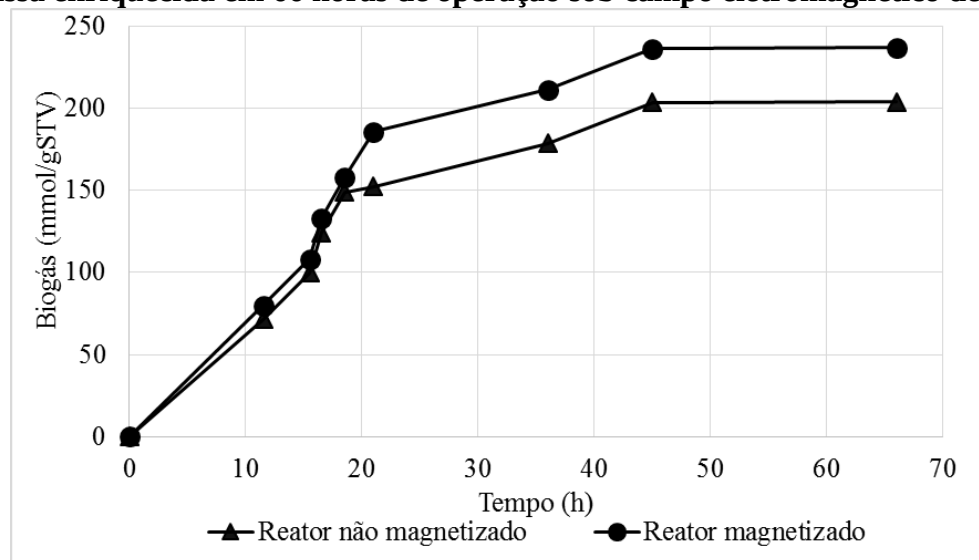
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 26 – Estimativa de produção acumulada de gás metano, ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



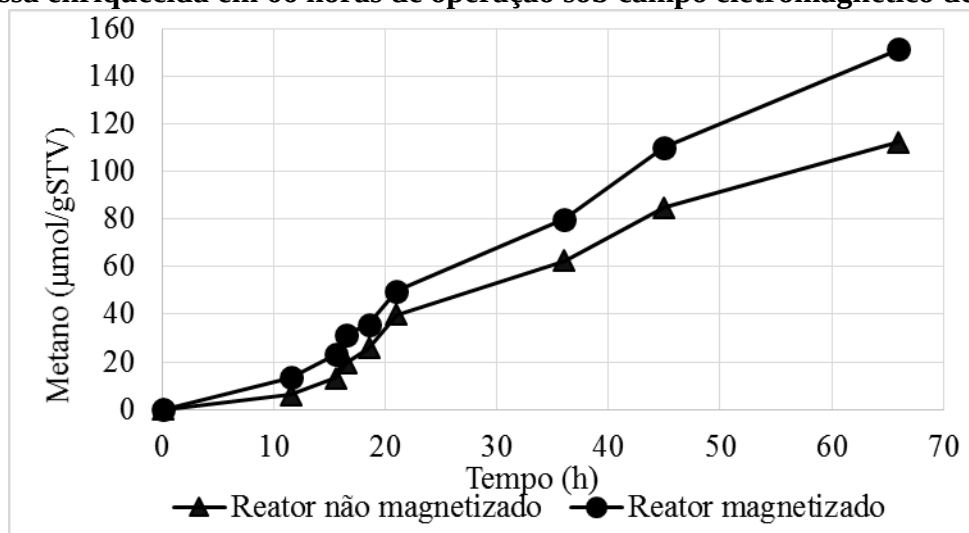
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 27 – Estimativa de produção acumulada de biogás, primeiro ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.



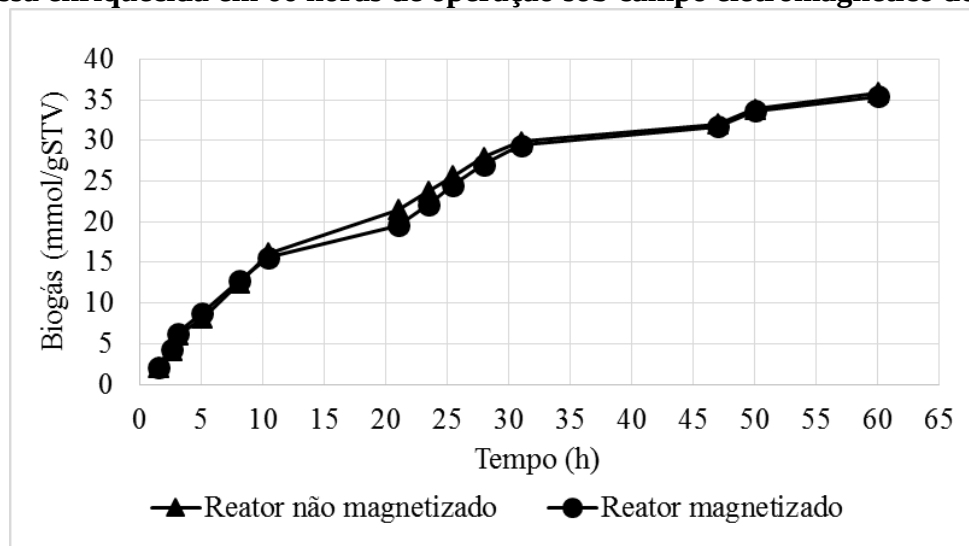
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 28 – Estimativa de produção acumulada de gás metano, primeiro ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.



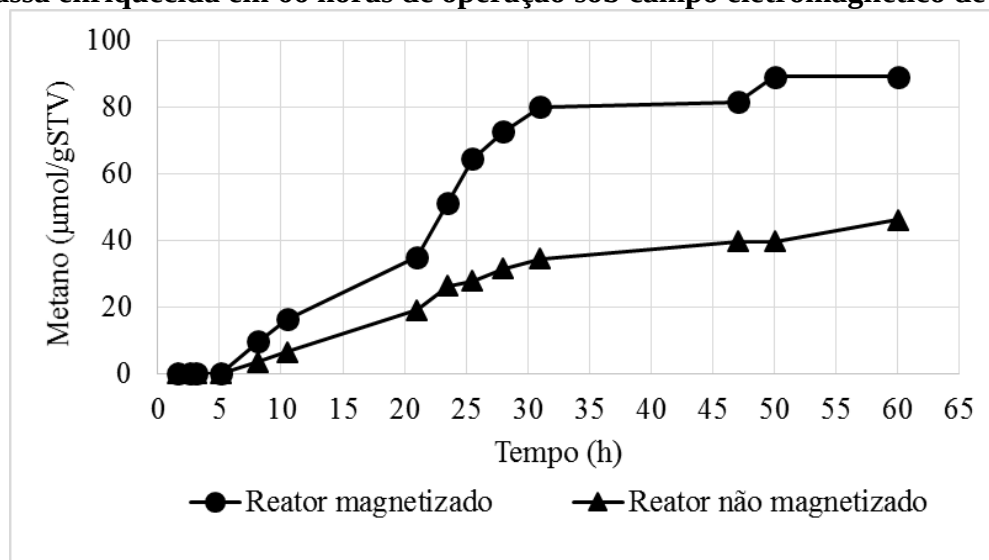
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 29 – Estimativa de produção acumulada de biogás, segundo ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 30 – Estimativa de produção acumulada de gás metano, segundo ensaio com biomassa enriquecida em 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.



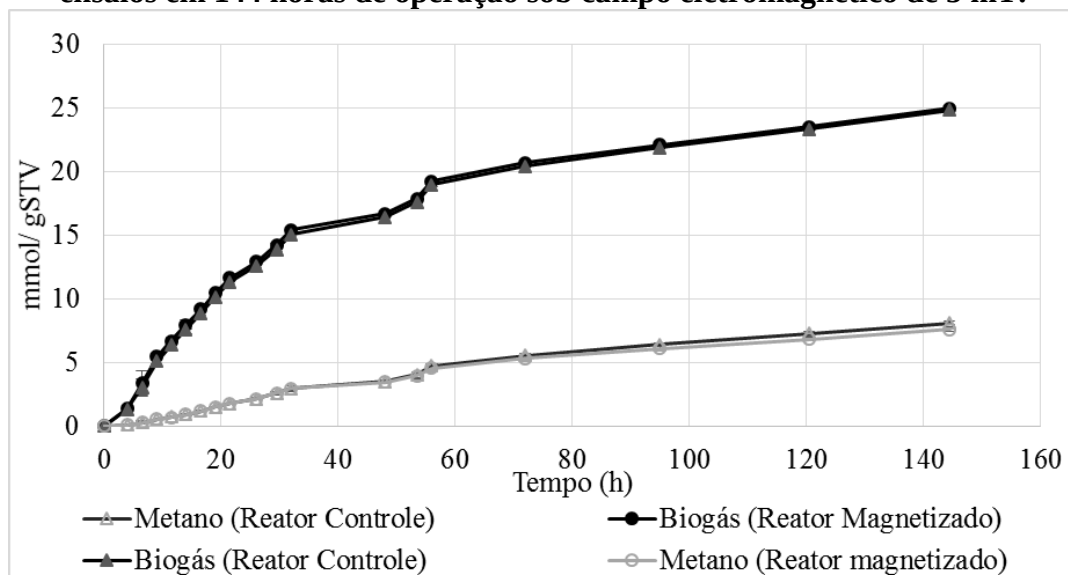
Fonte: Dados da pesquisa

A partir da observação dos gráficos de estimativa da produção acumulada de gases, percebe-se que os dois reatores, magnetizado e controle, apresentaram dinâmicas semelhantes ao longo dos ensaios com 5 mT. Após a análise dos resultados obtidos ao longo desses experimentos, nota-se que não houve indicação de que a aplicação do campo eletromagnético de 5 mT exerceu influência sobre os parâmetros analisados.

Entretanto, nos dois ensaios com campo eletromagnético de 10 mT, o gráfico da estimativa de produção acumulada de gás metano revelou que os dois reatores apresentaram comportamento semelhante, porém o reator não magnetizado exibiu valores levemente mais elevados. No primeiro ensaio, nota-se que houve atividade biológica mais intensa até as primeiras 20 horas de testes no reator não magnetizado, após esse período os dois reatores apresentaram comportamento semelhante. O gráfico do segundo ensaio revelou comportamento muito similar para os dois reatores analisados.

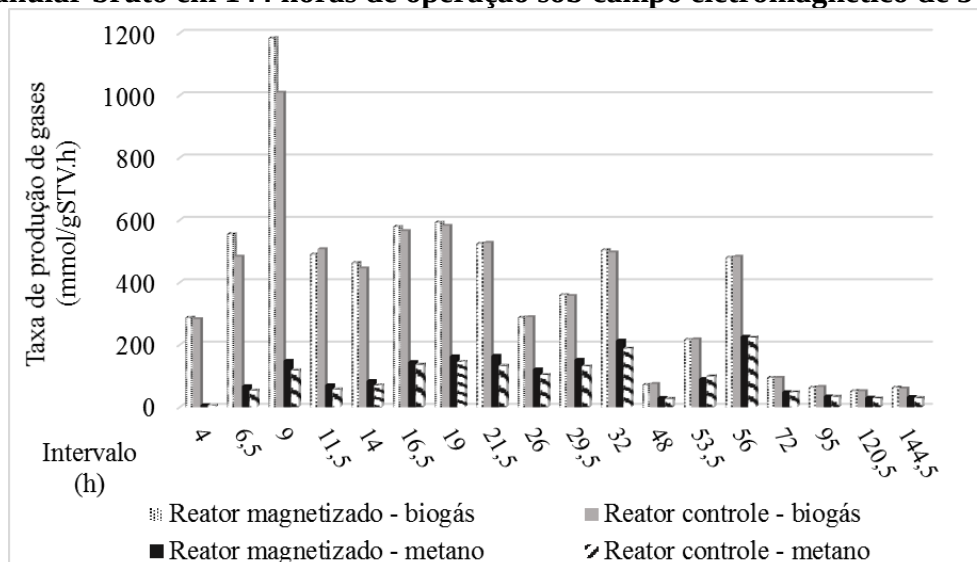
As Figuras de 31 a 39 apresentam os resultados para a estimativa de produção de biogás e de gás metano e, também, as taxas de produção de biogás e de gás metano nos intervalos analisados para os 6 ensaios realizados com lodo granular bruto.

Figura 31 – Estimativa de produção acumulada de biogás e de metano, média dos dois ensaios em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



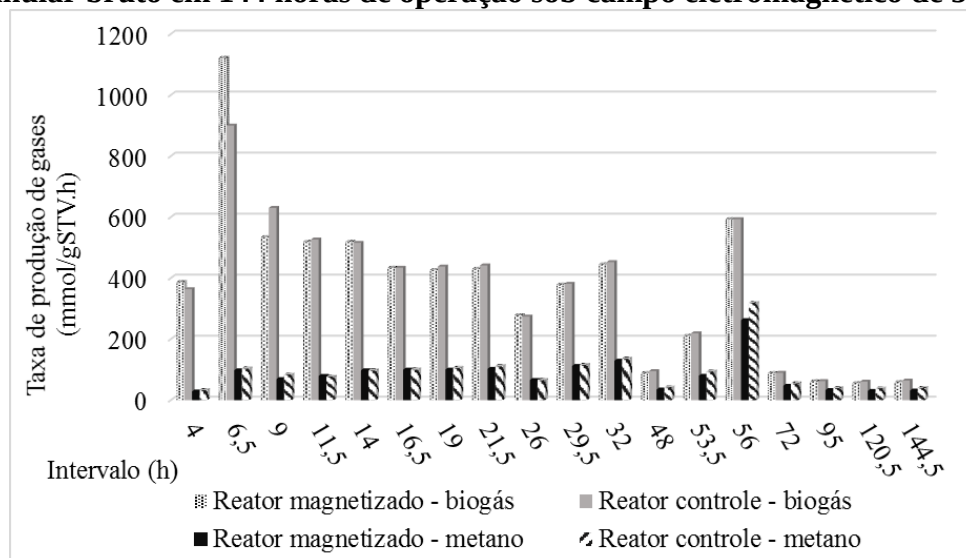
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 32 – Taxa de produção de biogás e de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



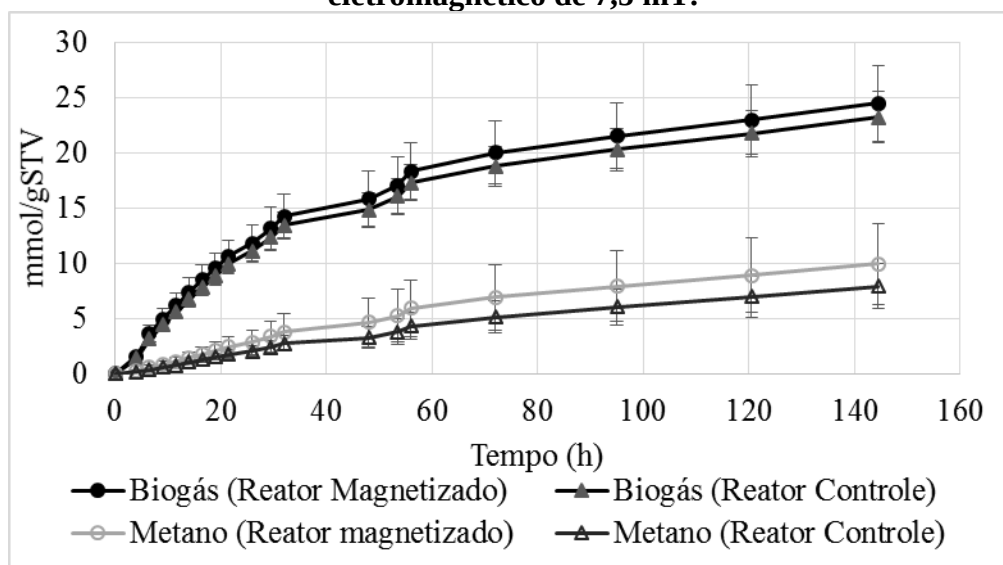
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 33 - Taxa de produção de biogás e de metano, segundo ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



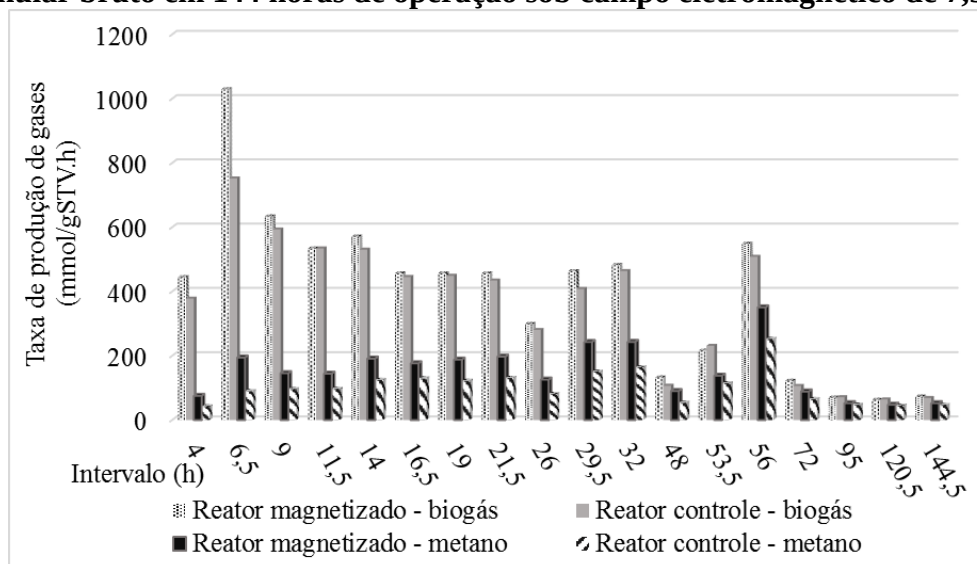
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 34 – Estimativa de produção acumulada de biogás e de metano, média dos dois ensaios com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.



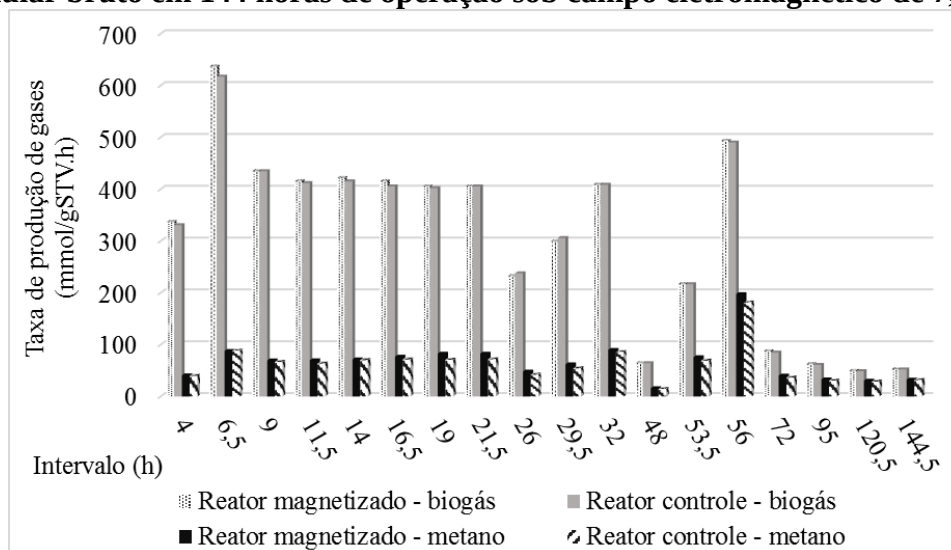
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 35 – Taxa de produção de biogás e de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.



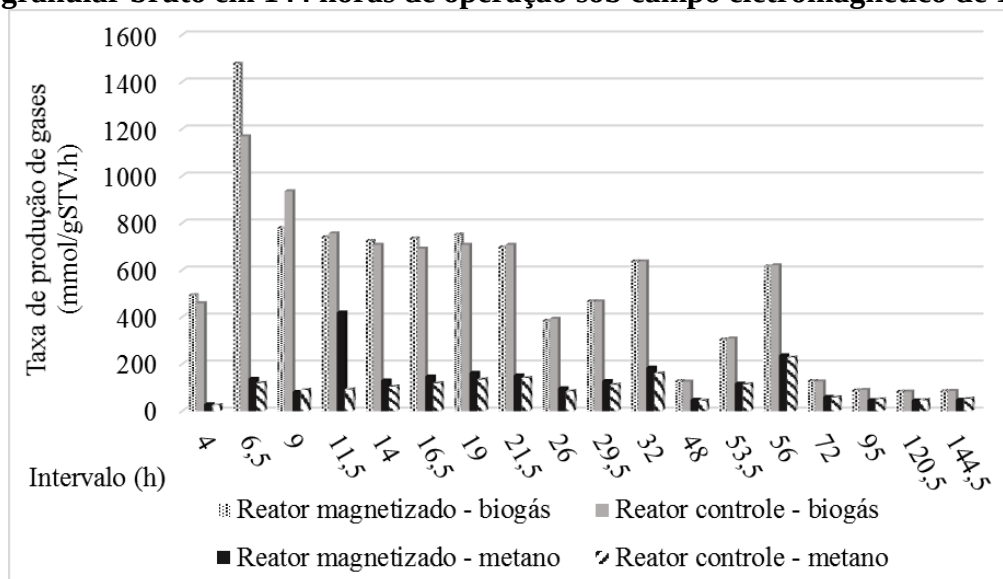
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 36 – Taxa de produção de biogás e de metano, segundo ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 7,5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 39 - Taxa de produção estimada de biogás e de metano, segundo ensaio com lodo granular bruto em 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 10 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Durante os ensaios com lodo granular bruto durante 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT, os reatores apresentaram valores muito similares para a estimativa de produção acumulada. Com relação à taxa de produção de gases também não foi verificada diferença sob a influência do campo magnético.

Os ensaios realizados com aplicação de campo magnético constante de 5 mT não apresentaram diferenças significativas nos resultados para a estimativa da produção de biogás. Os resultados da produção de metano também não foram favorecidos sob intensidade de campo. Ainda, o segundo ensaio com lodo granular apresentou redução de 13,43% na produção de gás metano, em comparação com o reator controle.

Os ensaios com lodo granular bruto, 144 horas e campo eletromagnético de 7,5 mT, apresentaram produção de biogás similar. No entanto, foi medido aumento da produção de gás metano no interior dos reatores magnetizados, em comparação aos reatores controle. No segundo ensaio o reator magnetizado apresentou resultado 36% mais elevado, para produção de gás metano, quando comparado ao reator controle.

Durante os experimentos com campo eletromagnético de 10 mT, apesar de pequena a diferença de estimativa de produção de biogás no interior dos dois reatores, o reator magnetizado apresentou valores levemente mais elevados, quando comparado ao reator controle. A diferença foi ainda maior para estimativa de produção acumulada de metano,

quando o reator magnetizado apresentou elevação de 11%, e 7,6% de produção de metano no primeiro e segundo ensaios respectivamente.

Os valores obtidos finais de produção da estimativa de produção de biogás e metano com aplicação do modelo de Gompertz são apresentados nas tabelas 18 e 19.

Tabela 18 - Resultados obtidos através do modelo de gompertz para produção de biogás

Biogas						
	5mT mag.	5 mT control.	7,5 mT mag.	7,5 mT control.	10 mT mag.	10 mT control.
P	22,64	22,53	22,61	21,41	27,27	26,79
Rm	0,44	0,43	0,38	0,36	0,55	0,53
λ	----	-----	----	----	----	----
R	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99

A produção de biogás começou no início do experimento, os valores finais acumulados e as taxas de produção de biogás foram similares para os três campos magnéticos aplicados.

Tabela 19 - Resultados obtidos através do modelo de gompertz para produção de metano

Metano						
	5mT mag.	5 mT control.	7,5 mT mag.	7,5 mT control.	10 mT mag.	10 mT control.
P	7,39	7,99	9,77	8,04	9,24	8,69
Rm	0,09	0,09	0,11	0,08	0,11	0,09
λ	4,38	5,00	2,21	2,90	1,75	4,60
R	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

A atividade metanogênica obteve maior diferença quando aplicado campo magnético de 7,5 mT, com 21,5 % de aumento na produção acumulada em relação ao controle. O reator magnetizado apresentou início da produção de metano 41,4 minutos antes em comparação ao controle.

O experimento com 10 mT apresentou diferença de produção acumulada de 6,32 % maior do reator magnetizado em comparação ao controle. Com início da produção de metano do reator magnetizado 171 minutos anterior ao início da produção do controle.

A variação dos parâmetros analisados, descritos na literatura consultada, ocorreram com intensidade de campo magnético superiores a 5 mT. Para tratamento de lodo ativado, variações foram encontradas nos parâmetros analisados nos trabalhos de Jung *et al.* (1993); Jung; Sofer, (1997); Yavuz; Çelebi, (2000); Tomska; Wolny (2008). Tais estudos ocorreram com variações na intensidade de campo magnético na faixa de 7 a 490 mT.

Os ensaios com 7,5 mT e 10 mT apresentaram alteração positiva na metanogênese, com média de aumento nos valores de produção de metano de 22,61% e 9,13% para os respectivos ensaios quando comparados aos reatores controle. A diferença de produção acumulada de biogás não foi significativa em nenhum ensaio, as maiores diferenças nas taxas de produção ocorreram nas primeiras 6,5 horas de operação.

Além do mais, as diferenças nas taxas de produção de metano ocorreram até 72h de operação. Zieliński *et al.* (2013) encontraram aumento do processo fermentativo aplicando campo magnético constante no tratamento de resíduo de laticínio, com significativas mudanças da DQO e sedimentação do lodo, porém não encontraram diferenças significativas na composição do biogás, com aumento de 4% de produção comparado ao controle, utilizando campo magnético constante (com intensidade de 431 mT a 0,7 mm de distância do imã).

Porém, Haritwal *et al.* (2015) encontraram aumento de 40% na atividade metanogênica do reator submetido a exposição de campo magnético constante comparado ao reator controle após seis dias de reação. Também, encontraram redução de nitrogênio amoniacal 20% maior comparado ao reator controle.

Em outro estudo, promovido por Dębowski *et al.* (2014), introduziram artefatos com imãs de neodímio e na zona da hidrólise e acidogênese em tanques reatores, utilizando leite em pó como substrato, permitindo maior formação de biofilmes e menor redução de perdas de biomassa bacteriana. Tecnicamente, o procedimento utilizado foi simples, além disso, economicamente fundamentado, pois os autores concluíram que não houve impacto significativo no aumento dos custos de investimento de toda a instalação. O estudo ainda demonstrou aumento na produção de biogás e aumento na concentração de metano do mesmo e relação com a quantidade de artefatos magnetizados, aumentando a eficiência da fermentação com aumento dos acessórios magnetoativos.

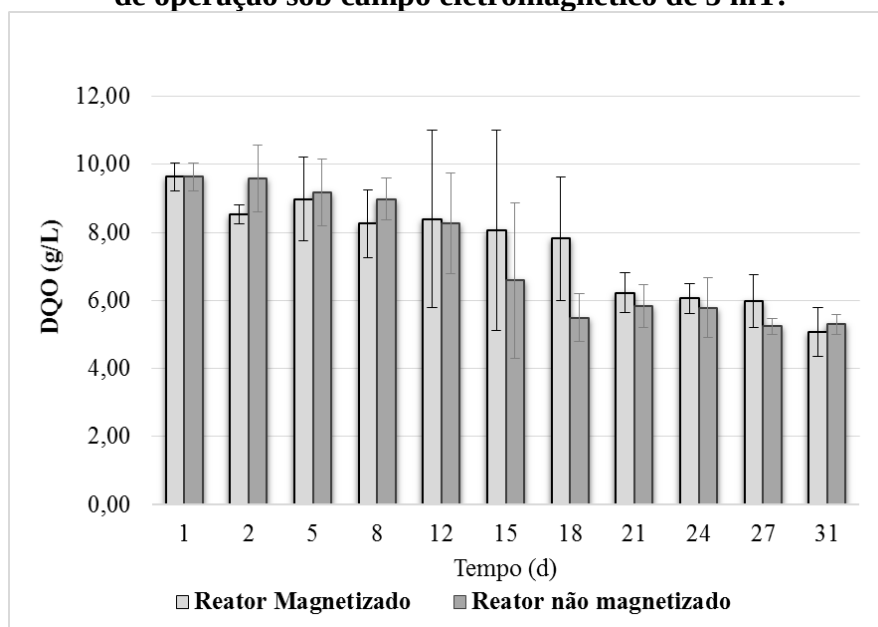
Ainda, Dębowski *et al.* (2015) sugerem a necessidade de um tempo de adaptação dos microorganismos anaeróbios a estimulação do campo magnético. Em seu estudo em seu com a biodigestão anaeróbia, utilizando microalgas como substrato, os microorganismos levaram 25 dias para a adaptação do campo magnético. Também encontraram, relação com aumento na atividade metanogênica com o tempo de exposição diário ao campo magnético, maior atividade metanogênica com exposição diária de 216 min, e piores resultados com 144 min/d e 432 min/d de exposição ao campo magnético.

Consumo de DQO

Nesse item estão apresentados os resultados para as análises de DQO realizadas ao longo dessa pesquisa.

O primeiro ensaio ocorreu com tempo de retenção de 31 dias, durante os quais, foram extraídas 16 amostras. Os valores resultantes das análises químicas para DQO estão apresentados na Figura 40.

Figura 40 - Variação da DQO durante o ensaio com biomassa enriquecida por 31 dias de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nota-se, que o comportamento dos dois reatores para esse parâmetro, foi semelhante. Houve remoção de DQO de 45% para o reator não magnetizado e de 47% para o reator magnetizado. Esse resultado mostra que a aplicação do campo eletromagnético de

intensidade de 5mT apresentou pouca diferença no consumo do substrato e, consequentemente, pouca diferença na redução da DQO ao longo do experimento.

A Tabela 20 apresenta os resultados das análises de DQO, realizadas sobre as amostras inicial e final dos reatores estudados durante os ensaios com biomassa enriquecida, 66 horas e campo eletromagnético de 5 mT e 10 mT.

A Tabela 21 apresenta os resultados das análises de DQO, realizadas sobre as amostras inicial e final dos reatores estudados durante os ensaios com lodo granular bruto, 144 horas e campo eletromagnético de 5 mT, 7,5 mT e 10 mT.

Tabela 20 - DQO inicial e final dos ensaios com biomassa enriquecida com 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT e 10 mT.

	Inicial (g/L)	Reator magnetizado (g/L)	% de remoção	Reator controle (g/L)	% de remoção
Ensaio 5 mT	30,04	23,20	22,77	24,25	19,27
Ensaio 1 10 mT	40,22	33,48	16,76	34,28	14,77
Ensaio 2 10 mT	38,93	33,16	14,82	33,96	12,77

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 21 - DQO inicial e final dos ensaios com lodo granular bruto com 144 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT, 7,5 mT e 10 mT.

	Inicial (g/L)	Reator magnetizado (g/L)	% de remoção	Reator controle (g/L)	% de remoção
Ensaio 1 5 mT	27,54	20,81	24,44	21,29	22,70
Ensaio 2 5 mT	27,22	21,13	22,37	20,32	25,35
Ensaio 1 7,5 mT	29,79	17,28	41,99	18,88	36,62
Ensaio 2 7,5 mT	27,22	20,32	25,35	21,29	21,78
Ensaio 1 10 mT	28,83	20,80	27,85	21,12	26,74
Ensaio 2 10 mT	27,70	20,16	27,22	20,96	24,33

Fonte: Dados da pesquisa.

Pela análise dos resultados dos ensaios com campo eletromagnético de 5 mT, observa-se que houve remoção de DQO em ambos os reatores, contudo, os reatores

magnetizados apresentaram valores de remoção menores, quando comparados aos reatores controle.

Os valores obtidos para o consumo de DQO, durante os ensaios sob campo eletromagnético de 7,5 mT revelaram maior eficiência de remoção para os reatores sob influência do eletromagnetismo, quando comparados aos reatores controle.

Também, os resultados obtidos para o consumo da DQO, durante os ensaios com reatores sob influência de campo eletromagnético de 10 mT apresentaram maior redução de DQO, quando comparados aos reatores controle.

Pela avaliação desses resultados, nota-se que os maiores valores de remoção de DQO ocorreram no ensaio de 31 dias em ambos os reatores, a remoção foi menor que no ensaio com 31 dias, provavelmente, devido ao curto período de experimento, o que indica que, durante esse período, a fermentação foi processo predominante, com pH baixo, então com baixa remoção de DQO, pois nessa fase os compostos orgânicos ainda não foram gaseificados.

Com base nos resultados de redução de DQO, o experimento de 31 dias, efetuado com campo eletromagnético de intensidade de 5 mT, apresentou as maiores porcentagens de redução de DQO. Aproximadamente, 45% para o reator magnetizado e 47% para o não magnetizado, esse fato provavelmente ocorreu devido ao maior tempo de ensaio comparado ao restante dos ensaios.

LU *et al.* (2014) estudaram o tempo de retenção hidráulica em tratamento anaeróbio de esgoto rural doméstico. Esses autores demonstraram que a eficiência de remoção da DQO está diretamente proporcional ao tempo de retenção hidráulica, quando o tempo de retenção cai, a eficiência de remoção da DQO tende a cair.

As maiores variações de DQO, entre o reator magnetizado e o não magnetizado, ocorreram com 7,5 mT. Essas variações apresentaram média de variação de 13,5 % a mais de redução de DQO para o reator magnetizado, em comparação ao reator controle.

Os ensaios com 5 mT apresentaram divergências nos resultados, com o segundo ensaio, realizado com lodo bruto, apresentando menor redução de DQO, cerca de 11% de diferença, do reator controle.

Os ensaios com lodo bruto e 10 mT de intensidade magnética apresentaram média de aumento de 8% da redução da DQO, pela provável bioestimulação magnética.

Haritwal *et al.* (2015) encontraram resultado semelhante, aumento de 14% de remoção da DQO em reator anaeróbio com campo magnético de 0,42T, em comparação com o reator não magnetizado. Zieliński *et al.* (2014) também encontraram 14% na diminuição da DQO com reator magnetizado (380 mT).

Tomska e Wolny (2008), em estudo com indução de campo magnético constante de 40mT, não encontraram diferença significativa na redução da DQO pelo consórcio microbiano aeróbio através da bioestimulação magnética.

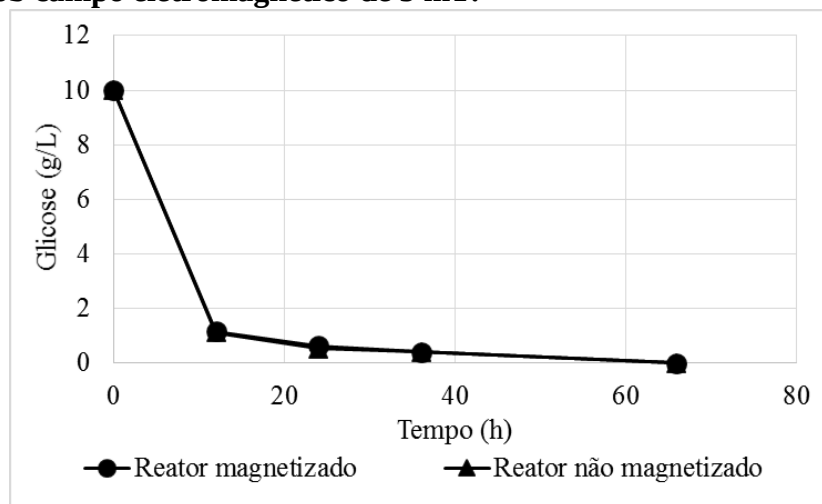
Conversão da glicose

O parâmetro conversão de glicose foi analisado por meio de metodologia descrita anteriormente. Os resultados dessas análises estão apresentados nesse item.

A Figura 41 apresenta o resultado das análises de consumo de açúcares para o ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo eletromagnético de 5 mT.

Pelo gráfico da conversão da glicose, percebe-se que toda glicose, presente no meio, foi consumida pelo consórcio microbiano que metabolizou a glicose em novos compostos durante as primeiras horas de reação.

Figura 41 – Conversão da glicose no ensaio com biomassa enriquecida com 66 horas de operação sob campo eletromagnético de 5 mT.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores encontrados, de conversão da glicose, para os ensaios realizados utilizando lodo granular bruto estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados da conversão de açúcar para os 6 ensaios utilizando lodo granular bruto.

Ensaio	Reator	Concentração Inicial g/L	Concentração em 4 h g/L	Concentração 6,5 h g/L
1º 5 mT	Reator magnetizado	9,66	1,84	0,27
	Reator controle		1,04	0,44
2º 5 mT	Reator magnetizado	9,63	1,54	0,42
	Reator controle		1,46	0,15
1º 7,5 mT	Reator magnetizado	9,40	1,86	0,25
	Reator controle		2,01	0,03
2º 7,5 mT	Reator magnetizado	9,71	2,60	0,42
	Reator controle		2,31	0,30
1º 10 mT	Reator magnetizado	9,66	1,39	0,01
	Reator controle		1,96	0,42
2º 10 mT	Reator magnetizado	9,37	1,77	0,14
	Reator controle		2,70	0,10

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados demonstraram que praticamente toda glicose foi convertida em novos compostos dentro de 6,5 horas de operação. Zhang *et al* (2007) encontraram 89,52% de conversão da glicose, utilizando a mesma concentração 10 g/L, inóculo de bactérias produtoras de hidrogênio, com tempo de retenção hidráulica de 1 hora, a porcentagem de redução caiu para 54,15% quando a concentração inicial foi de 30 g/L para o mesmo período.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados e nos objetivos propostos pode se concluir que:

Os lodos provenientes do tratamento de resíduos da avicultura apresentaram maior teor de sólidos e maior atividade metanogênica, quando comparados ao lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto.

A estimulação do consórcio anaeróbio microbiano com 5 mT não apresentou diferenças significativas nos parâmetros analisados, a produção de biogás e de metano foi praticamente idêntica.

A maior atividade metanogênica foi encontrada com a utilização do lodo granular recém coletado e diretamente utilizado com o meio nutricional. A adição de bicarbonato de sódio foi primordial para manutenção do pH dentro da faixa ótima da metanogênese.

Os resultados encontrados no presente trabalho sugerem que a bioestimulação por campo magnético constante, com intensidades de 7,5 mT e 10 mT (medidos no centro do reator, preenchido com ar a 37°C) aumentaram a eficiência do consórcio microbiano para remoção da DQO em média 15% e 8% respectivamente.

Os reatores magnetizados apresentaram alteração positiva na metanogênese. De acordo com as taxas de produção calculadas no trabalho, a bioestimulação magnética apresentou efeito positivo na metanogênese nas primeiras 72 h de reação, para os reatores submetidos ao campo eletromagnético de 7,5 e 10 mT. Após esse período, pode ter ocorrido a adaptação do consórcio ao stress gerado pelo magnetismo.

Com 72h de reação os experimentos utilizando lodo granular bruto apresentaram aumento de produção em média de 30% e 15% para exposição de 7,5 mT e 10 mT, sendo a intensidade de 7,5 mT o valor que obteve maiores diferenças na produção e metano.

Assim, a aplicação de campo magnético constante pode ser vantajosa para reatores operados com tempo de retenção hidráulica baixo. Porém, estudos mais detalhados são necessários para encontrar o tempo ótimo de exposição magnética do consórcio microbiano.

7. REFERÊNCIAS

- ALKHAMIS, T.M.; EL-KHAZALI, R.; KABLAN, M.M.; ALHUSEIN, M.A. Heating of a biogas reactor using a solar energy system with temperature control unit. **Solar Energy**, v.69, n.3, p.239-247, 2000.
- APHA, AWWA and WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed. American Public Health Association, Washington, Dc. 541p. 2005.
- APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**. v.34, p. 755-781, 2008.
- APPELS, L.; ASSCHE, A.V.; WILLEMS, K.; DEGRÈVE, J.; IMPE, J.V.; DEWIL, R. Peracetic acid oxidation as an alternative pre-treatment for the anaerobic digestion of waste activated sludge. **Bioresource Technology**. v.102, p.4124-4130, 2011.
- BAGHER, A.M.; FATEMEH, G.; SAMAN, M.; LEILI, M.M. Advantages and disadvantages of biogas energy. **Bulletin of Advanced Scientific Research**. v.1, n.5, 2015.
- BANIK, S.; BANDYOPADHYAY, S.; GANGULY, S.; DAN, D. Effect of microwave irradiated *Methanosarcina barkeri* DSM-804 on biomethanation. **Bioresource Technology**. v.97, n.6, p.819-823, 2006.
- BARBOZA, M. A. **Ação de campos magnéticos em alguns sistemas químicos e biológicos**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas SP, 2002.
- BRITANNICA ACADEMIC. In **Encyclopaedia Britannica - BIOGAS**. Extraído de <http://academic-eb-britannica.ez87.periodicos.capes.gov.br/EBchecked/topic/1692459/biogas>, acesso em 02/12/2015.
- BUYUKKAMACI, N.; FILIBELI, A. Volatile fatty acid formation in an anaerobic hybrid reactor. **Process Biochemistry**. v.39, p. 1491-1494, 2004.
- BUDZIANOWSKI, W.M. Sustainable biogas energy in Poland: prospects and challenges. **Renewable and sustainable energy reviews**. v.6, p.342-349, 2012.
- CAI, R.; YANG, H.; HE, J.; ZHU, W. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. **Journal of Molecular Structure**. v.938, p.15-19, 2009.
- CASTRO, M.C.A.A.; ANTONIO, S.M.; SCHALCH, V.; LEITE, W.C.A. Analysis of variation of concentration and methane gas flow in sanitary landfill in Brazil: 14a. **International Waste Management and Landfill Symposium**, 2013, Cagliari, Italy.Sardinia-2013. v.1. p.234 – 239.

COELHO, N.M.G.; DROSTE, R.L.; KENNEDY, K.J. Evaluation of continuous mesophilic, thermophilic and temperature phased anaerobic digestion of microwaved activated sludge. **Water Research**. v.45, p. 2822-2834, 2011.

DEBOWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M.; KRZEMIENIEWSKI, M.; BRUDNIAK, A. Effect of magneto-active filling on the effectiveness of methane fermentation of dairy wastewaters. **International Journal of Green Energy**. 2014.

DEBOWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M.; KISIELEWSKA, M.; HAJDUK, A. Effect of constant magnetic field on anaerobic digestion of algal biomass. **Environmental Technology**. v.37, n. 13, p. 1656-1663, 2016.

DOLFING, J.; BLOEMAN, W. G. B. M. Activity measurements as a tool to characterize the microbial composition of methanogenic environments. **Journal of Microbiological Methods**, v.4, n.1, p.1-12, 1985.

EL-MASHAD, H.M.; VAN LOON, W.K. P.; ZEEMAN, G. A model of solar energy utilization in the anaerobic digestion of cattle manure. **Biosystems Engineering**. v.84, n.2, p. 231-238, 2003.

FRICKE, K; PEREIRA, C; LEITE, A; BAGNATI, M. (Coords.). **Gestão sustentável de Resíduos sólidos Urbanos: Transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

GAJARAJ, S.; HUANG, Y.; ZHENG, P.; HU, Z. Methane production improvement and associated methanogenic assemblages in bioelectrochemically assisted anaerobic digestion. **Biochemical Engineering Journal**. v.117, p.105-112, 2017.

GALLERT, C.; BAUER, S.; WINTER, J. Effect of ammonia on the anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population. **Applied Microbiology and Biotechnology**. v.50, p. 495-501, 1998.

GEHR, R.; ZHAI, Z.A.; FINCH, J.A.; RAO, S.R. Reduction of concentrations in CaSO_4 saturated water using a magnetic field. **Journal of Applied Physics**. v.100, n.6, 1995.

GOZZI, G.G.M. **Circuitos Magnéticos**. Coleção Estude e Use, Ed. Érica, 1996.

GRADY, C.P.L.Jr.; DAIGGER, G.T.; LIM, H.C. **Biological Wastewater Treatment**. 2nd Ed., Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.

GUIMARÃES, A. P. **A pedra com alma - a fascinante história do eletromagnetismo**. Editora Civilização Brasileira, 335p., 2011.

GUJER, W.; ZEHNDER, A.J.B. Conversion processes in anaerobic digestion, **Water Science and Technology**. v. 15, n.8-9, p. 127-167, 1983.

EL-MASHAD, H. M.; ZEEMAN, G.; VAN LOON, W. K. P.; BOT, G. P. A.; LETTINGA, G. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. **Bioresource Technology**. v.95, p. 191-201, 2004.

HARITWAL, A.; CHAUDLHARY, M.; MOHAN, D.; ASOPA, P.P. Study on the improved biogas generation through magnetic field modified anaerobic digestion. **International Journal Engineering Research & Technology**. v.4, n.5, 2015.

HERBERT, D.; PHILIPPS, O. S.; STRANG, R. E. **Carbohydrate analyses**. Methods in Enzymology, 5B, p. 265-277, 1971.

HILL, D.T.; COBB, S.A.; BOLTE, J.P. Using volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. **American Society of Agricultural Engineers**. v.30, p.496-501, 1987.

HOURIUCHI, J.; SHIMIZU, T.; KANNO, T.; KOBAYASHI, M. Dynamic behavior in response to pH shift during anaerobic acidogenesis with a chemostat culture. **Biotechnology Techniques**. v.13, p. 155-157, 1999.

HOURIUCHI, J., SHIMIZU, T.; TADA, K., KANNO, T.; KOBAYASHI, M. Selective production of organic acids in anaerobic acid reactor by pH control. **Bioresource Technology**. v.82, p. 209-213, 2002.

HOLM-NIELSEN, J.B., AL SEADI, T., OLESKOWICZ-POPIEL P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**. v.100, p.5478-5484, 2009.

HUNT R.W.; ZAVALIN, A.; BHATNAGAR, A.; CHINNASAMY, S.; KESHAV, C. Electromagnetic bioestimulation of living cultures for biotechnology, biofuel and bioenergy applications. **International Journal of Molecular Sciences**. v.10, p.4515-4558, 2009.

JI, H.; WANG, Y.; SUN, J.; YAN, LI, J.; ZHAO, T.; YIN, X. Enhancement of biological treatment of wastewater by magnetic field. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 8535-8540, 2010.

JIANG, X.; SOMMER, S.G.; CHISTENSEN, K.V. A review of the biogas industry in China. **Energy Policy**. v.39, n.10, p.6073-6081, 2011.

JOHANSSON, B.T.; KELLY, H.; REDDY, A.K.N.; WILLIAMS, R.H.; BURNHAM, L. **Renewable Energy: Sources for fuels and Electricity**. Island Press, Washington, D.C., p. 1160, 1993.

JOSHI, K.M.; KAMAT, P.V. Effects of magnetic field on the physical properties of water. **Journal India Chemical Society**. v.43, p.620 – 622, 1966.

JUNG, J.; SANJI, B.; GODBOLE, S.; SOFER, S. Biodegradation of Phenol: A comparative study with and without applying magnetic fields. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v.56, p.73-76, 1993.

JUNG, J.; SOFER, S. Enhancement of phenol biodegradation by south magnetic field exposure. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. v.70, p.299-303. 1997.

KARDOS, L.; JUHÁSZ, Á.; PALKÓ, G.; OLÁH, J.; BARKÁCS, K.; ZÁRAY, G. Comparing of mesophilic and termophilic anaerobic fermented sewage sludge based on chemical and biochemical test. **Applied Ecology and Environmental Research**. v.9, n.3, p.293-302, 2011.

KIM, J.K.; OH, B.R.; CHUN, Y.N.; KIM, S.W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. v.102, n.4, p.328–332, 2006.

KIM, D.H.; OH, S.E. Continuous high-solids anaerobic co-digestion for organic waste under mesophilic conditions. **Waste Management**. v.31, p.1943–1948, 2011.

KERROUM, B.K.; DERBAL, K.; BECHEIKH-LEHOCINE, M. Effect of starting pH on the produced methane from dairy waster in thermophilic phase. **Chemical Engineering Transactions**. v.38, p.511-516, 2014.

KRYVORUCHKO, V.; MACHMÜLLER, A.; BODIROZA, V.; AMON, B.; AMON, T. Anaerobic digestion of by-products of sugar bett and starch potato processing. **Biomass and Bioenergy**, v.33, n.4, p.620-627, 2009.

LAY, J.; LI, Y.; NOIKE, T. Influences of pH and Moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. **Water Research**. v.31, n.6, p. 1518-1524, 1997.

LAY, J.; LI, Y.; NOIKE, T. Developments of bacterial population and methanogenic activity in a laboratory-scale landfill bioreactor. **Water Research**.v.32, n12, p. 3673-3679, 1998.

LI, Y.; PARK, S.Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.15, p.821-826, 2011.

LINO, F.A.M.; ISMAIL, K.A.R. Municipal solid waste as sustainable energy source for Brazil. **International Journal of Energy and Power Engineering**. v.4, n.4, p.897-204, 2015.

LYND, L.R.; WEIMER, P.J.; VAN ZYL, W.H.; PRETORIUS, I.S. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology, **Microbiology Molecular Biolology Reviews**., v.66, n.3, p.506-577, 2002.

LU, Xi-WU; LADU, J.L.C. Effects of hydraulic retention time, temperature, and effluent recycling on efficiency of anaerobic filter in treating rural domestic wastewater. **Water Science and Engineering**. v.7, n.2, p.168-182, 2014.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Editores BETTIOL, W. e CAMARGO, O. A. Jaguariuna, SP. EMBRAPA Meio Ambiente, Cap. 1, p 11-24, 2000.

MENARDO, S.; GIOELLI, F.; BALSARI, P. The methane yield of digestate: Effect of organic loading rate, hydraulic retention time and plant feeding. **Bioresource Technology**. v.103, n.3, p.2348-2351, 2011.

MOSET, V.; POULSEN, M.; WAHID, R.; HOJBER, O.; MOLLER, H.B. Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology. **Microbial biotechnology**. v.8, n.5, p.787-800, 2015.

MOYES, R. B.; REYNOLDS, J.; BREAKWELL, D. Differential Staining of Bacteria Gram Stain. Current Protocols in Microbiology A.3C.1-A.3C.8, **Wiley Interscience**, November 2009.

MUDRAK, K.; KUNST, S. **Biology of sewage treatment and water pollution control**. England: Ellis Horwood Ltd, 193p., 1986.

MUSSOI, F.L.R. **Fundamentos de eletromagnetismo**. Apostila de apoio didático. CEFET/SC, Versão 3.2, 127p., 2005.

NOVAK, M. A. Introdução ao Magnetismo – **II Escola Brasileira de Magnetismo**. Rio de Janeiro, IF- UFRJ, 1999.

PALATSI, J.; AFFES, R.; FERNANDEZ, B.; PEREIRA, M.A.; ALVES, M.M.; FLOTATS, X. Influence of adsorption and anaerobic granular sludge characteristics on long chain fatty acids inhibition process. **Water Resources**. v.46, p.5268–5278, 2012.

PAPACZ, W. Biogas as vehicle fuel. **Journal of KONES powertrain and Transport**, v.18, n.1, 2011.

PARKIN, G.F.; OWEN, W.F. Fundamentals of anaerobic-digestion of waste-water sludges. **Journal of Environmental Engineering**. v.112, n.5, p.867–920, 1986.

PARLAMENTO EUROPEU. Site do Parlamento Europeu. Disponível em: http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/pt/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.7.4.html, acesso em: 31/10/2016.

PARSONS, S.A.; WANG, S.J.; JUDD, S.J.; STEPHENSON, T. Magnetic treatment of calcium carbonate scale – effect of pH control. **Water Research**. v.31, n.2, p.339-342, 1997.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F.; NETO, A. M. O. Eficiência de um sistema de reatores anaeróbios no tratamento de efluentes líquidos de suinocultura. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 287-293, 2011.

PETRAÇONI FILHO, G. **Introdução ao magnetismo**. Física Vivencial, uma Aventura do conhecimento. 2009. Acesso em: 24/10/2016. Disponível em: http://www.fisicavivencial.pro.br/sites/default/files/ee/311/src/311/documentos/311_RT.pdf

QICKENDEN, T.I.; BETTS, D.M.; COLE, B.; NOBLE, M. Effects of magnetic fields on the pH of water. **Journal Physics Chemical**, v.75, n.18, p.2830 – 2831, 1971.

RAJESHWARI, K.V.; BALAKRISHNAN, M.; KANSAL, A.; LATA, K.; KISHORE, V.V.N. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v.4, p. 135-156, 2000.

DEL RE, B.; BERSANI, F.; AGOSTINI, C.; MESIRCA, P. Various effects on transposition activity and survival of Escherichia coli cells to different ELF-MF signals. **Radiation and Environmental Biophysics**, v.43, p.265-270, 2004.

REIS, A.S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 2012.

RODRÍGUEZ, J.F.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.I.; Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of OFMSW: Kinetic analysis. **Chemical Engineering Journal**. v.232, p.59-64, 2013

ROJAS, C.; FANG, S.; UHLENHUNT, F.; BORCHERT, A.; STEIN, I.; SCHLAAK, M. Stirring and biomass starter influences the anaerobic digestion of different substrates for biogas production. **Engineering in Life Sciences**, v.10, n.4, p.339-347, 2010.

SALMINEN, E.; RI`NTALA, J.; HARKOONEN, J.; KUITUNEN, M.; HOGMANDER, H.; OIKARI, A. Anaerobically digested solid poultry slaughterhouse wastes to be used as fertiliser on agricultural soil. **Bioresource Technology**. v.78, p.81- 88, 2001.

SÁNCHEZ, E.; BORJA, R.; WEILAND, P.; TRAVIESO, L.; MARTÍN, A. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. **Process Biochemistry**. v.37, p. 483-489, 2001.

SANTOS, J.C.F. Imãs e Magnetismo, educação física. Site contendo material didático de educação básica. Disponível em: <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/eletro-magnetismo/imas-e-magnetismo.html>, acesso em: 24/10/2016.

SCHATTAUER A.; ABDOUN, E.; WEILAND, P.; PLOHL, M.; HEIERMANN, M. Abundance of trace elements in demonstration biogas plants. **Biosystems Engineering**. v.108, p.57–65, 2011.

SLOBODKIN, A.I.; NOZHEVNIKOVA, A.N. Effect of Methanotrix thermoacetophila on ethanol degradation by a methanogenic microbial association, **Prikl. Biokhim. Mikrobiol**. v.26, n.2, p.825-831, 1990.

STUART, P. **The advantages and disadvantages of anaerobic digestion as a renewable energy source**. Postgraduate Loughborough University, 2006. Acesso em: 23/10/2016. Disponível em: <http://www.maths.tcd.ie/~jlennon/miniprojects/biomass.doc>.

SZCZEŚ, A.; CHIBOWSKI, E.; HOŁYSZ, L.; RAFALSKI, P. Effects of static magnetic field on water at kinetic condition. **Chemical Engineering and Processing**. v.50, p.124–127, 2011.

TAMBONE, F.; SCAGLIA, B.; D'IMPORZANO, G.; SCHIEVANO, A.; OEZI, V.; SALATI, S.; ADANU, F. Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. **Chemosphere**, v.181, n.5, p.77-583, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; DAVID-STENSEL, H. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse In: Metcalf & Eddy, Inc. 4th ed. New York McGraw-Hill Companies, (McGraw-Hill Series in Civil and Environmental Engineering) p. 1819, 2003.

TOMSKA, A.; WOLNY, L. Enhancement of biological wastewater treatment by magnetic field exposure. **Desalination**. v.222, p.368-373, 2008.

VINDIS, P.; MURSEC, B.; JANZEKOVIC, M.; CUS, F. The impact of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion on biogas production. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. v.36, n.2, 2009.

VEEKEN, A.; HAMELERS, B. Effect of temperature on hydrolysis rate of selected biowaste components. **Bioresource Technology**. v.69, p.249-254, 1999.

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, n.4, p.849-860, 2010.

YAVUZ, H.; ÇELEBI, S.S. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment. **Enzyme and Microbial Technology**. v.26, n.1, p.22-27, 2000.

ZHANG, C.; SU, H.; BAEYENS, J.; TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.38, p.383-392, 2014.

ZHANG, P. Z.; TAY, J. H.; SHOW, K. Y.; YAN, R.; LIANG, D. T.; LEE, D. J. JIAN, W. J. Biohydrogen production in a granular activated carbon anaerobic fluidized bed reactor. **International journal of Hydrogen Energy**. v. 32, p. 185 – 191, 2007.

ZESHAN, K.O.P.; VISVANATHAN, C. Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. **Bioresource Technology**, v.133, p. 294-302, 2012.

ZIELIŃSKI, M.; DEBOWSKI, M.; KRZEMIENIEWSKI, M.; DUDEK, M.; GRALA, A. Effect of constant magnetic field (CMF) with various values of magnetic induction effectiveness of dairy wastewater treatment under anaerobic conditions. **Polish Journal of Environmental Studies**. v.26, n.1, p. 255-261, 2013.

ZHONG, W.; CHI, L.; LUO, Y.; ZHANG, Z.; WU, W. M. Enhanced methane production from Taihu Lake blue algae by anaerobic co-digestion with corn straw in continuous feed digesters. **Bioresource Technology**. v.134, p. 264-70, 2013.

APÊNDICE

Dados brutos dos testes preliminares.

Nas Tabela 1 a 4, estão apresentados os dados de pressão e porcentagem de metano para os ensaios com lodo denominados L1, 2, L3 e L4.

Tabela 1 – Valores medidos de pressão e porcentagem de metano, testes preliminares com lodo granular L1.

Condição nutricional	Pressão	% de metano
M1	16,5	15,7
	16,3	14,4
M2K	18,3	43,0
	16,1	40,5
M2	13,6	42,6
	18,5	42,8
M3K	11,2	36,2
	10,4	34,3
M3	11,2	35,6
	11,2	36,9
M4k	7,9	29,7
	7,8	30,5
M4	8,3	30,3
	2,6	32,6

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 2 – Valores medidos de pressão e porcentagem de metano, testes preliminares com lodo granular L2.

Condição nutricional	Pressão	% de metano
M1	20,6	19
	25	18,6
M2K	39,8	15,6
	42,3	17,5
M2	41	16,7
	39,7	15,4
M3K	39,9	9,2
	34,9	9,5
M3	34,3	10,7
	34,9	9,5
M4K	32,2	7,1
	28,4	7,6
M4	28,7	6,9
	29,1	7,7

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 3 – Valores medidos de pressão e porcentagem de metano, testes preliminares com lodo granular L3.

Condição nutricional	Pressão	% de metano
M1	10,5	17,8
	15,2	15,3
M2K	17,3	2,6
	23	7,5
M2	22,9	7,8
	23,4	8,1
M3K	24,8	5,6
	21,6	5,2
M3	21	5,2
	20,2	5,3
M4K	23,8	3,4
	21,2	5
M4	19,9	7,8
	21	5,2

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 4 – Valores medidos de pressão e porcentagem de metano, testes preliminares com lodo granular L4.

Condição nutricional	Pressão	% de metano
M1	13,3	16
	13,5	9,3
M2	41,4	16,7
	42,6	17,5
M3	33,5	10,1
	33,8	10,3
M4	33,4	10,2
	33,7	10,6

Fonte: dados da pesquisa.

A Tabela 5 apresenta os dados coletados em laboratório para confecção da curva de calibração da bobina, realcionando corrente, tensão e intensidade de campo magnético no interior do frasco reagente, envolto pela bobina, preenchido com ar.

Tabela 5 – Valores medidos de tensão, corrente e campo magnético no ensaio para calibração da bobina.

Tensão (v)	Corrente (A)	Campo Magnético (mT)
2,5	0,5	1,6
5,0	1,0	4,0
7,9	1,5	5,9
10,0	2,0	7,8
15,5	3,0	11,6

Fonte: dados da pesquisa.

Ensaio com biomassa enriquecida

Na Tabela 6 estão apresentados os dados de absorvância para análise de DQO do primeiro ensaio com 31 dias e 5 mT de intensidade magnética.

Tabela 6 – Valores medidos de absorvância nas análises de DQO para o ensaio com biomassa enriquecida, 31 dias e campo magnético de 5 mT.

Tempo (d)	Diluição	Absorvância reator magnetizado	Absorvância reator controle
1	70x	0,040	0,04
	71x	0,042	0,042
	72x	0,041	0,041
2	60x	0,040	0,048
	60x	0,048	0,047
	60x	0,039	0,048
5	60x	0,047	0,043
	60x	0,039	0,041
	60x	0,048	0,053
8	60x	0,038	0,04
	60x	0,042	0,05
	60x	0,043	0,044
12	60x	0,037	0,071
	60x	0,037	0,041
	60x	0,051	0,058
15	60x	0,055	0,034
	60x	0,032	0,031
	60x	0,033	0,062
18	50X	0,046	0,054
	50X	0,051	0,032
	50X	0,043	0,033

21	50X	0,035	0,036
	50X	0,039	0,037
	50X	0,042	0,031
24	50X	0,04	0,036
	50X	0,03	0,035
	50X	0,038	0,032
27	50X	0,036	0,032
	50X	0,035	0,026
	50X	0,035	0,035
31	50X	0,03	0,03
	50X	0,031	0,028
	50X	0,029	0,036

Fonte: dados da pesquisa.

Na Tabela 7 são apresentados os dados coletados para o cálculo da sequência de sólidos do primeiro ensaio com 31 dias e 5 mT de intensidade magnética.

Tabela 7 – Valores medidos nas análises de sólidos para o ensaio com biomassa enriquecida, 31 dias e campo magnético de 5 mT.

	Peso do cadinho	Peso amostra	Peso pós estufa	Peso pós mufla
Inicial	37,5101	20,0812	37,912	37,7547
	35,4108	55,421	35,7923	35,6605
Final Reator controle	42,3184	20,1025	42,5665	42,4636
	28,7772	19,672	29,0122	28,9188
Reator Magnetizado	36,7364	19,8628	36,9687	36,8815
	40,3792	20,4672	40,6115	40,5059

Fonte: dados da pesquisa.

A Tabela 8 apresenta os dados coletados de pressão interna no reator, assim como as porcentagens de metano para o ensaio com 31 dias e 5 mT de intensidade magnética.

Tabela 8 – Valores medidos de incremento de pressão e % de metano para o ensaio com biomassa enriquecida, 31 dias e campo magnético de 5 mT.

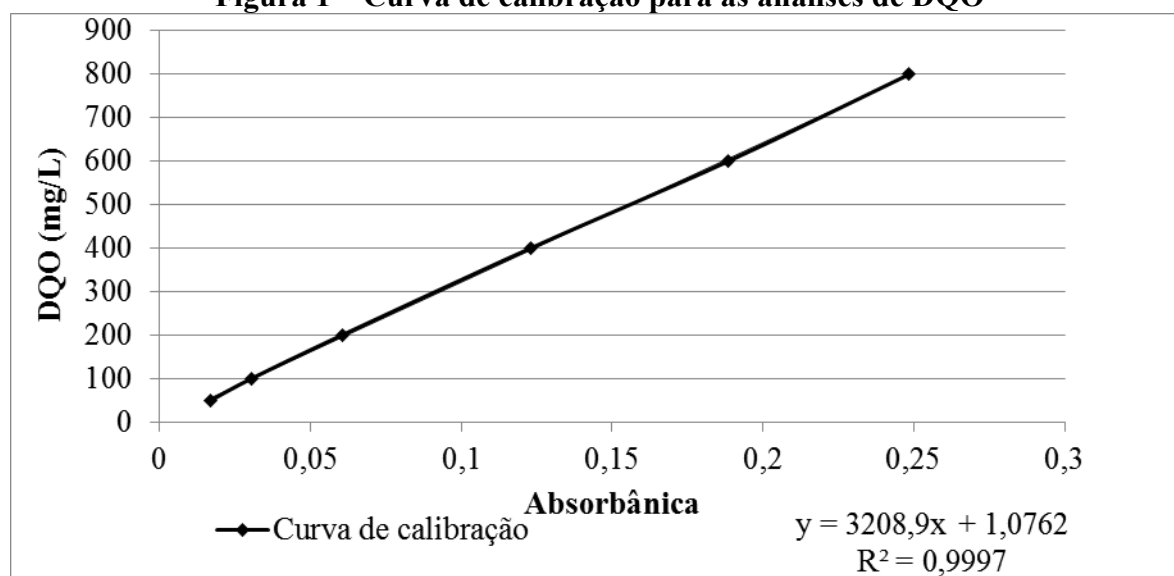
	Reator branco		Reator magnetizado	
	Pressão (m.c.a)	% de metano	Pressão (m.c.a)	% de metano
1	8,6	1,1	5,1	1,1
2	2,5		2,5	

3	3		2,8	
6	3,4	6,3	3,2	7,3
7	0,6		0,5	
8	-		0,9	
9	1		1	
13	1,2		1,2	
15	1,5	15,5	1,4	16,4
17	2,1		1,9	
20	2,3	15,5	2,5	16,4
22	0,9		1,1	
24	1	18,5	1,1	19,2
31	1,1	18,5	1,2	19,2

Fonte: dados da pesquisa.

Curva de calibração utilizada para as análises de DQO nesse trabalho, Figura 1.

Figura 1 – Curva de calibração para as análises de DQO



Fonte: dados da pesquisa.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados de absorbância para análise de DQO do ensaio de 66 horas e 5 mT de intensidade magnética.

Tabela 9 – Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 5 mT.

	Absorbância	Absorbância	Absorbância
Amostra	1	2	3
Inicial	0,195	0,198	0,228
Reator magnetizado	0,204	0,208	0,176

Reator Controle	0,184	0,200	0,220
------------------------	-------	-------	-------

Fonte: dados da pesquisa

Abaixo, na Tabela 10 são apresentados os resultados de absorvância utilizados para o cálculo do consumo de glicose do ensaio com 5 mT e 66 h.

Tabela 10 – Valores medidos de absorvância nas análises de consumo de açúcares para o ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 5 mT.

Tempo (h)	Reator controle	Reator magnetizado	Fator de diluição
	Absorvância	Absorvância	
07:30	0,247	0,255	45x
	0,246	0,249	45x
09:30	0,231	0,238	45x
	0,237	0,24	45x
11:30	0,236	0,234	45x
	0,234	0,238	45x
13:45	0,201	0,181	45x
	0,197	0,185	45x
15:45	0,152	0,166	45x
	0,015	0,168	45x

Fonte: dados da pesquisa.

Os resultados de pressão e porcentagem de metano medidos no ensaio com 5 mT e 66 h de rução são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 5 mT.

Tempo (h)	Reator magnetizado		Reator Controle	
	Pressão	% de metano	Pressão	% de metano
12	7,8	0,1	10,8	0,1
14,5	2		2,1	
16,5	2,8		3,1	
18,5	3,1	0,2	3,8	0,2
21	0,5		0,5	
36	1	0,5	1	0,5
45	1,1		1,1	
47	1,1	0,5	1,2	0,5
66	1,4	0,6	1,3	0,6

Fonte: dados da pesquisa.

Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentados os resultados encontrados de absorbância para análise da DQO do primeiro e segundo ensaio com 10 mT e 66h de duração.

Tabela 12 – Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o primeiro ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 10 mT.

	Absorbância	Diluição
Inicial	0,127	100x
	0,123	100x
Reator magnetizado final	0,106	100x
	0,102	100x
Reator controle final	0,108	100x
	0,105	100x

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 13 - Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o segundo ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 10 mT.

	Absorbância	Diluição
Inicial	0,126	100x
	0,116	100x
Reator magnetizado final	0,102	100x
	0,104	100x
Reator controle final	0,104	100x
	0,107	100x

Fonte: Dados da pesquisa.

Nas Tabelas 14 e 15 estão apresentados os resultados obtidos em laboratório para cálculo da sequência de sólidos do primeiro e segundo ensaio de 66 h e 10 mT de intensidade magnética.

Tabela 14 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, primeiro ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 10 mT.

	Peso do cadinho	Peso da amostra	Peso pós estufa	Peso pós mufla
Inicial	35,23	55,04	35,97	35,51
	40,94	20,86	41,75	41,26
Reator controle	39,34	19,71	39,95	39,62
	33,89	53,67	34,46	34,18
Reator magnetizado	37,90	57,61	38,50	38,18

	35,83	19,79	36,39	36,10
--	-------	-------	-------	-------

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 15 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, segundo ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 10 mT.

	Peso do cadinho	Peso da amostra	Peso pós estufa	Peso pós mufla
Inicial	28,78	49,10	29,39	28,85
	42,81	63,14	43,43	42,89
Reator controle	50,12	70,77	50,65	50,17
	44,69	65,36	45,23	44,76
Reator magnetizado	42,81	62,39	43,47	43,06
	65,51	86,31	66,02	65,40

Fonte: Dados da pesquisa.

As porcentagens de metano e os valores medidos de pressão no interior dos reatores para o primeiro e segundo ensaio de 66 h e 10 mT são apresentados nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, primeiro ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 10 mT.

Tempo (h)	Reator controle		Reator magnetizado	
	Pressão	% de metano	Pressão	% de metano
11,5	21	0,1	24,7	0,2
15,5	2,1	0,3	2,1	0,4
16,5	0,5	0,3	0,5	0,4
18,5	0,3		0,7	0,2
21	1,8	0,6	1,8	0,6
36	1,3	1	0,8	1,4
45	0,5		0,6	
66	0,6	1,3	0,9	1,9

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 17 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, segundo ensaio com biomassa enriquecida, 66 horas e campo magnético de 10 mT.

Tempo (h)	Reator controle		Reator magnetizado	
	Pressão	% de metano	Pressão	% de metano
1,6	1,4	0	1,8	0
2,6	1,4	0	1,9	0
3,1	0,4	0	0,8	0
5,1	1,3	0	3,7	0
8,15	14,6	0,1	12,5	0,3

10,5	10	0,1	5,4	0,3
21	19,7	0,3	12	0,6
23,5	2,7	0,4	4,2	0,8
25,5	0,4	0,1	3	0,7
28	2,4	0,2	4,2	0,4
31	0,6	0,2	2,8	0,4
47	2	0,3	2,7	0,8
50	0	0	0,5	0,5
66	1	0,4	0	0

Fonte: Dados da pesquisa.

Ensaio com lodo granular bruto

Na Tabela 18 são apresentados os resultados da sequência de sólidos para caracterização do lodo anaeróbio proveniente da estação de tratamento da avícula Dacar.

Tabela 18 - Valores medidos na sequência de sólidos para caracterização do lodo anaeróbio proveniente da estação de tratamento de dejetos avícolas.

	Peso do cadinho	Peso da amostra	Peso pós estufa	Peso pós mufla
Lodo Bruto	43,01	62,91	44,27	43,22
	38,28	53,83	39,38	38,46

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores de absorvância para o cálculo da DQO no primeiro e segundo ensaios com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 5 mT estão apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Valores medidos de absorvância nas análises de DQO para o primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 5 mT.

	Absorvância	Diluição
Inicial	0,091	100X
	0,080	100X
Reator magnetizado	0,065	100X
	0,064	100X
Reator controle	0,067	100X
	0,065	100X

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 20 - Valores medidos de absorvância nas análises de DQO para o segundo ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 5 mT.

	Absorvância	Diluição
Inicial	0,092	100X

	0,077	100X
Reator magnetizado	0,065	100X
	0,066	100X
Reator controle	0,067	100X
	0,059	100X

Fonte: Dados da pesquisa

Os valores de pressão e porcentagem de metano para o primeiro e segundo ensaios com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 5 mT estão apresentados nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético do primeiro ensaio 5 mT.

Tempo (h)	Reator Controle		Reator magnetizado 5 mT	
	Pressão (m.c.a)	% de metano	Pressão (m.c.a)	% de metano
4	2,9	2,2	3,1	2,3
6,5	3,8	11,2	5,9	12,2
9	19,2	11,8	24,3	12,6
11,5	4,5	11,4	4	14,4
14	2,7	15,9	3,2	18,2
16,5	6,2	24,4	6,6	25,1
19	6,7	25,1	7	27,6
21,5	5,1	25,3	5	31,5
26	4,9	36	4,8	42,3
29,5	4,3	37	4,4	42,4
32	4,2	38	4,4	42,5
48	3,7	37	3,1	41,8
53,5	3,7	46	3,6	42
56	3,8	46,4	3,7	47,2
72	7,4	51,5	7,4	51,1
95	7,3	53,8	6,6	55,1
120,5	5,1	57	5,1	59,7
144,5	6,6	50,7	7,3	52,9

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 22 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético do segundo ensaio 5 mT.

Reator magnetizado	Reator controle
--------------------	-----------------

Tempo (h)	Pressão m.c.a	% de metano	Pressão m.c.a	% de metano
4	6,4	7,3	5,4	9,1
6,5	20	8,7	14	11,6
9	4,1	12,9	6,7	13,2
11,5	3,7	15,3	3,9	14,5
14	3,7	18,8	3,6	19
16,5	1,4	23	1,4	23,2
19	1,2	23,4	1,5	24,2
21,5	1,3	23,8	1,6	25,3
26	3,2	23,6	3	24,2
29,5	4	29,6	4,1	30,44
32	1,7	29	1,9	30,1
48	5	39,1	6,1	43,5
53,5	2,2	37,8	2,7	42,6
56	5,7	44,2	5,7	53,7
72	5	53	5,2	61,2
95	5	53,5	5,2	63,2
120,5	5	54	6,4	62,3
144,5	5	52,8	6,3	62,4

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores obtidos em laboratório para quantificação da sequência de sólidos do primeiro e segundo ensaios com lodo bruto, 144 horas e campo eletromagnético de 5 mT estão apresentados na Tabela 23 e 24.

Tabela 23 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 5 mT.

	Peso cadinho	Peso amostra	Peso pós estufa	Peso pós mufla	Volume da amostra
Inicial	36,86	57,40	37,61	37,08	20 mL
	53,50	74,07	54,36	53,81	20 mL
Reator magnetizado 5 mT	44,69	63,63	45,24	44,89	20 mL
	42,81	62,39	43,36	43,06	20 mL
Reator controle	46,05	66,46	46,83	46,38	20 mL
	28,78	49,31	29,45	29,01	20 mL

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 24 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, segundo ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 5 mT.

	Peso cadinho	Peso amostra	Peso pós estufa	Peso pós mufla	Volume da amostra
Inicial	48,59	68,11	49,36	48,80	20 mL
	36,75	56,30	37,52	36,99	20 mL
Reator magnetizado 5 mT	35,43	55,29	35,90	35,57	20 mL
	36,73	54,99	37,22	36,92	20 mL
Reator controle	53,50	69,76	53,99	53,65	20 mL
	39,71	56,00	40,22	39,96	20 mL

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados de absorbância coletados para quantificação da DQO do primeiro e segundo ensaios com lodo bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT estão apresentados na Tabela 25 e 26.

Tabela 25 - Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT.

	Absorbância	Diluição
Inicial	0,054	100X
	0,053	100X
	0,056	100X
Reator magnetizado	0,061	100X
	0,093	100X
Reator controle	0,092	100X

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 26 - Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o segundo ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT.

	Absorbância	Diluição
Inicial	0,081	100X
	0,088	100X
Reator magnetizado	0,063	100X
	0,063	100X
Reator controle	0,064	100X
	0,068	100X

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores obtidos em laboratório pra quantificação da sequência de sólidos do primeiro e segundo ensaio com lodo bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT são apresentados na Tabela 27 e 28.

Tabela 27 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT.

	Peso cadinho (g)	Peso amostra (g)	Peso estufa (g)	Peso pós mufla (g)	Volume da amostra (g)
Inicial	48,59	68,11	49,41	48,85	20 mL
	42,32	61,87	43,14	42,61	20 mL
Reator magnetizado	36,74	55,12	37,12	36,97	20 mL
	37,90	56,42	38,28	38,13	20 mL
Reator controle	61,72	81,00	62,34	62,04	20 mL
	35,42	54,57	35,92	35,63	20 mL

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 28 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, segundo ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT.

	Peso cadinho g	Peso amostra g	Peso pós estufa g	Peso pós mufla g	Volume da amostra mL
Inicial	28,78	49,13	29,47	29,05	20
	38,58	58,95	39,54	38,86	20
Reator magnetizado	36,74	55,12	37,14	36,87	20
	37,90	56,42	38,49	38,23	20
Reator controle	33,88	52,35	34,35	34,13	20
	35,84	54,57	36,45	35,96	20

Fonte: Dados da pesquisa.

As porcentagens de metano e pressão medidas durante o primeiro e segundo ensaios com 7,5 mT, utilizando lodo bruto como inóculo são apresentados nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, primeiro ensaio lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT.

Tempo h	Reator Controle		Reator magnetizado	
	Pressão m.c.a	% de metano	Pressão m.c.a	% de metano
4	3	2,3	2,7	1,9
6,5	4,2	11,5	3,9	11,1
9	22,1	12,4	19,1	12,2
11,5	4,1	9,4	4,5	9,2
14	3,3	13,6	3,3	13,1
16,5	6,5	22,3	6,1	22
19	7	23,9	6,8	24

21,5	4,7	24,8	4,6	24,6
26	4,9	35,9	4,9	33,2
29,5	4,4	36	4,3	33,9
32	4,5	36,7	4,4	34,8
48	3,5	35,6	3,3	36,2
53,5	3,6	46	3,6	46,8
56	3,6	46,4	3,6	46,7
72	7,2	50,4	7,4	50,8
95	6,7	54,7	6,8	55,1
120,5	5,3	55,1	5,2	57,3
144,5	7,2	51,2	6,9	50,4

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 30 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, segundo ensaio lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 7,5 mT.

Tempo h	Reator Controle		Reator magnetizado	
	Pressão m.c.a	% de metano	Pressão m.c.a	% de metano
4	5,9	12,1	6,3	12,4
6,5	8,6	14,3	9,8	13,8
9	3	15,4	3,1	16,5
11,5	2,3	15,5	2,9	16,8
14	2,4	17	2,7	17
16,5	2,1	17,7	2,7	18,5
19	2	17,7	2,8	20,4
21,5	2,1	17,8	2,4	20,4
26	2,8	17,8	2,5	20,7
29,5	2,8	17,9	2,5	20,8
32	2,2	21	2,6	22
48	2,3	23,1	2,3	31
53,5	4,3	32	4,4	35
56	4,7	37	4,8	40
72	6,3	43,4	6,8	46,2
95	6,9	50,4	7,3	52,9
120,5	5	59	5,1	62
144,5	5,1	61	5,1	62,1

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados de absorbância coletados para quantificação da DQO do primeiro e segundo ensaio utilizando lodo bruto, com 10 mT são apresentados na Tabela 31 e 32.

Tabela 31 - Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 10 mT.

	Absorbância	Diluição
Inicial	0,089	100X
	0,09	100X
Reator magnetizado	0,065	100X
	0,064	100X
Reator controle	0,068	100X
	0,063	100X

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 32 - Valores medidos de absorbância nas análises de DQO para o segundo ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 10 mT.

	Absorbância	Diluição
Inicial	0,085	100X
	0,087	100X
Reator magnetizado	0,065	100X
	0,06	100X
Reator controle	0,067	100X
	0,063	100X

Fonte: Dados da pesquisa.

As Tabelas 33 e 34 apresentam os dados obtidos em laboratório para o cálculo da sequência de sólidos, no primeiro e segundo ensaio de 10 mT, com lodo bruto.

Tabela 33 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, primeiro ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 10 mT.

	Peso do cadinho g	Peso da amostra g	Peso pós estufa g	Peso pós mufla g
Inicial	65,51	86,31	66,31	65,72
	44,69	65,61	45,51	44,91
Reator magnetizado	40,94	60,56	41,38	41,08
	37,90	57,63	38,35	38,05
Reator controle	35,20	54,76	35,59	35,24
	61,72	81,39	62,26	61,99

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 34 - Valores medidos nas análises da sequência de sólidos, segundo ensaio com lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 10 mT.

	Peso do cadinho g	Peso da amostra g	Peso pós estufa g	Peso pós mufla g
Inicial	44,69	63,73	45,84	44,89
	42,81	62,99	43,24	43,16

Reator magnetizado	40,96	60,94	41,42	41,12
	50,12	69,94	50,78	50,43
Reator controle	43,01	62,94	43,60	43,21
	42,81	62,84	43,50	43,10

Fonte: Dados da pesquisa.

As porcentagens de metano e pressão medidas durante o primeiro e segundo ensaio com 10 mT, utilizando lodo bruto como inóculo são apresentados nas Tabelas 35 e 36.

Tabela 35 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, primeiro ensaio lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 10 mT.

Tempo h	Reator controle		Reator magnetizado	
	Pressão m.c.a	% de metano	Pressão m.c.a	% de metano
4	3,2	5,6	4,2	6
6,5	11,2	10,3	16,9	9,3
9	6,9	9,7	4	10,5
11,5	3,6	12,3	3,3	56,7
14	2,7	14,8	3	18
16,5	2,4	17,3	3,2	20,1
19	2,7	19,2	3,5	21,7
21,5	2,7	20	2,5	21,8
26	2,7	21,7	2,4	25,4
29,5	1,7	24,3	1,7	27,5
32	1,4	25,3	1,4	29,1
48	4,5	36,2	4,7	37,9
53,5	2,2	37,1	2	38,5
56	1,1	36,8	1	38,6
72	4,6	46,5	4,8	47,5
95	5	56,4	4,6	53,2
120,5	5,3	57,8	5,2	55,1
144,5	4,9	61,5	4,7	57,4

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 36 - Valores medidos de incremento de pressão e porcentagem de metano, segundo ensaio lodo granular bruto, 144 horas e campo magnético de 10 mT.

Tempo h	Reator controle		Reator magnetizado	
	Pressão m.c.a	% de metano	Pressão m.c.a	% de metano
4	5,9	12,1	6,3	12,4
6,5	8,6	14,3	9,8	13,8

9	3	15,4	3,1	16,5
11,5	2,3	15,5	2,9	16,8
14	2,4	17	2,7	17
16,5	2,1	17,7	2,7	18,5
19	2	17,7	2,8	20,4
21,5	2,1	17,8	2,4	20,4
26	2,8	17,8	2,5	20,7
29,5	2,8	17,9	2,5	20,8
32	2,2	21	2,6	22
48	2,3	23,1	2,3	31
53,5	4,3	32	4,4	35
56	4,7	37	4,8	40
72	6,3	43,4	6,8	46,2
95	6,9	50,4	7,3	52,9
120,5	5	59	5,1	62
144,5	5,1	61	5,1	62,1

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados obtidos em laboratório, leitura da absorbância pelo espectrofotômetro, 490 nm, para o cálculo de conversão de açúcar são apresentados nas Tabelas 36 e 37.

Tabela 37 – Valores medidos de absorbância nas análises de consumo de açúcares para os reatores controle dos ensaios com lodo granular bruto e 144 horas.

Ensaio	Inicial	4 h	6,5 h
1º com 5 mT			
Absorbância 1	0,762	0,157	0,099
Absorbância 2	0,742	0,126	0,069
2º com 5 mT			
Absorbância 1	0,732	0,207	0,079
Absorbância 2	0,768	0,136	0,072
1º com 7,5 mT			
Absorbância 1	0,692	0,222	0,067
Absorbância 2	0,776	0,199	0,073
2º com 7,5 mT			
Absorbância 1	0,761	0,107	0,089
Absorbância 2	0,75	0,156	0,079
1º com 10 mT			
Absorbância 1	0,762	0,167	0,069

Absorbância 2	0,742	0,166	0,073
2° com 10 mT			
Absorbância 1	0,751	0,257	0,088
Absorbância 2	0,712	0,261	0,063

Fonte: Dados da pesquisa.

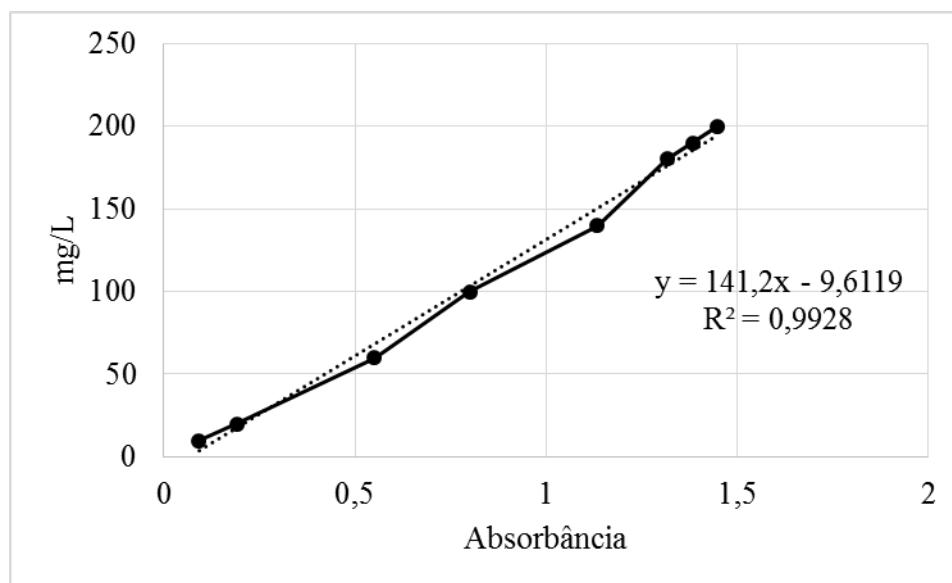
Tabela 38 – Valores medidos de absorbância nas análises de consumo de açúcares para os reatores magnetizados dos ensaios com lodo granular bruto, 144 horas.

Ensaio	4 h	6,5 h
1° com 5 mT		
Absorbância 1	0,187	0,087
Absorbância 2	0,21	0,081
2° com 5 mT		
Absorbância 1	0,187	0,087
Absorbância 2	0,21	0,081
1° com 7,5 mT		
Absorbância 1	0,211	0,086
Absorbância 2	0,189	0,081
Ensaio	4 h	6,5 h
2° com 7,5 mT		
Absorbância 1	0,262	0,098
Absorbância 2	0,242	0,097
1° com 10 mT		
Absorbância 1	0,202	0,098
Absorbância 2	0,212	0,097
2° com 10 mT		
Absorbância 1	0,198	0,078
Absorbância 2	0,189	0,088

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 2 apresenta a curva de consumo de glicose utilizada para os cálculos de conversão de açúcar na presente pesquisa.

Figura 2 – Curva de calibração utilizada para quantificação da concentração de glicose.



Fonte: Dados da pesquisa.