

UNIVERSIDADE TIRADENTES – UNIT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS - PEP

**CONSTRUÇÃO DE UM REATOR *AnSTBR* AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO
PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Autor: Ianny Andrade Cruz

Orientadores: Prof. Luiz Fernando Romanholo Ferreira, D.Sc.

Prof. Renan Tavares Figueiredo, D.Sc.

ARACAJU, SE - BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

CONSTRUÇÃO DE UM REATOR *AnSTBR* AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO
PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Ianny Andrade Cruz

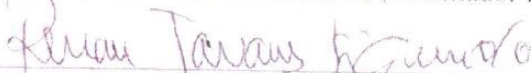
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS DA UNIVERSIDADE TIRADENTES COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS

Aprovada por:

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Luiz Fernando Romanholo Ferreira (Orientador PEP/UNIT)



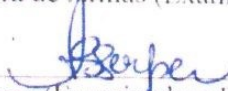
Dr. Renan Tavares Figueiredo (Orientador PEP/UNIT)



Dr.^a Katlin Ivon Barrios Eguiluz (Examinadora Interna PEP/UNIT)



Dr. Rafael Dutra de Armas (Examinador Externo UNERJ)



Dr.^a Fabiane Santos Serpa (Examinadora Externa Pós-Doc./PETROBRAS/TTP)



Ianny Andrade Cruz – Candidato (a)

ARACAJU, SE - BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

C955c Cruz, Ianny Andrade
Construção de um reator AnSTBR automatizado de baixo custo para produção de biogás / Ianny Andrade Cruz; orientação [de] Prof. Dr. Luiz Fernando Romanholo Ferreira, Prof. Dr. Renan Tavares Figueiredo – Aracaju: UNIT, 2019.

83 f. il ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, 2019
Inclui bibliografia.

1. Digestão anaeróbia. 2. Monitoramento online. 3. Arduino 4. Ecotoxicidade
I. Cruz, Ianny Andrade. II. Ferreira, Luiz Fernando Romanholo. (orient.). III. Figueiredo, Renan Tavares. (orient.) IV. Universidade Tiradentes. V. Título.

CDU: 608. 32: 502.131.1

SIB- Sistema Integrado de Bibliotecas

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela vida e por ter me conduzido até aqui.

Ao meu pai, Edilson, e a minha mãe, Josefa Rosany, que muitas vezes se privaram de alegrias pessoais para verem meus sonhos e desejos realizados, pelo amor e apoio constante em todos momentos da minha vida.

A minha irmã, Luane, por toda paciência, ajuda e incentivo nos momentos felizes e tristes, e, por todo amor.

Aos meus avós, em especial a vó Jocelina, por todo estímulo a minha educação e por nunca me deixar desanimar.

A todos familiares, tios, tias, primos e primas que estiveram ao meu lado, me apoiando incondicionalmente.

Aos meus orientadores, Luiz Romanholo e Renan Tavares, pela amizade, confiança, suporte, e principalmente pelas contribuições construtivas na realização deste trabalho.

A Luciano Melo, que embora não formalmente, também desempenhou papel de orientador neste trabalho, obrigada por todos valiosos conhecimentos transmitidos.

A família que fiz no Laboratório de Catálise, Energia e Materiais (LCEM): Larissa, a baiana alto astral que tanto me ensinou; Ariadne, por ser uma pessoa e IC maravilhosa; Gabriel e Matheus, por serem sobrinhos sensacionais, e, João, o agregado mais adorável; sem falar dos doutorandos mais incríveis (Diego, Iraí, Mel). Vocês tornaram o trabalho mais agradável e foram minha base em vários momentos difíceis.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que esse trabalho fosse concluído. Essa vitória é nossa!

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos da Universidade Tiradentes como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos.

CONSTRUÇÃO DE UM REATOR *AnSTBR* AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Ianny Andrade Cruz

A digestão anaeróbia (DA) é uma tecnologia madura que depende do esforço sinérgico de um grupo microbiano diversificado para metabolizar vários substratos orgânicos. No entanto, este grupo microbiano é altamente sensível a perturbações do processo, sendo assim vantajoso usar técnicas de monitoramento online e controle de variáveis para operar o processo DA de maneira eficiente. Portanto, neste estudo foi construído, em laboratório, um sistema para monitorar/controlar algumas variáveis da DA usando a plataforma aberta “Arduino” e seus componentes. Para testar o sistema, a DA do efluente de laticínios foi avaliada em termos de rendimento de biogás e metano, taxa de remoção de sólidos voláteis (SV) e de demanda química de oxigênio (DQO). O experimento em batelada foi conduzido em condições mesofílicas (38°C), com uma razão inóculo/substrato de 1:2, durante 21 dias. A concentração média acumulada de biogás e metano nesta condição foi de 675,2 mL e 21,64% respectivamente, já a taxa de remoção de SV e DQO foi de 45,35% e 80,1%, respectivamente. Um teste de ecotoxicidade também foi realizado, mostrando que altas concentrações do digestato apresentaram toxicidade. Por fim, a construção do sistema de monitoramento e controle da DA mostrou-se viável para a proposta do trabalho, indicando potencial para o uso com outros efluentes agroindustriais.

Palavras-chave: digestão anaeróbia; monitoramento online; Arduino; ecotoxicidade.

Abstract of Dissertation presented to the Process Engineering Graduate Program of Universidade Tiradentes as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CONSTRUCTION OF AN AUTOMATED LOW COST AnSTBR REACTOR FOR BIOGAS PRODUCTION

Ianny Andrade Cruz

Anaerobic digestion (AD) is a mature technology that depends on a diverse microbial group synergistic effort for metabolizing various organic substrates. However, it is highly sensitive to process disturbances, therefore it is advantageous to use online monitoring and process control techniques to operate AD process efficiently. Thus, this study developed a lab made system to monitor/control some AD variables using the open source platform “Arduino” and its components. To test the system, the AD of dairy wastewater was evaluated in terms of biogas and methane yield, volatile solids (VS) removal rate and chemical oxygen demand (COD) removal. The batch experiment was conducted in mesophilic conditions (38°C), with an inoculum/substrate ratio of ½ for 21 days. The average cumulative biogas and methane concentration in this condition was 675.2 mL and 21.64%, respectively, and the VS and COD removal rate was 45.35% and 80.1%, respectively. An ecotoxicity test was also made and showed that high digestate concentrations exhibited toxicity. Finally, the construction of the AD monitoring and controlling system was feasible for the proposed work, indicating its potential use with other agroindustrial effluents.

Keywords: anaerobic digestion; online monitoring; Arduino; ecotoxicity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo Geral:	3
1.1.2. Objetivos específicos:	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Efluentes da Indústria de Produtos Lácteos	4
2.2. Tratamento Biológico	5
2.2.1. Tratamento biológico anaeróbio	7
2.3. Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia	10
2.3.1. pH e alcalinidade	11
2.3.2. Temperatura	11
2.3.3. Nutrientes	12
2.3.4. Toxicidade	13
2.4. Produtos da Digestão Anaeróbia	14
2.4.1. Biogás	14
2.4.2. Lodo de excesso	16
2.5. Biodigestores Anaeróbios	17
2.5.1. Reator anaeróbio de agitação contínua (CSTR)	17
2.5.2. Reator compartimentado (ABR)	18
2.5.3. Reator anaeróbio de fluxo ascendente e de manta de lodo (UASB)	18
2.5.4. Reator anaeróbio em batelada sequencial (ASBR)	19
2.6. Automação do Processo de DA	20
2.6.1. Sensores e atuadores nos sistemas automatizados	21
2.6.2. Software e hardware na aquisição de dados	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	25
3.1. Aparato Experimental	25
3.1.1. Placa Arduino e acessórios	25
3.1.2. Montagem e automação do reator	29
3.1.3. Calibração dos sensores	34
3.1.4. Desenvolvimento do firmware	35
3.2. Procedimento Experimental	36
3.2.1. Coleta e caracterização do efluente	36

3.2.2.	Coleta e caracterização do inóculo	37
3.2.3.	Processo de geração e monitoração do biogás.....	37
3.3.	Materiais	39
3.4.	Parâmetros de Avaliação e Monitoramento	39
3.4.1.	Controle do pH	39
3.4.2.	Controle da temperatura	40
3.4.3.	Determinação de CH ₄	40
3.4.4.	Determinação da demanda química de oxigênio (DQO).....	40
3.4.5.	Sólidos suspensos totais, fixos e voláteis	41
3.4.6.	Análise de toxicidade.....	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1.	Construção do Sistema.....	43
4.2.	Monitoramento das Variáveis do Processo.....	45
4.2.1.	pH	45
4.2.2.	Temperatura.....	46
4.2.3.	Pressão	47
4.2.4.	Taxa de biogás e metano produzido	48
4.3.	Análises Físico-químicas e Ecotoxicológicas do Efluente	49
4.3.1.	Demanda química de oxigênio (DQO).....	49
4.3.2.	Remoção de sólidos voláteis	50
4.3.3.	Toxicidade	51
4.4.	Aspecto Econômico: Custo do Sistema AnSTBR	53
5.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	55
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conversão biológica dos sistemas aeróbios e anaeróbios.....	6
Figura 2: Rotas no metabolismo do complexo orgânico durante a digestão anaeróbia	7
Figura 3: Esquema de reator anaeróbio de agitação contínua.....	17
Figura 4: Esquema do reator anaeróbio compartimentado.....	18
Figura 5: Princípio de funcionamento de um reator UASB.....	19
Figura 6: Esquema do reator anaeróbio sequencial.....	20
Figura 7: Arduino UNO e especificações	25
Figura 8: (a) Nanoshield Load Cell (b) Nanoshield ADC (c) Nanoshield RTCMem (d) Nanoshield MicroSD	26
Figura 9: Sensor de pressão.....	27
Figura 10: Sensor DS18B20.....	27
Figura 11: Sensor de pH e transdutor.....	28
Figura 12: Sensor de metano indicado pela seta	28
Figura 13: (a) Sensor; (b) Sensor de carga na balança.....	29
Figura 14: Esquema do sistema utilizado para o processo de digestão anaeróbia	30
Figura 15: Tampa em nylon do reator.....	30
Figura 16: Equipamento utilizado para análise de biogás, onde: (a) sensor de pressão, (b) bomba de vácuo, (c) solenoide, (d) relés	31
Figura 17: Esquema para determinação de metano.....	32
Figura 18: Conexão dos dispositivos com o Arduino (abaixo dos nanoshields) e Nanoshields	33
Figura 19: Sistema anaeróbio automatizado de baixo custo	33
Figura 20: Janela principal da IDE do Arduino	36
Figura 21: Aparato experimental para determinar volume de gás	38
Figura 22: Fluxograma representativo das funções apresentadas no firmware do sistema	44
Figura 23: Variação de pH do efluente durante o período de digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto	45
Figura 24: Temperatura do efluente durante o período de digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto.....	46
Figura 25: Perfil de pressão do sistema durante a digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto.....	47

Figura 26: Taxa de biogás acumulada e diária durante o período de digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto	48
Figura 27: Concentração de metano produzido obtida pelo sensor NDIR.....	49
Figura 28: Concentração de DQO em relação ao tempo.....	50
Figura 29: Concentração de sólidos voláteis do efluente.....	50
Figura 30: Índice de germinação (a) e de crescimento da raiz (b) do soro de leite bruto. Índice de germinação (c) e de crescimento da raiz (d) da mistura do efluente lácteo inoculado com lodo (inicial) e da mistura do efluente lácteo inoculado com lodo após batelada (final), em diversas concentrações	52
Figura 31: Modelo de regressão linear da curva de calibração para CH ₄	68
Figura 32: Modelo de regressão linear da curva de calibração para sensor de pressão	68
Figura 33: Modelo de regressão linear da curva de calibração para sensor de pH	68
Figura 34: Modelo de regressão linear da curva de calibração do sensor de massa	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físico-químicas de efluente lácteo em diferentes estudos.....	5
Tabela 2: Potencial das biomoléculas orgânicas para produção de biogás	5
Tabela 3: Degradação acetogênica de diferentes substratos.....	9
Tabela 4: Substâncias tóxicas e inibidoras no processo de DA.....	13
Tabela 5: Relação de trabalhos utilizando diferentes substratos para produção de biogás	15
Tabela 6: Concentração de CH ₄ com respectivas correntes elétricas.....	34
Tabela 7: Valores de pressão aplicada e os respectivos valores correspondentes.....	34
Tabela 8: Valores de pH e seus respectivos valores correspondentes em volts	35
Tabela 9: Pesos padronizados e respectivas respostas da célula de carga.....	35
Tabela 10: Caracterização do efluente lácteo	36
Tabela 11: Caracterização do inóculo utilizado	37
Tabela 12: Variáveis fixadas durante cada batelada.....	38
Tabela 13: Custo do sistema automatizado	53
Tabela 14: Custo de biorreator com analisador de gases comercial.....	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC: Conversor analógico digital (*analog digital converter*)

AGCL: Ácidos graxos de cadeia longa

AnSTBR: Reator anaeróbico operado em batelada com tanque agitado (*anaerobic stirred tank batch reactor*)

ASBR: Reator anaeróbico operado em batelada sequencial (*anaerobic sequencing batch reactor*)

ASBBR: Reator anaeróbico operado em batelada sequencial com biomassa imobilizada (*anaerobic sequencing biofilm batch reactor*)

CLP: Controlador lógico programável

COT: Carbono orgânico total

DA: Digestão anaeróbia

DC: Corrente contínua (*direct current*)

DBO: Demanda bioquímica de oxigênio

DESO: Companhia de Saneamento de Sergipe

DQO: Demanda química de oxigênio

ETE: Estação de tratamento de esgoto

FAO: Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*)

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDE: Interface de desenvolvimento integrado (*integrated development environment*)

KB: Kilobyte

KPa: Kilopascal

KW: Kilowatts

mA: Miliampère

mm: Milímetro

mS: Milissegundos

mV: Milivolts

NDIR: Infravermelho não dispersivo (*non-dispersive infraRed*)

PWM: Modulação por largura de pulso (*pulse width modulation*)

rpm: Rotação por minuto

SST: Sólidos suspensos totais

SSV: Sólidos suspensos voláteis

UASB: Reator anaeróbio de fluxo ascendente (*upflow anaerobic sludge blanket*)

V: Volts

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial juntamente com a industrialização do planeta resultou na elevação do volume de resíduos gerados e na necessidade de uma grande demanda energética. No entanto, a quantidade de resíduos gerados atualmente caracteriza uma ameaça para a estabilidade da economia global e de ecossistemas (Iacovidou *et al.*, 2017), ao passo que o uso dos combustíveis fósseis é uma das principais causas das mudanças climáticas do planeta (Wang *et al.*, 2016).

Neste contexto, com a consciência ecológica do mundo devido ao aquecimento global, tanto a gestão de resíduos quanto o consumo de energia tem sido um desafio (Kayakutlu *et al.*, 2017). Em meio a essa problemática, técnicas de tratamento de efluentes e geração de energias renováveis vem sendo estudadas amplamente (Choong *et al.*, 2017; Nizami *et al.*, 2016; Zaman, 2016).

Isto posto, as indústrias de laticínios, que são de grande importância para a nutrição humana, apresentam um obstáculo ambiental devido aos seus processos produtivos, os quais geram grandes quantidades de efluentes ricos em matéria orgânica (Qasim e Mane, 2013). Estes efluentes possuem um alto potencial para causar problemas ecológicos se não tratados adequadamente antes de serem descartados (Garcha *et al.*, 2016; Karadag *et al.*, 2015).

Sabendo que os compostos orgânicos podem ser degradados por processos biológicos, o tratamento anaeróbio pode ser um dos processos biológicos mais indicados para casos em que o resíduo a ser tratado possua altas cargas orgânicas (Chernicharo, 2007), uma vez que a digestão anaeróbia além de melhorar o problema da gestão de resíduos, também produz energia renovável sob a forma de biogás e fertilizantes (Deng *et al.*, 2017; Grando *et al.*, 2017; Karadag *et al.*, 2015).

Entretanto, já existem diversos estudos sobre o processo de digestão anaeróbia como o apresentado por Valladão *et al.* (2011) que realizaram um pré-tratamento enzimático para aumentar a produção de metano durante a digestão do efluente de abatedouros avícolas. Santana *et al.* (2016) compararam a eficiência do reator anaeróbio operado em batelada sequencial

(ASBR) com a do reator anaeróbio operado em batelada sequencial com biomassa imobilizada (ASBBR) no tratamento de resíduos lácteos, enquanto Zhang *et al.* (2018) estudaram o tratamento anaeróbio de resíduos domésticos em temperaturas de 10-20°C (faixa psicrófila). Porém, são poucas as produções científicas voltadas para a instrumentação e automação de biorreatores anaeróbios que vão operar com geração de biogás, buscando a otimização do processo.

Nessa linha de pesquisa, Sahu *et al.* (2017) desenvolveram um sistema automatizado para operar em biorreatores, porém voltado apenas para melhorar a eficiência da segurança em plantas de biogás. Yu *et al.* (2015) realizaram o monitoramento e controle do volume de biogás produzido e do pH, utilizando um controlador lógico programável (CLP). Já Ahmed *et al.* (2017) desenvolveram um sistema eletrônico utilizando a plataforma Arduino para quantificar apenas a produção de metano, diferentemente desta pesquisa que também analisará outras variáveis (pH, temperatura, produção de biogás) além da concentração de CH₄.

Dessa forma, o presente trabalho desenvolve um sistema automatizado de baixo custo, o qual permitirá o monitoramento e controle de algumas variáveis essenciais ao processo de digestão anaeróbia. Este sistema permitirá a otimização do processo, promovendo maior eficiência na geração do gás metano a partir de biomassa residuária da indústria de laticínio.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo Geral:*

Construir um sistema anaeróbio automatizado que monitore e controle variáveis importantes para a geração de biogás a partir do efluente proveniente da indústria de laticínios.

1.1.2. *Objetivos específicos:*

- Projetar e construir um sistema de digestão anaeróbia de bancada, operando com um AnSTBR (*Anaerobic Stirred Tank Batch Reactor*);
- Construir um *firmware* em linguagem C e *hardware* em plataforma Arduino para automatizar o aparato instrumental;
- Coletar e realizar a caracterização físico-química do efluente proveniente de uma indústria de laticínios e do lodo de esgoto filtrado proveniente da estação de tratamento de uma empresa de saneamento (DESO);
- Realizar a digestão anaeróbia do resíduo lácteo no reator automatizado;
- Controlar e registrar a temperatura, a agitação e o pH do substrato inoculado no reator;
- Monitorar os parâmetros do processo (demanda química de oxigênio, sólidos voláteis);
- Avaliar a geração de metano através de um sensor non-dispersive infrared (NDIR);
- Validar o sistema construído através de comparações com metodologias já aceitas;
- Avaliar a toxicidade do efluente lácteo e do digestato.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Efluentes da Indústria de Produtos Lácteos

A indústria de laticínios é de grande relevância devido a sua contribuição essencial para nutrição humana e devido as grandes oportunidades econômicas que a mesma oferece (Kothari *et al.*, 2016). De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação) o mundo produziu aproximadamente 828,5 milhões de toneladas de leite em 2018. Já no Brasil, segundo o IBGE, foram adquiridos cerca de 6,26 bilhões de litros de leite cru no trimestre de 2018.

Todo este leite produzido pode ser transformado em leite em pó, iogurte, queijo, manteiga, sorvete e vários outros tipos de derivados através de processos fabris nas indústrias de laticínios (Karadag *et al.*, 2015). No entanto, durante todas as etapas de produção são gerados águas residuais, as quais são compostas principalmente por diferentes níveis de diluições de leite ou dos produtos derivados, e água de lavagem contendo produtos químicos, alcalinos e ácidos, depois da limpeza dos tanques, garrafas e equipamentos (Carvalho *et al.*, 2013). Sendo que para cada litro de leite processado é gerado aproximadamente de 0,2 – 10,0L de resíduos, resultando em uma grande quantidade de efluente (Qasim e Mane, 2013).

Estes efluentes normalmente apresentam altas concentrações de material orgânico como lipídios, carboidratos e proteínas, altos valores de demanda química de oxigênio (DQO) e de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), assim como altas concentrações de sólidos suspensos (Zinadini *et al.*, 2015). Porém, estas características são afetadas por diversos parâmetros como escala de produção, tipos de processamento, eficiência e simplicidade de métodos usados na limpeza de equipamentos e tipos de água utilizados (Karadag *et al.*, 2015), o que resulta em valores bem diferentes para as características físico-químicas do efluente, como pode ser visto na Tabela 1 que apresenta valores de análises físico-químicas, encontrados na literatura, para efluentes lácteos.

Tabela 1: Características físico-químicas de efluente lácteo em diferentes estudos, comprovando que os parâmetros de produção afetam o efluente final

Resíduo	pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Sólidos Totais (mg/L)	Nitrogênio (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Referência
Lácteo	7,1	5000	2800	3880	16,5 (NKT)	38,6	(Rajesh Banu <i>et al.</i> , 2008)
	6,58	1586	11000	12254	69,32	13,12	(Amini <i>et al.</i> , 2013)
	7,1	89,60	442	797	120,1 (NKT)	-	(Qasim e Mane, 2013)
	5,5	2131	1535	-	233 (NKT)	60,2	(Zinadini <i>et al.</i> , 2015)
	5,16	1792	820	1040	28 (NKT)	0,5	(Kumar <i>et al.</i> , 2015)
	8,2	3000	-	-	26,3	172	(Jürgensen <i>et al.</i> , 2017)

NKT: Nitrogênio Kjhedahl Total

Em geral, os efluentes lácteos são tidos como de difícil degradação, especialmente devido à presença de gorduras emulsionadas em sua composição (Cichello *et al.*, 2012). No entanto, é importante ressaltar que os lipídios são substratos potenciais para a produção de biogás, conforme mostra Tabela 2 (Alqaralleh *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2009).

Tabela 2: Potencial das biomoléculas orgânicas para produção de biogás

Componentes	Lipídios	Proteínas	Carboidratos
Produção de biogás (L/g)	1,425	0,830	0,921
CH₄ (%)	69,5	50,0	68,8

Fonte: Adaptado de Alves *et al.*, 2009

Por conseguinte, é necessário a valorização deste efluente visando o potencial energético, devido ao fato deste possuir alto teor de óleos e gorduras, tornando a aplicação da digestão anaeróbia uma ótima alternativa para produção de energia (Rasit *et al.*, 2015).

2.2. Tratamento Biológico

Os tratamentos biológicos são os mais adequados para tratar efluentes com altas concentrações de matéria orgânica, e, podem ser aeróbios ou anaeróbios. Os primeiros são tradicionalmente utilizados, porém para eficiência do processo os microrganismos necessitam

de oxigênio, sendo este o principal responsável pelo custo operacional do processo (Vidal *et al.*, 2016). No entanto, atualmente, os processos anaeróbios estão sendo largamente utilizados, já que possuem algumas vantagens sobre o processo aeróbio, como a redução da quantidade de lodo e a geração de biogás (Alexandre *et al.*, 2011; Pilli *et al.*, 2015), apesar deste também apresentar algumas desvantagens, como suscetibilidade dos microrganismos a inibição por muitos compostos, início demorado devido à ausência de um lodo adaptado e possível geração de odores ruins (Sperling e Chernicharo, 2005).

Na Figura 1 pode ser observado um esquema de comparação entre os tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios. No processo aeróbio, ocorre apenas cerca de 40 a 50% de conversão da matéria orgânica a gás carbônico (CO₂), enquanto que de 50 a 60% é convertido em biomassa, o chamado lodo de excesso, e, por fim, o restante da matéria orgânica, que corresponde de 5 a 10%, é descartada como material não degradado (Chernicharo, 2007). Já no processo anaeróbio, percebe-se que a maior parte da matéria orgânica (de 70 a 90%) é convertida a biogás, uma pequena porção desta, 5 a 15%, é convertida em biomassa, que é o lodo excedente do sistema, e, cerca de 10 a 30%, a parte não consumida pelos microrganismos, é descartada (Chernicharo, 2007).

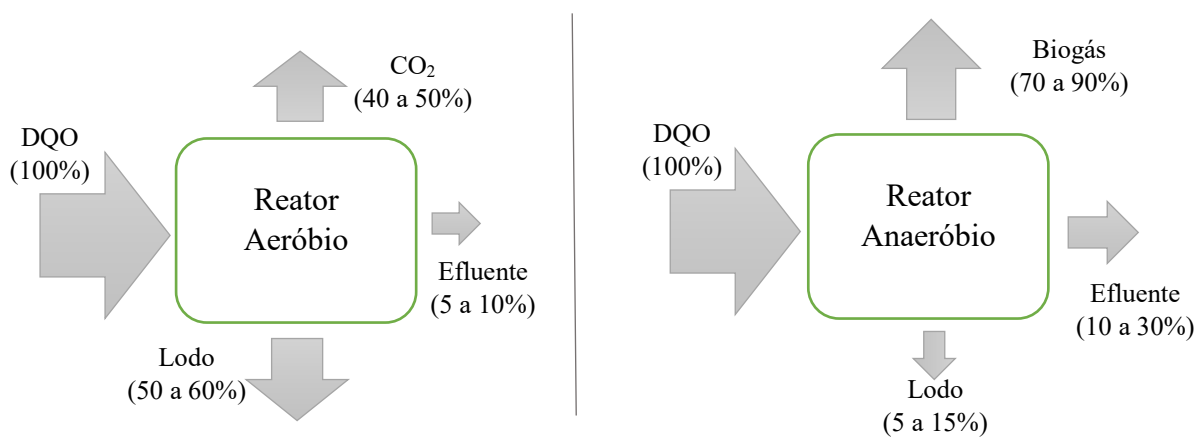


Figura 1: Conversão biológica dos sistemas aeróbios e anaeróbios

Fonte: Adaptado de Chernicharo, 2007

Devido as características apresentadas, o tratamento biológico anaeróbio foi selecionado por ser o mais adequado para a realização deste trabalho, e, portanto, será mais explorado no tópico seguinte.

2.2.1. Tratamento biológico anaeróbio

A digestão anaeróbia (DA) é um complexo processo biológico, que inclui muitas reações químicas e biológicas na ausência de oxigênio, no qual a maior parte da matéria orgânica (carboidratos, lipídios e proteínas), com exceção da lignina, é degradada em subprodutos, sendo os principais, metano e dióxido de carbono (Jankowska *et al.*, 2015; Leung e Wang, 2016). Este processo representa um sistema ecológico balanceado, onde cada microrganismo possui determinada função, sendo normalmente dividido em quatro etapas (Figura 2).

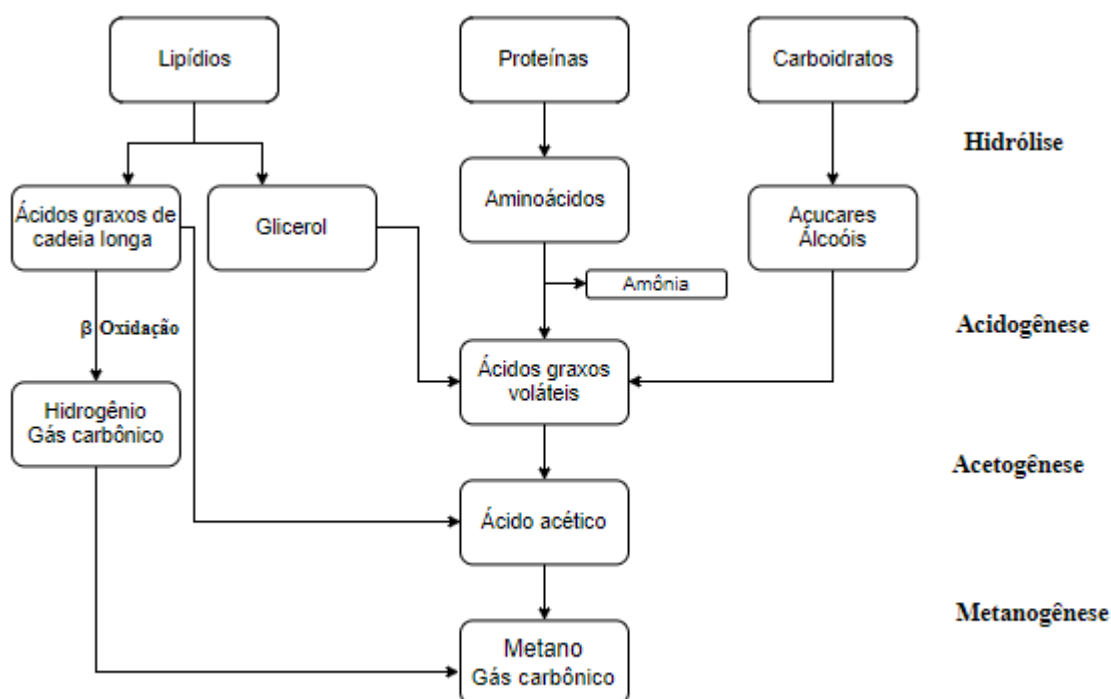


Figura 2: Rotas no metabolismo do complexo orgânico durante a digestão anaeróbia

Na primeira etapa, a hidrólise, as macromoléculas orgânicas insolúveis (polímeros, por exemplo) são transformadas em compostos orgânicos com estrutura química mais simples pela ação de exoenzimas, como as hidrolases (Leung e Wang, 2016). Segundo Guo e Xu (2011), as hidrolases juntamente com as enzimas amilase, lipase e protease são produzidas por diversos microrganismos encontrados no meio reacional, e, são também os primeiros agentes ativos na defloculação, oxidação do floco do lodo e quebra de moléculas mais complexas.

Cada enzima produzida é responsável por hidrolisar determinado composto. Assim, celulasas, proteases e lipases resultam na hidrólise de carboidratos, proteínas e lipídios,

respectivamente, em açúcares, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa (Berg *et al.*, 2002; Mani *et al.*, 2016).

Diversos estudos propõem que, normalmente, a hidrólise é a etapa limitante da DA (Luo *et al.*, 2012; Pilli *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2009), ou seja, a cinética que representa esta etapa possui a reação mais lenta dentre todas reações bioquímicas interligadas no processo anaeróbio. Sendo assim, a cinética de primeira ordem (Equação 1) é o modelo mais comum para simular a degradação de material orgânico no processo.

$$\frac{dS}{dt} = -kS \quad \text{Eq. 1}$$

Onde k é o coeficiente de primeira ordem, t é o tempo e S é a concentração de sólidos voláteis (SV). Uma ampla gama de valores do coeficiente, de primeira ordem, para materiais orgânicos pode ser encontrada na literatura, a depender das condições experimentais, das proporções de biomassa hidrolítica e do efeito de desintegração (Vavilin *et al.*, 2008).

A acidogênese, também conhecida como fermentação acidogênica, ocorre logo após a hidrólise e é a etapa mais rápida durante a DA de um material orgânico complexo (Kumar *et al.*, 2013; Mani *et al.*, 2016). Nela, os produtos solúveis formados na fase hidrolítica ou lançados no digestor são metabolizados e degradados em substâncias mais simples por bactérias fermentativas. A maioria das bactérias responsáveis por realizar essa fermentação acidogênica é anaeróbia obrigatória, como *Bacteriocides*, *Clostridia* e *Bifidobacteria*, porém, algumas espécies são facultativas, como *Streptococci* e *Enterobacteriaceae*. Estas últimas podem metabolizar material orgânico por via oxidativa, evitando que o oxigênio dissolvido, eventualmente presente, se torne tóxico para as bactérias metanogênicas.

São resultados desta etapa os ácidos graxos de cadeia curta (ácido acético, acetato, ácido butírico, ácido propiônico, por exemplo), álcoois, amônia, hidrogênio e dióxido de carbono (Leng *et al.*, 2017). Sendo que, dentre estes produtos, o hidrogênio, o dióxido de carbono e o ácido acético são diretamente metabolizados no último estágio por bactérias metanogênicas (Zeb *et al.*, 2013).

Na acetogênese, terceira etapa, microrganismos acetogênicos oxidam alguns substratos, formados na hidrólise e acidogênese, os quais não são metabolizados diretamente pelos microrganismos metanogênicos (Monson *et al.*, 2007). É nessa etapa que os ácidos orgânicos, por exemplo, como é visto na Tabela 3, são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de

carbono, os quais se tornarão substratos para produção de metano na etapa seguinte (Mani *et al.*, 2016).

Tabela 3: Degradação acetogênica de diferentes substratos

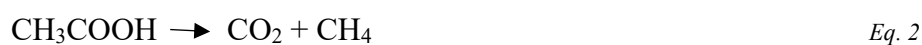
Substrato	Reação
Ácido Propiônico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
Ácido Butírico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Ácido Valérico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH} + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2 + \text{H}^+$
Ácido Isovalérico	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2 + \text{H}^+$
Ácido Capriônico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 5\text{H}_2$
Dióxido de Carbono	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$
Ácido Láctico	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$

Fonte: Deublein e Steinhauser, 2008

Segundo Leite (2015), a homoacetogênese e a acetogênese sintrófica são as rotas metabólicas utilizadas pelos microrganismos acetogênicos para a produção do ácido acético. Na homoacetogênese, há a redução de dióxido de carbono para ácido acético, utilizando hidrogênio como doador de elétrons (homoacetogênese redutora), assim como também pode acontecer a oxidação do acetato com produção de hidrogênio e dióxido de carbono (homoacetogênese oxidativa). Já na acetogênese sintrófica ocorre a oxidação de ácidos orgânicos voláteis a ácido acético e hidrogênio, por ação de bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio (Venkiteshwaran *et al.*, 2015). Dentre a grande diversidade de bactérias acetogênicas, incluem-se bactérias do gênero *Acetobacterium*, *Clostridium*, *Peptococcus anaerobus*, *Lactobacillus*, *Actinomyces* e *Sporomusa* (Gerardi, 2003; Molino *et al.*, 2013).

Por fim, a quarta e última etapa, é chamada de metanogênese. Nesta, metano e gás carbônico são produzidos por bactérias metanogênicas, as quais podem ser acetotróficas, hidrogenotróficas ou metilotróficas (Leung e Wang, 2016; Nunes, 2012).

As bactérias acetotróficas (gêneros *Methanosarcina* e *Methanothrix*) produzem metano e dióxido de carbono a partir da redução do ácido acético (Equação 2). Sendo estas responsáveis por cerca de 70% da produção do metano, e ainda, por limitar a velocidade de transformação de material orgânico complexo (Leung e Wang, 2016; Mani *et al.*, 2016 e Nunes, 2012).

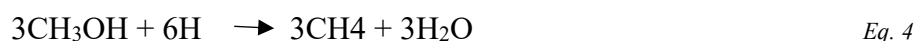


As bactérias hidrogenotróficas usam o hidrogênio para converter o dióxido de carbono em metano (Equação 3). Assim, com esta reação, os microrganismos ajudam a diminuir a

pressão parcial do hidrogênio na DA, o que também é importante para as bactérias acetogênicas (Leung e Wang, 2016; Mani *et al.*, 2016).



As bactérias metilotróficas não são tão comuns quanto as acetotróficas e hidrogenotróficas, elas crescem em substratos que possuam o radical metila (CH₃-), como por exemplo, metanol (CH₃OH) e metil aminas [(CH₃)₃N]. Assim, este grupo de bactérias metanogênicas produz metano diretamente de radicais metila e não do CO₂, conforme Equação 4 (Gerardi, 2003; Leung e Wang, 2016).



Além dos processos fermentativos que conduzem à produção do biogás, descritos previamente, outros processos também podem se desenvolver no reator anaeróbio. O sulfato ou outros compostos que contenham enxofre, por exemplo, são reduzidos a sulfetos, por bactérias sulfo-redutoras (*Desulfovibrio Desulfuromonas, Desulfobullus Desulfobacter, Desulfococcuse Desulfosarcina*), as quais utilizam a matéria orgânica como doador de elétron e o íon sulfato como receptor final dos elétrons (Nunes, 2012).

Como visto, a cooperação da população da microbiota anaeróbia provoca a síntese de certos produtos que são posteriormente consumidos por outro grupo de bactérias. Daí, por exemplo, as arqueobactérias possuem uma relação sinérgica com os outros grupos bacterianos, e, a produção e o consumo dos produtos favorecem a atividade de todos os grupos envolvidos. Portanto, para um processo estável e efetiva conversão de matéria orgânica em biogás é necessário que todas espécies vivam juntas em equilíbrio (Yang *et al.*, 2016).

2.3. Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia

Para que a digestão anaeróbia apresente boa eficiência, é necessário observar a relação entre os microrganismos participantes do processo juntamente com as condições ambientais necessárias ao seu desenvolvimento. Os principais parâmetros que devem ser controlados para o desenvolvimento da digestão anaeróbia são o pH, a temperatura, a presença de nutrientes e ausência de materiais tóxicos.

2.3.1. pH e alcalinidade

O pH é uma variável que afeta significativamente a taxa de crescimento dos microrganismos (Mao *et al.*, 2015). Durante a DA, os valores de pH variam para cada etapa, ou seja, os valores de pH para a acidogênese diferem daqueles para a metanogênese (Kothari *et al.*, 2014). Assim, a depender dos microrganismos presentes no processo, existirá uma faixa ótima de pH.

Na DA por exemplo, as bactérias acidogênicas possuem uma faixa ótima de pH entre 5,5 e 6,5, enquanto que as bactérias formadoras de metano tem a taxa de crescimento significativamente reduzida em um pH abaixo de 6,6 (Mao *et al.*, 2015). Portanto, é necessário que o acúmulo excessivo de ácido seja evitado durante o processo, sendo a adição de cal ou do filtrado reciclado uma forma de evitar a redução do pH no processo (Kothari *et al.*, 2014).

Durante o tratamento anaeróbio, o pH inicialmente é baixo devido a produção dos ácidos orgânicos voláteis. No entanto, as bactérias metanogênicas consomem estes ácidos, produzindo alcalinidade, e, elevando o pH até estabiliza-lo. Assim, a alcalinidade serve como uma solução tampão, a qual é necessária para manter o pH estável e a atividade biológica ótima (Lee *et al.*, 2009).

As preocupações inerentes ao pH são principalmente para assegurar o êxito e o controle do processo anaeróbio. Já que quando as bactérias acidogênicas produzem mais ácido que as metanogênicas podem consumir, o processo entra em desequilíbrio, já que, o pH cai e há um aumento na produção de CO₂ (Deublein e Steinhauser, 2008).

2.3.2. Temperatura

A temperatura é um dos fatores físicos mais importantes para o crescimento das espécies microbianas, uma vez que microrganismos não são capazes de controlar suas temperaturas internas, assim sendo, a temperatura do interior das células é determinada pela temperatura do ambiente externo (Chernicharo, 2007).

Na DA, os microrganismos são classificados em faixas com base na temperatura ótima e no intervalo no qual suas espécies crescem e metabolizam. Sendo três faixas de temperatura associadas a atividade microbiana e formação de metano: a psicrófila, a mesofílica e a termofílica. (Leite *et al.*, 2017).

O tratamento anaeróbio torna-se cada vez mais difícil a temperaturas abaixo de 20°C (faixa psicrófila), devido a mudanças físico químicas da natureza do lodo e dos resíduos, assim como do retardamento das reações bioquímicas (Bowen *et al.*, 2014). Já na faixa termófila (55 – 70°C), há vantagens como mais rápidas velocidades de reação, suporte de taxas mais altas de capacidade e conseqüentemente maior produtividade, no entanto, também existem algumas desvantagens como menor estabilidade, mais baixa qualidade do efluente, maior toxicidade e suscetibilidade a condições ambientais, maior investimento e maior consumo de energia (Mao *et al.*, 2015). Por fim, digestores mesófilos (20 – 45°C) são mais comuns, principalmente em regiões tropicais, e, apesar da menor produção de metano, apresentam melhor estabilidade no processo e maior abundância de bactérias (Kothari *et al.*, 2014; Leite *et al.*, 2017; Mao *et al.*, 2015).

Vale ressaltar a importância de manter a temperatura uniforme durante o processo, uma vez que a DA é muito sensível a mudanças abruptas de temperatura o que causaria um desequilíbrio entre a população microbiana, e, conseqüentemente, a falha do processo. Além disso, a manutenção da temperatura é necessária para manter uma taxa máxima de produção de gás (Kothari *et al.*, 2014).

2.3.3. Nutrientes

Para um processo de DA eficiente é fundamental que nutrientes para o crescimento dos microrganismos sejam fornecidos em quantidades suficientes. Se a concentração ideal destes nutrientes não for disponibilizada, ou os insere em pequenas quantidades no sistema, ou permite-se que a eficiência do processo seja reduzida (Chernicharo, 2007).

Dentre os principais nutrientes necessários para biossíntese de novas células estão o carbono, o nitrogênio, o fósforo e o enxofre. Porém, apesar destes macronutrientes, alguns micronutrientes, como por exemplo: o ferro, níquel, selênio e zinco, também conhecidos como elementos traços, são essenciais para o crescimento dos microrganismos, assim como para o suporte de atividades enzimáticas e reações químicas durante a DA (Mao *et al.*, 2015).

Segundo Moukazis *et al.* (2017), proporções de C:N não apropriadas resultam na queda de produção de metano. Já que valores altos de C:N levam à carência de fontes de nitrogênio, enquanto valores baixos de C:N induzem o acúmulo de nitrogênio como amônia livre, resultando em efeitos tóxicos para o crescimento de bactérias metanogênicas.

Portanto, a taxa de nutrientes necessária normalmente é de C:N:P:S igual a 600:15:5:1, enquanto que a taxa ótima para produção de metano é de C:N:P igual a 200:5:1 (Alshehi *et al.*, 2018; Mao *et al.*, 2015; Weiland, 2010). Proporções ótimas de C:N:P, na presença de elementos traços, podem ser mantidas com a co-digestão de diferentes resíduos orgânicos. Para isso, pode-se misturar resíduos com altas taxas de nitrogênio e fósforo, como por exemplo, restos de comida, lodo de esgoto ou esterco animal, com insumos com alto teor de carbono, promovendo então, uma mistura balanceada para a digestão (Monson *et al.*, 2007).

2.3.4. Toxicidade

A degradação adequada de resíduos orgânicos, por qualquer processo biológico, depende de um ambiente adequado para os microrganismos, e para isso, necessita-se controlar ou eliminar substâncias tóxicas deste meio (Sperling e Chernicharo, 2005). E, por mais que exista uma variedade de resíduos orgânicos e inorgânicos que podem ser tóxicos ou inibidores durante a DA, vale ressaltar que qualquer composto em altas concentrações pode ser prejudicial, conforme mostra a Tabela 4.

Vários elementos como metais leves (Na, K, Mg, Ca) e pesados (Cr, Co, Cu, Zn) são requeridos pelas bactérias anaeróbias não só para a síntese de enzimas, como também para manter suas atividades. Porém, quando suas concentrações forem altas, estes podem inibir a DA devido ao rompimento da estrutura enzimática, e, ao contrário de outras substâncias, os metais pesados não são biodegradáveis (Zhang *et al.*, 2014).

Tabela 4: Substâncias tóxicas e inibidoras no processo de DA

Substância	Concentração moderadamente inibitória, mg/L	Concentração altamente inibitória, mg/L
Na⁺	3500 – 5500	8000
K⁻	2500 – 4500	12000
Ca²⁻	2500 – 4500	8000
Mg²⁻	1000 – 1500	3000
NH₄⁺	1500 – 3000	3000
S²⁻	200	200

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003

Dentre os compostos tóxicos presentes em um digestor, a amônia (NH_3) e o íon amônia (NH_4^+) são os inibidores mais significantes (Yenigün e Demirel, 2013). Apesar de ser um nutriente necessário para o crescimento bacteriano, concentrações elevadas de amônia podem ser alcançadas durante a quebra de proteínas disponíveis no substrato, o que pode levar à falha do processo de digestão (Yenigün e Demirel, 2013; Zhang *et al.*, 2014).

Sérios problemas em uma planta de biogás também podem ocorrer devido a altas concentrações de ácidos graxos de cadeia longa (AGCL), os quais são provenientes da degradação de lipídios durante a hidrólise (Valladão *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014). A inibição devido aos AGCL ocorre devido a sua adsorção pela membrana bacteriana, impedindo assim o transporte do substrato por esta camada resultando na morte da célula (Valladão *et al.*, 2011)

O desaparecimento de hidrogênio e metano, ou o aumento do pH e dos ácidos voláteis podem ser indicadores da presença destes compostos tóxicos no processo (Gerardi, 2003).

2.4. Produtos da Digestão Anaeróbia

2.4.1. Biogás

O uso contínuo de combustíveis fósseis e o efeito dos gases estufa no ambiente iniciaram esforços em pesquisas para a produção de combustível a partir de recursos biológicos. Neste contexto, o biogás produzido a partir de resíduos e dejetos desempenha um papel fundamental para a energia do futuro (Achinas *et al.*, 2017).

O biogás é uma mistura formada principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), contendo tipicamente 50 – 70% de CH_4 , 30 – 50% de CO_2 , <1% de N_2 e 10 – 2000 ppm H_2S (Lovato *et al.*, 2017). Sendo que este pode ser utilizado para vários propósitos, como substituir os combustíveis convencionais na produção de energia elétrica e de calor, ou mesmo ser utilizado como combustível gasoso em aplicações automotivas (Achinas *et al.*, 2017; Lovato *et al.*, 2017).

Dito isto, vale ressaltar que a composição deste biogás produto da digestão anaeróbia ainda depende das características da matéria orgânica utilizada no processo (Cruz-Salomón *et al.*, 2017). Assim, devido a atenção que a DA tem recebido nos últimos anos, vários resíduos já foram empregados para a produção de biogás, conforme pode ser visto na Tabela 5, sendo que

a depender do substrato e reator utilizado pode ter sido evidenciada, ou não, uma maior produção de biogás.

Tabela 5: Relação de trabalhos utilizando diferentes substratos para produção de biogás

Referência	Substratos	Reator	Comentários
Lansing <i>et al.</i> , 2010	Esterco suíno + óleo de cozinha utilizado	250 L – digestor (escala de campo)	Produção total de biogás de 67,3 L/dia, sendo produção máxima de CH ₄ (45 L/dia)
Li <i>et al.</i> , 2015	Óleos e graxas de resíduos orgânicos + lodo municipal	15 L – reator de dois estágios	Um pré tratamento termo químico melhorou a produção de biogás de 18,73 L/dia para 25,14 L/dia
Maragkaki <i>et al.</i> , 2017	Lodo de esgoto + resíduos de comida + Soro de queijo + resíduos de azeitonas	Reatores CSTR em série – 3 reatores de 4 L e 1 reator de 2 L	Produção de biogás de 1,172±216 L/dia, sendo 0,815 mL/dia de CH ₄
Cruz-Salomón <i>et al.</i> , 2017	Vinhaça	4 L – reator UASB modificado	O reator modificado aumentou a produção de CH ₄ para 2,14 L/dia
Jürgensen <i>et al.</i> , 2017	Efluente de laticínios	Reatores em série - 1m ³ CSTR e 0,2 m ³ ABR	Produção de 122 L/dia de biogás
Kumari <i>et al.</i> , 2018	Resíduos de jardim + lodo de esgoto	1 L - reator UASB	Produção máxima de 4,5 L/dia de biogás
Kumari <i>et al.</i> , 2018	Efluente de laticínios + estrume de vaca	1 L - reator UASB	Produção de 3,106 L de biogás ao final de 20 dias

Ao contrário de outras formas de energias renováveis, o biogás não possui limitações geográficas, nem precisa de tecnologias complexas para sua produção, tornando assim a geração de energia elétrica a partir do biogás ainda mais importante (Santos *et al.*, 2016).

No entanto, no Brasil, em janeiro de 2018, existiam apenas 35 usinas de biogás, que produziam um total de 1081 KW de energia, equivalendo a 0,9% da capacidade de biomassa nacional (ANEEL, 2018). Assim, apesar de possuir grande potencial para a produção de energia

através do biogás, este ainda é limitado pelo baixo número de usinas no Brasil, enquanto que vários outros países como China, Índia, Nepal, Tailândia, Alemanha, Estados Unidos e Dinamarca já possuem longa experiência com projetos deste tipo (Salomon e Silva Lora, 2009; Santos *et al.*, 2016). Sendo que em todos estes casos de sucesso, existe o apoio institucional, financeiro, educacional e tecnológico por diversas organizações (Salomon e Silva Lora, 2009).

2.4.2. Lodo de excesso

Além do biogás, outro produto da digestão anaeróbia é o lodo de excesso (LDE). Este é composto de biomassa microbiana, matéria orgânica parcialmente degradada e compostos inorgânicos, podendo assim ser utilizado como fertilizante na agricultura (Albuquerque *et al.*, 2012; Owamah *et al.*, 2014; Stefaniuk *et al.*, 2016).

O fato de poder utilizar o LDE como biofertilizante para solos é uma opção atrativa em termos de redução de problemas ambientais, uma vez que isto permite a recuperação de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e, também limita a perda de matéria orgânica sofrida pelos solos devido à agricultura (Pivato *et al.*, 2016). Além do fato que este lodo apresenta mais nutrientes disponíveis, e, por ser o produto da DA é mais barato que outros fertilizantes minerais (Garfi *et al.*, 2011; Owamah *et al.*, 2014).

As características do lodo ainda dependem da composição da matéria prima original, da alimentação e das condições de operação do processo de digestão (Garfi *et al.*, 2011). Assim, a depender do afluente utilizado na DA por exemplo, o LDE pode conter concentrações elevadas de elementos potencialmente tóxicos, como metais pesados, sais ou bactérias patogênicas, o que acabaria afetando a biota dos solos (Gryta *et al.*, 2014; Pivato *et al.*, 2016).

Por isso, análises de ecotoxicologia do lodo antes de sua exploração na agricultura devem ser feitas para prever o impacto deste no meio ambiente. Estas análises consistem em uma bateria de bioensaios com organismos que representam diferentes posições na cadeia alimentar a fim de obter resultados que representem de forma realística o impacto ambiental (Tigini *et al.*, 2016). No entanto, poucos estudos realizaram estes bioensaios, como foi o caso de Chen *et al.*, (2014) e Tigini *et al.*, (2016) que avaliaram o lodo produzido da DA do estrume de porco, e perceberam que o mesmo ainda precisaria de um tratamento antes de ser utilizado nos solos, uma vez que este apresentava altos valores de amônia, salinidade, DQO e fosfato.

2.5. Biodigestores Anaeróbios

Dentre os digestores anaeróbios, os de alta taxa (reatores de filme fixo, de cama fluidizada, compartimentado, digestores de tanque de agitação contínua) são os mais utilizados na DA, uma vez que promovem melhor contato entre o afluente e os microrganismos, permitindo assim maior remoção de matéria orgânica em menor tempo de retenção, assim como melhor estabilização do lodo e maior capacidade de carga (Chong *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2011). Alguns destes biodigestores serão apresentados nos seguintes subtópicos.

2.5.1. Reator anaeróbio de agitação contínua (CSTR)

O digestor de agitação contínua ou *continuous-stirred tank reactor* (CSTR) é conhecido por sua confiabilidade e é amplamente utilizado para tratar resíduos com altas concentrações de sólidos suspensos, especialmente esterco animal e resíduos orgânicos industriais (Mao *et al.*, 2015). Neste sistema, o conteúdo do reator é mantido em condições de completa mistura através de agitação contínua ou intermitente, o que permite um bom contato entre o substrato e o lodo, mas consome uma considerável energia (Mao *et al.*, 2015). Este apresenta um tempo de retenção hidráulica (TRH) igual ao tempo de retenção sólida (TRS) que varia de 20 a 50 dias. Adicionalmente, a mistura constante permite a rápida diluição dos componentes recebidos (Khanal *et al.*, 2017). A Figura 3 apresenta o esquema deste tipo de reator.

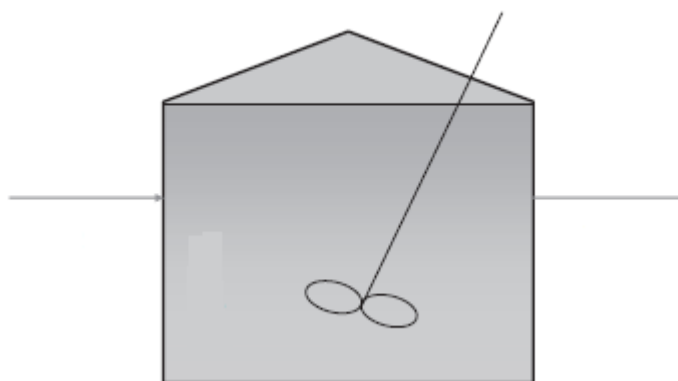


Figura 3: Esquema de reator anaeróbio de agitação contínua

Fonte: Adaptado de Khanal *et al.* (2017)

2.5.2. Reator compartimentado (ABR)

O reator compartimentado ou *anaerobic baffled reactor* (ABR) consiste em uma série de defletores que dividem o tanque em diversos compartimentos, de uma forma que o resíduo é forçado a escoar por cima e por baixo dos defletores, como mostra a Figura 4. Neste sistema, a biomassa microbiana se acumula por entre os defletores formando grânulos com o tempo; sendo que estes defletores também evitam curto circuitos e permitem uma alta concentração de micróbios no reator (Khanal *et al.*, 2017). Este tipo de biorreator também permite achar uma boa remoção de DQO e sólidos e uma baixa produção de lama (Mao *et al.*, 2015).

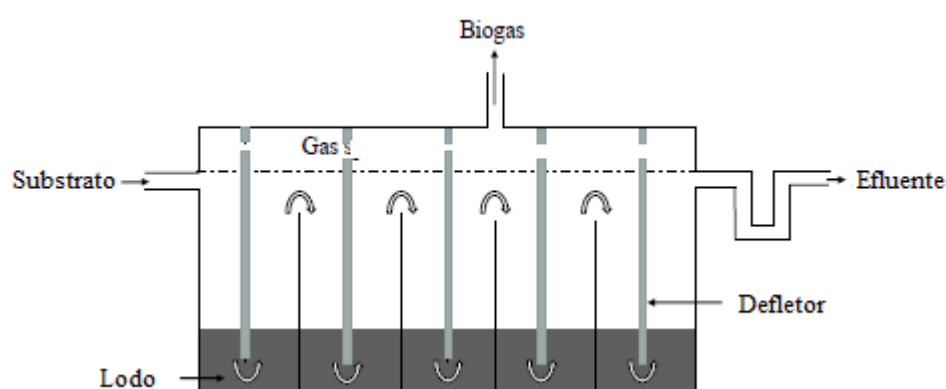


Figura 4: Esquema do reator anaeróbico compartimentado

Fonte: Adaptado de Khanal *et al.* (2017)

2.5.3. Reator anaeróbico de fluxo ascendente e de manta de lodo (UASB)

O reator anaeróbico de fluxo ascendente e de manta de lodo ou simplesmente reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é de longe o mais robusto em meio aos digestores de alta taxa, possui baixo custo operacional, e portanto, é o mais utilizado no tratamento anaeróbico de diferentes tipos de águas residuais (Chong *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2015; Watari *et al.*, 2017), tais como, óleo de palma (Ahmad *et al.*, 2011), esgotos domésticos (Rizvi *et al.*, 2015) e soro do queijo (Carrillo-Reyes *et al.*, 2014; Cichello *et al.*, 2012). Neste, a concentração de biomassa alcança 50 g/L ou mais, enquanto um TRS longo, independentemente do curto TRH de 4 – 8 h (Khanal *et al.*, 2017)

Os reatores UASB (Figura 5) podem apresentar várias configurações, como tanques cilíndricos, quadrados ou retangulares, sendo que todas estas possuem basicamente três partes: leito de lodo, manta de lodo e separador trifásico. Nestes reatores, há uma elevada concentração de biomassa, a qual cresce dispersa no meio, podendo formar grânulos, devido à aglutinação de

diversas espécies microbianas. E neles, o afluyente a ser tratado é bombeado pelo fundo, encontrando-se com o leito de lodo, o que causa a adsorção da maior parte da matéria orgânica pela biomassa, e, como resultado da atividade anaeróbia os gases são formados. Porém, como o fluxo do líquido é ascendente, o separador trifásico é responsável pela separação e retorno da biomassa, assim como da separação do gás, o qual é coletado e pode ser retirado para o reaproveitamento (Chernicharo, 2007).

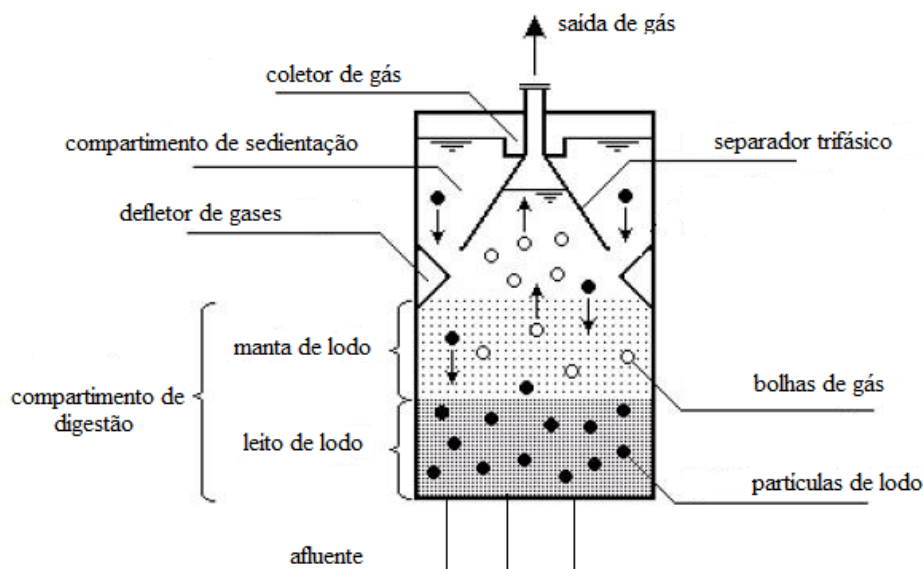


Figura 5: Princípio de funcionamento de um reator UASB

Fonte: Adaptado de Chernicharo, 2007

2.5.4. Reator anaeróbio em batelada sequencial (ASBR)

O reator anaeróbio em batelada sequencial ou *anaerobic sequencing batch reactor* (ASBR) promove um benefício único no tratamento de efluentes industriais com uma quantidade média de sólidos (0,5 – 4% de sólidos totais), já que é um reator único operado em modo batelada em diversos ciclos, como mostra a Figura 6. Este sistema é uma variação do UASB, onde o processo ocorre de acordo com os seguintes passos: alimentação, reação, estabilização e decantação. Assim, os microrganismos são expostos a concentrações variáveis do substrato ao longo do ciclo, sendo que ambos são misturados para haver maior contato entre a matéria orgânica e os microrganismos, havendo a conversão da matéria biodegradável em biogás e sedimentação do lodo (Akil e Jayanthi, 2012).

As principais vantagens deste sistema são simplicidade operacional, eficiente controle de qualidade do efluente, flexibilidade de uso, poucos requisitos mecânicos, custo-efetividade alta taxa de biogás (Mao *et al.*, 2015).

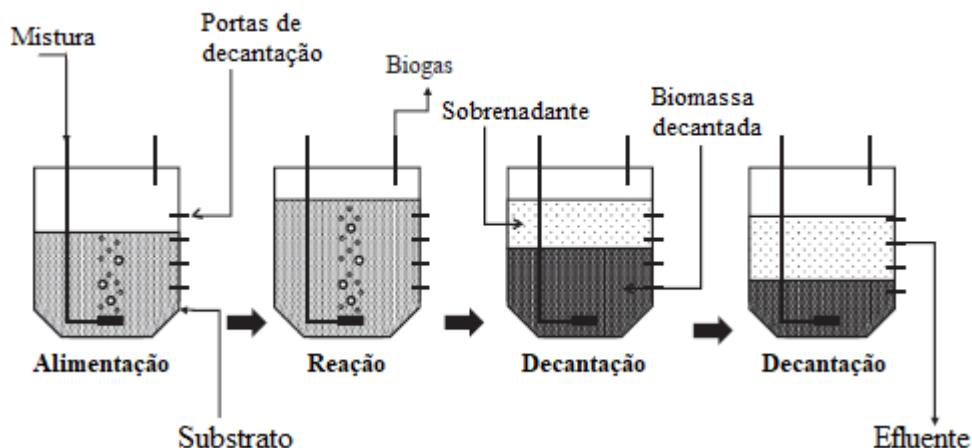


Figura 6: Esquema do reator anaeróbico sequencial

Fonte: Adaptado de Khanal *et al.* (2017)

2.6. Automação do Processo de DA

Como visto anteriormente, a digestão anaeróbia é um processo complexo e delicadamente balanceado, onde qualquer alteração em qualquer etapa pode afetar todo o processo. O mesmo, por exemplo, pode ser inibido por seus próprios produtos intermediários como a amônia (Chen *et al.*, 2008). Portanto, a falta de indicadores adequados que reflitam o status atual da digestão resulta em um controle limitado do processo (Boe *et al.*, 2010)

A automação da DA possibilita, assim, maior estabilização e menor inconvenientes, permitindo que o processo opere em sua capacidade máxima. Para isto, é necessário um sistema de monitoração e controle, onde os parâmetros sensíveis a perturbação são monitorados e, os dados obtidos referentes a estes são enviados para um sistema de controle com o intuito de regular os parâmetros dentro de faixas de valores desejados (Nguyen *et al.*, 2015).

Dentre os diversos estudos referentes à monitoração online de parâmetros da DA, Ward *et al.* (2011) compararam diferentes métodos de monitoração para a fase líquida (pH e espectroscopia no infravermelho próximo) e gasosa (cromatografia gasosa e espectrometria de massa), utilizando um controlador responsável pelo registro de dados, controle da temperatura e da alimentação/remoção do efluente. Eles concluíram que o uso do pHmetro, da

espectroscopia no infravermelho e da micro cromatografia gasosa fornecem dados confiáveis e são de baixa manutenção.

Yu *et al.* (2015) afirmaram que a monitoração do pH na fase líquida e da produção de biogás na fase gasosa já são parâmetros robustos para avaliar o tratamento anaeróbio, e, por isso utilizaram um controlador lógico programável (CLP) para monitorar o pH e a produção de biogás do processo. Já Sahu *et al.* (2017) automatizaram uma planta de produção de biogás com o intuito de evitar a falha do processo devido a sobrepressão do sistema. Por fim, Ahmed *et al.* (2017) utilizaram um sensor de metano e a plataforma Arduino para monitorar a produção diária de metano do processo, algo semelhante ao que será desenvolvido no presente trabalho.

No entanto, implementar um sistema de monitoração e controle não é algo simples, uma vez que é necessário garantir condições de precisão, confiabilidade e repetibilidade. Por isso os instrumentos utilizados nas análises quantitativas e qualitativas precisam possuir um grau de precisão para garantir credibilidade aos resultados coletados.

Assim, se faz necessário conhecer os dispositivos utilizados em um sistema automatizado. Os próximos tópicos irão discorrer mais sobre estes.

2.6.1. Sensores e atuadores nos sistemas automatizados

Os sensores são elementos essenciais em um ambiente monitorado, uma vez que são estes os responsáveis por detectar mudanças físicas e convertê-las para sinais elétricos que podem ser processados. Existem diversos tipos de sensores, e, estes ainda podem ser chamados de transdutores, pois convertem um tipo de energia em outra, como energia mecânica em elétrica (Frenzel, 2018).

Sabendo isso, é necessário destacar alguns tipos de sensores pertencentes a esta pesquisa. Dentre eles, foi utilizado um sensor de pH para monitorar o pH da fase líquida da reação. Caso semelhante ocorreu no trabalho de Yu *et al.* (2015), onde foi desenvolvido um sistema automatizado para controlar pH e a produção de biogás em um processo de digestão anaeróbia. Os pesquisadores utilizaram um sensor E201-C (Leici Instrument Incorporated, China) para monitorar o pH e prevenir uma sobrecarga no reator da metanogênese. Durante o processo, o pH diminuía para em torno de 7.4 durante a alimentação do substrato, e, aumentava gradualmente até 8.1 no fim do ciclo (metanogênese). Este controle permitiu condições benéficas para a metanogênese, tornando o processo mais estável, com maior remoção da DQO e maior produção de metano.

O DS18B20 foi o termopar usado neste trabalho para a medição da temperatura. Este também foi utilizado por Carre e Williamson (2018) que avaliaram a qualidade do ambiente interior de habitações residenciais, e, para isto utilizaram a plataforma Arduino e diversos sensores para coletar dados de alguns parâmetros, como a temperatura, humidade relativa e concentração de CO₂. Sendo que o trabalho demonstra o potencial de tecnologias em desenvolvimento para a redução de custos com avaliações detalhadas sobre a qualidade de ambientes internos.

Já para a medição de pressão existem diversos dispositivos, como os transdutores de pressão piezoelétrica que usam a voltagem de certos tipos de cristais ou cerâmicas quando uma pressão é aplicada a estes, ou medidores de pressão do inglês *strain gauge*, que consiste em um fino padrão de metal, depositado em uma base plástica, com um valor específico de resistência, que se deforma ao receber alguma pressão (Frenzel, 2018). Zarfl *et al.* (2016), por exemplo, apresentaram o desenvolvimento de um sensor de pressão, equipado com cristais piezoelétricos e com uma película fina de *strain gauge*, capaz de realizar medições precisas. Sendo este adequado para monitorar simultaneamente a pressão dinâmica e estática em ambientes agressivos.

Existe também um sensor de pressão especial conhecido como célula de carga, o qual normalmente é constituído por *strain gauges*, ou mesmo por material piezoelétrico, uma vez que a rigidez deste fornece uma rápida resposta para forças variantes (Maranzano e Hancock, 2016). Este sensor é amplamente utilizado para realizar pesagem dinâmicas, ou seja, para calcular com precisão e rapidez o valor mensurado enquanto a saída do sensor ainda está em oscilação (Richiedei e Trevisani, 2018).

Já detectar seletivamente concentrações de espécies gasosas ainda é uma dificuldade enfrentada em laboratórios científicos. Uma tecnologia que responde bem a este caso é a infravermelha não dispersiva, do inglês *non-dispersive infraRed* (NDIR), a qual consiste na absorção do comprimento de onda no espectro infravermelho, como forma de identificar gases específicos como CH₄, CO₂, NH₃ e SO₂ (Kim *et al.*, 2016). Isso foi confirmado por Tan *et al.* (2015) que testaram a tecnologia NDIR para detectar três gases (CH₄, CO e CO₂) simultaneamente e obtiveram bons resultados com precisão de $\pm 0.05\%$.

Quanto aos atuadores, estes são dispositivos de saída, e, são utilizados para realizar o controle de um sistema. Dentre os mais conhecidos estão os relés e as válvulas solenoides.

2.6.2. *Software e hardware na aquisição de dados*

O desenvolvimento tecnológico tornou possível a criação de sistemas automatizados de aquisição de dados que dispensam a interferência humana nas medições, proporcionando uma melhor eficiência dos processos. Porém, apesar de oferecer maior precisão e melhor desempenho, essa automação normalmente possui um custo muito elevado.

Dessa forma, as dificuldades de adequação de projetos específicos fizeram com que surgisse um movimento para tornar as tecnologias livres. Nas últimas duas décadas, esse movimento *open-source*, cada vez mais, fornece um melhor acesso a software e até mesmo a hardware, e assim, reduz custos de pesquisas (Maraba e Bulur, 2017). Uma iniciativa bem conhecida deste movimento é o Arduino, o qual consiste em uma plataforma de *hardware* e *software* abertos, que já se tornou uma alternativa para uma dispendiosa instrumentação científica (Fisher e Gould, 2012).

A plataforma eletrônica Arduino tem sido muito eficaz para realizar a monitoração e controle de equipamentos experimentais utilizados pela comunidade científica durante o processo de automação (D'Ausilio, 2012; Pearce, 2012). Esta além de oferecer suporte para uma linguagem de programação simplificada C/C++, também possui uma grande comunidade online que estimula o desenvolvimento, permitindo uma rápida prototipagem, e, um grande número de sensores e dispositivos oferecem bibliotecas personalizadas e suporte dos fabricantes para o uso da plataforma (Ali *et al.*, 2016; D'Ausilio, 2012). Dentre os diversos estudos que utilizaram o Arduino para a automação de seu projeto, como Mesas-Carrascosa *et al.* (2015) que realizaram o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar e do solo na agricultura, e, Rosa *et al.* (2017) que desenvolveram um aparelho para controlar o pré-tratamento de eletrodos de diamante dopado com boro para fins analíticos, este já está sendo utilizado no processo de DA, como foi o caso da monitoração da produção diária de metano em um reator anaeróbio por Ahmed *et al.* (2017).

Como já foi dito, o Arduino é composto basicamente por dois componentes: um hardware e um software. Seu hardware é construído com base em um microcontrolador capaz de computar 300.000 linhas de códigos por segundo, sendo uma ferramenta muito eficaz para uma instrumentação precisa (Ali *et al.*, 2016; Maraba e Bulur, 2017). Vale ressaltar que um microcontrolador é praticamente um computador de baixo custo encapsulado em um chip, e, que seu papel é gerenciar, armazenar e transmitir os dados dos sensores utilizados para monitorar os diversos parâmetros (Fisher e Gould, 2012; Mesas-Carrascosa *et al.*, 2015).

A memória também é um elemento importante do hardware do Arduino. Neste, existem três tipos de memória, cada uma com uma função distinta: a memória *Flash* permite a execução do *sketch*, e, é capaz de guardar os dados carregados por muito tempo, mesmo sem alimentação elétrica. Já a memória *Static Random Access Memory* (SRAM) é utilizada para armazenar e modificar os valores das variáveis em tempo de execução, porém sempre é limpa juntamente com a inicialização do dispositivo. Por fim, a memória *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) é utilizada para armazenar um pequeno volume de dados os quais devem ser salvos mesmo quando não há alimentação de energia (Frenzel, 2018).

Outro elemento importante no esquema de funcionamento do Arduino é o *pinout*, que no modelo ATmega328P disponibiliza 14 pinos digitais de entrada ou saída, dos quais 6 destes podem ser utilizados como *Pulse Width Modulation* (PWM). Além disso, ainda são disponibilizados 6 pinos para entradas analógicas. Neste caso, o microcontrolador usa um conversor ADC (*Analog Digital Converter*) interno de 10 bits, que define a combinações de $2^{10} = 1024$ para uma tensão máxima de 5V, gerando então uma resolução máxima de 5 mV (Arduino, 2018).

Por fim, para que todos elementos tenham funcionalidade, é necessário carregar as instruções lógicas na memória e executá-las. Sendo que o conjunto destas instruções lógicas ou programas é denominado *software* (Frenzel, 2018). O Arduino oferece uma interface de desenvolvimento integrado (IDE), também conhecida como *sketch*, a qual torna o ambiente de escrita deste *software* mais amigável, facilitando a operação do usuário.

Ainda assim, é necessário destacar que para criar um programa na IDE, algumas regras devem ser obedecidas, como a declaração de variáveis globais e definição das portas (analógicas ou digitais). Também é preciso efetuar algumas configurações obrigatoriamente incluídas no bloco do *setup*, cuja principal é a inicialização da comunicação serial, enquanto, no *loop* se inclui todas as instruções e funções do programa, evidenciando a escrita do código em linguagem C.

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados durante a etapa experimental deste trabalho. Os estudos experimentais foram realizados no Laboratório de Catálise, Energia e Materiais (LCEM) e no Laboratório de Tratamentos de Resíduos e Efluentes (LTRE) do Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP), localizado no campus Aracaju/Farolândia da Universidade Tiradentes.

3.1. Aparato Experimental

3.1.1. Placa Arduino e acessórios

Para a montagem e automação do sistema anaeróbio foram utilizados vários equipamentos, os quais serão detalhados neste tópico.

Para a construção da parte lógica do sistema foi utilizada uma placa Arduino UNO (Figura 7) com as seguintes características: comunicação Universal Serial Bus (USB), micro controlador ATmega328P, 14 pinos de entrada/saída digitais, 6 entradas analógicas, uma entrada de alimentação e um botão reset (ARDUINO, 2018).



Especificações	
Microcontrolador	ATmega328P
Voltagem de alimentação	7 – 12 V
Voltagem operacional	5 V
Corrente contínua por pino	40 mA
Memória Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB

Figura 7: Arduino UNO e especificações

Fonte: Arduino, 2018

Alguns Nanoshields, que são um sistema de eletrônica modular compatível com o Arduino, também foram utilizados com o intuito de tornar o projeto mais compacto e robusto. A Figura 8 apresenta os Nanoshields utilizados no projeto, sendo que os mesmos são desenvolvidos pela Circuitar Eletrônicos.

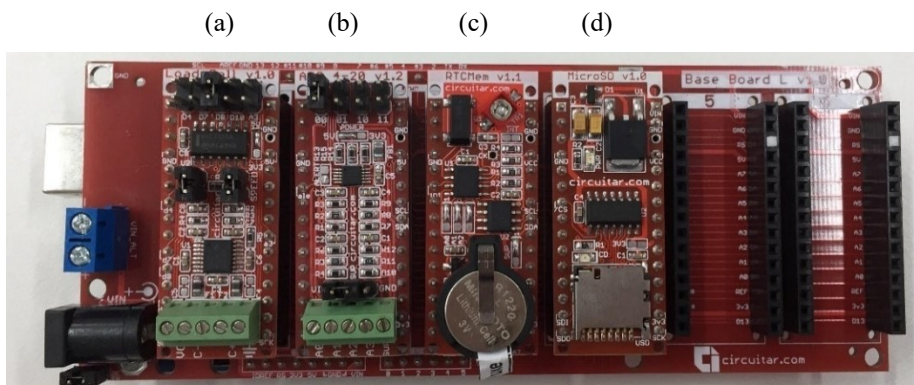


Figura 8: (a) Nanoshield Load Cell (b) Nanoshield ADC (c) Nanoshield RTCMem (d) Nanoshield MicroSD

O Nanoshield MicroSD, Figura 8 (d), permite expandir a capacidade de armazenamento de dados do projeto, ao se utilizar um cartão Micro SD. Já com o Nanoshield ADC 4-20, Figura 8 (b), é possível medir sensores que possuem saída de 4 a 20 mA com grande precisão e resolução. O Nanoshield RTCMem, Figura 8 (c), adiciona um relógio de tempo real ao projeto, e, uma memória não volátil por meio de um chip EEPROM disponível na placa. Por fim, o Nanoshield Load Cell, Figura 8 (a), permite a medição de células de carga com alta precisão, uma vez que conta com recursos necessários para medição, como amplificador interno, filtros para atenuação de ruído e conversor AD de alta resolução (CIRCUITAR, 2018).

A utilização de sensores também foi necessária, pois são estes que estabelecem contato com o ambiente de interesse, captam as informações desejadas e as transmitem para um dispositivo conversor ou mesmo diretamente para o Arduino.

O sensor de pressão, MPX5050DP (Motorola), foi colocado diretamente na linha por onde o biogás passa. Este sensor é do tipo diferencial, com capacidade de até 0.50 bar e sinal de saída na faixa de 0.20 a 4.70 V (MOTOROLA, 2018). A calibração do mesmo é padronizada no processo de fabricação e alguns outros detalhes deste podem ser vistos na Figura 9.



Especificações	
Faixa de pressão	0 – 50 kPa
Tensão de alimentação	4.75 – 5.25 Vdc
Corrente de alimentação	10.0 mA _{dc}
Precisão	± 2.5
Tempo de resposta	1.0 mS

Figura 9: Sensor de pressão

Fonte: Motorola, 2018

O sensor de temperatura DS18B20 (Maxim Integrated), Figura 10, encontra-se dentro do vaso de reação, e, fornece medições de temperatura de 9 bits a 12 bits. Este, através de um resistor 4.7 K, deriva energia da linha de dados, eliminando a necessidade de uma fonte de alimentação externa (MAXIM INTEGRATED, 2018).



Especificações	
Chip	DS18B20
Tensão de operação	3 – 5.5 V
Faixa de medição	-55°C a 125°C
Precisão	± 0.5°C entre -10°C e 85°C
Dimensão ponta de aço	6 x 50 mm

Figura 10: Sensor DS18B20

Fonte: Maxim Integrated, 2018

Já o sensor de pH (Arduo Eletro), que também se encontra dentro do vaso de reação, necessita de um transdutor o qual se conecta com o Arduino (Figura 11). Este conjunto precisa de 5 volts de alimentação e possui uma faixa de medida de 0 a 14, com precisão de ±0.1 de pH, possuindo um tempo de resposta menor que um minuto.



Figura 11: Sensor de pH e transdutor

O sensor de metano CH₄/GP 40.100 (Figura 12), fabricado pela GRI Instrument, encontra-se conectado à linha por onde passa o biogás gerado. Este sensor é do *tipo non-dispersive infraRed*, conhecido como NDIR, possibilitando a seletividade de gases específicos, neste caso, do CH₄. Sua faixa de medição da concentração é de 0 – 100%VOL, e, sua alimentação é de 12 volts (DC), tornando necessário alimentá-lo com uma fonte externa (GRI, 2018). No entanto, para que a placa Arduino™ consiga processar os dados fornecidos por este, foi necessário o intermédio do Nanoshield ADC, o qual converte o sinal de resposta do sensor (4 – 20 mA) para tensão.

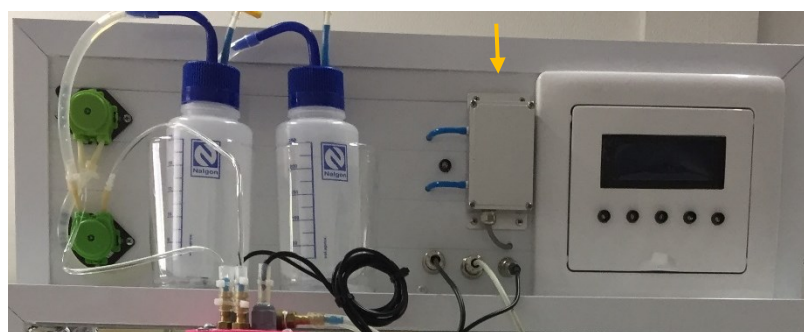


Figura 12: Sensor de metano indicado pela seta

A célula de carga presente na balança (posicionada sob o frasco de medição do biogás) é outro sensor importante. Este sensor é do tipo resistivo por deformação, sensível por *strain gauge* e que pode ter capacidade de até 4 Kg (SPLT, 2018). É necessário destacar que para o Arduino™ receber o sinal de resposta deste, foi necessário o intermédio do Nanoshield Load Cell. O sensor juntamente com a balança utilizada para acompanhar a variação de massa do recipiente receptor de biogás podem ser vistos na Figura 13.

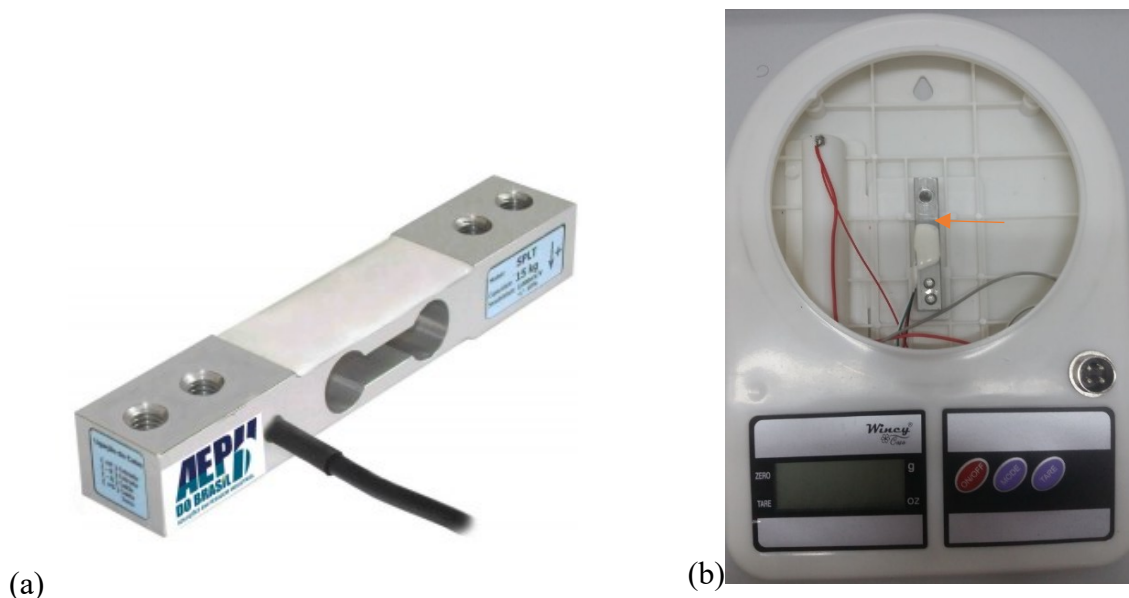


Figura 13: (a) Sensor; (b) Sensor de carga na balança

Além dos sensores, foi utilizado um agitador magnético com aquecimento (K40-1820H), fabricado pela KASVI, que oferece uma faixa de velocidade de agitação de 100 – 1500 rpm e temperatura máxima de aquecimento de 380°C. Adicionalmente, uma fonte de energia externa S-240-12 (PXL) foi utilizada para alimentar os equipamentos que precisavam mais que os 5 volts fornecidos pelo Arduino™.

Por fim, também foram utilizadas válvulas solenoides (Kobo air), relés SRC-05VDC-SLC (Songle), bombas peristálticas AB11 (Goso) e de vácuo, algumas conexões, mangueiras, jumpers, resistores e diodos.

3.1.2. Montagem e automação do reator

Um dos grandes problemas dos trabalhos sobre digestão anaeróbia é o alto custo associado aos reatores, que normalmente são feitos de materiais como aço ou concreto (Budzianowski, 2016). Também existe uma dificuldade em relação ao uso de instrumentos automatizados, tanto para *hardware* quanto para *software*, que normalmente estão associados a altos custos (Maraba e Bulur, 2017). Por isto, no presente trabalho, um sistema automatizado foi desenvolvido para realizar o processo de digestão anaeróbia em escala de bancada e em regime de batelada, utilizando tecnologia de baixo custo e fácil utilização.

Este sistema foi montado em uma base de alumínio preparada para recebê-lo, onde foram colocados os equipamentos necessários para a digestão anaeróbia, tais como vaso de reação,

vaso de coleta de biogás, placas eletrônicas, sensores e atuadores. Na Figura 14 está a representação do sistema, mostrando alguns componentes presentes no mesmo.

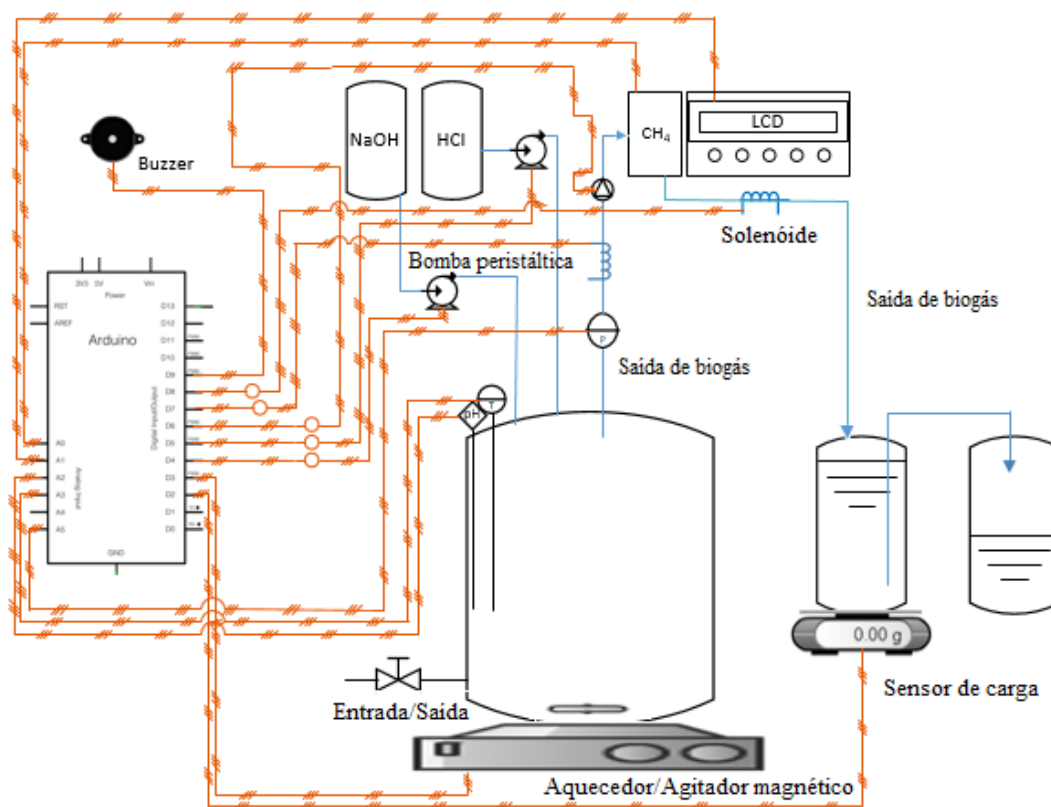


Figura 14: Esquema do sistema utilizado para o processo de digestão anaeróbia

O reator consiste em um vaso Mariotte com capacidade de dois litros vedado com uma tampa feita de nylon com o intuito de evitar vazamentos. No reator ainda existem orifícios para acoplar os sensores de pH e temperatura, de dutos utilizados para adicionar a solução básica ou ácida durante o controle do pH através de bombas dosadoras, e, de um duto para a transferência do biogás conforme mostra a Figura 15.

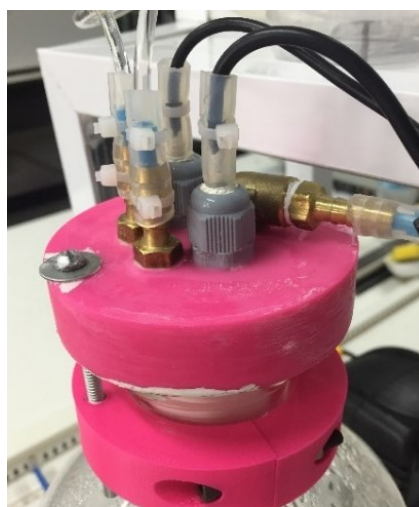


Figura 15: Tampa em nylon do reator

Já para permitir a passagem do biogás do vaso de reação para o de coleta, uma caixa eletromecânica foi construída. Esta, conforme mostra Figura 16, é composta por: sensor de pressão, bomba diafragma, quatro solenoides e cinco relês responsáveis por intermediar a conexão das válvulas com o microcontrolador.

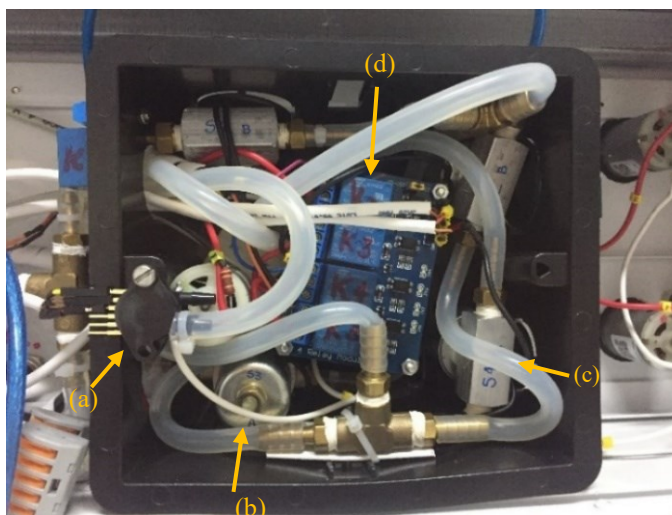


Figura 16: Equipamento utilizado para análise de biogás, onde: (a) sensor de pressão, (b) bomba de vácuo, (c) solenoide, (d) relês

A Figura 17 apresenta o esquema do funcionamento da caixa eletromecânica. Inicialmente é necessário que o sensor de pressão informe uma pressão mínima no vaso de reação, $\pm 0,1$ KPa, para que as válvulas solenoides 1 e 2 (normalmente fechadas) sejam abertas, permitindo o fluxo do biogás em direção ao sensor. Em seguida, a válvula solenoide 2 é fechada, e a bomba de vácuo é acionada por alguns segundos (tempo determinado em função do volume necessário para preencher a linha), enquanto as válvulas solenoides 3 e 4 permanecem estáticas. Esse acionamento formará um novo fluxo de gás, garantindo que uma amostra do mesmo estará em contato com o sensor de metano. Logo após, a bomba é desligada e a válvula solenoide 1 fechada, para que haja a estabilização do sensor em contato com a amostra. Em função das especificações técnicas do sensor, ficou determinado que o tempo necessário para esta estabilização é de 20 segundos. A leitura realizada é armazenada no cartão Micro SD, e, as válvulas solenoides 1 e 2 se abrem permitindo que o biogás continue fluindo para o vaso receptor. Por último, ocorre uma purga no sensor para o ambiente, a qual consiste em uma limpeza necessária por causa dos compostos nocivos no biogás bruto. Neste processo, as válvulas solenoides 3 e 4 se abrem e a bomba é acionada promovendo a limpeza no interior do sensor, com o intuito de minimizar os efeitos nocivos do gás no equipamento. Ao final deste processo, o sistema está pronto para iniciar um novo ciclo.

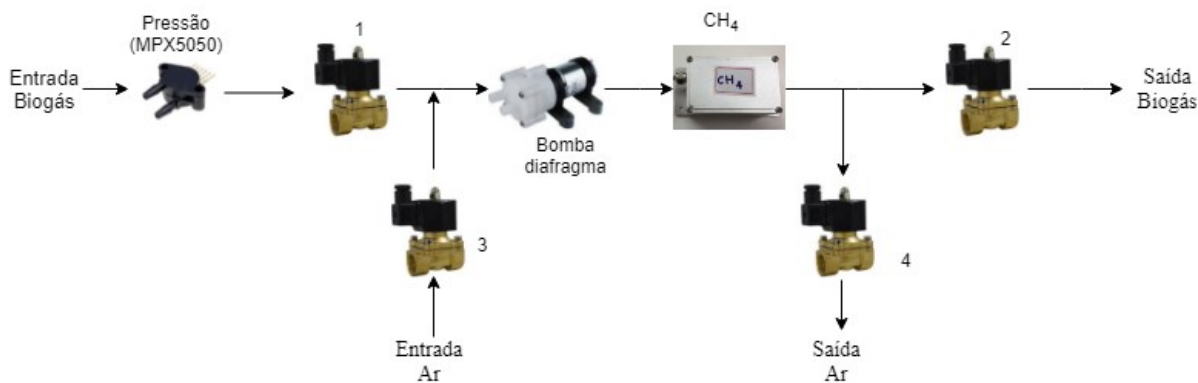


Figura 17: Esquema para determinação de metano

Para realizar a medição do volume de biogás gerado no processo, foi utilizada a técnica de deslocamento de um líquido conhecido. Porém, para que esta monitoração fosse feita automaticamente, uma célula de carga foi colocada sob o vaso receptor de gás, uma vez que ao conhecer a massa e a densidade do fluido expulso, o volume equivalente de biogás produzido pode ser encontrado facilmente.

O projeto também apresenta um LCD I2C, um buzzer e alguns LEDs. O primeiro exibe as variáveis (temperatura, pH, pressão, volume de biogás e concentração de CH_4) em tempo real, ou mesmo alguma mensagem de alerta. O buzzer é responsável por emitir sons de alerta em alguma ocasião que necessite de maior atenção, como o não funcionamento de algum dispositivo. Já os LEDs representam o funcionamento do sistema ou de algum dispositivo, como o do sensor de CH_4 , das bombas dosadoras e diafragma, do acontecimento da limpeza do sensor de CH_4 (purga) e de pressão negativa no vaso de reação.

Para controlar os equipamentos do reator foi utilizada a placa lógica Arduino UNO juntamente com algumas placas auxiliares conhecidas como *nanoshields*, cuja função é adaptar as condições de funcionamento de alguns sensores utilizados ao Arduino. O sensor de metano, por exemplo, necessita ser conectado ao Nanoshield ADC 4-20, pois este consegue medir sensores industriais com saída de 4 a 20 mA com grande precisão. Já a célula de carga da balança precisa ser conectada ao Nanoshield Load Cell, que oferece maior resolução para células de carga (CIRCUITAR, 2018). Os sensores de temperatura e pressão estão conectados diretamente ao Arduino, juntamente com os relês e alguns LEDs, enquanto o sensor de pH possui seu próprio transdutor, o qual é conectado ao Arduino.

Ainda conectado ao Arduino estão os Nanoshields RTCMem, que adiciona um relógio de tempo real ao processo, e, o Micro SD, onde serão gravados todos os dados coletados durante

a digestão (em tempo a ser determinado). Todas estas conexões entre o Arduino, os *nanoshields* e os dispositivos podem ser vistos na Figura 18.

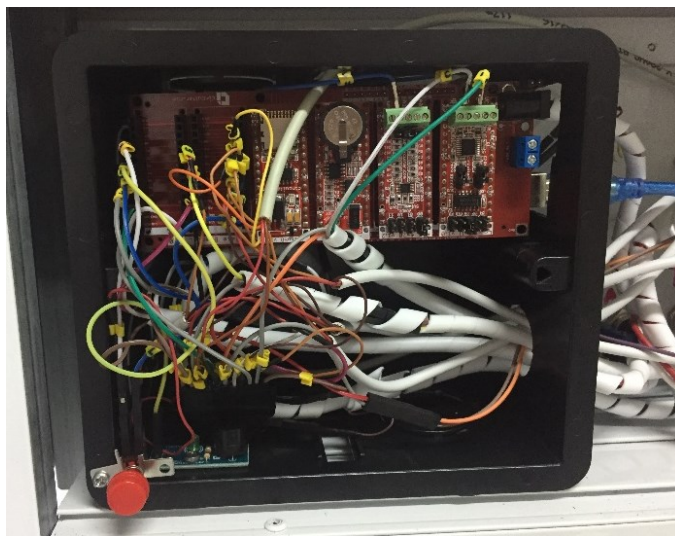


Figura 18: Conexão dos dispositivos com o Arduino (abaixo dos *nanoshields*) e *Nanoshields*

A montagem completa do sistema automatizado usando reator AnSTBR para a produção do biogás metano pode ser evidenciado na Figura 19.



Figura 19: Sistema anaeróbio automatizado de baixo custo

3.1.3. Calibração dos sensores

Conforme descrito nas seções anteriores, o sistema é provido de vários sensores. Enquanto alguns destes já são calibrados durante sua fabricação, outros precisaram ser calibrados durante a pesquisa. Assim, esta seção irá detalhar o procedimento utilizado para a calibração dos mesmos.

Os valores resposta para cada sensor foram utilizados para montar-se um gráfico de dispersão, e assim, obter uma equação do tipo $y = ax + b$ (regressão linear). Os gráficos para calibração dos sensores podem ser vistos no Apêndice A. É importante ressaltar que estatisticamente para cada curva foi admitida uma discrepância de, no máximo, 5% representada pelo coeficiente de variação, sendo que acima disso os valores foram descartados e o procedimento refeito.

Para o sensor de CH₄ a calibração foi realizada utilizando um padrão de gás (99,98%) fornecido pela White Martins. Assim, amostras de diferentes gases como nitrogênio (N), dióxido de carbono (CO₂) e do próprio metano (CH₄) foram injetadas no sensor, e então, valores de saída foram obtidos, conforme mostra a Tabela 6. Porém, por se tratar de um sensor industrial sensível apenas a metano, só este foi detectado, sendo os valores resposta em miliampere.

Tabela 6: Concentração de CH₄ com respectivas correntes elétricas

Concentração (% v/v)	Corrente (mA)
0	4,015
99,98	19,97

Já para a calibração do sensor de pressão foram aplicadas diferentes pressões, as quais eram monitoradas por um manômetro. Para cada pressão obteve-se um valor correspondente em bits (Tabela 7).

Tabela 7: Valores de pressão aplicada e os respectivos valores correspondentes

Pressão (kgf/cm²)	Valor Corresp. (bits)
0	41
0,1	461
0,2	647
0,3	853
0,4	1016

O sensor de pH também precisou ser calibrado, e, para isto soluções padrão com pH já conhecido foram utilizadas. Os valores correspondentes deste foram informados em volts, pois foi utilizado um multímetro para obtê-los.

Tabela 8: Valores de pH e seus respectivos valores correspondentes em volts

pH	Tensão (V)
4,16	3,008
6,83	2,533
10,02	2,072

A célula de carga, sensor de massa, foi outro sensor que necessitou de calibração, e, para isto pesos padronizados foram utilizados. Os valores de saída em bits foram obtidos para cada ponto, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Pesos padronizados e respectivas respostas da célula de carga

Massa (g)	Valor Corresp. (bits)
1065	549
903	466
589	303
235	121
138	71

Também é importante salientar que todas as curvas realizadas foram aplicadas através do *firmware* desenvolvido e gravado na placa eletrônica Arduino. Por isto, todos os valores obtidos pelos sensores já são apresentados em suas respectivas unidades.

3.1.4. *Desenvolvimento do firmware*

Uma vez conhecido o processo e com todos os equipamentos disponíveis ainda foi necessário realizar a integração do sistema com o Arduino. Para isto foi necessário proceder com a instalação da interface de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino (Figura 21), ambiente no qual se pode criar e compilar códigos, onde foi realizada toda escrita do código de programação em linguagem C, o qual pode ser visto no Apêndice B.

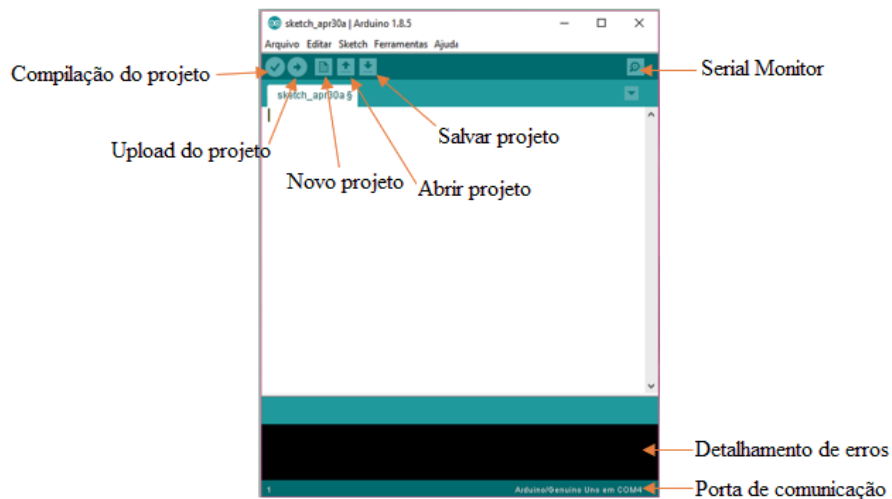


Figura 20: Janela principal da IDE do Arduino

Com o código pronto, foi realizado o upload do mesmo, que consiste na transmissão do código para a memória da placa lógica. A partir deste momento, o código compilado chama-se *firmware*, sendo que este não apresenta interface para o usuário, e, é responsável por conter todas as instruções necessárias para o funcionamento do sistema anaeróbio proposto.

3.2. Procedimento Experimental

3.2.1. Coleta e caracterização do efluente

Como substrato foi utilizado o soro lácteo proveniente de uma pequena fábrica de queijos do município de Campo do Brito (10°44'38.0" S 37°29'42.3" W), coletado em um único ponto. O efluente foi estocado em recipientes plásticos limpos e armazenados em um refrigerador Philco (PH85N) a 4 °C para conservação de suas características.

Este substrato foi caracterizado no Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP), e o resultado pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10: Caracterização do efluente lácteo

Análise	Valores
pH	4,48
Sólidos totais (mg/L)	52.640,0
Sólidos voláteis (mg/L)	46.465,0
Demanda química de oxigênio (mgO ₂ /L)	78.057,3

Demanda bioquímica de oxigênio (mgO ₂ /L)	42.650,0
Óleos e graxas (mg/L)	820,0
Nitrogênio total (mg/L)	1.200,0
Fósforo total (mg/L)	369,9
Sulfato (mg/L)	276,0
Potássio (mg/L)	4,56

3.2.2. Coleta e caracterização do inóculo

O lodo anaeróbico foi utilizado como inóculo uma vez que este é a fonte mais adequada de um inóculo diverso e ativo (Koch *et al.*, 2017; Raposo *et al.*, 2012). Este lodo foi obtido de reatores de manta de lodo com fluxo ascendente (UASB) na estação de tratamento de esgoto (ETE – Barra dos Coqueiros) da Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) (10°53'58.8" S 37°01'57.5" W).

Após a coleta, este passou por uma filtração a vácuo com membrana de porosidade igual a 40 µm, com o intuito de permitir a passagem das bactérias e reter sólidos mais grosseiros, e, sua caracterização inicial pode ser visualizada na Tabela 11.

Tabela 11: Caracterização do inóculo utilizado

Análise	Inóculo
Sólidos totais (mg/L)	915,0
Sólidos voláteis (mg/L)	270,0
Demanda química de oxigênio (mgO ₂ /L)	1.985,5
pH	6,92
Temperatura (°C)	30,0

3.2.3. Processo de geração e monitoração do biogás

Inicialmente, o substrato e o lodo de esgoto foram misturados na proporção de 2:1 (Koch *et al.*, 2017), e então, o líquido foi introduzido no biorreator manualmente. Daí, com o intuito de permitir maior eficiência na produção de gás e no tratamento do efluente processado, alguns parâmetros de controle foram fixados através das variáveis da fase líquida: temperatura, pH e agitação, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Variáveis fixadas durante cada batelada

Variável	Valor	Parâmetro/Controle
Temperatura (°C)	36 - 40	Temperatura controlada por aquecedor e termostato
pH	6,5 – 7,8	Adição de 4M HCl e 1M NaOH
Agitação (rpm)	80	Agitação intermitente

A atividade microbiana é praticamente nula abaixo de 20 °C (Bowen *et al.*, 2014), enquanto que acima de 55 °C a produção de biogás diminui devido a produção de gases voláteis que inibem as atividades metanogênicas (Khalid *et al.*, 2011). Assim, a faixa de temperatura de 36 a 40 °C foi estabelecida como condição mais favorável para um processo estável e como forma de manter uma taxa máxima de produção de gás (Kothari *et al.*, 2014). Já o pH foi mantido de 6,5 a 7,8 como condição ideal para as bactérias metanogênicas (Choong *et al.*, 2017), uma vez que um pH abaixo de 6 pode inibir o desenvolvimento destas bactérias (Leung e Wang, 2016), e a finalidade do trabalho é a produção de metano. Quanto à agitação, foi utilizada a mistura intermitente, que segundo Kariyama *et al.* (2018) pode ser utilizada para achar uma maior eficiência na produção energética da DA.

Cada batelada teve duração de 21 dias (504 horas), incluindo o tempo de adaptação e produção de biogás, de acordo com Mao *et al.* (2015). E, durante a digestão anaeróbia, o sistema automatizado monitorou a concentração de metano através do uso de um sensor altamente seletivo, enquanto que para monitorar o volume de biogás gerado no processo, um procedimento semelhante ao de Moukazis *et al.* (2017) foi utilizado, onde o volume de biogás produzido é equivalente ao deslocamento de um líquido no vaso receptor (Figura 21).

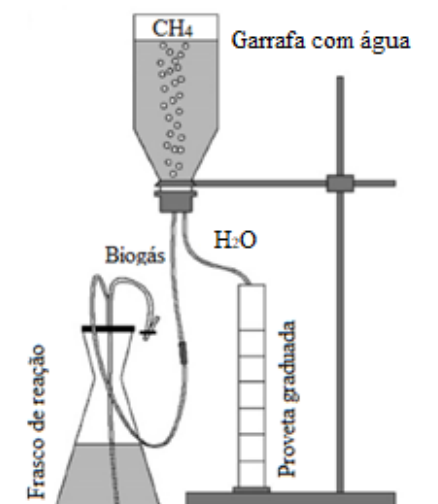


Figura 21: Aparato experimental para determinar volume de gás

Fonte: Adaptado de Moukazis *et al.* (2017)

No entanto, para que esta monitoração fosse feita automaticamente, uma célula de carga foi colocada sob o vaso receptor do gás, pois, conhecendo a massa e a densidade do fluido expulso, pode-se encontrar facilmente o volume equivalente do biogás produzido, através da equação:

$$V = \frac{m}{d} \quad \text{Eq. 5}$$

V = volume (cm³)

m = massa (g)

d = densidade (g.cm⁻³)

Durante a batelada, duas vezes por semana alíquotas foram coletadas do reator para realizar a determinação química de oxigênio e sólidos voláteis. Destas alíquotas também foram medidos o pH e a temperatura da mesma logo após sua coleta, com o intuito de comparar os valores com os obtidos pelo sistema.

3.3. Materiais

Para cada batelada realizada foram preparadas soluções contendo concentrações conhecidas de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH).

Para a calibração do sensor de metano foi utilizado o metano (CH₄) fornecido pela White Martins, com grau de pureza mínimo de 99,98%, enquanto que para calibração do sensor de pH foram utilizadas soluções tampão com pH já conhecido.

3.4. Parâmetros de Avaliação e Monitoramento

3.4.1. Controle do pH

O pH deve ser mantido entre 6,5 e 7,8 como condição ideal para as bactérias metanogênicas (Choong *et al.*, 2017). Por isto, o sistema utiliza bombas dosadoras para adicionar uma solução de ácido clorídrico (HCl) 4 M ou uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1 M e manter o pH da reação estável.

3.4.2. Controle da temperatura

Durante o processo a temperatura de reação é mantida de 36 a 40 °C (faixa mesófila), utilizando um aquecedor juntamente com um termostato. Este controle é necessário para evitar o desequilíbrio do processo ocasionado por mudanças abruptas de temperaturas (Kothari *et al.*, 2014).

3.4.3. Determinação de CH₄

Todo gás produzido no reator, ao atingir uma pressão mínima (0,1 KPa), segue para o sensor de CH₄ modelo GP 40.100. Assim, a concentração de metano no biogás produzido é determinada e esta informação armazenada no Micro SD.

3.4.4. Determinação da demanda química de oxigênio (DQO)

Foi utilizado o método colorimétrico padrão de refluxo fechado para a determinação da DQO, utilizando K₂Cr₂O₇ em meio ácido, contendo Ag₂SO₄ como catalisador e HgSO₄ para eliminar a interferência de cloretos presentes na amostra. Quando necessário, as amostras foram diluídas adequadamente para contemplar as faixas de DQO do método. Logo em seguida, as soluções para o ensaio são adicionadas, e, os tubos colocados no digestor, por duas horas, a 150°C. Após o resfriamento até a temperatura ambiente, a leitura direta da absorbância em espectrofotômetro (Hach, DR 5000) é realizada. Para a preparação dos brancos utiliza-se água destilada em substituição às amostras. E, os valores de absorbância a 600 nm são convertidos em DQO através de uma curva padrão previamente preparada, usando biftalato de potássio como substância padrão (APHA, 2005).

A eficiência da remoção da DQO nos testes de biodegradabilidade anaeróbia é calculada seguindo a Equação:

$$\%DQO\ remov = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \cdot 100 \quad Eq. 1$$

Sendo:

%DQO remov = porcentagem de DQO removida

DQOi = DQO inicial do efluente a ser tratado

DQOf = DQO do efluente após o tratamento

3.4.5. Sólidos suspensos totais, fixos e voláteis

A determinação dos sólidos suspensos totais, fixos e voláteis foi realizada com amostras filtradas, sob vácuo, em filtros de vidro com porosidade de 1,2µm. Os filtros com resíduos retidos são colocados em cápsulas de porcelana previamente taradas – M₀ (após serem secas em mufla por 2 horas e resfriadas em dessecador). Os conjuntos cápsulas e filtros com amostras são aquecidos em estufa a 105°C até massa constante – M₁. Posteriormente a esta etapa, os conjuntos são levados à mufla, a 550°C, durante 15 minutos, resfriados em dessecador e pesados – M₂. As concentrações dos sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV) são calculadas através das equações a seguir:

$$SST = \frac{(M_1 - M_0) * 1000}{V_a} \quad Eq. 2$$

$$SSF = \frac{(M_2 - M_0) * 1000}{V_a} \quad Eq. 3$$

$$SSV = \frac{(M_2 - M_1) * 1000}{V_a} \quad Eq. 4$$

Sendo,

SST: sólidos suspensos totais (mg/L)

SSF: sólidos suspensos fixos (mg/L)

SSV: sólidos suspensos voláteis (mg/L)

M₀: massa da cápsula vazia (g)

M₁: massa do conjunto (cápsula + filtro com resíduo) após estufa (g)

M₂: massa do conjunto (cápsula + filtro com resíduo) após mufla (g)

V_a: volume da amostra (L)

3.4.6. Análise de toxicidade

O teste de germinação com sementes de alface (*Lactuca sativa L*) foi realizado de acordo com Vilar *et al.* (2018). Inicialmente, foram preparadas soluções contendo concentrações

variadas do efluente/digestato a partir de diluições (75%, 50%, 25%, 12,5%), para o efluente não tratado (inicial), e, após submetido a digestão anaeróbia (digestato). Com a finalidade de testar a sensibilidade das sementes utilizadas, também foi realizado simultaneamente um controle positivo, com água ultrapura, e um negativo com uma solução de NaCl 0,2 M. Em placas de Petri foram dispostas 20 sementes de alface, da marca Isla Sementes Ltda, sobre um papel filtro (da marca Unifil, com gramatura de 80 g.m⁻²) saturado com 4 mL das soluções preparadas. Após 5 dias de incubação no escuro, à temperatura ambiente, foram contabilizadas as sementes germinadas e seus respectivos comprimentos e percentuais de variação do crescimento, utilizando as seguintes equações:

$$CMA = \frac{\text{comprimento total}}{\text{no de sementes germinadas}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$VG\% = (SGa - SGcp) * \frac{100}{SGcp} \quad \text{Eq. 6}$$

$$VC\% = (CMA - CMcn) * \frac{100}{SGcp} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo,

CMa: comprimento médio da amostra

VG%: porcentagem de variação da germinação

SGa: N° de sementes germinadas da amostra

SGcp: N° de sementes germinadas do controle positivo

VC%: porcentagem de variação do crescimento da raiz

CMcn: comprimento médio do controle negativo

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Construção do Sistema

Uma vez conhecido o processo de digestão anaeróbia, foi realizada a construção do sistema automatizado, cujos detalhes estão na seção 3.1 deste trabalho, para monitorar e controlar algumas variáveis inerentes ao processo, como mostra o fluxograma representativo das funções do sistema na Figura 22.

O desenvolvimento deste protótipo experimental mostrou-se inédito, pois há uma carência de produções científicas voltadas para a instrumentação e automação de baixo custo de biorreatores anaeróbios que operem com geração de biogás. Ainda assim, existem alguns trabalhos científicos que apresentam semelhanças no tocante a alguns aspectos do trabalho. Um bom exemplo disso foi a pesquisa desenvolvida por Ahmed *et al.* (2017), que construíram um sistema eletrônico utilizando a plataforma Arduino™ para quantificar apenas a produção de metano durante o processo de digestão anaeróbia.

Já Sahu *et al.* (2017) também desenvolveram um sistema automatizado para operar em plantas de biogás, porém, visando apenas melhorar a eficiência da segurança. Outrossim, Yu *et al.* (2015) realizaram o monitoramento do pH na fase líquida e da produção de biogás na fase gasosa utilizando um controlador lógico programável (CLP), o que elevou o custo do projeto.

Outra aplicação semelhante foi a realizada por Kamogawa e Miranda (2013), que aplicaram a plataforma Arduino™ para realizar o acionamento de válvulas solenóides em sistemas de análises em fluxo, uma função que atende apenas parcialmente aos objetivos pretendidos neste trabalho.

Em síntese, esta pesquisa ocupou uma lacuna até então não preenchida, que é a elaboração de um sistema de baixo custo, em relação aos sistemas convencionais, o qual além de processar um substrato, também monitora e controla variáveis importantes para a produção de biogás.

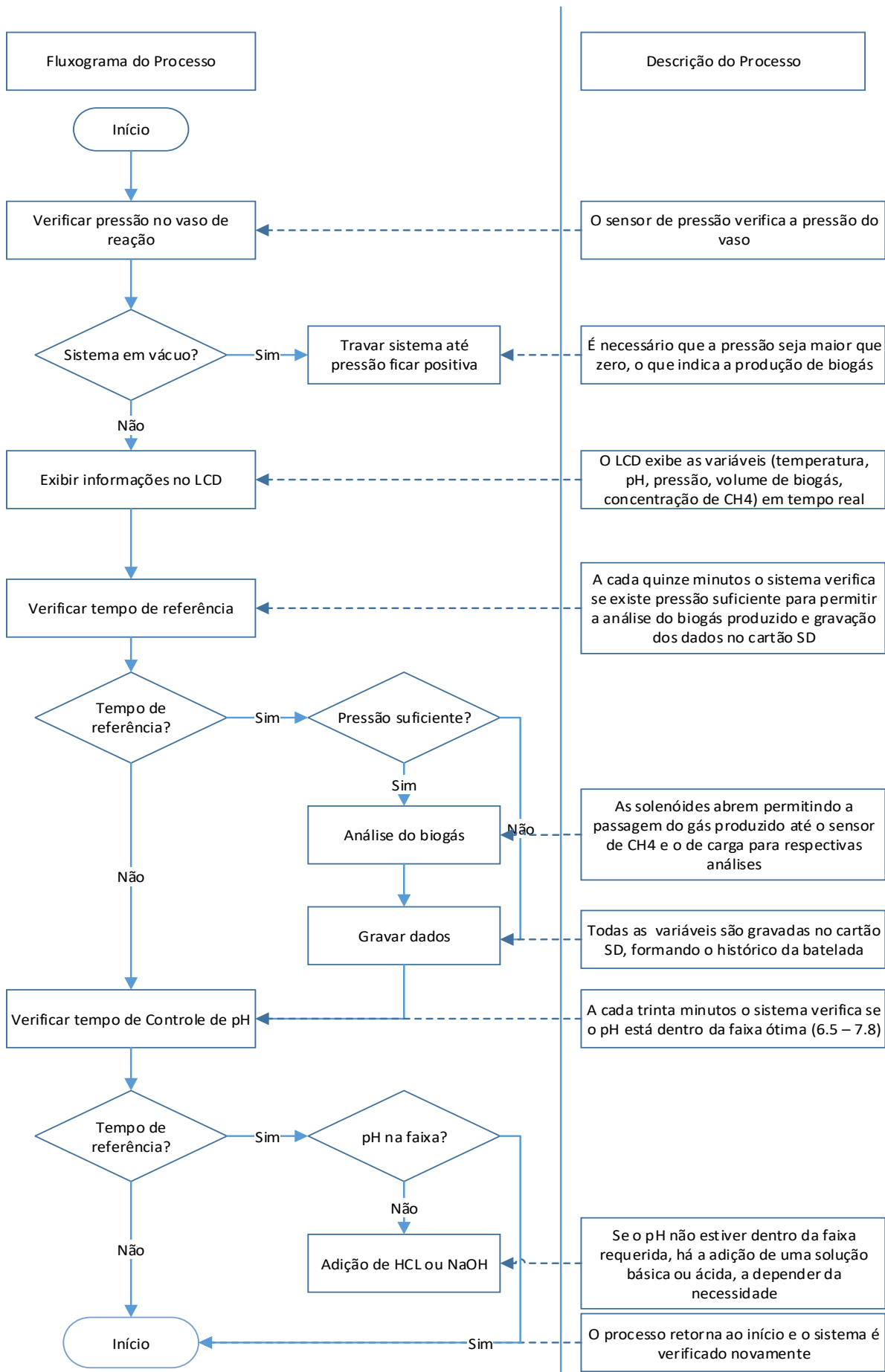


Figura 22: Fluxograma representativo das funções apresentadas no *firmware* do sistema

4.2. Monitoramento das Variáveis do Processo

Nesta seção serão abordadas as variáveis monitoradas pelo sistema construído e sua importância para o processo de DA.

4.2.1. pH

O processo de digestão anaeróbia é dividido em quatro etapas (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese), e, as bactérias presentes em cada etapa são bastante dependentes do pH do sistema (Mao *et al.*, 2015), sendo a faixa ideal para a sobrevivência das bactérias metanogênicas entre 6,5 e 7,8 (Choong *et al.*, 2017). Portanto, é necessário que o acúmulo excessivo de ácido seja evitado durante o processo, sendo a adição de cal ou do filtrado reciclado (efluente de trabalho) uma forma de evitar a redução brusca do pH durante a digestão (Kothari *et al.*, 2014).

A natureza oleosa do efluente lácteo resulta na formação de mais ácidos, assim, como pode ser visto na Figura 23, o pH inicial do sistema está na faixa 5-6. Desta forma, com o intuito de evitar uma queda brusca do pH, 1M NaOH foi utilizado como solução alcalina para estabilizá-lo, como foi feito por Streitwieser (2017).

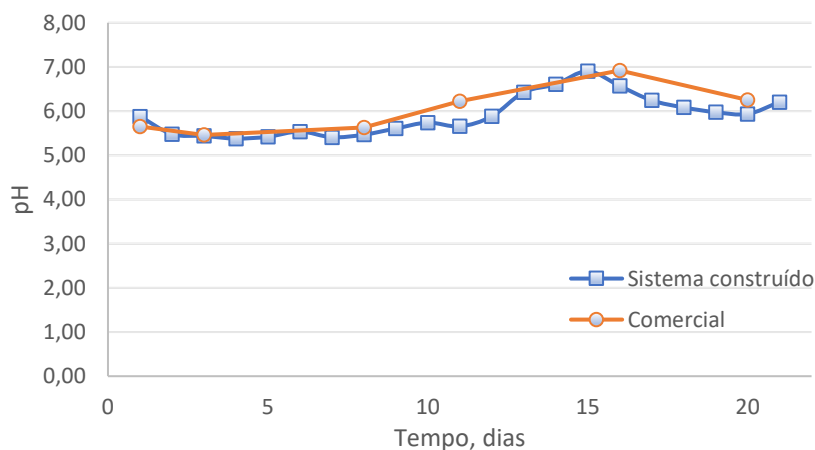


Figura 23: Variação de pH do efluente durante o período de digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto

Observando a Figura 23, pode-se perceber que até o dia 10 o pH continuou entre 5 e 6, o que pode ser interpretado como as fases iniciais da DA (hidrólise, acidogênese, acetogênese), porém a partir do dia 12, este pH começa a aumentar, chegando à faixa ideal para as bactérias metanogênicas, e, como pode ser visto na Figura 27, é neste período que realmente ocorre a produção de metano, indicando assim, a fase metanogênica do processo.

Já para demonstrar a eficiência do equipamento construído, duas vezes por semana alíquotas foram coletadas do reator, e o pH destas também foi medido em um pHmetro comercial (Spencer), e os valores foram comparados com os obtidos pelo sistema na Figura 24. É importante salientar que por ser utilizado um volume pequeno (2 L) de efluente no processo, não é possível retirar um número maior de alíquotas, o que dificulta o monitoramento e controle *offline* do processo.

4.2.2. Temperatura

A digestão anaeróbia pode ocorrer em três faixas de temperatura: psicrófila (10 – 30 °C), mesofílica (20 – 50 °C) e termofílica (35 – 75 °C) (Leite *et al.*, 2017). O processo se torna mais difícil em temperaturas abaixo de 20 °C (Bowen *et al.*, 2014), por isto, as faixas mesofílica e termofílica são as mais utilizadas nos tratamentos anaeróbios, uma vez que temperaturas mais elevadas resultam em uma maior produção de biogás (Leung e Wang, 2016). No entanto, devido a algumas desvantagens da faixa termofílica, como menor estabilidade e maior consumo de energia, os digestores mesofílicos são os mais comuns, principalmente em regiões tropicais (Mao *et al.*, 2015). Por estas razões, a faixa mesofílica foi a escolhida no presente trabalho para ser utilizada durante a DA.

Ainda assim, é importante manter a temperatura da digestão a um nível constante para que se possa encontrar uma taxa máxima de produção de gás (Kothari *et al.*, 2014). Portanto, há a necessidade do controle de temperatura durante o processo, como foi feito pelo sistema construído, como mostra a Figura 24.

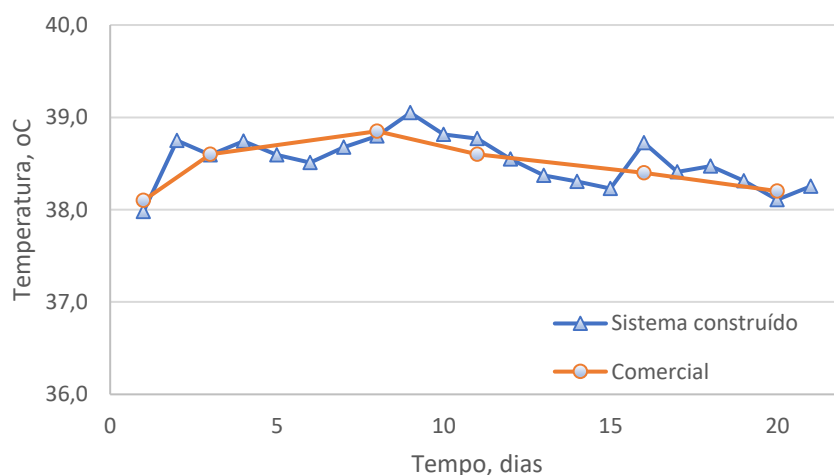


Figura 24: Temperatura do efluente durante o período de digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto

A temperatura das alíquotas coletadas do reator também foi medida fora do sistema e o resultado pode ser visto na Figura 25. Da mesma forma que ocorreu com o pH, os valores de temperatura estão bastante próximos, no entanto, é necessário lembrar que a temperatura do ambiente pode influenciar nestes resultados, o que dá mais confiabilidade ao sistema.

4.2.3. Pressão

As medidas de pressão podem ser utilizadas para determinar de forma indireta a produção de biogás no digestor através da equação ideal dos gases (Labatut *et al.*, 2011). No entanto, no presente trabalho estas foram utilizadas como artifício para permitir a passagem e permanência (20 segundos) do biogás pelo sensor de metano, e, em seguida para o aparato de medição da produção de biogás através do deslocamento de um líquido. Assim, é possível afirmar que o aumento da pressão no vaso de reação é o indício da produção de biogás, como pode ser visto na Figura 25, onde ao alcançar 0,1 KPa acontece a abertura dos solenoides e a passagem deste biogás para o vaso receptor, com conseqüentemente queda na pressão do vaso de reação.

Também pode ser visto na Figura 25 que a partir do 2º dia até meados do 5º houve uma queda da pressão que continuou baixa até o 10º dia. Isto provavelmente aconteceu por causa de uma inibição, uma vez que o pH do sistema neste período ainda estava abaixo do ideal. Porém foi apenas do no 12º dia que a produção chegou ao setpoint (0,1 KPa) e a produção reiniciou.

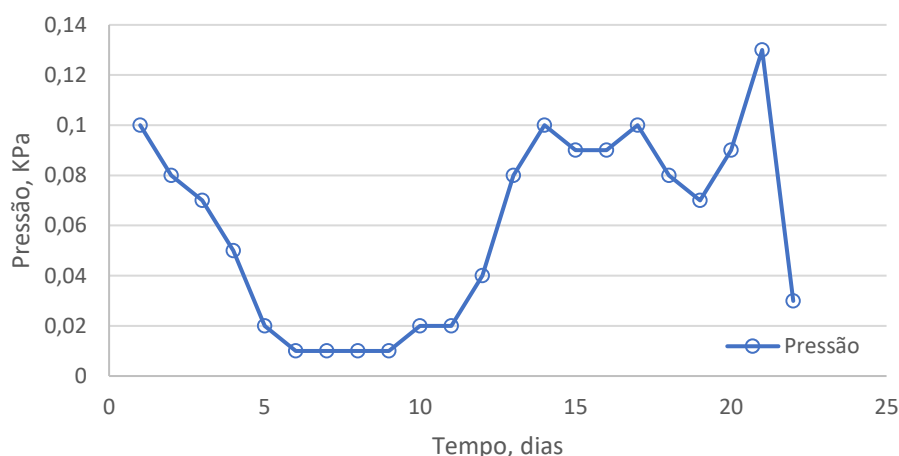


Figura 25: Perfil de pressão do sistema durante a digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto

4.2.4. Taxa de biogás e metano produzido

A taxa de produção acumulada e diária de biogás é apresentada na Figura 26. No primeiro dia, foi observado um pico de produção de biogás (1,38 mL/dia), devido à alta quantidade de DQO que poderia ser biodegradada rapidamente. No entanto, a taxa de produção caiu após este pico, e, nenhum biogás foi produzido do dia 3 ao dia 12, indicando uma aparente inibição. Esta inibição provavelmente foi causada pela alta digestibilidade do substrato que levou a produção em excesso de ácidos graxos voláteis e inibiu a etapa da metanogênese (Abudi *et al.*, 2016). Após 9 dias de auto recuperação das bactérias metanogênicas, a produção de biogás reiniciou. Na Figura 26, também pode ser visto que ao fim do processo de DA, houve uma taxa de produção acumulada de 675,2 mL.

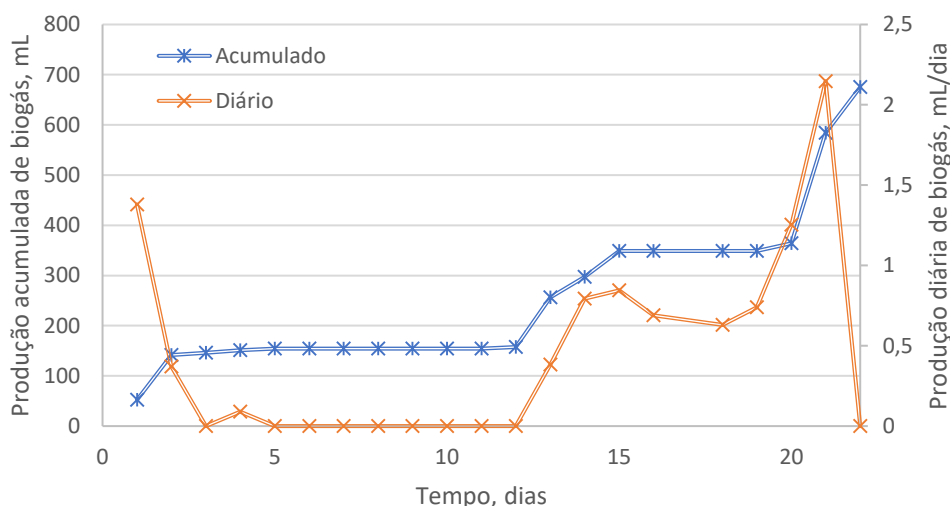


Figura 26: Taxa de biogás acumulada e diária durante o período de digestão do efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto

Já a produção diária de metano é mostrada na Figura 27, e, pode-se perceber que no 21º dia houve a maior produção de biogás (2,146 mL/dia), e conseqüentemente, como mostra a Figura 28, a maior produção de metano (21,64%). Lovato *et al.* (2016) conseguiram obter 79,1% de metano ao realizar a co-digestão do soro de queijo (sintético) com glicerina, utilizando a temperatura na faixa mesofílica ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$), o que diferencia do presente trabalho que utiliza apenas o soro de leite agroindustrial real sem adição de glicerina, o que evidenciaria a menor produção de biogás e metano.

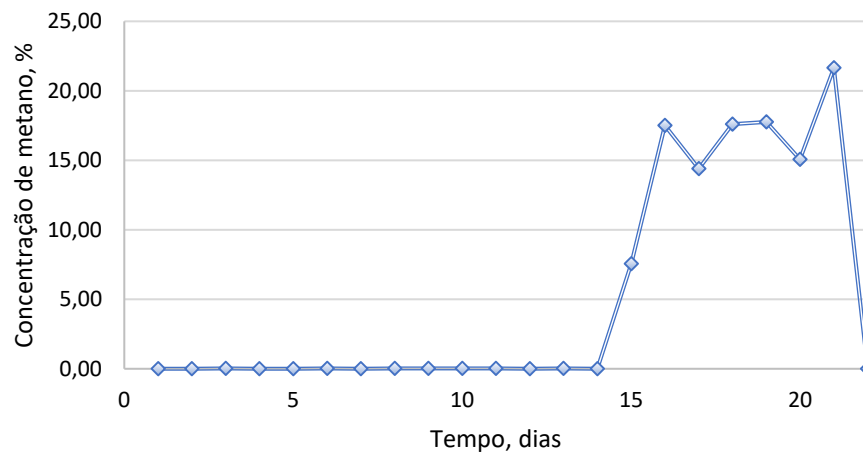


Figura 27: Concentração de metano produzido obtida pelo sensor NDIR

4.3. Análises Físico-químicas e Ecotoxicológicas do Efluente

4.3.1. Demanda química de oxigênio (DQO)

A DQO indica a quantidade de poluentes orgânicos presentes na amostra (Kumari *et al.*, 2018), sendo a concentração de DQO do efluente analisado em relação ao tempo mostrada na Figura 28. A redução da concentração de DQO durante a digestão anaeróbia foi observada, e, representa uma redução de poluentes orgânicos da mistura contendo efluente lácteo e lodo de esgoto. Ao fim dos 21 dias do período de digestão, o processo obteve uma redução de DQO de 80,1%. Em estudos semelhantes, Kumari *et al.* (2018) obtiveram uma remoção de DQO de 86,56% depois da co-digestão de efluente lácteo e esterco bovino numa faixa de temperatura mesofílica, enquanto que Lovato *et al.* (2016) conseguiram 89% de remoção durante a co-digestão do soro de queijo sintético e glicerina. Vale salientar que no estudo realizado por Kumari *et al.* (2018) foi utilizado um inóculo composto por esterco bovino, o qual contém uma diversidade microbiana distinta da utilizada no presente trabalho. Ao passo que o Lovato *et al.* (2016) trabalhou com um efluente lácteo sintético acrescido de glicerina, caracterizado por apresentar menor DQO (5000 mg.DQO/L) que o efluente lácteo real, o que poderia explicar a maior redução da DQO.

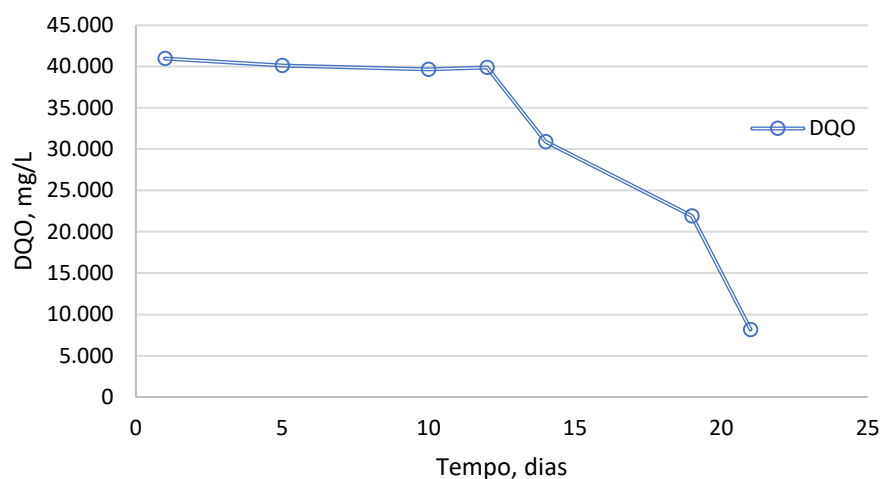


Figura 28: Concentração de DQO em relação ao tempo

4.3.2. Remoção de sólidos voláteis

A redução de sólidos voláteis é um indicador da biodegradabilidade do substrato, sendo assim importante para avaliar a eficiência do processo (Abudi *et al.*, 2016; Leung e Wang, 2016). Como pode ser visto na Figura 29, houve uma redução na concentração de sólidos voláteis ao fim do processo, sendo obtido 45,35% de remoção dos sólidos, o que indica a biodegradabilidade do substrato.

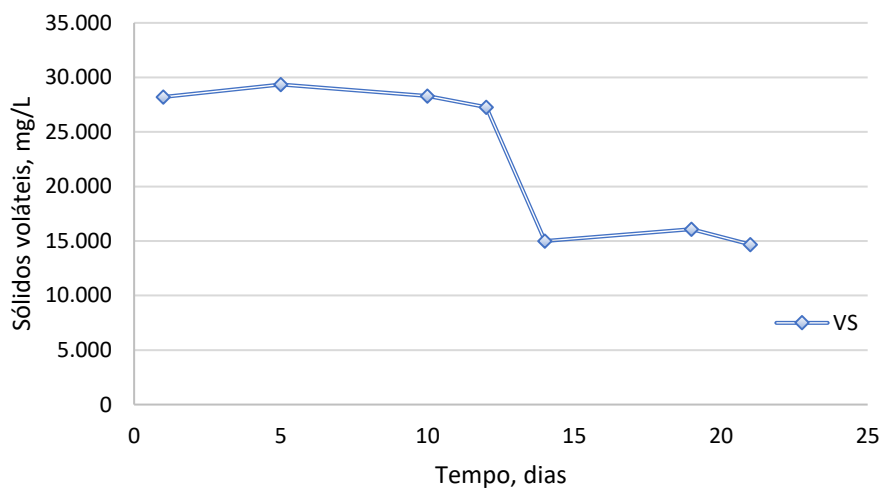


Figura 29: Concentração de sólidos voláteis do efluente

Pavi *et al.* (2017) reportaram 54,6% como a maior taxa de remoção de sólidos durante a co-digestão da fração orgânica de sólidos municipais, com restos de frutas e vegetais, porém durante a digestão separada dos mesmos, foi obtido uma menor remoção de sólidos para 17,4%

e 16%, respectivamente, o que denota um aumento da eficiência quando é realizada a co-digestão, o que não aconteceu no presente trabalho em função do mesmo utilizar apenas um substrato (mono-digestão).

4.3.3. Toxicidade

Além do biogás, o processo de digestão anaeróbia também produz um resíduo chamado digestato, o qual pode ser utilizado como biofertilizante na agricultura, porém sua aplicação direta pode ser limitada devido a presença de elementos tóxicos, como metais pesados, sais ou bactérias patogênicas (Pivato *et al.*, 2016; Stefaniuk *et al.*, 2016). Por isto existe a necessidade de realizar ensaios ecotoxicológicos para prever o impacto deste digestato no ambiente ou a necessidade de tratamentos adicionais (Tigini *et al.*, 2016).

De acordo com Cesaro *et al.* (2015), ao analisar a toxicidade usando a semente *L. sativa*, os índices de germinação abaixo de 40% indicam que o material causa a inibição das sementes, de 40 a 80% indicam uma leve inibição, enquanto que os valores de 80 a 120% não são considerados significantes e os valores acima de 120% são considerados como estímulo ao crescimento. Assim, observando a Figura 30 (a), percebe-se que o índice de germinação para o soro lácteo bruto não apresentou efeito tóxico, enquanto a Figura 30 (b) evidencia um ligeiro crescimento (10% maior) quando comparado ao controle positivo, o que evidencia a atuação do soro como indutor tanto na germinação quanto no crescimento de raiz.

Já na Figura 30 (c), percebe-se que não houve germinação para concentrações iguais ou maiores a 75% para a mistura lodo e soro lácteo (inicial), nem para concentrações iguais ou maiores a 50% do digestato (após batelada de 21 dias - final). Enquanto o índice de germinação da mistura inicial em torno dos 70% indica uma leve inibição na germinação das sementes para as concentrações de 12,5%, 25% e 50% da mistura. Porém, as concentrações de 12,5% e 25% da mistura inicial serviram como indutor ao crescimento da raiz, como pode ser visto na Figura 30 (d), ao passo que a concentração de 50% já apresentou um crescimento inferior ao do controle positivo. Esta leve inibição e mesmo o crescimento reduzido, para a concentração de 50% da mistura, pode ser explicado pela presença de substâncias tóxicas e/ou recalcitrantes no lodo de esgoto que foi utilizado como inóculo.

Ainda observando a Figura 30 (c) percebe-se que o índice de germinação para o digestato (final), nas concentrações de 12.5% e 25%, estava em torno dos 80%, o que seria caracterizado como um valor não significativo para a germinação. Porém ao observar a Figura 30 (d) nota-se

que o crescimento da raiz diminui gradativamente até a ausência de crescimento nas concentrações a partir de 50% do digestato. Este episódio pode ter acontecido pela presença de algum produto da DA que afetou o crescimento das raízes; Khanal *et al.* (2017), por exemplo, afirmam que na DA de alguns efluentes industriais como o lácteo há a geração de amônia em alta concentração, o que pode ter afetado o crescimento das raízes.

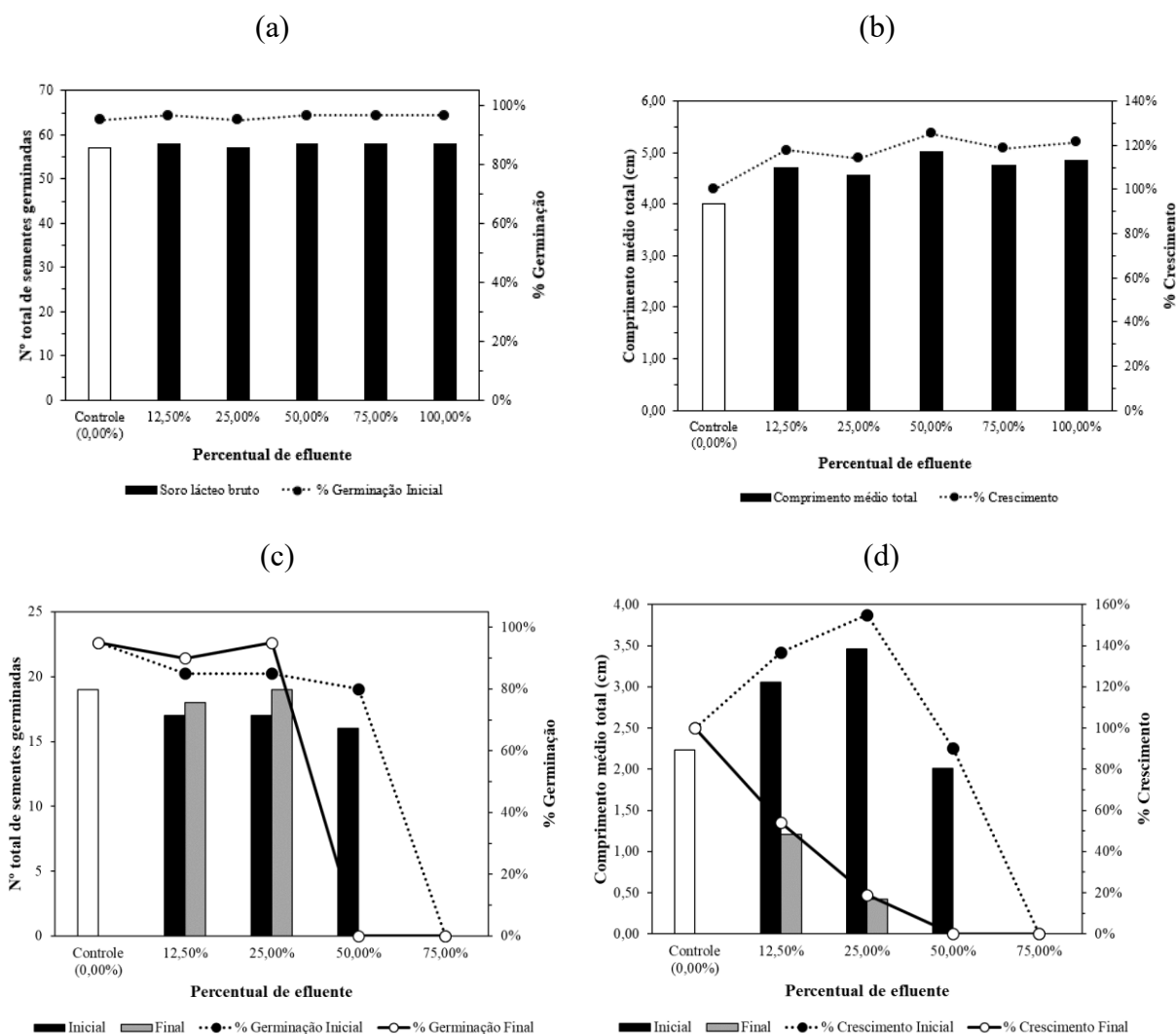


Figura 30: Índice de germinação (a) e de crescimento da raiz (b) do soro de leite bruto. Índice de germinação (c) e de crescimento da raiz (d) da mistura do efluente lácteo inoculado com lodo (inicial) e da mistura do efluente lácteo inoculado com lodo após batelada (final), em diversas concentrações

O trabalho realizado por Tigini *et al.* (2016) avaliou o digestato proveniente do esterco suíno, e afirmou que este apresenta alta toxicidade e por isto necessita de um pré-tratamento antes de seu uso como biofertilizante/biossólido. Tal resultado foi semelhante ao se estudar o efluente lácteo inoculado com lodo de esgoto, como pode ser visto na Figura 30 (c, d), onde maiores porcentagens do digestato resultaram em nenhuma germinação, indicando a necessidade de algum pré-tratamento antes de sua utilização, em grandes concentrações, como

biofertilizante/biossólido. Ao contrário do que aconteceu com o soro lácteo bruto que não apresentou toxicidade alguma (Figura 30 a,b), e por isto poderia ser utilizado diretamente como biofertilizante próximo às regiões produtoras, reduzindo a quantidade de insumos, e conseqüentemente o custo de produção. Entretanto vale salientar a necessidade de um estudo mais aprofundado e com um maior número de níveis tróficos com diferentes espécies para se avaliar a real toxicidade do efluente bruto e ainda sim seu uso em diversos cultivares reais e o comportamento do resíduo no solo.

4.4. Aspecto Econômico: Custo do Sistema AnSTBR

Esta seção expõe os custos de aquisição do sistema construído nesta pesquisa (Tabela 13) e de sistemas similares ofertados no mercado (Tabela 14). Sendo que foi atribuído maior ênfase ao valor dos equipamentos, não considerando os custos operacionais e de implantação. Todos valores apresentados são referentes ao mês de agosto de 2018.

Tabela 13: Custo do sistema automatizado

Equipamento	Descrição do Item	Valor (R\$)	Fornecedor
Sistema de Produção e Análise	Frasco Mariotte	241,00	NETLAB
	Kitasato	120,00	NETLAB
	Pisseta	11,90	NETLAB
	Tampa em nylon	150,00	XYZ
	Sensor de pressão (MPX 5050DP)	100,00	USINAINFO
	Sensor de temperatura (DS18B20)	27,90	USINAINFO
	Sensor de pH + módulo de leitura	259,80	USINAINFO
	Sensor de carga	32,00	MERCADO LIVRE
	Sensor de CH ₄ (NDIR)	1500,00	GRI
	Bomba de vácuo (diafragma)	154,76	USINAINFO
	Bombas peristálticas	138,52	USINAINFO
	Agitador magnético com aquecimento (K40-1820H)	1460,57	FORLAB
	Fonte externa (S-240-12)	47,89	MERCADO LIVRE
	Estabilizador UPSAI	64,9	MERCADO LIVRE
	Válvulas solenóides (2 vias)	180	MERCADO LIVRE
	Relé eletromagnético (SRC-05VDC-SLC)	67,8	USINAINFO
	Termostato Digital + Sensor de temp.	22,9	USINAINFO
	LEDs	25,35	USINAINFO
	Regulador de tensão (7805)	1,99	USINAINFO
	Resistores	50,00	ELET. NACIONAL
	Conexões para gás	120,00	INCOMEX
	Conectores multivias (elétrico)	90,00	NACIONAL
	Mangueiras PU (4mm)	10,00	INCOMEX

	Mangueiras de silicone (6mm)	40,00	CIT FARMA
	Base de alumínio	40,00	-
Central de Processamento	Arduino UNO	55,00	USINAINFO
	Nanoshield ADC 4-20	69,90	ELETROSHIELDS
	Nanoshield Load Cell	69,90	ELETROSHIELDS
	Nanoshield MicroSD	49,90	ELETROSHIELDS
	Nanoshield RTCMem	59,90	ELETROSHIELDS
	Base Board UNO	29,90	ELETROSHIELDS
	Cabos e terminações (elétrico)	25,00	NACIONAL
	Conectores multivias (elétrico)	60,00	NACIONAL
	Total do Sistema Automatizado (R\$)		5.376,78

Tabela 14: Custo de biorreator com analisador de gases comercial

Equipamento	Descrição do Item	Valor (R\$)	Fornecedor
Biorreator Tecnal - TEC-BIO 7,5L	Módulo de bombas peristálticas TEC-BIO-B	---	TECNAL
	Controlador CPU - TEC-BIO-C	---	TECNAL
	Banho termostaticado - TEC-BIO-T	---	TECNAL
	Vaso de reação - TEC-BIO-V	---	TECNAL
	Motor agitador e trap de espuma	---	TECNAL
	Compressor de ar	---	TECNAL
	Software de controle	---	TECNAL
Total do Biorreator			98.000,00
Analisador de Biogás - Portátil	Módulo analisador GAS3200L	28.800,00	ENGEZER
	Treinamento para uso (2 dias)	4.000,00	ENGEZER
Total do Analisador			32.800,00
Total (R\$)			130.800,00*

*Valor baseado em cotação

É possível perceber que o custo final do biorreator com analisador de gás é muito maior que o custo final do sistema construído, garantindo assim a viabilidade econômica para a construção do mesmo. Entretanto, é importante lembrar que a robustez do reator comercial possibilita uma maior eficiência e controle para o sistema anaeróbio, o que pode ser alcançado pelo sistema construído com o aprofundamento dos estudos sobre o presente reator desenvolvido.

Este valor inclusive, permite que essa tecnologia seja mais acessível a sociedade, e, que possa ser utilizada para simular em pequena escala a produção de biogás a partir de diversos efluentes, e assim, determinar as melhores condições a serem seguidas em um sistema de maior escala.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O desenvolvimento de novas tecnologias pode ser utilizado para ajudar na resolução do problema que envolve os resíduos (industrias e domésticos) e na geração de energias renováveis. Com este intuito, foi evidenciada a construção de um sistema de baixo custo, com monitoramento online, operado em reator AnSTBR (*Anaerobic Stirred Tank Batch Reactor*) para geração de biogás.

Esse sistema foi projetado e construído com sucesso, permitindo processar o substrato e realizar a aquisição dos dados gerados no processo. De tal modo, foi possível realizar o acompanhamento, em tempo real, das variáveis da fase gasosa do processo: pressão, volume de biogás gerado e concentração de metano, ao passo que também foi possível controlar as variáveis da fase líquida: temperatura e pH, em prol de uma melhor estabilidade da digestão anaeróbia.

O biorreator foi utilizado de forma eficiente para a digestão do efluente lácteo inoculado com microrganismos extraídos do lodo de esgoto. Foi constatado que após um período 504 horas de digestão, houve uma produção satisfatória de biogás, registrando um volume total de 675,2 mL.

A construção do sistema também se mostrou vantajosa quanto ao custo de aquisição, uma vez que apresentou um preço muito inferior ao convencional ofertado pelo mercado, cerca de 26 vezes menor, permitindo que essa tecnologia seja mais acessível.

No entanto, ainda se faz necessário dar continuidade às análises e a otimizar o processo, a fim de conseguir produzir um biogás com maior concentração de metano e aproveitamento energético. Desta forma, será possível substituir gradativamente as fontes mais agressivas ao ambiente e promover a universalização da energia renovável em benefício da sociedade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*, v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017.

AHMAD, A.; GHUFRAN, R.; WAHID, Z. A. Role of calcium oxide in sludge granulation and methanogenesis for the treatment of palm oil mill effluent using UASB reactor. *Journal of Hazardous Materials*, v. 198, p. 40–48, 2011.

AHMED, W. A.; AGGOUR, M.; NACIRI, M. Biogas Control: Methane Production Monitoring Using Arduino. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering*, v. 11, n. 2, p. 130–133, 2017.

AKIL, K.; JAYANTHI, S. Anaerobic sequencing batch reactors and its influencing factors : an overview. *Journal of Environmental Science and Engineering*, v. 54, n. 2, p. 317–322, 2012.

ALBURQUERQUE, J. A.; LA FUENTE, C. DE; FERRER-COSTA, A.; CARRASCO, L.; CEGARRA, J.; ABAD, M.; BERNAL, M. P. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy*, v. 40, p. 181–189, 2012.

ALEXANDRE, V. M. F.; VALENTE, A. M.; CAMMAROTA, M. C.; FREIRE, D. M. G. Performance of anaerobic bioreactor treating fish-processing plant wastewater pre-hydrolyzed with a solid enzyme pool. *Renewable Energy*, v. 36, n. 12, p. 3439–3444, 2011.

ALI, A. S.; ZANZINGER, Z.; DEBOSE, D.; STEPHENS, B. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, v. 100, p. 114–126, 2016.

ALFAKIT. Disponível em: <https://alfakit.ind.br/kit-analise-de-biogas-cod-3819/1/>. Acesso em: 07/05/2018.

ALQARALLEH, R. M.; KENNEDY, K.; DELATOLLA, R.; SARTAJ, M. Thermophilic and hyper-thermophilic co-digestion of waste activated sludge and fat, oil and grease: Evaluating and modeling methane production. *Journal of Environmental Management*, v. 183, p. 551–561, 2016.

ALVES, M. M.; PEREIRA, M. A.; SOUSA, D. Z.; CAVALEIRO, A. J.; PICAVET, M.; SMIDT, H.; STAMS, A. J. M. Waste lipids to energy: How to optimize methane production

from long-chain fatty acids (LCFA). *Microbial Biotechnology*, v. 2, n. 5, p. 538–550, 2009.

ANEEL. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em 05/05/2018.

APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC, New York: American Public Health Association; 2005.

ARDUINO. Disponível em: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. Acesso em 01/03/2018.

BERG, J.; TYMOCZKO, J.; STRYER, L. Biochemistry. 5. ed. New York: W. H. Freeman, 2002. 1514p.

BOE, K.; JOHN, D.; STEYER, J.; ANGELIDAKI, I. State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. *Water Research*, v. 44, n. 20, p. 5973–5980, 2010.

BOWEN, E. J.; DOL, J.; DAVENPORT, R. J.; READ, F. L.; CURTIS, T. P.; CURTIS, T. P. Low-temperature limitation of bioreactor sludge in anaerobic treatment of domestic wastewater. *Water Science & Technology*, p. 1004–1013, 2014.

BUDZIANOWSKI, W. M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 1148–1171, 2016.

CARRE, A.; WILLIAMSON, T. Design and validation of a low cost indoor environment quality data logger. *Energy and Buildings*, v. 158, p. 1751–1761, 2018.

CARRILLO-REYES, J.; CELIS, L. B.; ALATRISTE-MONDRAGÓN, F.; RAZO-FLORES, E. Decreasing methane production in hydrogenogenic UASB reactors fed with cheese whey. *Biomass and Bioenergy*, v. 63, p. 101–108, 2014.

CARVALHO, F.; PRAZERES, A. R.; RIVAS, J. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, v. 445–446, p. 385–396, 2013.

CHEN, W.; CAI, Q.; ZHAO, Y.; ZHENG, G.; LIANG, Y. Toxicity evaluation of pig slurry using luminescent bacteria and zebrafish. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, n. 7, p. 6856–6870, 2014.

CHEN, W.; CAI, Q.; ZHAO, Y.; ZHENG, G.; LIANG, Y. Toxicity evaluation of pig slurry using luminescent bacteria and zebrafish. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, n. 7, p. 6856–6870, 2014.

- CHERNICHARO, C. A. D. L. *Anaerobic Reactors*. 1. ed. DESA/UFMG. London: IWA Publishing, 2007. 188p.
- CHONG, S.; SEN, T. K.; KAYAALP, A.; ANG, H. M. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A State-of-the-art review. *Water Research*, v. 46, n. 11, p. 3434–3470, 2012.
- CHOONG, Y. Y.; CHOU, K. W.; NORLI, I. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, n. January, p. 2993–3006, 2017.
- CICHELO, G. C. V.; TOMMASO, G.; RIBEIRO, R. Characterization and Kinetics of the Anaerobic Treatment of Dairy Wastewaters. *Unopar Cient Ciênc Biol Saúde*, v. 15, p. 27–40, 2012.
- CIRCUITAR. Disponível em: <https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/>. Acesso em 02/03/2018.
- CRUZ-SALOMÓN, A.; MEZA-GORDILLO, R.; ROSALES-QUINTERO, A.; VENTURACANSECO, C.; LAGUNAS-RIVERA, S.; CARRASCO-CERVANTES, J. Biogas production from a native beverage vinasse using a modified UASB bioreactor. *Fuel*, v. 198, p. 170–174, 2017.
- D'AUSILIO, A. Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behavior Research Methods*, v. 44, n. 2, p. 305–313, 2012.
- DENG, L.; LIU, Y.; ZHENG, D.; WANG, L.; PU, X.; SONG, L.; WANG, Z.; LEI, Y.; CHEN, Z.; LONG, Y. Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, n. February, p. 845–851, 2017.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH, 2008. 450p.
- FAO. Food Outlook - Biannual Report on global Food Markets. Disponível em: <http://www.fao.org/3/CA0239EN/ca0239en.pdf>. Acesso em: 19/01/2019.
- FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Modern Instrumentation*, v. 1, n. 2, p. 8–20, 2012.
- FRENZEL, L. E. J. *Electronics Explained Fundamentals for engineers, technicians, and makers*. Second ed. Austin, TX, United States: Newnes, 2018.

- GARCHA, S.; VERMA, N.; BRAR, S. K. Isolation, characterization and identification of microorganisms from unorganized dairy sector wastewater and sludge samples and evaluation of their biodegradability. *Water Resources and Industry*, v. 16, n. August, p. 19–28, 2016.
- GARFÍ, M.; GELMAN, P.; COMAS, J.; CARRASCO, W.; FERRER, I. Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management*, v. 31, n. 12, p. 2584–2589, 2011.
- GERARDI, M. H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 188p.
- GRANDO, R. L.; SOUZA ANTUNE, A. M. DE; FONSECA, F. V. DA; SÁNCHEZ, A.; BARRENA, R.; FONT, X. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, n. February, p. 44–53, 2017.
- GRI. Disponível em: https://cngri.en.alibaba.com/product/60606091174-221326634/CH4_NDIR_Infrared_gas_sensor.html. Acesso em: 02/03/2018.
- GRYTA, A.; FRĄC, M.; OSZUST, K. The Application of the Biolog EcoPlate Approach in Ecotoxicological Evaluation of Dairy Sewage Sludge. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 174, n. 4, p. 1434–1443, 2014.
- GUO, J.; XU, Y. Review of Enzymatic Sludge Hydrolysis. *Bioremediation & Biodegradation*. v. 2, n. 5, 2011.
- IACOVIDOU, E.; MILLWARD-HOPKINS, J.; BUSCH, J.; PURNELL, P.; VELIS, C. A.; HAHLADAKIS, J. N.; ZWIRNER, O.; BROWN, A. A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 1279–1288, 2017.
- IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9209-pesquisa-trimestral-do-leite.html?=&t=destaques>. Acesso em 19/01/2019.
- JANKOWSKA, E.; CHWIALKOWSKA, J.; STODOLNY, M.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Effect of pH and retention time on volatile fatty acids production during mixed culture fermentation. *Bioresource Technology*, v. 190, p. 274–280, 2015.
- JÜRGENSEN, L.; EHIMEN, E. A.; BORN, J.; HOLM-NIELSEN, J. B. A combination anaerobic digestion scheme for biogas production from dairy effluent-CSTR and ABR, and biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy*, p. 1–7, 2017.

KARADAG, D.; KÖROLLU, O. E.; OZKAYA, B.; CAKMAKCI, M. A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochemistry*, v. 50, n. 2, p. 262–271, 2015.

KAYAKUTLU, G.; DAIM, T.; KUNT, M.; ALTAY, A.; SUHARTO, Y. Scenarios for regional waste management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, n. November, p. 1323–1335, 2017.

KHAN, A. A.; GAUR, R. Z.; TYAGI, V. K.; KHURSHEED, A.; LEW, B.; MEHROTRA, I.; KAZMI, A. A. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 12, p. 1232–1251, 2011.

KIM, S. J.; TRIEU-VUONG, D.; CHOI, Y.-S. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2016.

KOCH, K.; LIPPERT, T.; DREWES, J. E. The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. *Bioresource Technology*, v. 243, p. 457–463, 2017.

KOTHARI, R.; KUMAR, V.; PATHAK, V. V.; TYAGI, V. V. Sequential hydrogen and methane production with simultaneous treatment of dairy industry wastewater: Bioenergy profit approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 8, p. 4870–4879, 2016.

KOTHARI, R.; PANDEY, A. K.; KUMAR, S.; TYAGI, V. V.; TYAGI, S. K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 174–195, 2014.

KUMAR, K. V.; SRIDEVI, V.; RANI, K.; SAKUNTHALA, M.; KUMAR, C. S. A review on production of biogas , fundamentals , applications & its recent enhancing techniques. v. 57, p. 14073–14079, 2013.

KUMAR, S.; GUPTA, N.; PAKSHIRAJAN, K. Simultaneous lipid production and dairy wastewater treatment using *Rhodococcus opacus* in a batch bioreactor for potential biodiesel application. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 3, n. 3, p. 1630–1636, 2015.

LANSING, S.; MARTIN, J. F.; BOTERO, R. B.; SILVA, T. N. DA; SILVA, E. D. DA. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 12, p. 4362–4370, 2010.

LEE, D. H.; BEHERA, S. K.; KIM, J. W.; PARK, H. S. Methane production potential of

leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study. *Waste Management*, v. 29, n. 2, p. 876–882, 2009.

LEITE, W.; MAGNUS, B. S.; GUIMARÃES, L. B.; GOTTARDO, M.; BELLI FILHO, P. Feasibility of thermophilic anaerobic processes for treating waste activated sludge under low HRT and intermittent mixing. *Journal of Environmental Management*, v. 201, n. November, p. 335–344, 2017.

LENG, L.; YANG, P.; SINGH, S.; ZHUANG, H.; XU, L.; CHEN, W. A review on the bioenergetics of anaerobic microbial metabolism close to the thermodynamic limits and its implications for digestion applications. *Bioresource Technology*, n. September, 2017.

LEUNG, D. Y. C.; WANG, J. An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Green Energy*, v. 13, n. 2, p. 119–131, 2016.

LI, C.; CHAMPAGNE, P.; ANDERSON, B. C. Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermo-chemical pre-treatment. *Renewable Energy*, v. 83, p. 474–482, 2015.

LOVATO, G.; ALVARADO-MORALES, M.; KOVALOVSKI, A.; PEPRAH, M.; KOUGIAS, P. G.; RODRIGUES, J. A. D.; ANGELIDAKI, I. In-situ biogas upgrading process: Modeling and simulations aspects. *Bioresource Technology*, v. 245, p. 332–341, 2017.

LU, X.; ZHEN, G.; ESTRADA, A. L.; CHEN, M.; NI, J.; HOJO, T.; KUBOTA, K.; LI, Y. Y. Operation performance and granule characterization of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating wastewater with starch as the sole carbon source. *Bioresource Technology*, v. 180, p. 264–273, 2015.

LUO, K.; YANG, Q.; LI, X. MING; YANG, G. JING; LIU, Y.; WANG, D. BO; ZHENG, W.; ZENG, G. MING. Hydrolysis kinetics in anaerobic digestion of waste activated sludge enhanced by α -amylase. *Biochemical Engineering Journal*, v. 62, p. 17–21, 2012.

LÜTZHÖFT, H. C. H.; BOE, K.; FANG, C.; ANGELIDAKI, I. Comparison of VFA titration procedures used for monitoring the biogas process. *Water Research*, v. 54, p. 262–272, 2014.

MANI, S.; SUNDARAM, J.; DAS, K. C. Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter. *Biomass and Bioenergy*, v. 93, p. 158–167, 2016.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540–555, 2015.

- MARABA, D.; BULUR, E. Design and construction of an automated OSL reader with open source software and hardware. *Radiation Measurements*, v. 106, p. 632–637, 2017.
- MARAGKAKI, A. E.; VASILEIADIS, I.; FOUNTOULAKIS, M.; KYRIAKOU, A.; LASARIDI, K.; MANIOS, T. Improving biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge with a thermal dried mixture of food waste, cheese whey and olive mill wastewater. *Waste Management*, v. 71, p. 644–651, 2017.
- MARANZANO, B. J.; HANCOCK, B. C. Quantitative analysis of impact measurements using dynamic load cells. *Sensing and Bio-Sensing Research*, v. 7, p. 31–37, 2016.
- MAXIM INTEGRATED. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em 02/03/2018.
- METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4. ed. McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.
- MESAS-CARRASCOSA, F. J.; VERDÚ SANTANO, D.; MEROÑO, J. E.; SÁNCHEZ DE LA ORDEN, M.; GARCÍA-FERRER, A. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. *Biosystems Engineering*, v. 137, p. 73–83, 2015.
- MOLINO, A.; NANNA, F.; DING, Y.; BIKSON, B.; BRACCIO, G. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, v. 103, p. 1003–1009, 2013.
- MONSON, K. D.; ESTEVES, S. R.; GUWY, A. J.; DINSDALE, R. . *Anaerobic digestion of biodegradable Municipal Wastes: A review*. 1. ed. University of Glamorgan: SERC, 2007.
- MOUKAZIS, I.; PELLERA, F.-M.; GIDARAKOS, E. Slaughterhouse by-products treatment using anaerobic digestion. *Waste Management*, 2017.
- MOTOROLA. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5186/MOTOROLA/MPX5050DP.html>. Acesso em 23/04/2018.
- NGUYEN, D.; GADHAMSHETTY, V.; NITAYAVARDHANA, S.; KUMAR, S. Bioresource Technology Automatic process control in anaerobic digestion technology : A critical review. *Bioresource Technology*, 2015.
- NIZAMI, A. S.; SHAHZAD, K.; REHAN, M.; OUDA, O. K. M.; KHAN, M. Z.; ISMAIL, I. M. I.; ALMEELBI, T.; BASAHI, J. M.; DEMIRBAS, A. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. *Applied Energy*, v. 186, p. 189–196, 2016.

- NUNES, J.A. Tratamento biológico de águas residuárias. 3. ed. Aracaju: Gráfica Editora J. Andrade, 2012. 277p.
- OWAMAH, H. I.; DAHUNSI, S. O.; ORANUSI, U. S.; ALFA, M. I. Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste Management*, v. 34, n. 4, p. 747–752, 2014.
- PEARCE, J. M. Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware. *Science*, v. 337, n. 6100, p. 1303–1304, 2012.
- PILLI, S.; MORE, T.; YAN, S.; DAYAL, R.; SURAMPALLI, R. Y. Anaerobic digestion of thermal pre-treated sludge at different solids concentrations e Computation of mass-energy balance and greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, v. 157, p. 250–261, 2015.
- PIVATO, A.; VANIN, S.; RAGA, R.; LAVAGNOLO, M. C.; BARAUSSE, A.; RIEPLE, A.; LAURENT, A.; COSSU, R. Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment. *Waste Management*, v. 49, p. 378–389, 2016.
- QASIM, W.; MANE, A. V. Characterization and treatment of selected food industrial effluents by coagulation and adsorption techniques. *Water Resources and Industry*, v. 4, p. 1–12, 2013.
- RAJESH BANU, J.; ANANDAN, S.; KALIAPPAN, S.; YEOM, I. T. Treatment of dairy wastewater using anaerobic and solar photocatalytic methods. *Solar Energy*, v. 82, n. 9, p. 812–819, 2008.
- RAPOSO, F.; LA RUBIA, M. A. DE; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 861–877, 2012.
- RASIT, N.; IDRIS, A.; HARUN, R.; WAN AB KARIM GHANI, W. A. Effects of lipid inhibition on biogas production of anaerobic digestion from oily effluents and sludges: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 351–358, 2015.
- RICHIEDEI, D.; TREVISANI, A. Shaper-Based Filters for the compensation of the load cell response in dynamic mass measurement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 98, p. 281–291, 2018.
- RIGGIO, V.; COMINO, E.; ROSSO, M. Energy production from anaerobic co-digestion

- processing of cow slurry, olive pomace and apple pulp. *Renewable Energy*, v. 83, p. 1043–1049, 2015.
- RIZVI, H.; AHMAD, N.; ABBAS, F.; BUKHARI, I. H.; YASAR, A.; ALI, S.; YASMEEN, T.; RIAZ, M. Start-up of UASB reactors treating municipal wastewater and effect of temperature/sludge age and hydraulic retention time (HRT) on its performance. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 8, n. 6, p. 780–786, 2015.
- ROSA, T. R.; BETIM, F. S.; FERREIRA, R. DE Q. Development and application of a labmade apparatus using open-source “arduino” hardware for the electrochemical pretreatment of boron-doped diamond electrodes. *Electrochimica Acta*, v. 231, p. 185–189, 2017.
- SAHU, P.; SAHU, S.; PUROHIT, R.; WARUDKAR, V.; ARISUTHA, S.; SURESH, S. Automation in Biogas Plant for Enhancement of Efficiency and Safety. *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 4, p. 5351–5356, 2017.
- SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009.
- SANTANA, R. S. DE S.; PRETTI, A. A.; MORENO, J. G.; DACANAL, G. C.; TOMMASO, G.; RIBEIRO, R. Effect of biomass configuration on the behavior of pilot-scale anaerobic batch reactors treating dairy wastewater. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 106, p. 80–87, 2016.
- SANTOS, I. F. S. DOS; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, v. 126, p. 504–514, 2016.
- SPLT. Disponível em: http://aeph.com.br/upload/produtos/celulas-de-carga/116554373_2.pdf. Acesso em: 03/03/2018.
- STEFANIUK, M.; OLESZCZUK, P.; BARTMIŃSKI, P. Chemical and ecotoxicological evaluation of biochar produced from residues of biogas production. *Journal of Hazardous Materials*, v. 318, p. 417–424, 2016.
- TAN, Q.; TANG, L.; YANG, M.; XUE, C.; ZHANG, W. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 74, p. 103–108, 2015.
- TIGINI, V.; FRANCHINO, M.; BONA, F.; VARESE, G. C. Is digestate safe? A study on its

- ecotoxicity and environmental risk on a pig manure. *Science of the Total Environment*, v. 551–552, p. 127–132, 2016.
- VALLADÃO, A. B. G.; TORRES, A. G.; FREIRE, D. M. G.; CAMMAROTA, M. C. Profiles of fatty acids and triacylglycerols and their influence on the anaerobic biodegradability of effluents from poultry slaughterhouse. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 7043–7050, 2011.
- VAVILIN, V. A.; FERNANDEZ, B.; PALATSI, J.; FLOTATS, X. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, v. 28, n. 6, p. 939–951, 2008.
- VENKITESHWARAN, K.; BOCHER, B.; MAKI, J.; ZITOMER, D. Relating Anaerobic Digestion Microbial Community and Process Function. *Microbiology Insights*, v. 8, n. S2, p. 37–44, 2015.
- VIDAL, J.; HUILIÑIR, C.; SALAZAR, R. Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectro-Fenton processes. *Electrochimica Acta*, v. 210, p. 163–170, 2016.
- VILAR, D. S.; CARVALHO, G. O.; PUPO, M. M. S.; AGUIAR, M. M.; TORRES, N. H.; AMÉRICO, J. H. P.; CAVALCANTI, E. B.; EGUILUZ, K. I. B.; SALAZAR-BANDA, G. R.; LEITE, M. S.; FERREIRA, L. F. R. Vinasse degradation using *Pleurotus sajor-caju* in a combined biological – Electrochemical oxidation treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 192, p. 287–296, 2018.
- WANG, J.; FENG, L.; TANG, X.; BENTLEY, Y.; HÖÖK, M. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections : A supply-side analysis. *Futures*, n. 2015, 2016.
- WANG, Z.; WANG, W.; ZHANG, X.; ZHANG, G. Digestion of thermally hydrolyzed sewage sludge by anaerobic sequencing batch reactor. *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, n. 2–3, p. 799–803, 2009.
- WARD, A. J.; BRUNI, E.; LYKKEGAARD, M. K.; FEILBERG, A.; ADAMSEN, A. P. S.; JENSEN, A. P.; POULSEN, A. K. Real time monitoring of a biogas digester with gas chromatography , near-infrared spectroscopy , and membrane-inlet mass spectrometry. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 5, p. 4098–4103, 2011.
- WATARI, T.; MAI, T. C.; TANIKAWA, D.; HIRAKATA, Y.; HATAMOTO, M.; SYUTSUBO, K.; FUKUDA, M.; NGUYEN, N. B.; YAMAGUCHI, T. Performance evaluation

of the pilot scale upflow anaerobic sludge blanket – Downflow hanging sponge system for natural rubber processing wastewater treatment in South Vietnam. *Bioresource Technology*, v. 237, p. 204–212, 2017.

WEILAND, P. Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 85, n. 4, p. 849–860, 2010.

YANG, Z. H.; XU, R.; ZHENG, Y.; CHEN, T.; ZHAO, L. J.; LI, M. Characterization of extracellular polymeric substances and microbial diversity in anaerobic co-digestion reactor treated sewage sludge with fat, oil, grease. *Bioresource Technology*, v. 212, p. 164–173, 2016.

YENIGÜN, O.; DEMIREL, B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, 2013.

YU, D.; LIU, J.; SUI, Q.; WEI, Y. Biogas-pH automation control strategy for optimizing organic loading rate of anaerobic membrane bioreactor treating high COD wastewater. *Bioresource Technology*, 2015.

ZAMAN, A. U. A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 41–50, 2016.

ZARFL, C.; SCHMID, P.; SCHMID, U. A Novel Miniaturised Sensor for Combined Static and Dynamic Pressure Measurements in Harsh Environments. *Procedia Engineering*, v. 168, p. 782–785, 2016.

ZEB, B. S.; MAHMOOD, Q.; PERVEZ, A. Characteristics and Performance of Anaerobic Wastewater Treatment (A Review). *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, v. 35, n. 1, p. 217–232, 2013.

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, L.; VRIEZE, J. DE; HENDRICKX, T. L. G.; WEI, W.; TEMMINK, H.; RIJNAARTS, H.; ZEEMAN, G. Anaerobic treatment of raw domestic wastewater in a UASB-digester at 10 °C and microbial community dynamics. *Chemical Engineering Journal*, v. 334, p. 2088–2097, 2018.

ZINADINI, S.; VATANPOUR, V.; ZINATIZADEH, A. A.; RAHIMI, M.; RAHIMI, Z.; KIAN, M. Preparation and characterization of antifouling graphene oxide/polyethersulfone ultrafiltration membrane: Application in MBR for dairy wastewater treatment. *Journal of Water*

Apêndice A

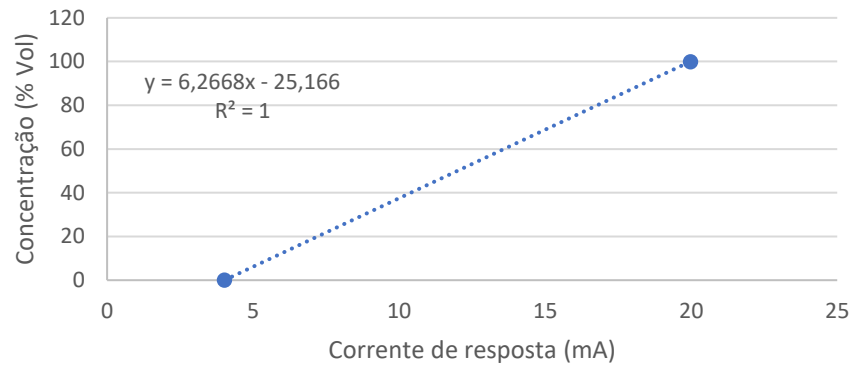


Figura 31: Modelo de regressão linear da curva de calibração para CH₄

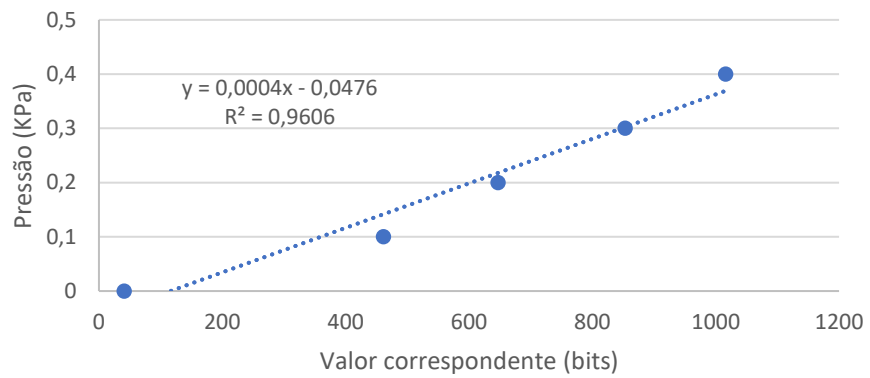


Figura 32: Modelo de regressão linear da curva de calibração para sensor de pressão

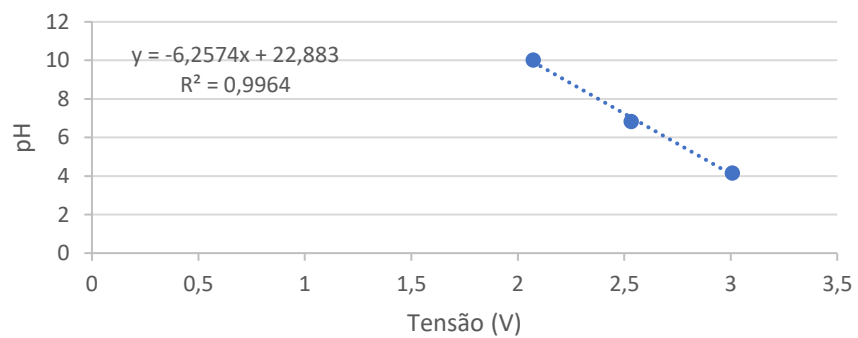


Figura 33: Modelo de regressão linear da curva de calibração para sensor de pH

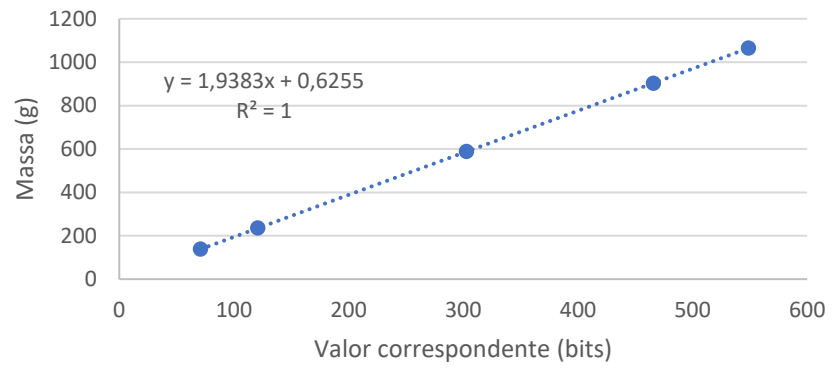


Figura 34: Modelo de regressão linear da curva de calibração do sensor de massa

Apêndice B

```
// Bibliotecas carregadas

#include <DS1307.h>
#include <DS3231.h>
#include <Nanoshield_RTC.h>
#include <stdio.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Nanoshield_ADC.h>
#include <Nanoshield_LoadCell.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

// Limpa o LCD e ajusta as posições onde imprimir (início)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Define o endereço do LCD para um display
de 20 chars e 4 linhas

// Declara variáveis para endereçamento da placa de leitura 4-20mA do sensor de CH4
Nanoshield_ADC adc;

// Declara variáveis para endereçamento da placa do sensor de temperatura - no pino
16 (a 4.7K resistor is necessary)
#define ONE_WIRE_BUS 16
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // Setup a oneWire instance to communicate
with any OneWire devices (not just Maxim/Dallas temperature ICs)

// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Prepara a célula de carga para 5000g com sensibilidade de 1.05v/v // Load cell
with 1kg capacity and 3mV/V sensitivity
Nanoshield_LoadCell loadCell (5000, 1.05);

// Prepara o RTCMem
Nanoshield_RTC rtc;

// Declara variáveis para controle de envio de dados
// #define Freq_envioSD 180000
#define Freq_envioSD 900000
// #define Freq_controlepH 240000
#define Freq_controlepH 1500000
#define tempo_mistura 600000 // tempo de homogeneização e cinética da reação

// Declara variáveis para envio de dados para MicroSD
unsigned long referencia_TempoSD = 0; // variável auxiliar (referência contador
"millis()")
unsigned long ult_envioSD = 0; // variável auxiliar (última leitura de
tempo para envio para o SD)
unsigned long ult_enviopH = 0;
unsigned long referencia_TempopH = 0;

// Declara variáveis de máximo/mínimo na geração de biogás e volume de água
```

```

//float Press_Max = 0.5;      // bar
//int Volume_Min =           // cm3

// Declara variáveis do RTCMem
#define BUFFER_SIZE 50
char buf[BUFFER_SIZE];
char date[11];
char time[9];

// Declara variáveis para acionamento dos LEDs
#define LEB 0                // pino do Led de estabilização de biogás (azul)
#define LPN 1                // pino do Led de pressão negativa (vermelho)

// Declara variáveis para acionamento do sistema de amostragem do biogás,
liga/desliga bomba e abre/fecha solenoides
#define pump_gas 3          // pino do Rele K1 da bomba a vácuo de amostragem do
biogás
#define valvula_s4 2        // pino do Rele K2 da solenoide S4 de amostragem do
biogas (digital)
#define valvula_s3 5        // pino do Rele K3 da solenoide S3 de amostragem do
biogas (digital)
#define valvula_s2 6        // pino do Rele K4 da solenoide S2 de amostragem do
biogas (digital)
#define valvula_s1 7        // pino do Rele K5 da solenoide S1 de amostragem do
biogas (digital)

// Declara variáveis para acionamento das bombas peristálticas dosadoras
#define pump_base 9         // pino do Rele K6 da bomba dosadora de baixo (base)
#define pump_acido 10      // pino do Rele K7 da bomba dosadora de cima (ácido)

// Variável para exportação dos dados do SD
int enquiry;
int endOfTransmission = 0x04;

// Variáveis para diferença de massa
float leitura_ini_massa = 0;
float perda_1 = 0;

//Variaveis Globais Leitura de PH

#define analogInPin A0
#define NUMREADINGS 20

int readings[NUMREADINGS];          // qtde de amostras
int index = 0;                      // índice da leitura atual
float total = 0;                    // total móvel
float average = 0;                  // média

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Configuração do LCD (Liquid Crystal Display)
  lcd.begin();                      // Inicia o LCD
  //lcd.backlight();                 // Liga a luz de fundo e imprime a mensagem

  //Imprime a logo do biorreator no LCD

```

```

// logoLCD_LM();

// Seta os pinos das bombas dosadoras como de saída
pinMode(pump_base, OUTPUT);
digitalWrite(pump_base, HIGH);          // Garantir rele da bomba de base como
desligado ao iniciar
pinMode(pump_acido, OUTPUT);
digitalWrite(pump_acido, HIGH);        // Garantir rele da bomba de ácido como
desligado ao iniciar

// Seta os pinos analógicos A2 e A3 como de saída (digital)
pinMode (A2, OUTPUT);
pinMode (A3, OUTPUT);

// Seta os pinos digitais como de saída e garante reles como desligado ao iniciar

pinMode(pump_gas, OUTPUT);
pinMode(valvula_s4, OUTPUT);
pinMode(valvula_s3, OUTPUT);
pinMode(valvula_s2, OUTPUT);
pinMode(valvula_s1, OUTPUT);
digitalWrite(pump_gas, LOW);           // Garantir rele da bomba de gas como
desligado ao iniciar
digitalWrite(valvula_s4, HIGH);        // Garantir rele da solenoide s4 como
desligado ao iniciar
digitalWrite(valvula_s3, HIGH);        // Garantir rele da solenoide s3 como
desligado ao iniciar
digitalWrite(valvula_s2, HIGH);        // Garantir rele da solenoide s2 como
desligado ao iniciar
digitalWrite(valvula_s1, HIGH);        // Garantir rele da solenoide s1 como
desligado ao iniciar

// Initialize RTC
if (!rtc.begin()) {
  lcd.print(F("Failed starting RTC"));
  while (true);
};

// Configuração de funcionamento do sensor de temperatura
sensors.begin();

// Configuração do funcionamento do canal 4-20mA com ganho de resolução (ADC)
adc.begin();
adc.setGain(GAIN_TWO);                // Adjust gain to two (2.048V range) to get maximum
resolution for 4-20mA range

// Configuração do funcionamento do Load Cell
loadCell.begin();
while (!loadCell.updated());
loadCell.setZero();

// Data e hora
/* rtc.read();
  sprintf(date, "%04d-%02d-%02d", rtc.getYear(), rtc.getMonth(), rtc.getDay());
  sprintf(time, "%02d:%02d:%02d",      rtc.getHours(),      rtc.getMinutes(),
rtc.getSeconds());*/
tempo_atual();
lcd.print(date);
lcd.setCursor(12, 0);
lcd.print(time);
lcd.setCursor(0, 2);

```

```

lcd.print(F("BIORREATOR ANAEROBIO"));
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(F("_____"));
delay(10000);

// MicroSD
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(F("Iniciando SD Card..."));

if (!SD.begin(4)) {
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(F("Inicializacao falhou"));
  while (1);
}
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(F("Inicializacao feita!"));

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(F("_____"));
delay(3000);
for (int i = 0; i < NUMREADINGS; i++)
  readings[i] = 0; // inicializa todas as leituras com 0
}

////////////////////////////////////
////
void loop()
{
  // Atualiza hora e data
  tempo_atual();

  // Verifica se o sistema entrou em vácuo e bloqueia até a pressão ficar positiva
  verifica_Vacu0();

  // Exibe no LCD as variáveis do último registro
  imprimeLCD_RESULT();

  // Testa se é tempo de realizar leituras e registrar dados
  referencia_TempoSD = millis(); // lê a referência de tempo
  if (referencia_TempoSD >= (ult_envioSD + Freq_envioSD))
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("15 minutos "));
    delay(1000);

    envia_Dados(); // Função que envia dados para MicroSD
    ult_envioSD = referencia_TempoSD; // Manipula a variável de tempo de reenvio

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("_____"));
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(F("Registrando dados..."));
    lcd.setCursor(5, 2);
    lcd.print(F("SD Card..."));
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(F("_____"));
    delay(5000);
  }
}

```

```

    injeta_Gas();                // Injeta biogás no analisador
    delay(2000);                // Aguarda as leituras dos sensores após
estabilizarem
    perda_1 = le_Balanca();
}

// Testa se é tempo de realizar o controle de pH no sistema
referencia_TempopH = millis(); // lê a referência de tempo

if (referencia_TempopH >= (ult_enviopH + Freq_controlepH) or (referencia_TempopH
>= ult_enviopH + tempo_mistura))
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("_____"));
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(F("Ambiente do Substrato"));
    lcd.setCursor(3, 2);
    lcd.print(F("(BASE - ACIDO)"));
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(F("_____"));
    delay(3000);

    controla_pH();                // Controla o pH
    ult_enviopH = referencia_TempopH; // Manipula a variável de tempo de reenvio
}

// Verifica se existe recepção de dados pela serial
if (Serial.available() > 0) {
    enquiry = Serial.read();
    if (enquiry == 0x05 ) { // verifica se é o caracter enquiry
        delay(1000);
        int comando = Serial.read();
        switch (comando) {
            case 0x31:
                // Esporta leitura atual
                break;
            case 0x32:
                // Exporta dados da memória SD
                lcd.clear();
                lcd.setCursor(0, 0);
                lcd.print(F("_____"));
                lcd.setCursor(0, 1);
                lcd.print(F("Exportando dados..."));
                lcd.setCursor(5, 2);
                lcd.print(F("SD Card..."));
                lcd.setCursor(0, 3);
                lcd.print(F("_____"));
                ExportaDadosSD();
                break;
            case 0x33:
                // Apaga dados da memória SD

                break;
        }
    }
}
}

```

```

}

////////////////////////////////////
void tempo_atual()
{
    rtc.read();

    // Print time in the serial port
    sprintf(date, "%04d-%02d-%02d", rtc.getYear(), rtc.getMonth(), rtc.getDay());
    sprintf(time, "%02d:%02d:%02d", rtc.getHours(), rtc.getMinutes(),
rtc.getSeconds());

    // Wait for next second
    delay(1000);
}
////////////////////////////////////
void aciona_Buzzer() // Função que aciona o Buzzer
{
    // Declara variáveis para o Buzzer
    int Buzzer = 17; // pino ao qual o Módulo buzzer está conectado
    pinMode(Buzzer, OUTPUT); // seta o pino como saída

    digitalWrite (Buzzer, HIGH); // sintaxe: (pino, valor);
    delay(500);
    digitalWrite (Buzzer, LOW);
    delay (4000);
}

////////////////////////////////////
float le_Press() // Função que realiza a leitura de pressão no sistema
{
    // Declara variáveis para o sensor de pressão no sistema
    float pinoPress = A1; // pino de leitura do sensor de pressão (analógico)
    float valorLido_Press; // variável que recebe o valor lido do sensor
    float pressao_Linha; // pressão na linha do sistema (calculada)

    // Realiza leitura de pressão no sistema
    valorLido_Press = analogRead (pinoPress);
    pressao_Linha = (0.0006 * valorLido_Press) - 0.0112;
    // pressao_Linha = (0.0004 * valorLido_Press) - 0.0476;
    /* if (pressao_Linha < 0)
    {
        pressao_Linha = 0;
    } */
    return pressao_Linha;
}
////////////////////////////////////
void verifica_Vacu() // Função que verifica se existe vácuo no sistema
{
    // Testa pressão na linha e verifica se o sistema está em vácuo
    while (le_Press() < 0.01)
    {
        alerta_Press();
        // Imprime mensagem no LCD
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(F("*****"));
        lcd.setCursor(7, 1);
        lcd.print(F("ATENCAO!"));
        lcd.setCursor(2, 2);
    }
}

```



```

    lcd.print (F("SISTEMA EM VACUO!"));
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(F("*****"));
    digitalWrite (LPN, HIGH);
    aciona_Buzzer();
    digitalWrite(17, LOW);
}
}

////////////////////////////////////
float le_Temperatura()          // Função que realiza a leitura da temperatura no
sistema
{
    float temperatura;

    sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperature readings
    temperatura = (sensors.getTempCByIndex(0));

    return temperatura;
}

////////////////////////////////////
float le_pH()                  // Função que realiza a leitura do pH no sistema
{
    /* const int analogInPin = A0;
    int sensorValue = 0;
    float pHvalue; */

    total -= readings[index];          // subtrair a última leitura
    readings[index] = analogRead(analogInPin); // ler do sensor
    // float pH = analogRead(analogInPin);
    //Serial.print (pH);
    //Serial.print (" ");
    total += readings[index];          // adicionar leitura ao total
    index = (index + 1);               // avançar ao próximo índice

    if (index >= NUMREADINGS)         // se estiver no fim do vetor...
    index = 0;                         // ..meia-volta ao início

    average = total / NUMREADINGS;    // calcular a média
    // Serial.print("MEDIA:");
    // Serial.println(average);       // enviá-la ao computador (em forma
ASCII)
    float PHvoltage = (average * 5.0) / 1024;
    // float pHVol=((analogRead(analogInPin))*5.0)/1024;
    // float PHvalue = -5.3367*PHvoltage+28.891;
    // float PHvalue = -5.3367*PHvoltage+28.891+3; // Adicionado um delta=3 para
aumentar o valor do pH
    float PHvalue = -6.2574 * PHvoltage + 22.883;
    if (PHvalue < 0)
    {
        PHvalue = 0;
    }
    if (PHvalue > 14)
    {
        PHvalue = 14;
    }

    return PHvalue;
}
}

```

```

////////////////////////////////////
void controla_pH()          // Função que controla o pH no sistema
{
  // Declara variáveis necessárias para controle de pH
  int setPoint_pH = 7;
  float delta_mais_pH = 0.8;      //valor
  float delta_menos_pH = 0.5;

  // Realiza controle do pH
  if (le_pH() < (setPoint_pH - delta_menos_pH) or le_pH() > (setPoint_pH +
delta_mais_pH))
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1, 0);
    lcd.print(F("CONTROLANDO pH ..."));

    if (le_pH() < (setPoint_pH - delta_menos_pH))      // pH baixo
    {
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(F("Adicionando BASE ..."));
      delay(5000);
      digitalWrite(pump_base, LOW);                    // Aciona a bomba dosadora (invertido
para LOW por causa do relê)
      delay(300);
      digitalWrite(pump_base, HIGH);                   // Desliga a bomba dosadora (invetido
para HIGH por causa do relê)
    }

    if (le_pH() > (setPoint_pH + delta_mais_pH))      // pH alto
    {
      lcd.setCursor(0, 2);
      lcd.print(F("Adicionando ACIDO..."));
      digitalWrite(pump_acido, LOW);                   // Aciona a bomba dosadora (invertido
para LOW por causa do relê)
      delay(300);
      digitalWrite(pump_acido, HIGH);                  // Desliga a bomba dosadora (invetido
para HIGH por causa do relê)
    }
  }
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print(F("Aguarde misturar..."));
  delay(5000);
}

////////////////////////////////////
void imprimeLCD_RESULT()   // Função que imprime no LCD os resultados dos
parâmetros analisados
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(4, 0);
  lcd.print (F("INFORMACOES"));
  lcd.setCursor(9, 1);
  lcd.print (F("DO"));
  lcd.setCursor(6, 2);
  lcd.print (F("SISTEMA"));
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print (F("*****"));
  delay(2500);
}

```

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(F("Temperat. ="));
lcd.setCursor(12, 0);
lcd.print(le_Temperatura(), 2);
lcd.setCursor(18, 0);
lcd.print(F("C"));

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(F("Pressao ="));
lcd.setCursor(11, 2);
lcd.print(le_Press(), 2);
lcd.setCursor(16, 2);
lcd.print(F("kPa"));
delay(5000);

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(F("Metano(CH4)="));
lcd.setCursor(14, 0);
lcd.print(le_Sensor_CH4(), 2);
lcd.print(F("%"));

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(F("Volume ="));
lcd.setCursor(10, 2);
// lcd.print(le_Balanca(),2);
lcd.print(perda_1, 2);
lcd.setCursor(17, 2);
lcd.print(F("cm3"));
delay(5000);

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print (F("pH ="));
lcd.setCursor(6, 0);
lcd.print (le_pH(), 2);

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(F("Agitacao ="));
lcd.setCursor(12, 2);
lcd.print("300 rpm");
delay(5000);

}
//////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void envia_Dados() // Função para enviar dados para o MicroSD
{
// Declara variáveis
File myFile;

float pH = le_pH();
float Prs = le_Press();
float Vol = perda_1;
// float Vol = le_Balanca();
float Temp = le_Temperatura();

```

```

float CH4 = le_Sensor_CH4();
// sprintf(date, "%04d-%02d-%02d", rtc.getYear(), rtc.getMonth(), rtc.getDay());
//      sprintf(time, "%02d:%02d:%02d",   rtc.getHours(),   rtc.getMinutes(),
rtc.getSeconds());

/**/ MicroSD
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(F("Checando SD Card..."));

  if (!SD.begin(4))
  {
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(F("Inicializacao falhou"));
  while (1);
  }
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print(F("Inicializacao feita!"));

  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print(F("_____"));
  delay(3000);

*/

// open the file. note that only one file can be open at a time, so you have to
close this one before opening another.
myFile = SD.open("logianny.txt", FILE_WRITE);

// if the file opened okay, write to it:
if (myFile) {

  myFile.print(date);
  myFile.print(",");
  myFile.print(time);
  myFile.print(",");
  // myFile.print("pH =");
  myFile.print(pH);
  myFile.print(",");
  // myFile.print("Prs =");
  myFile.print(Prs);
  myFile.print(",");
  // myFile.print("Temp=");
  myFile.print(Temp);
  myFile.print(",");
  // myFile.print("Vol=");
  myFile.print(Vol);
  myFile.print(",");
  // myFile.print("CH4=");
  myFile.print(CH4);
  myFile.println();

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(F("Dados gravados"));
  //delay(1000);

  // close the file:
  myFile.close();
  lcd.setCursor(0, 1);

```

```

    lcd.print(F("Arquivo fechado"));
    delay(1000);
}

else {
    // if the file didn't open, print an error:
    aciona_Buzzer();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("*****"));
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(F("ERRO ABRINDO ARQUIVO"));
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print(F("Insira o SD Card..."));
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print(F("*****"));
    delay(5000);
}

/* // re-open the file for reading:
myFile = SD.open("test.txt");
if (myFile) {
    // Serial.println("test.txt:");

    // read from the file until there's nothing else in it:
    while (myFile.available()) {
        // Serial.write(myFile.read());
    }
    // close the file:
    myFile.close();
} else {
    // if the file didn't open, print an error:
    // Serial.println("error opening test.txt");
}*/
}

//////////////////////////////////
void injeta_Gas()          // Função que injeta biogás no analisador
{
    // Ajusta as válvulas para funcionamento da injeção de biogás

    // Testa pressão na linha e admite amostra de biogás
    if (le_Press() >= 0.1)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(F("_____"));
        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print(F("Equalizando linha..."));
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print(F("_____"));
        delay(1000);
        digitalWrite(valvula_s1, LOW);      // Abre a solenoide S1b
        delay(2000);
        digitalWrite(valvula_s2, LOW);      // Abre a solenoide S2b
        delay(5000);
        verifica_Vacuo();

        do {

```

```

delay(500);
if (le_Press() >= -0.02 and le_Press() <= 0.15)
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(F("_____"));
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print(F("Estabiliz. sensor..."));
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print(F("_____"));
  delay(1000);
  digitalWrite(valvula_s2, HIGH);      // Fecha a solenoide S2b
  delay(2000);
  digitalWrite(pump_gas, HIGH);      // Liga a bomba a vácuo
  delay(500);
  digitalWrite(pump_gas, LOW);      // Desliga a bomba a vácuo
  delay(50);
  digitalWrite(valvula_s1, HIGH);    // Fecha a solenoide S1b
  delay(50);
  digitalWrite(LEB, HIGH);          // Tempo de estabilização do sensor
  delay(20000);
  digitalWrite(LEB, LOW);
  delay(50);
  digitalWrite(valvula_s1, LOW);    // Abre a solenoide S1b
  delay(2000);
  digitalWrite(valvula_s2, LOW);    // Abre a solenoide S2b
  delay(5000);
}
}
while (le_Press() > 0.1);

/* lcd.clear();
  lcd.print(F("_____"));
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print(F("Limpeza sensor CH4.."));
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print(F("_____"));
  delay(1000); */
digitalWrite(valvula_s1, HIGH);      // Fecha a solenoide S1b
delay(100);
digitalWrite(valvula_s2, HIGH);      // Fecha a solenoide S2b
delay(1000);
// purga_Gas();                      // Limpa a célula do analisador
}
delay(100);
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////
void alerta_Press()
{
  if (le_Press() < -0.05)
  {
    aciona_Buzzer();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("*****"));
    lcd.setCursor(2, 1);
    lcd.print(F("PRESSAO CRITICA"));
    lcd.setCursor(1, 2);
    lcd.print(F("ABORTAR BATELADA!!!"));
    lcd.setCursor(0, 3);
  }
}

```

```

lcd.print(F("*****"));
delay(5000);

do {
  digitalWrite(valvula_s1, LOW);          // Abre a solenoide S1b
  //digitalWrite(valvula_s2, LOW);       // Abre a solenoide S2b
  digitalWrite(valvula_s3, LOW);        // Abre a solenoide S3a
  delay(3000);
  digitalWrite(valvula_s1, HIGH);       // Fecha a solenoide S1b
  //digitalWrite(valvula_s2, HIGH);     // Fecha a solenoide S2b
  digitalWrite(valvula_s3, HIGH);      // Fecha a solenoide S3a
}
while (le_Press() < -0.02);
}
}

////////////////////////////////////
float le_Sensor_CH4()                // Função que realiza a leitura da concentração de
metano
{
  // Declara variáveis para acionamento do sensor de metano (ADC4to20mA)
#define channel_A3 3
  float valorLido;                    // variável que recebe o valor do sensor
  float concentra_CH4;                // concentração de metano na célula (calculada)

  // Realiza leitura da concentração de CH4
  valorLido = adc.read4to20mA(channel_A3);
  concentra_CH4 = (6.2448 * valorLido) - 24.979; // Aplica a curva de calibração
para determinar a concentração de CH4
  if (concentra_CH4 < 0)                // Evita o registro de concentração
negativa (imprecisão)
  {
    concentra_CH4 = 0;
  }
  return concentra_CH4;
}

////////////////////////////////////
float le_Balanca()                    // Função que realiza a leitura da balança
{
  // Declara variáveis para o load cell
  int valorlido_loadcell;
  float volume_Balanca;
  float leitura_atual;
  float perda_massa;

  // Realiza leitura da massa na balança
  valorlido_loadcell = loadCell.getWeight();
  leitura_atual = 1.9472 * valorlido_loadcell + 1.101;
  // return valorlido_loadcell;

  // leitura_atual = valorlido_loadcell;
  perda_massa = leitura_ini_massa - leitura_atual;
  leitura_ini_massa = leitura_atual;

  if (perda_massa < 0)
  {
    perda_massa = 0;
  }

  return perda_massa;
}

```

```

/*volume_Balanca = valorlido_loadcell / 1.2712;
   return volume_Balanca;
   if (volume_Balanca < 0)
   {
   volume_Balanca = 0;
   }*/
}

////////////////////////////////////
void purga_Gas() // Função que realiza uma purga do gás injetado no
analizador
{
  delay(100);
  digitalWrite(valvula_s3, LOW); // Aciona a válvula S3b (relê invertido)
  delay(2000);
  digitalWrite(valvula_s4, LOW); // Aciona a válvula S4b (relê invertido)
  delay(2000);
  digitalWrite(pump_gas, HIGH); // Aciona a bomba a vácuo
  delay(10000);
  digitalWrite(pump_gas, LOW); // Desliga a bomba a vácuo
  delay(100);
  digitalWrite(valvula_s3, HIGH); // Desliga a válvula S3b (relê invertido)
  delay(100);
  digitalWrite(valvula_s4, HIGH); // Desliga a válvula S4b (relê invertido)
  delay(50);
}

////////////////////////////////////
void ExportaDadosSD() { // Função que exporta os dados do SD

  //criar um objeto File para manipular um arquivo
  File myFile;
  String linha;

  // Abri SD para leitura
  myFile = SD.open("logianny.txt");
  if (myFile) {
    //Conteudo de logianny.txt;

    // Le todo o arquivo...
    while (myFile.available()) {
      // Escreve byte a byte
      Serial.write(myFile.read());
    }

    // Espera por um segundo
    delay(1000);
    // Sinaliza Fim de Transmissão (End of Transmission - EOT ( Caracter (eot) da
tabela ASCII))
    Serial.write(0x04);
    Serial.write(0x0a);

    //Finalizado, fecha-se o arquivo
    myFile.close();
  }
  else {
    // Se deu erro acima, aqui tambem dara.
    Serial.println("Nao pude abrir o arquivo.");
  }
}
}

```