

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM
BIOENERGIA – NÍVEL DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL DE
MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS POR MEIO DE SENSORES
ELETRÔNICOS E ARDUINO**

GUILHERME CUNHA PRINCIVAL

TOLEDO – PR - BRASIL

Agosto de 2016

GUILHERME CUNHA PRINCIVAL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL DE
MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS POR MEIO DE SENSORES
ELETRÔNICOS E ARDUINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Bioenergia, área de concentração em **Biocombustíveis**.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

TOLEDO – PR – BRASIL

Agosto de 2016

Catálogo na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Unioeste – SBU

Princival, Guilherme Cunha

P957d Desenvolvimento de um sistema computacional de monitoramento da produção do biogás por meio de sensores eletrônicos e arduino. / Guilherme Cunha Princival. – Toledo, 2016.

79 f.

Orientador: Profº Drº Samuel Nelson Melegari de Souza.
Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Toledo, 2016.

1. Biogás. 2. Digestão anaeróbia. 3. Arduino (Controlador programável). I. Souza, Samuel Nelson Melegari de. II. Título.

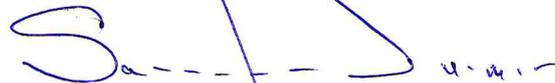
CDD 20. ed. – 665.7

Sandra Regina Mendonça CRB – 9/1090

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por GUILHERME
CUNHA PRINCIVAL perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em
Bioenergia em 09 de setembro de 2016

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Orientador



Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti
Membro



Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira
Membro

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL DE MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS POR MEIO DE SENSORES ELETRÔNICOS E ARDUINO

AUTOR: GUILHERME CUNHA PRINCIVAL

ORIENTADOR: PROF. DR. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA.

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Bioenergia; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Rua da Faculdade, 645; CEP: 85903-000 - Toledo - PR, Brasil, defendida em setembro de 2016. 79 p.

RESUMO

O biogás, entendido como uma fonte alternativa de energia, é constituído por uma mistura de gases essencialmente metano (CH_4) e por dióxido de carbono (CO_2). Esta pesquisa teve como objetivo caracterizar o biogás por meio de um sistema computacional (hardware e software), levando em conta os dois principais gases de sua composição, possibilitando análise *in situ*, de forma *online* e contínua, sem a intervenção humana no processo. Para tal, foi desenvolvido um experimento utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, alimentada com dados de um sensor que utiliza a tecnologia de espectroscopia de infravermelho não dispersivo (NDIR). Os resultados apontam que o sistema desenvolvido foi eficiente, sendo possível o monitoramento da concentração de CO_2 e CH_4 , por meio de gráficos gerados em tempo real. Além disso, foi possível analisar a temperatura interna do reator anaeróbio através de um sensor integrado ao sistema de monitoramento, que demonstra sua escalabilidade, uma característica desejável em sistemas computacionais. Pôde-se concluir, também, que o sistema detecta os primeiros indícios de uma instabilidade no processo de biodigestão, permitindo respostas aceitáveis no estabelecimento de contramedidas para sua compensação.

Palavras-chave: Biogás. Biodigestão anaeróbia. Caracterização do biogás. Sistema de monitoramento. Arduino.

DEVELOPMENT OF A MONITORING COMPUTER SYSTEM BIOGAS PRODUCTION FOR SENSORS AND ELECTRONIC MEDIA ARDUINO

AUTHOR: GUILHERME CUNHA PRINCIVAL

SUPERVISOR: PROF. DR. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA.

Master Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; Western Paraná State University; Rua da Faculdade, 645; CEP: 85903-000 - Toledo - PR, Brazil, September of 2016. 79p.

ABSTRACT

Biogas is known as an alternative source of energy, comprises essentially a mixture of methane gas (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). This study aimed to characterize the biogas through a computer system (hardware and software), taking into account the two main gas composition, allowing in situ analysis, online and continuously, without human intervention in the process. For this, an experiment was conducted using electronic prototyping platform Arduino, which is fed with data from a sensor that uses non-dispersive infrared spectroscopy technology (NDIR). The results show that the system was efficient, once it is possible to monitor the concentration of CO₂ and CH₄ through real-time generated graphics. Moreover, it was possible to analyze the internal temperature of the anaerobic reactor through an integrated sensor to the monitoring system, which demonstrates its scalability, a desirable feature in computer systems. It was concluded also that the system detects the first signs of instability in the biodigestion process, allowing acceptable answers to establish countermeasures for its compensation.

Palavras-chave: Biogas. Anaerobic biodigestion. Characterization of biogas. Monitoring system. Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	9
Figura 2.2 - Modelos de biodigestores.	15
Figura 2.3 - Biodigestor modelo Marinha ou Canadense	16
Figura 2.4 - Exemplo de espectros de absorção.	24
Figura 3.1 - Módulo MH-Z92 Dual Gás CO ₂ /CH ₄	26
Figura 3.2 - Esquema de funcionamento do Sensor NDIR.....	27
Figura 3.3 - Bomba de diafragma e bateria	28
Figura 3.4 - Esquema de ligação do kit bomba de diafragma e filtros	28
Figura 3.5 - Termômetro Digital DS18B20	30
Figura 3.6 - Arduino Uno	31
Figura 3.7 – Fluxo de dados do sistema.....	33
Figura 3.8 – Esquema de ligação entre biodigestor e módulo de análise	34
Figura 3.9 – Biodigestor construído e Sistema de Monitoramento	36
Figura 4.1 - Montagem dos dispositivos no painel elétrico de comando	37
Figura 4.2 – Esquema de conexão Arduino e sensor MHZ-92	38
Figura 4.3 – Lista de Comandos (sensor MH-Z92).....	39
Figura 4.4 – Exemplo de Requisição e Resposta da concentração de CO ₂ (sensor MHZ-92)	39
Figura 4.5 – Trecho de código utilizado para comunicação e requisição de dados entre Arduino e MH-Z92.....	40
Figura 4.6 - Módulo <i>Micro</i> SD Storage Board.....	40
Figura 4.7 - Módulo RTC 3231	41
Figura 4.8 - Interface gráfica do sistema de monitoramento.....	42
Figura 4.9 – Relação Temperatura Ambiente X Temperatura Reator	43
Figura 4.10 – Gráfico gerado pelo sistema no primeiro dia de coleta.....	435
Figura 4.11 – Gráfico gerado pelo sistema no segundo dia de coleta.....	436
Figura 4.12 – Gráfico gerado pelo sistema no terceiro dia de coleta.....	437
Figura 4.13 – Gráfico gerado pelo sistema no terceiro dia de coleta.....	438

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição básica do biogás	18
Tabela 2.2 - Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás ..	19
Tabela 2.3 - Equivalência por m ³ de biogás	19
Tabela 2.4 - Equivalência energética de 1 m ³ de biogás comparado a outras fontes de energia.....	20
Tabela 3.1 - Especificações Técnicas do Arduino Uno	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	INTRODUÇÃO	4
2.2	FUNDAMENTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	5
2.3	FATORES AMBIENTAIS QUE AFETAM O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIO	9
2.4	BIODIGESTORES	12
2.5	BIOGÁS.....	16
2.6	MONITORAMENTO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	20
2.7	TECNOLOGIA DE INFRAVERMELHO NÃO DISPERSIVO (NDIR)	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	MÓDULO DE MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	25
3.1.1	KIT BOMBA E FILTROS PARA SENSOR MH-Z92	27
3.1.2	TERMÔMETRO DIGITAL DS18B20	29
3.1.3	PLACA ARDUINO UNO	30
3.2	FLUXO DE DADOS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO	33
3.3	ENSAIO DE BIODIGESTÃO	33
3.4	COLETA DE DADOS.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	MONTAGEM E CONFIGURAÇÃO DO MÓDULO DE MONITORAMENTO ..	37
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	41
4.3	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DO BIODIGESTOR.....	42
4.4	CONCENTRAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	52
	APÊNDICES	58
	APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE COMPLETO E COMENTADO, DO SKETCH UTILIZADO NO ARDUINO	59
	APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE (C#) COMPLETO E COMENTADO, DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	62
	APÊNDICE C - RELAÇÃO TEMPERATURA AMBIENTE X TEMPERATURA REATOR	67
	APÊNDICE D - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO PRIMEIRO DIA DE COLETA.....	68
	APÊNDICE E - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO SEGUNDO DIA DE COLETA.....	69

APÊNDICE F - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO TERCEIRO DIA DE COLETA.....	70
APÊNDICE G - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO QUARTO DIA DE COLETA.....	71

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o estilo de vida das civilizações sofreu mudanças estimuladas pelo crescimento econômico e pela produção de energia que acontece predominantemente a partir de combustíveis fósseis. Porém, de acordo com LEITE & LEAL (2007), a instabilidade no preço internacional do petróleo e a perspectiva de desabastecimento despertou no mundo a necessidade de fomento de fontes alternativas de energia. Para MARQUES (2012), tais fontes, particularmente o biogás, subproduto de processos que envolvem a digestão de matéria orgânica oriunda de biomassa, constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui significativamente para a solução dos problemas ambientais, pois reduz potencialmente os impactos da fonte poluidora.

O biogás é constituído de uma mistura de gases onde o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) estão em maiores proporções. Seu potencial energético existe em função da quantidade de metano contida no gás, que determina o seu poder calorífico. A proporção de cada gás que o constitui depende de vários fatores, entre eles o tipo de digestor e o substrato utilizado. Para que ele possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico (SALOMON, 2007).

Diante disso, o objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver um sistema computacional (*hardware e software*), por meio de sensores que utilizam a tecnologia de espectroscopia de infravermelho (NDIR), para o monitoramento da composição do biogás de forma contínua e *in situ*, determinando a concentração dos principais gases (CH_4 e CO_2).

A problemática que norteou o desenvolvimento deste projeto foi a seguinte: é possível analisar a qualidade de biogás, por meio de sensores eletrônicos, de modo a permitir tempos de resposta aceitáveis que possibilitem a tomada de medidas corretivas em sistemas de produção de biogás?

A hipótese é que, com a instalação do sistema, seja possível reduzir o tempo de obtenção de resultados da composição do biogás, uma vez que a análise dos dados é contínua e, também, reduzir os custos na coleta de amostras, dispensando a necessidade de um técnico para isso.

Espera-se, que o desenvolvimento desta pesquisa possa contribuir com o avanço das investigações referentes à qualidade do biogás, constituindo, assim, uma importante ferramenta para:

- Avaliar a concentração de CH₄ no biogás, bem como seu poder calorífico, viabilizando ou não sua destinação como combustível em motores ou turbinas; determinando, assim, seu real potencial na geração de energia elétrica, por exemplo;
- Permitir testes com diferentes substratos, determinando seu tempo exato de maturação para o início da produção do biogás, o tempo que perdura sua produção, bem como sua concentração de metano;
- Avaliar o processo de produção do biogás viabilizando as tomadas de decisão para medidas como substituição do substrato digerido, quando a concentração de metano diminuir drasticamente, ou sua relação com a temperatura no interior do biodigestor;
- Permitir a tomada de medidas corretivas no sistema de produção, uma vez que os dados coletados serão apresentados ao operador em tempo real.

No intuito de organização deste trabalho, apresenta-se, no capítulo 2, a revisão de literatura que discute o estado da arte dos sistemas de biodigestão anaeróbia, os fatores ambientais que afetam o processo de biodigestão, os tipos de biodigestores e o monitoramento da biodigestão anaeróbia, destacando a importância de monitorar o processo de digestão, a escolha dos parâmetros para monitorar e controlar o processo, apresentando metodologias utilizadas por alguns autores para esse fim.

Os materiais e métodos são apresentados no capítulo 3, descrevendo os equipamentos utilizados para montar o módulo de monitoramento da produção de biogás, suas conexões e configuração, bem como o ensaio da biodigestão e o processo de coleta de dados.

Na sequência, capítulo 4, apresenta-se os resultados e a discussão dos dados coletados, iniciando com a montagem e configuração do módulo de monitoramento, o desenvolvimento do sistema supervisor, responsável pela apresentação dos gráficos e tabelas contendo a concentração de CO₂ (dióxido de

carbono) e CH₄ (metano) em razão da temperatura interna do reator, durante o ensaio da biodigestão anaeróbia. A concentração dos gases produzidos e a temperatura do biodigestor são analisados de acordo com a literatura estudada.

As considerações finais apontam que o sistema de monitoramento proposto foi eficiente, representando uma alternativa simples e de baixo custo operacional e permitindo o acompanhamento *online* de alguns parâmetros como a temperatura de operação do reator e a concentração dos principais gases que compõem o biogás produzido, possibilitando a tomada de medidas corretivas a qualquer momento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A predominância de combustíveis fósseis que dominam a matriz energética mundial levou o mundo ao crescimento econômico e possibilitou mudanças no estilo de vida das civilizações, sobretudo nas grandes consumidoras de energia. Entretanto, a perspectiva de desabastecimento e o preço internacional do petróleo em constante instabilidade e historicamente em ascensão, despertou no mundo a necessidade de fomento de fontes alternativas de energia (LEITE & LEAL 2007).

Segundo MARQUES (2012), a biomassa merece destaque dentre as fontes de energias renováveis pela quantidade disponível e por ser a mais sustentável. De acordo com STAISS & PEREIRA (2001) designa-se como biomassa, a massa total de matéria orgânica que se acumula em um espaço vital. Desta maneira, pertencem à biomassa todas as plantas e todos os animais incluindo os seus resíduos bem como, as matérias orgânicas transformadas como resíduos de indústria transformadora da madeira e indústria alimentar. Estes elementos primários de biomassa podem ser transformados pelas diferentes tecnologias de conversão em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos e, finalmente, nos produtos finais energias térmica, mecânica e elétrica. Assim, entende-se que biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia.

No Brasil, o maior exemplo de utilização da biomassa é na forma de biocombustível. De acordo com COELHO (2005), o PROÁLCOOL (Programa Nacional do Alcool), foi responsável pelo crescimento do setor sucroalcooleiro e promoveu o desenvolvimento tecnológico de processos industriais e da agroindústria.

A transformação da biomassa em biocombustível ocorre através da biodigestão anaeróbia, como veremos a seguir.

2.2 Fundamentos da biodigestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico natural, que ocorre na ausência de oxigênio molecular livre, no qual um consórcio de diferentes espécies de microrganismos interagem para promover a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples como metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas, (CHERNICHARO, 1997). Pesquisas científicas relacionadas ao tema se iniciaram no século XVII, quando o belga Jan Baptista Van Helmont relacionou a decomposição do material orgânico com a geração de gases inflamáveis, reafirmada posteriormente pelo italiano Count Alessandro Volta, que estabeleceu que a quantidade de material orgânico decomposto estava relacionada à quantidade de gás inflamável produzido. Em 1930, Buswell identificou as bactérias anaeróbias e as condições necessárias para a geração de metano (VERMA, 2002).

A digestão anaeróbia é considerada uma opção viável para o tratamento biológico dos resíduos agroindustriais, pois demanda pequena área e é de construção simples. Além de permitir a redução do potencial poluidor, configura-se como um importante vetor energético capaz de fornecer os benefícios da energia e a produção de biofertilizante (CAMPOS, 2004).

No processo de biodigestão anaeróbia é necessário uma sequência de reações biológicas para um funcionamento estável e, conseqüentemente, de um equilíbrio harmônico entre os diferentes estágios. O início da operação de um reator está diretamente relacionado à sequência bioquímica do processo de transformação do material orgânico (MORAES, 2000). A maior parte do material orgânico presente no substrato é convertida em biogás (cerca de 50 a 90%), que é removido da fase líquida e deixado no reator de forma gasosa, onde apenas uma pequena parte desse material é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a constituir o lodo do sistema (ARRUDA, 2004).

Em razão da enorme complexidade de caminhos metabólicos disponíveis para as bactérias anaeróbias, o processo de digestão envolve uma cadeia sequencial de percursos metabólicos com ação conjugada e coordenada por diferentes grupos tróficos e de bactérias anaeróbias. O conhecimento dos

aspectos fundamentais da tecnologia do tratamento anaeróbio, especialmente da bioquímica e da microbiota envolvida, é essencial para o projeto correto de biodigestão e aplicação desses sistemas (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Conforme CHERNICHARO (1997) e STEIL (2001), os quatro estágios do processo de biodigestão anaeróbia podem ser definidos assim:

Hidrólise: é a fase inicial do processo anaeróbio onde os compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídeos particulados necessitam ser convertidos em materiais dissolvidos mais simples, a fim de possibilitar a penetração das paredes celulares das bactérias fermentativas. Sua velocidade se dá em função de fatores como o pH, temperatura, composição e tamanho das partículas do substrato bem como as concentrações dos produtos intermediários do processo (BOUALLAGUI *et al*, 2004).

Acidogênese: É o estágio denominado de fase ácida, devido à grande quantidade de ácidos formados além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas (GOMES, 2006). Tais bactérias consomem os compostos orgânicos simples, produto oriundo da hidrólise e transforma-os em ácidos orgânicos (propionato, butirato, etc). Estes produtos metabólicos serão à base do consumo das bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas, segundo CHERNICHARO (1997).

Os organismos acidogênicos preferem um ambiente levemente ácido (pH 4.5 - 5.5) e são menos sensíveis a mudanças repentinas no substrato (Ostrem (2004) citado por (COSTA, 2011)).

Acetogênese: As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos ácidos orgânicos em substrato para os microrganismos metanogênicos. Em uma digestão anaeróbia estável, transformam os produtos da acidogênese em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Tais bactérias são chamadas de bactérias sintróficas acetogênicas, e são assim denominadas porque a sua existência depende da atividade de organismos consumidores de hidrogênio (CHERNICHARO, 2010).

As bactérias acetogênicas e metanogênicas, portanto, vivem em simbiose. As arqueas metanogênicas apenas sobrevivem com concentrações mais altas de

hidrogênio dissolvido e acetato disponível. Elas constantemente removem os produtos do metabolismo das bactérias acetogênicas mantendo a concentração de hidrogênio dissolvido em níveis baixos, favoráveis às bactérias acetogênicas (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Metanogênese: Na metanogênese, a formação de metano se dá em condições anaeróbias estritas, atuando microrganismos denominados metanogênicos, classificados como dentro do domínio *archaea*, um grupo verdadeiramente reconhecido como distinto das bactérias típicas (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

As arqueas metanogênicas atuam sobre os produtos gerados nas etapas anteriores, sendo que as arqueas metanogênicas acetoclásticas são responsáveis pela produção de aproximadamente 70% de metano do processo, tendo como fonte de energia os ácidos acéticos para produzir metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂) a partir dos seus metabolismos e as rotas das arqueas metanogênicas hidrogenotróficas produzem cerca de 30% do metano do processo usando hidrogênio (H₂) como fonte de energia e gás carbônico (CO₂) como acceptor de elétrons, resultando maior liberação de energia e formando metano (CH₄) a partir dessa reação (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006).

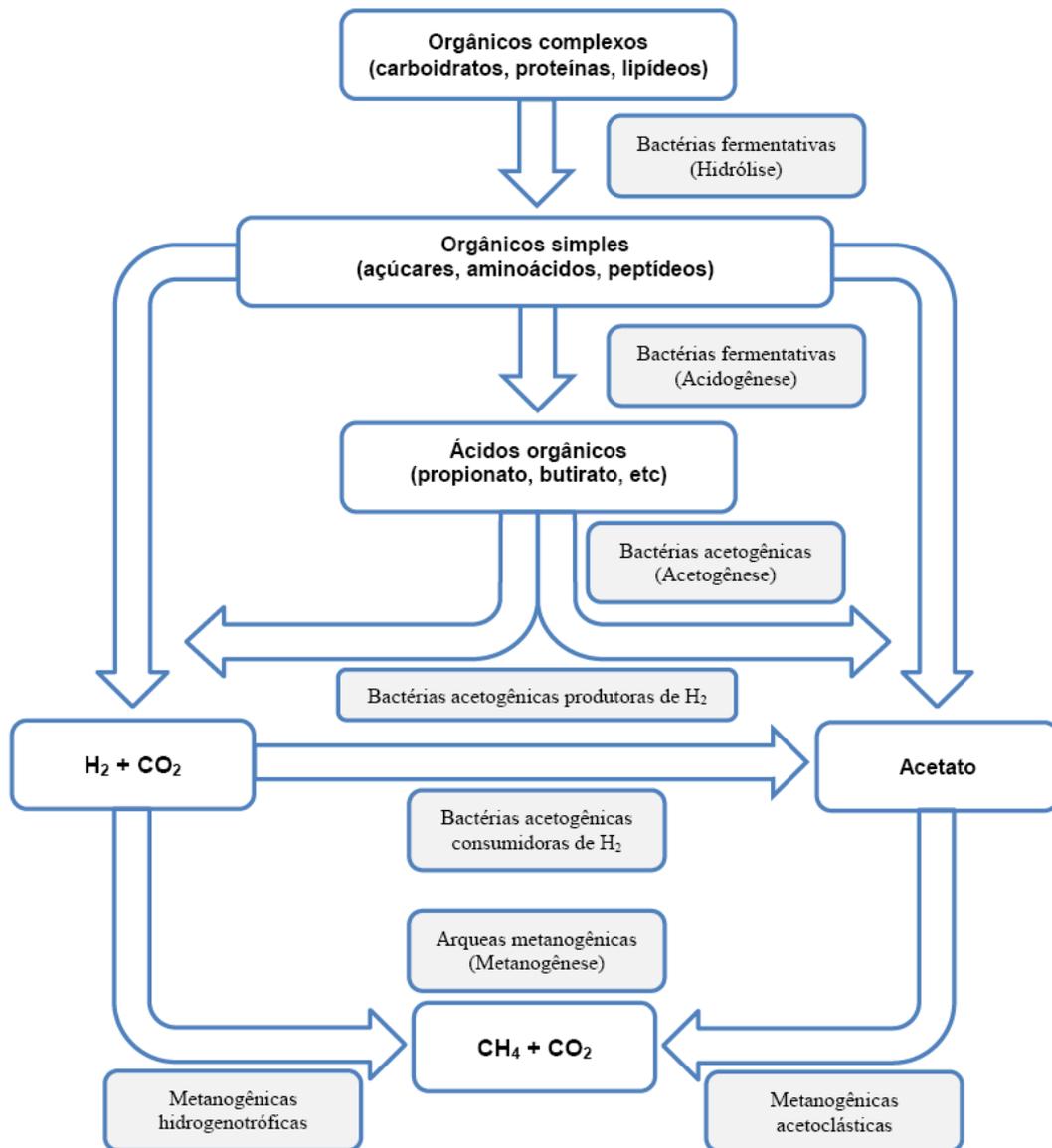
Cada uma dessas etapas deve ser mantida em equilíbrio dinâmico a fim de que a metanogênese ocorra à taxa máxima. A manutenção desse equilíbrio está relacionada à natureza do substrato e à intensidade e disponibilidade de H₂, pois este deve ser continuamente removido do meio para assegurar que a produção de ácido acético não seja interrompida ou diminua drasticamente. Essa condição é essencial para que a fermentação metanogênica prevaleça, sendo H₂ e ácido acético, os mais importantes, responsáveis por cerca de 70% do gás metano gerados no biodigestor (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

De forma adicional ao processo de digestão anaeróbia, é comum que ocorra também um estágio adicional chamado **sulfetogênese** – um processo que utiliza compostos a base de enxofre presentes na biomassa para a oxidação de compostos orgânicos, reduzindo-os a sulfetos. A sulfetogênese ocorre através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulforedutoras). As bactérias sulforedutoras são

consideradas um grupo muito versátil de microrganismos, capazes de utilizar uma ampla gama de substratos, incluindo toda a cadeia de ácidos graxos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos, e vários compostos fenólicos (CHERNICHARO, 2010).

Para CHERNICHARO (2010), todos os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia são especializados e cada grupo atua em reações específicas. Nos biodigestores, a formação de metano (componente principal do biogás) é altamente desejável, porém os microrganismos metanogênicos são mais sensíveis do que os hidrolíticos ou acidogênicos às condições desfavoráveis do meio. Na Figura 2.1 está representado o esquema geral das rotas metabólicas do processo de digestão anaeróbia, desde a entrada do material orgânico até a formação do metano e do dióxido de carbono.

Figura 2.1 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (2010)

2.3 Fatores ambientais que afetam o processo de digestão anaeróbio

O processo de digestão anaeróbia requer uma perfeita interação entre as bactérias fermentativas e as metanogênicas. Como o grupo das bactérias metanogênicas é o mais sensível às variações ambientais, deve-se operar o digestor anaeróbio visando à manutenção das condições ideais para estas bactérias. Entre os fatores que afetam os microrganismos da digestão anaeróbia encontra-se a temperatura, o pH, os nutrientes e a toxicidade no meio de reação (PINTO, 2006). Esses fatores serão explicados na sequência:

Temperatura: A atividade enzimática dos microorganismos anaeróbios dependem intimamente da temperatura, variando de espécie para espécie existindo sempre uma temperatura ótima. Ela é fraca a 10°C e nula acima dos 65°C quando as enzimas são desativas pelo calor (CHERNICHARO, 2010).

De acordo com BOUALLAGUI *et al.* (2004), existe três possíveis faixas de temperatura em que o processo de digestão anaeróbia pode ser realizado (psicrofílica 15-25°C, mesofílica 35-37°C e termofílicas 50-60°C). Já para Lagrange (1979) citado por DAL MAGO (2009), as três faixas são também citadas, porém com valores diferenciados (psicrofílica 10-20°C, mesofílica 20 e 45°C e termofílica 45-65°C), os dois autores colocam a fase mesofílica como a mais utilizada na digestão anaeróbia.

Para DEMEYER *et al.* (1981) citado por BOUALLAGUI *et al.* (2004), quando há acréscimos na temperatura as reações biológicas se processam muito mais rapidamente, resultando em uma operação mais eficiente e tempo de retenção menor. Para a produção de biogás existem duas temperaturas ótimas, uma na faixa mesofílica (35°C) e outra na faixa termofílica (55°C).

Segundo SOUZA (1984) a velocidade da digestão é maior sob temperaturas termofílicas, porém os custos relativos ao aquecimento, em geral, não compensam a utilização de temperaturas termofílicas. Para CRAVEIRO (1982) porém, a alta temperatura requerida para a biodigestão termofílica não é considerada desvantagem no caso dos resíduos orgânicos rejeitados a altas temperaturas, como a vinhaça que sai da destilaria de álcool a aproximadamente 80°C; neste caso, é viável o processo da biodigestão na fase termofílica. Assim, o aquecimento da biomassa poderia ser dispensado e, usando-se isolamento térmico adequado, minimizar a energia necessária para manter a temperatura do processo.

Para CHERNICHARO (2010), embora elevadas temperaturas sejam desejadas, talvez seja mais importante a manutenção de uma temperatura uniforme dentro do reator, uma vez que o processo anaeróbio é considerado muito sensível a mudanças bruscas de temperatura, podendo provocar um desbalanceamento entre as duas maiores populações microbianas e a consequente falha do processo (o limite usual é de cerca de 2°C por dia).

pH: o valor e a estabilidade do pH no reator são extremamente importantes, em meio ácido, a atividade enzimática das bactérias é anulada. Num meio alcalino, a fermentação produz anidrido sulfuroso e hidrogênio. A digestão pode efetuar-se entre os pH de 6,6 e 7,6, encontrando-se o ótimo a pH=7. Para valores abaixo de 6,5, a acidez aumenta rapidamente e a fermentação é interrompida.

No início do processo, a formação de ácido orgânico pode reduzir o pH para menos que 7. Então, as bactérias metanogênicas começam a transformar ácidos em produtos gasosos e o pH retorna a um nível próximo do neutro. Segundo HENN (2005), o pH adquire, automaticamente, um valor de faixa ótimo no biodigestor, sem que haja necessidade de adição de um alcalinizante, e isto se deve à capacidade de tamponamento do sistema. No entanto, há situações em que ocorre um decréscimo no valor do pH sem sua posterior estabilização, ou a água residuária já presente naturalmente, um valor de pH baixo, sendo necessária sua correção, fator que pode afetar economicamente o tratamento anaeróbio em relação ao aeróbio (PIEROTTI, 2007).

Nutrientes: o bom desempenho do processo de digestão anaeróbia está relacionado diretamente com a presença de alguns nutrientes necessários para que a atividade dos microorganismos seja realizado com sucesso. Em relação à matéria a fermentar, há que levar em consideração a relação carbono/nitrogênio (C/N), que deve ter um valor compreendido entre 30 e 35. Acima deste valor, o processo é pouco eficaz, já que as bactérias não têm possibilidade de utilizar todo o carbono disponível. Se houver nitrogênio demais, ele não será consumido e se acumulará, como amônia, cujos altos teores podem matar ou inibir o crescimento das bactérias, especialmente as metanogênicas (NOGUEIRA, 1986).

Os elementos essenciais ao estímulo nutricional das arqueas metanogênicas são o fósforo e o nitrogênio, sendo que o resíduo deve conter concentrações destes componentes em quantidades suficientes para suprir as necessidades das bactérias responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia. No entanto, são igualmente importantes: C, H, O, S, K, Ca, Mg. Dejetos agrícolas têm normalmente, estes nutrientes em quantidades adequadas para digestão anaeróbia (SOUZA, 1984).

Conforme NOGUEIRA (1986), o fosfato é necessário à bactéria e, ainda que as consequências de um alto teor não sejam drásticas, a sua ausência inibe o processo. A relação ideal carbono/fosfato é em torno de 150. Enxofre é outro nutriente básico para a bactéria, mas em teores menores que o fosfato, e a maioria dos resíduos orgânicos não apresentam carência deste elemento. Entretanto, se o teor de enxofre for muito alto, haverá um grande crescimento da população bacteriana sulforedutora, convertendo os sais de enxofre em sulfeto de hidrogênio, um gás venenoso e criador de dificuldades na queima do metano.

Elementos tóxicos: Existem diversas substâncias que provocam um efeito tóxico no processo de tratamento anaeróbio. Segundo SOUZA (1984), a toxicidade é um termo relativo e vai depender da concentração em que se encontra uma substância. Quando ocorre uma aclimatação das bactérias ao composto tóxico, elas podem adaptar-se, até certo limite, a concentrações elevadas daqueles compostos.

Grupos de substâncias químicas como metais pesados e substâncias organo-cloradas têm uma influência tóxica, mesmo a concentrações muito baixas. Os metais pesados, apesar de indispensáveis ao metabolismo das bactérias, em concentrações acima de 1 mg/L de cobre, de níquel, de cromo, de zinco e de chumbo, geralmente são tóxicos ao metabolismo bacteriano (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

São conhecidos também os efeitos prejudiciais de antibióticos, desinfetantes e pesticidas. Estes compostos podem, frequentemente, ser encontrados em larga escala nas propriedades rurais. O antibiótico monensina, às vezes, usado na alimentação de animais, inibe a metanogênese em concentrações tão baixas quanto 1 µg/mol, o que afetaria um sistema simples de biodigestão anaeróbia (NOGUEIRA, 1986).

2.4 Biodigestores

Os biodigestores são sistemas de tratamento empregados na conversão da matéria orgânica em biogás, através dos mecanismos da digestão anaeróbia, na eliminação de microorganismos patogênicos e na valorização deste efluente como biofertilizante para as lavouras. Caracterizam-se essencialmente pela

simplicidade na construção e operação, proporcionando boa eficiência a baixo custo. Como define BARRERA (1993, p. 11) “o biodigestor, como toda grande ideia, é genial por sua simplicidade”. Existem vários tipos de biodigestor, mas, em geral todos são compostos, basicamente, de duas partes: um recipiente (tanque) para abrigar e permitir a digestão da biomassa, e o gasômetro (campânula), para armazenar o biogás (BARRERA, 1993).

O primeiro registro da construção de um biodigestor operacional trata de 1857, em Bombaim, Índia, destinado a produzir gás combustível para um hospital de hansenianos. Inegavelmente, a pesquisa e desenvolvimento de biodigestores desenvolveram-se muito na Índia, onde, em 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco. Segundo NOGUEIRA (1986), o sucesso obtido animou os indianos a continuarem as pesquisas, formando o Gobar Gás Institute (1950), comandado por Ram Bux Singh. Tais pesquisas resultaram em grande difusão da metodologia de biodigestores como forma de tratar os dejetos animais, obter biogás e ainda conservar o efeito fertilizante do produto (biofertilizante). Foi esse trabalho pioneiro, realizado na região de Ajitmal (Norte da Índia), que permitiu a construção de quase meio milhão de unidades de biodigestão no interior daquele país.

De acordo com GASPAR (2003) a China começou a utilizar esta fonte de energia em 1958, e a adesão foi intensa, sendo que em 1972, já haviam sido instalados 7,2 milhões de biodigestores na região do Rio Amarelo. A partir da crise energética deflagrada em 1973, a utilização de biodigestores passou a ser uma opção adotada tanto por países ricos como países de terceiro mundo. Em nenhum deles, contudo, o uso dessa tecnologia alternativa foi ou é tão acentuada como na China e Índia.

O interesse da China pelo uso de biodigestores deveu-se, originalmente, à questões militares. Preocupada com a Guerra Fria, a China temeu que um ataque nuclear impediria toda e qualquer atividade econômica (principalmente industrial). Entretanto, com a pulverização de pequenas unidades biodigestores ao longo do país, algumas poderiam escapar ao ataque inimigo. Há pelo menos meio século, para os chineses, a implantação de biodigestores transformou-se em questão vital, incrustada em lógicas de política internacional. Um país continental, com excesso de população, a China buscou, durante os anos 50 e 60, no auge da

Guerra Fria, por uma alternativa de descentralização energética (NOGUEIRA, 1986).

Na década de 80 no Brasil os biodigestores tiveram maior desenvolvimento quando contaram com grande apoio dos Ministérios da Agricultura e Minas e Energia. Cerca de 8000 unidades foram construídas até 1988. Porém, dificuldades de ordem técnica, ausência de subsídios e corte das verbas impediram maior amplitude do programa (ANDRADE *et al.*, 2002).

Para NOGUEIRA (1986), podemos dividir os biodigestores em dois grandes grupos.

- Biodigestores de uso agrícola
- Biodigestores de uso sanitário

Entre os biodigestores de uso agrícola, pode-se destacar os modelos indiano, filipino e chinês. Outro biodigestor de uso agrícola muito utilizado no Brasil é o modelo canadense, também conhecido como biodigestor de lona.

O modelo de biodigestor indiano (Figura 2a) pode ser considerado o modelo mais popular para resíduos rurais. Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula móvel como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação; e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, acarretando a movimentação do resíduo por todo o biodigestor. O modelo indiano possui pressão interna constante, pois quando o biogás é produzido e não é consumido, a campânula expande-se, aumentando o volume destinado para o armazenamento do biogás, garantindo que a pressão não se altere. Uma adaptação do modelo indiano é o modelo filipino (Figura 2b) cuja concepção visou simplificar ainda mais a construção de biodigestores. Já a ideia do modelo chinês (Figura 2c) é evitar o uso de gasômetro móvel do modelo indiano, pressurizando o biogás produzido dentro do próprio biodigestor e reduzindo uma parcela considerável do custo de construção daquele modelo (NOGUEIRA, 1986) e (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

Figura 2.2 - Modelos de biodigestores.

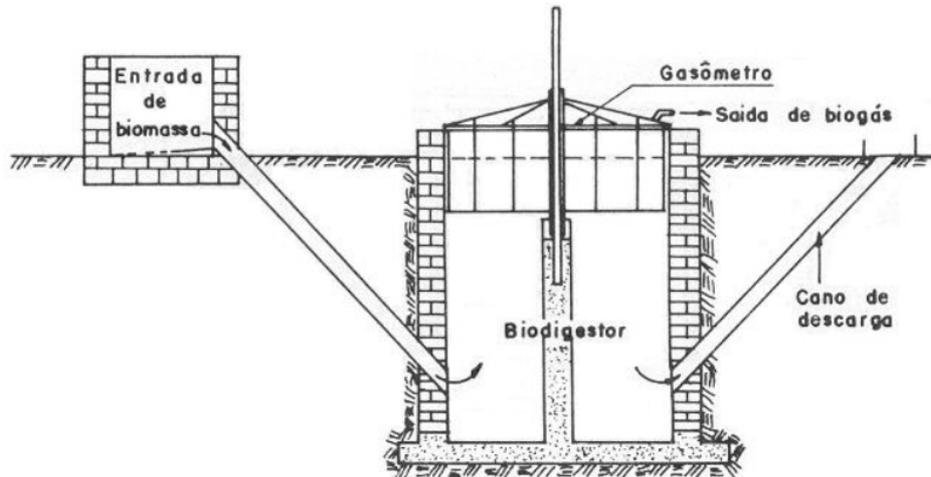


Figura 2a: Biodigestor modelo indiano

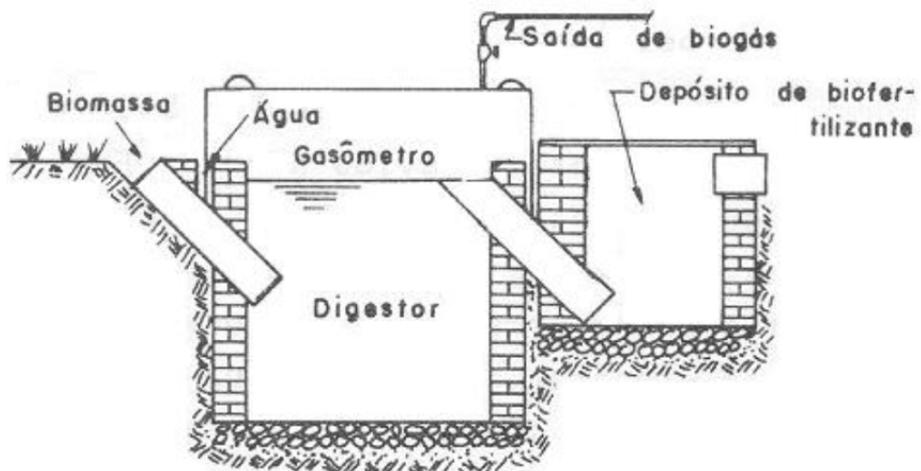


Figura 2b: Biodigestor modelo filipino

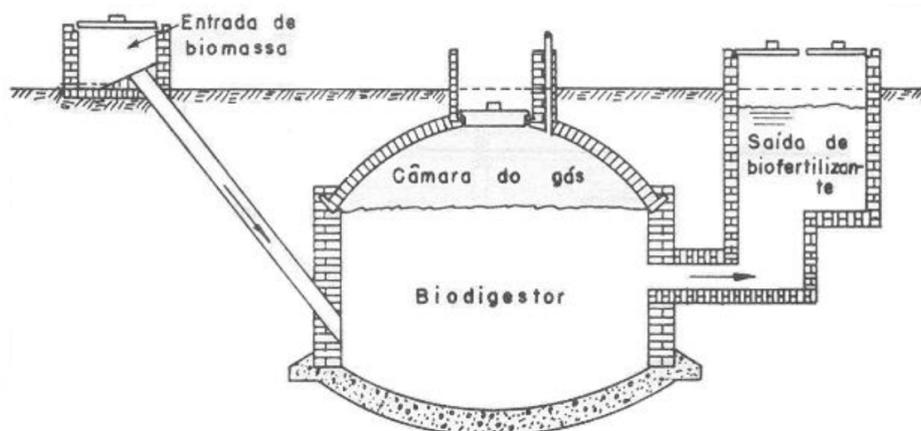
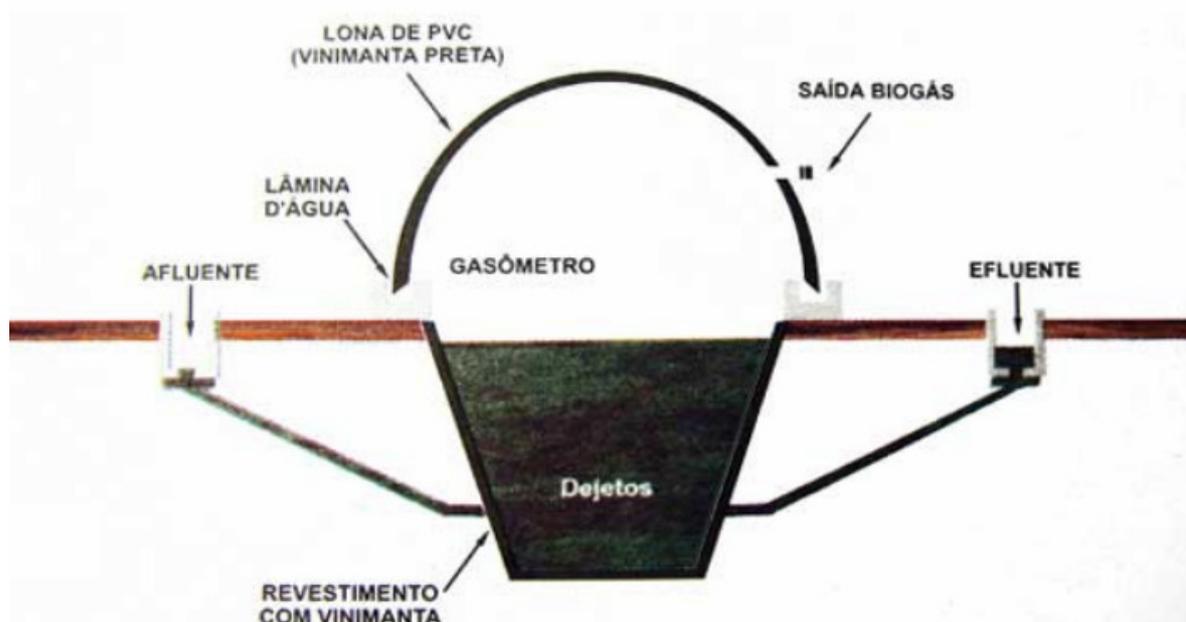


Figura 2c: Biodigestor modelo chinês

Fonte: NOGUEIRA (1986).

O biodigestor modelo canadense (Figura 2.3) é um modelo tipo horizontal, com sentido de fluxo tubular, apresentando uma geometria retangular, construído em alvenaria e com a largura maior que a profundidade, assim tendo uma grande área de exposição ao sol, que em climas quentes contribui para a produção de biogás pela elevação da temperatura. No Brasil, é o modelo de biodigestor mais utilizado atualmente, sua cobertura de lona de PVC, em substituição às campânulas (metálica ou de fibra de vidro), vem sendo o mais implantado comparado aos outros modelos, devido aos menores custos e facilidade de implantação (HAACK, 2009).

Figura 2.3 - Biodigestor modelo Marinha ou Canadense



Fonte: INSTITUTO WINROCK (2008)

2.5 Biogás

O biogás é o nome atribuído à mistura gasosa (combustível), resultante da biodigestão anaeróbica da matéria orgânica e constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui significativamente para a solução dos problemas ambientais, pois reduz potencialmente os impactos da fonte poluidora (SALOMON, 2007). É um gás incolor, geralmente inodoro (se não contiver demasiadas impurezas), insolúvel em água e mais leve do que o ar e por isso seu risco de explosão é mínimo, na medida em que a sua acumulação se torna mais

difícil. A sua fraca densidade implica, em contrapartida, que ele ocupe um volume significativo e que sua liquefação seja mais difícil, o que lhe confere algumas desvantagens em termos de transporte e utilização (ANDRADE *et al.*, 2002) e (IANNICELLI, 2008).

Em condições normais de produção o biogás não é considerado tóxico, isso devido ao seu baixo teor de monóxido de carbono (inferior a 0,1%). Por outro lado, segundo IANNICELLI (2008), o biogás costuma ser corrosivo, principalmente pela presença do sulfeto de hidrogênio, ou gás sulfídrico (H_2S) que ataca, além de outros materiais, o cobre, o latão, e o aço desde que a sua concentração seja considerável. Para teores elevados, na ordem de 1% (excepcionais nas condições normais de produção do biogás) o biogás torna-se tóxico e mortal.

Além do sulfeto de hidrogênio, o amoníaco, também em concentrações muito fracas em condições normais de produção, pode ser corrosivo para o cobre, sendo os óxidos de azoto libertados durante a combustão, igualmente tóxicos. Outros gases contidos no biogás, não suscitam problemas em termos de toxicidade ou nocividade. O vapor de água também pode ser um problema, podendo ser corrosivo para as canalizações, depois de condensado.

A quantidade de biogás produzido e a proporção de cada gás na mistura depende de vários parâmetros como a temperatura em que se desenvolve, o tipo de digestor, o substrato a digerir, o tempo de retenção hidráulica, entre outras condições utilizadas no processo de biodigestão. De qualquer forma, esta mistura é essencialmente constituída por metano (CH_4) e por dióxido de carbono (CO_2), além de outros gases, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o nitrogênio (N_2), o hidrogênio (H_2) e o monóxido de carbono (CO) que também compõe o biogás, mas em menores concentrações. Na Tabela 2.1, apresenta-se a composição do biogás (COLDEBELLA *et al.*, 2008).

Tabela 2.1 - Composição básica do biogás

Componente	Quantidades (em %)
CH ₄ (Metano)	50 a 80%
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	20 a 50%
N ₂ (Nitrogênio)	0,5 a 2
H ₂ (Hidrogênio)	0,1 a 10
CO (Monóxido de carbono)	máximo 0,1
O ₂ (Oxigênio)	máximo 0,1
H ₂ S (Gás Sulfídrico)	máximo 0,1
H ₂ O (Água)	Variável

Fonte: Adaptado de Empresa Brasileira de Biodigestores citado por CAMPOS (2004)

O potencial teórico de energia contido nos combustíveis é determinado pelo poder calorífico inferior (PCI). O potencial energético do biogás existe em função da quantidade de metano contida no gás que determina o seu poder calorífico (SALOMON, 2007). O metano, quando puro em condições normais (PTN) de pressão (1 atm) e temperatura (0°), tem um PCI de 9,9 kWh/m³. O biogás com um teor de metano entre 50 e 80% terá um PCI entre 4,95 e 7,92 kWh/m³ (COLDEBELLA *et al.*, 2008). Para IANNICELLI (2008), o poder calorífico do biogás pode chegar a 11.661,02 kcal.kg⁻¹ se com um grau de purificação extremamente alto, em torno de 99% CH₄ e 0,1% CO₂.

A tabela 2.2 apresenta a variação do poder calorífico do biogás em relação à composição e, a título de comparação, a tabela 2.3 que segue apresenta os P.C.I.s para outros combustíveis gasosos.

Tabela 2.2 - Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm³)	P.C.I (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Adaptado de (AVELLAR, 2001).

Tabela 2.3 - Equivalência por m³ de biogás

Gás	P.C.I (kcal/Nm³)
Metano	8500
Propano	22000
Butano	28000
Gás de Coqueria	4400
Gás de Cidade	4000
Gás Natural	8554
Biogás	5500

Fonte: (IANNICELLI, 2008)

A tabela 2.4 relaciona a equivalência energética do biogás com outras fontes de energia de acordo com alguns autores.

Tabela 2.4 - Equivalência energética de 1 m³ de biogás (1 atm e 0°C) comparado a outras fontes de energia

ENERGÉTICO	FERRAZ&MARIEL (1980)	SGANZERLA (1983)	SANTOS (2000)
Gasolina (L)	0,61	0,613	0,6
Querosene (L)	0,58	0,579	-
Diesel (L)	0,55	0,553	0,6
GLP (kg)	0,45	0,454	-
Álcool (L)	-	0,79	-
Carvão Mineral (kg)	-	0,735	-
Lenha (kg)	-	1,538	1,6
Eletricidade (kWh)	1,43 kW	1,428	6,5

Fonte: Ferraz&Mariel (1980), Sganzerla (1983) e Santos (2000) citado por (COLDEBELLA et al., 2008).

Para que o biogás possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico, parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia elétrica. Além disso, é preciso dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção do gás sulfídrico (H₂S) e da umidade, com o propósito de evitar danos aos equipamentos utilizados e aumentar seu poder calorífico (AVELLAR, 2001) e (CAMPOS, 2004).

2.6 Monitoramento da Digestão Anaeróbia

Os processos anaeróbios apresentados anteriormente, sofrem interferências de mudanças ambientais, sendo necessário controlar os fatores que afetam a atuação das bactérias envolvidas no processo de degradação, possibilitando, assim, a otimização da eficiência do sistema de tratamento dos resíduos orgânicos e, conseqüentemente, a produção de biogás. Para BOHRZ (2010), quando esses fatores são devidamente monitorados, podem contribuir para a otimização da atividade bacteriana, aumentando assim a produção de metano. Dentre os fatores de interferência na digestão anaeróbia pode-se

destacar, a temperatura, o pH, a alcalinidade, os ácidos voláteis e a composição do resíduo - presença de nutrientes e a ausência de materiais tóxicos.

A escolha de parâmetros para monitorar e controlar o processo de digestão anaeróbia irá depender de vários fatores tais como a origem dos resíduos, a tecnologia do digestor utilizado e do conhecimento disponível (FDEZ-GÜELFO *et al.*, 2012). O mesmo autor ainda revela que na literatura existem muitos parâmetros operacionais e de controle para verificar o comportamento de sistemas de digestão anaeróbia, porém, em alguns casos, os parâmetros clássicos não são suficientes para explicar episódios de desestabilização e novos parâmetros com base em combinações e transformações devem ser esclarecidos, a fim de compreender o problema.

Nas últimas décadas, inúmeras metodologias têm sido desenvolvidas visando quantificar a emissão de gases de sistemas de manejo e tratamento de dejetos. Essas metodologias variam em termos de complexidade, custo e precisão analítica. Entretanto, ainda não existe um consenso quanto àquelas que atendem aos requisitos necessários para serem adotadas como “métodos padrão” (HIGARASHI *et al.*, 2010)

As pesquisas de SOUTO *et al.* (2007), avaliaram três metodologias para determinar a concentração de metano, que eram: método volumétrico com volume variável, que consiste na quantificação do volume total do biogás e posterior caracterização do mesmo por cromatografia gasosa; método seringa e lavagem do biogás em solução alcalina, que mede apenas o metano produzido; e método manométrico, que associa o acréscimo de pressão proporcionado pelo metano produzido a um volume do gás. Tais técnicas demandam um tempo muito longo para a obtenção das respostas, tornando o método inadequado como ferramenta para o diagnóstico de manejo e tomada de medidas corretivas em sistemas de produção de biogás.

Na pesquisa de SIQUEIRA (2012), usou-se o método de lavagem do biogás em solução alcalina utilizando um *kit* portátil de lavagem, comercializado pela empresa Alfakit, composto por uma seringa plástica contendo a solução alcalina e que, segundo o fabricante, o *kit* foi calibrado através de cromatografias, apresentando 2,5% de precisão. A utilização do *kit* reduz o custo e o tempo para o

controle de qualidade do biogás produzido, uma vez que as amostras não precisam ser enviadas para análise em laboratórios especializados. Porém, não elimina a necessidade da coleta manual do material, ficando a análise condicionada à disponibilidade do técnico ir ao local de produção para realizar os testes, além do que o *kit* apresenta um baixo índice de precisão.

Para JANTSCH & MATTIASSON (2004), um sistema de monitoramento e controle ideal deve ser capaz de detectar uma instabilidade e estabelecer contramedidas para compensar esta instabilidade. Um sistema de monitoramento eficiente deve ser *online*, automatizado e robusto, detectando os primeiros indícios de instabilidade no processo, otimizando tempo e custo para realizar a caracterização do biogás produzido.

Diante do conteúdo estudado e principalmente da perspectiva de um sistema de monitoramento ideal apontada por JANTSCH & MATTIASSON (2004), é que este projeto foi proposto, buscando desenvolver um sistema de monitoramento eficiente e com a vantagem da utilização de hardware e software *open source*, o que permite que o projeto possa estar em contínuo desenvolvimento pela comunidade científica.

2.7 Tecnologia de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR)

Considerando estudos acerca das tecnologias existentes no mercado a respeito de sensores para caracterização de biogás, bem como, as características necessárias para o trabalho proposto em que o objetivo é o monitoramento em tempo real da produção do biogás, percebeu-se que a que melhor atende a esta expectativa é a utilização de sensores baseados na espectroscopia na região do infravermelho. Estes sensores têm diversas vantagens sobre os sensores químicos e eletroquímicos, pois são mais estáveis e bastante seletivos em relação ao gás alvo e, como não interagem de forma direta com a amostra, podem suportar altos índices de umidade, poeira, sujeira e outras condições severas, como é o caso da biodigestão anaeróbia. Por esses motivos, têm uma vida útil consideravelmente maior do que outros sensores de mesmo propósito (SCHAEFFER, 2004).

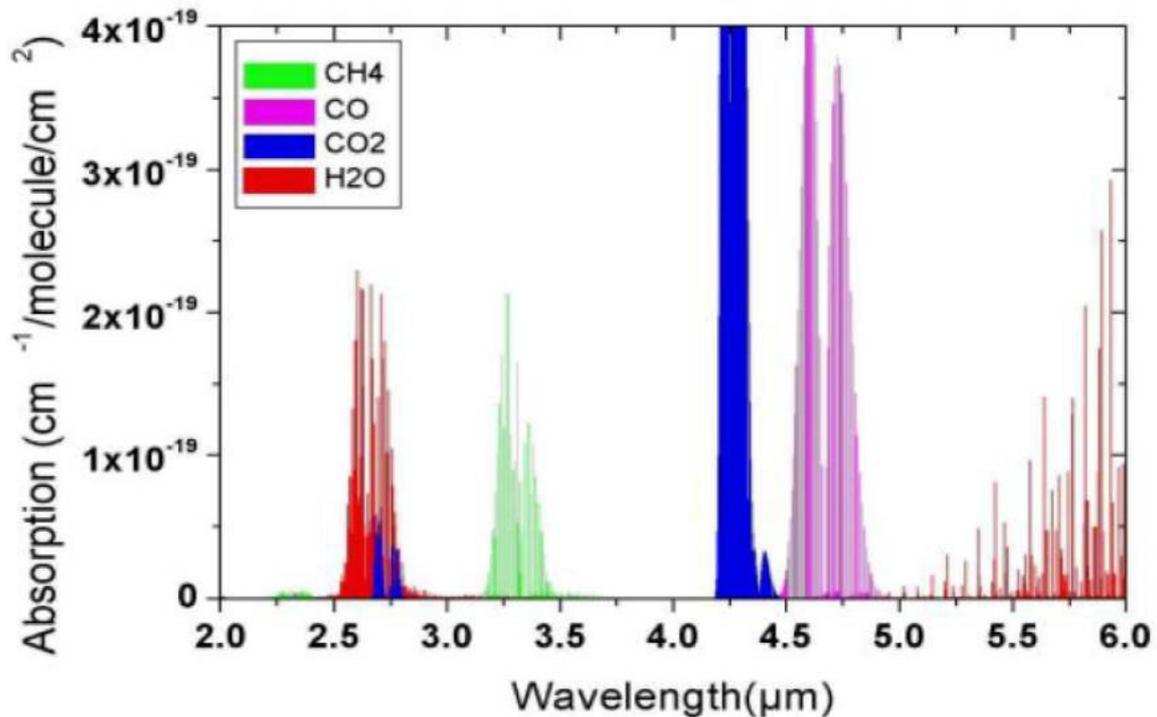
A tecnologia de espectrometria de infravermelho consiste basicamente em analisar a absorção de radiação no espectro do infravermelho (0,7 a 300 μm), que ocorre em muitos tipos de gases como nos casos das moléculas de CH_4 e CO_2 , em função da agitação intermolecular de alguns materiais. O comprimento de onda em que se dá esta absorção é característico de cada molécula e a quantidade de energia absorvida depende do número de moléculas presentes na trajetória do feixe e do coeficiente de absorção da molécula, conforme a lei de Beer-Lambert, expressa pela Equação (1) abaixo.

$$A(\lambda) = E(\lambda)bc \quad (1)$$

Em que $A(\lambda)$ é a absorção, $E(\lambda)$ o coeficiente de absorção no comprimento de onda λ , b é comprimento ótico entre emissor e detector e c é a concentração do gás neste caminho (Lee, 2001 citado por SCHAEFFER, 2004).

A lei de *Beer-Lambert* diz que a absorção em um dado comprimento de onda é diretamente proporcional ao comprimento ótico e a concentração do gás. Através de um feixe monocromático se obtém a concentração de um gás, sem que o mesmo tenha interferência de outros gases que podem estar misturados ao gás em análise, como é o caso do CH_4 e do CO_2 no biogás, sendo os comprimentos de onda utilizados 3,4 μm (CH_4) e 4,24 μm (CO_2) (RIBEIRO, 2006). A figura 2.4 abaixo ilustra a variação de absorbância de alguns gases em função do comprimento de onda.

Figura 2.4 - Exemplo de espectros de absorção.



Fonte: (SCHAEFFER, 2004)

Os sensores baseados na absorção de energia na faixa do infravermelho podem ser basicamente de dois tipos: dispersivo e não dispersivo. Os dispersivos, mais comumente usados em laboratórios, são mais sensíveis para baixas concentrações, sendo utilizados em medições espectroscópicas mais sofisticadas. Sua desvantagem é o custo elevado, pela complexidade envolvida (SCHAEFFER, 2004). Os sensores não dispersivos, chamados de NDIR – *Non-Dispersive InfraRed*, são utilizados comumente nas indústrias, como monitores de processos, por serem de construção e uso mais simples. Nesse método, a intensidade de luz transmitida pela amostra em um comprimento de onda em que a mesma absorve energia é comparada com a intensidade de luz transmitida em um outro comprimento de onda, onde não ocorre absorção. A partir da razão entre as intensidades de radiação infravermelha transmitidas nesses dois comprimentos de onda, é possível obter-se a densidade de moléculas do material (Lee, 2001 citado por SCHAEFFER, 2004).

Para LIMA *et al.* (2009), a espectroscopia na região do infravermelho tem se destacado por proporcionar métodos rápidos, robustos, não-destrutivos e não-invasivos, possibilitando aplicações automáticas e em tempo real.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado através de uma pesquisa de campo e desenvolvido em três partes. Na primeira, realizou-se um levantamento bibliográfico no qual se destaca o processo de produção de biogás por meio da digestão anaeróbia em biodigestores bem como os métodos de caracterização do biogás produzido utilizados por outros autores. Neste levantamento verificou-se que a composição global do biogás varia de acordo com as condições ambientais presentes no reator, destacando alguns parâmetros como a temperatura de operação do reator, pH, ausência de oxigênio, entre outros já destacados neste trabalho.

Na segunda parte, foi realizada a escolha, montagem e configuração dos componentes do módulo de monitoramento da produção do biogás, que são: o sensor de composição do biogás (CH_4 e CO_2), o sensor de temperatura interna do reator anaeróbio, e o microcontrolador que fará a coleta de dados dos sensores e sua integração com o software supervisor.

Na terceira parte, foi realizada a leitura dos dados coletados pelos sensores e o seu processamento. Para isso, foi desenvolvido um software supervisor que realiza a conversão dos dados transmitidos pelos sensores em tabelas e gráficos em tempo real, otimizando a análise do monitoramento das características do biogás produzido.

A seguir, cada uma das partes deste caminho metodológico será explicada detalhadamente. A primeira parte está descrita na revisão bibliográfica, de modo que serão apresentadas, então, as etapas seguintes, a começar pela escolha dos componentes que compõe o módulo de análise.

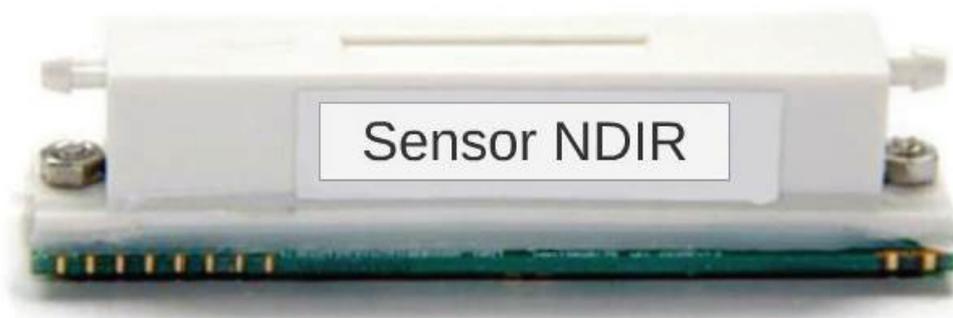
3.1 Módulo de monitoramento da produção de biogás

O módulo de monitoramento da produção de biogás foi composto por um sensor, que utiliza a tecnologia de espectrometria de infravermelho para realizar a leitura da concentração dos dois principais gases que compõem o biogás (CH_4 e CO_2), além dele, um sensor de temperatura submerso ao substrato no interior do biodigestor, permitindo, assim, uma análise em tempo real entre os parâmetros

ambientais no interior do reator e a composição do biogás produzido. A interligação e leitura dos dados emitidos pelos sensores foi feita através da plataforma de prototipagem Arduino, composta por microcontrolador, circuitos e portas necessárias para o funcionamento do sistema.

Considerando o exposto acima, foi adquirido o módulo MH-Z92 Dual Gás CO₂/CH₄ da empresa CO2Meter (figura 3.1), que utiliza a tecnologia de espectrometria de infravermelho não dispersivo (NDIR), para leitura das concentrações do dióxido de carbono (CO₂) até a concentração máxima de 50% do volume total da mistura e leitura do gás metano (CH₄) até a concentração máxima de 100%. Considerando que o biogás é composto principalmente por esses dois gases e o metano é o gás alvo por determinar o poder calorífico da mistura, a faixa de concentração do sensor se mostra satisfatória para a o seu monitoramento.

Figura 3.1 - Módulo MH-Z92 Dual Gás CO₂/CH₄

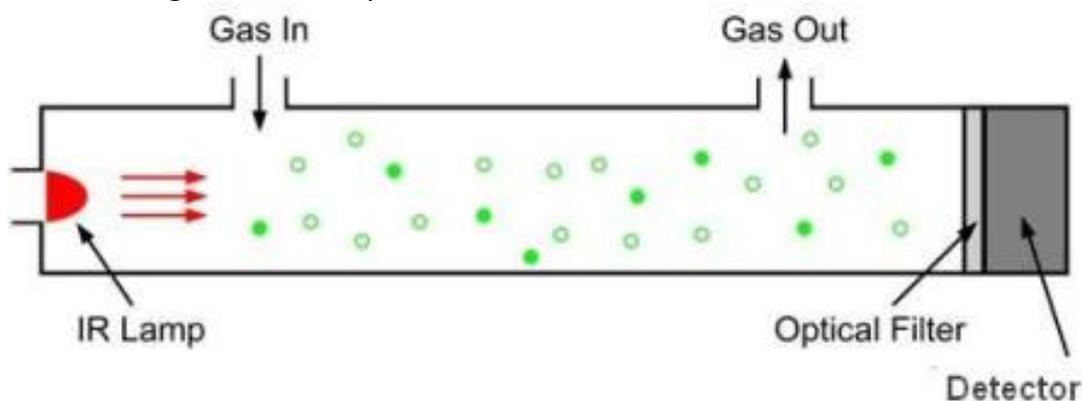


Fonte: (CO2METER.COM, 2016)

O módulo é composto por um emissor de radiação no infravermelho para cada gás, uma câmara de amostra onde ocorre a absorção, um filtro ótico e um detector de infravermelhos para cada um dos gases. A figura 3.2 apresenta o esquema de funcionamento do sensor, onde o emissor de radiação (IR Lamp) é instalado em uma extremidade da câmara e o detector de infravermelho na extremidade oposta. Antes de atingir o detector, a radiação passa pelo filtro ótico, que limita o espectro em uma faixa de comprimento de onda, desta forma o detector identifica especificamente a radiação no espectro eletromagnético que está relacionado com o gás alvo. O módulo ainda possui um sensor de temperatura interna utilizada para compensação automática de temperatura na

leitura das concentrações. Ele pode compensar temperaturas entre 0°C e 50°C com margem de erro inferior a 3%.

Figura 3.2 - Esquema de funcionamento do Sensor NDIR.



Fonte: (CO2METER.COM, 2016)

3.1.1 Kit bomba e filtros para sensor MH-Z92

Em conjunto com o sensor MH-Z92 foi adquirido um kit de bomba e filtros modelo CM-0111 junto à empresa co2meter.com. Este kit contém os acessórios necessários para uma melhor utilização do sensor, com mangueiras, filtros e bomba de diafragma compatíveis com o sensor adquirido.

A bomba de diafragma modelo 2002 VD LC (figura 3.3), contida no kit, tem como características principais: tamanho reduzido (33 x 16 x 25.5 mm), peso de 17g, baixo nível de ruído, tensão de operação (3,5 a 5V), trabalha com um fluxo máximo de 500ml/min, suporta uma pressão máxima de 400mbar e vácuo máximo de -400mbar. O kit acompanha um módulo de bateria para alimentação da bomba com capacidade de 4 pilhas do tipo AA.

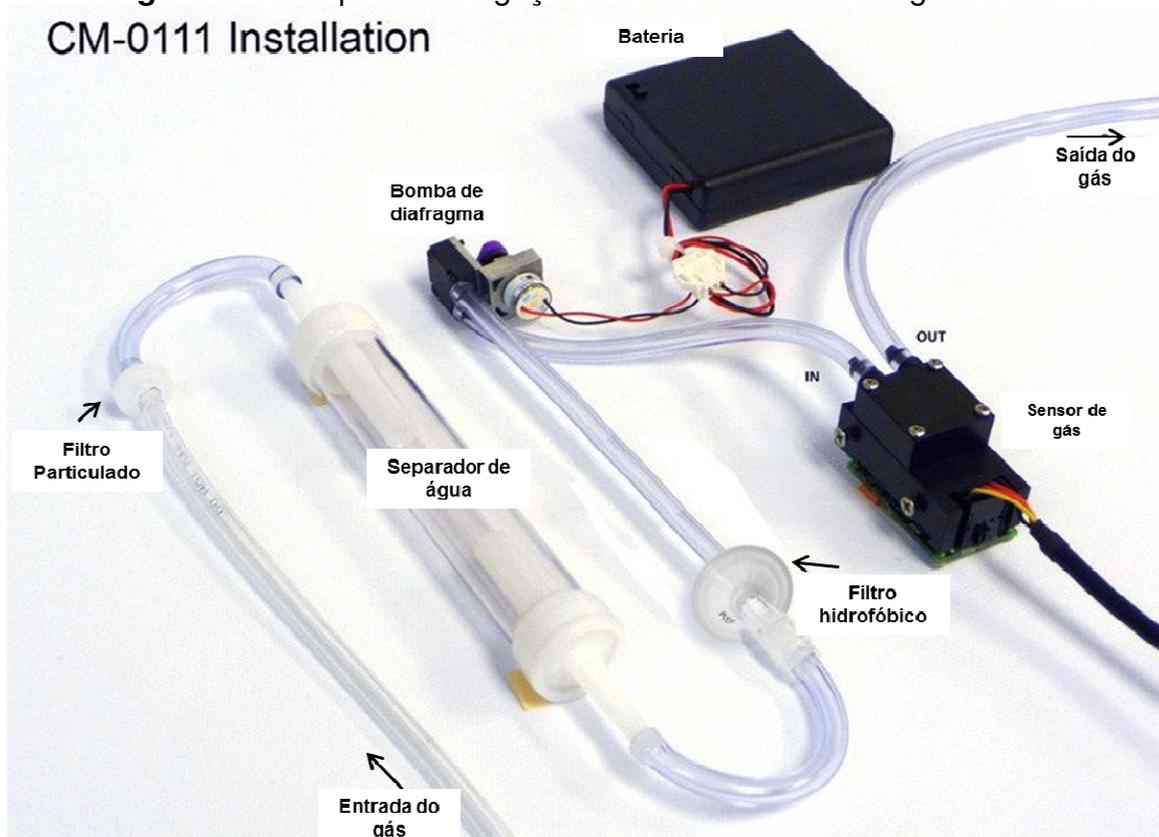
Figura 3.3 - Bomba de diafragma e bateria



Fonte: (CO2METER.COM3, 2016)

Além da bomba de diafragma, acompanham o kit mangueiras e acessórios para conexão entre a bomba e o sensor, um tubo separador de água e filtros (particulado (150 microns) e hidrofóbico (0,22 microns)), cuja função é proteger o sensor do excesso de água e partículas. Na figura 3.4 é apresentado o esquema de ligação do kit e posicionamento dos filtros no caminho do gás até o sensor.

Figura 3.4 - Esquema de ligação do kit bomba de diafragma e filtros
CM-0111 Installation



Fonte: (CO2METER.COM3, 2016) adaptada pelo autor

3.1.2 Termômetro digital DS18B20

Conforme descrito anteriormente, a temperatura é uma variável de grande interesse durante a digestão anaeróbia e por isso deve ser monitorada. Este parâmetro influencia no desenvolvimento e atuação bacteriana e na quantidade de água presente no biogás, sendo que com o aumento da temperatura a produção de biogás cresce. Além disso, de acordo com DENNIS & BURKE (2001), a temperatura também pode influenciar na concentração dos componentes do biogás gerado e de substâncias orgânicas voláteis dissolvidas em solução e, juntamente com as características do material orgânico, também estabelecem o percentual de dióxido de carbono e de metano no biogás produzido.

Submerso ao substrato digerido na parte central interna do reator, foi instalado um sensor digital de temperatura, a fim de monitorar as condições térmicas internas do reator anaeróbio, permitindo uma posterior comparação entre os dados qualitativos do biogás gerado e as condições internas do reator em um determinado instante do tempo.

O modelo escolhido foi o termômetro digital DS18B20 (figura 3.5), à prova d'água, compatível com a plataforma Arduino, que fornece medições de temperatura em graus Celsius, operando no intervalo de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$ e tem a precisão de $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ no intervalo de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$. Sua comunicação é implementada pela tecnologia *One-Wire bus* que, por definição, necessita apenas de uma linha de transmissão de dados (e um terra) para comunicação com um microprocessador central (Arduino). A alimentação do mesmo pode ser feita diretamente da linha de dados, eliminando a necessidade de uma fonte de alimentação externa (DATASHEET DS18B20, 2015).

Figura 3.5 - Termômetro Digital DS18B20



Fonte: (DATASHEET DS18B20, 2015)

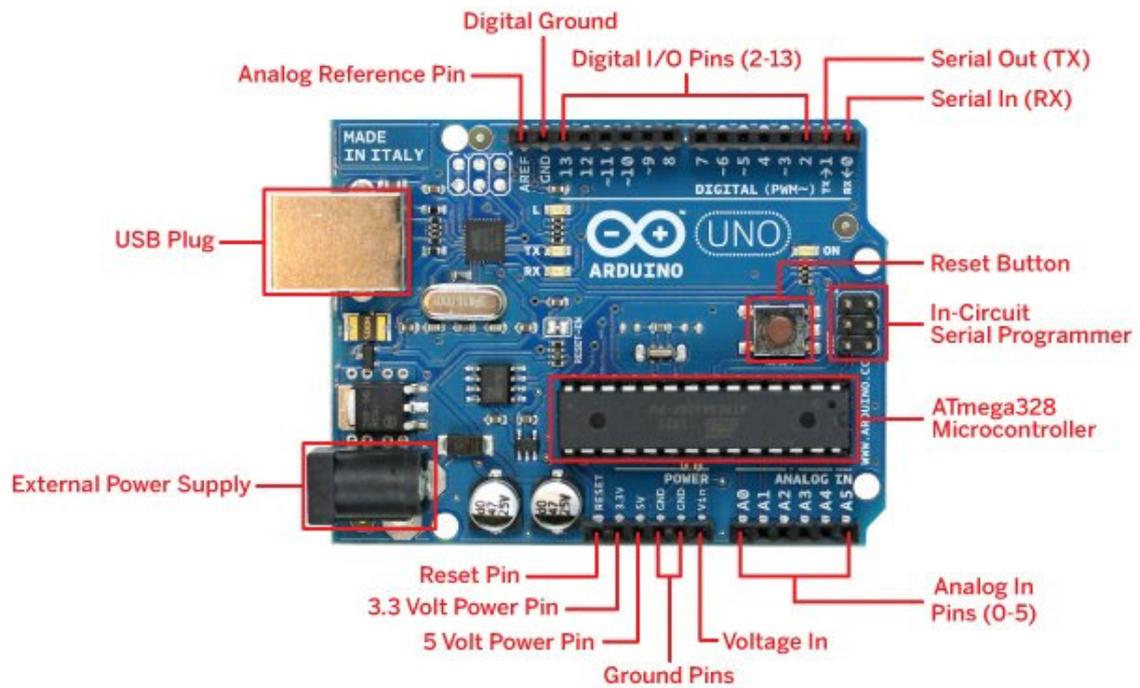
As tecnologias utilizadas por este dispositivo (como por exemplo: *One-Wire*) são de fácil integração com a plataforma Arduino. Existem bibliotecas abertas disponíveis para a plataforma, tanto para a interpretação de dados do próprio dispositivo, quanto para a implementação do *One-Wire*. Além disso, pela sua ampla utilização na comunidade da plataforma Arduino, existem diversos exemplos abertos de conexões possíveis para a sua integração com esta plataforma.

3.1.3 Placa Arduino Uno

O projeto Arduino foi criado na Itália em 2005 com o objetivo de oferecer uma plataforma de prototipagem eletrônica de baixo custo e de fácil manuseio por qualquer pessoa interessada em criar projetos com objetos e ambientes interativos. O Arduino é um projeto *open source* onde a documentação para elaboração do hardware (placa eletrônica) e o código fonte do ambiente de desenvolvimento estão disponíveis para os usuários.

A plataforma Arduino é composta de uma placa eletrônica (hardware) e de um ambiente de desenvolvimento (software) para criação dos projetos pelos usuários. A placa eletrônica utilizada é o Arduino Uno (Figura 3.6). Este modelo foi o escolhido devido à quantidade de entradas e saídas de comunicação, suficientes para conexão de todos os sensores propostos no presente trabalho.

Figura 3.6 - Arduino Uno



Fonte: (ARDUINO UNO, 2016)

O Arduino Uno é uma placa microcontroladora programável baseada no chip ATmega328. Ele possui 14 pinos de entradas/saídas digitais dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*), além de 6 entradas analógicas. Ele contempla o circuito necessário para o suporte do microcontrolador, bastando conectá-lo a um computador através de um cabo USB ou alimentá-lo com uma fonte AC-DC ou uma bateria de 12V (ARDUINO UNO, 2016). Suas especificações técnicas principais estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações Técnicas do Arduino Uno

Especificações	
Microcontrolador	ATmega328
Voltagem de operação	5V
Voltagem de Entrada (recomendada/limites)	7-12V / 6-20V
Pinos I/O Digitais	14 (dos quais 6 fornecem saída PWM)
Pinos de Entrada Analógica	6
Corrente DC por pino I/O e Pino 3,3V	40 mA e 50 mA
Memória Flash	32 KB
SRAM – EEPROM	2 KB
Clock	16 Mhz
Comprimento	68,6 mm
Largura	53,4 mm
Peso	25g

Fonte: (ARDUINO UNO, 2016)

Como descrito anteriormente, o Arduino é um microcontrolador capaz de interagir com o exterior através de dispositivos de entrada e saída, como sensores e motores, respectivamente. Basicamente é um pequeno computador com memória, processador e barramentos. Sua programação pode ser escrita em sua própria linguagem, *Arduino Programming Language*, com a utilização de um ambiente de desenvolvimento integrado ao hardware (IDE - Integrated Development Environment) para geração dos programas (*sketches*) que serão enviadas para a placa eletrônica. É possível também o envio de código compilado em outras linguagens com a utilização de bibliotecas externas programadas na linguagem C/C++, amplamente disponíveis na Internet (normalmente em código aberto) (ARDUINO, 2016).

Por suas propriedades de comunicação e conexões e versatilidade na programação, além da comunicação em tempo real com computadores, o Arduino é considerado um ótimo instrumento de integração de diferentes componentes e dispositivos. Este é o principal objetivo de sua utilização na presente pesquisa. Apesar de não contemplar a mesma robustez de uma plataforma industrial já conceituada no mercado, a plataforma Arduino destaca-se no quesito custo e pela

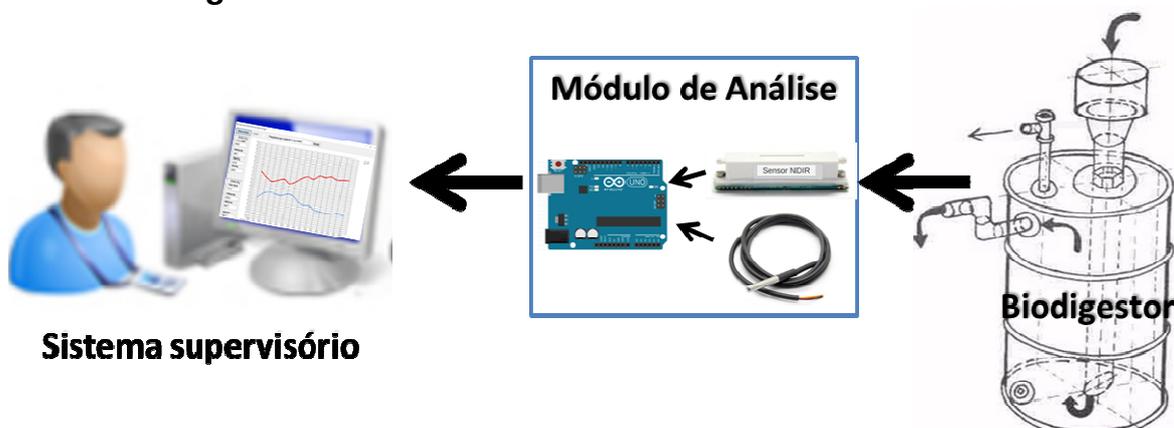
ampla aceitação da comunidade científica como instrumento de prototipação eletrônica.

3.2 Fluxo de dados do sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento é dividido em duas etapas de desenvolvimento. A primeira consiste na comunicação e configuração dos sensores com a placa Arduino Uno, ela funciona como uma central de comunicação do sistema como um todo, pois funciona como um elo entre os dados transmitidos pelos sensores e o sistema supervisor que transformara esses dados em algo legível para o usuário.

O supervisor tem a função fundamental de servir como Interface Homem Máquina (IHM) do módulo de análise da produção do biogás. Ele é responsável pela solicitação dos dados dos sensores, já adquiridos pela placa Arduino, organizando-os em forma de gráficos de acordo com a configuração do usuário. O fluxo de dados do sistema de monitoramento é apresentado na figura 3.7 a seguir.

Figura 3.7 – Fluxo de dados do sistema de monitoramento



Fonte: o autor

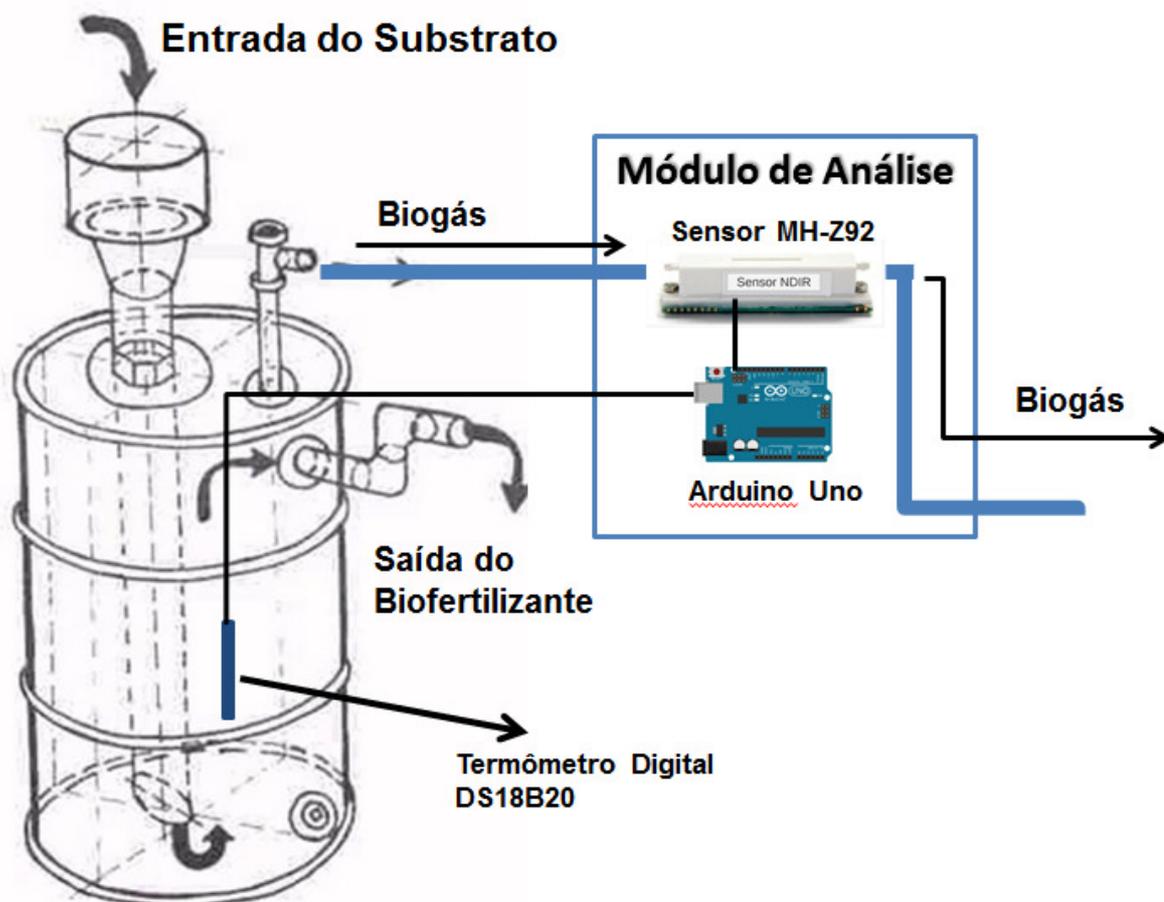
3.3 Ensaio de biodigestão

Para a realização da pesquisa, foi montado aparato experimental dentro das dependências do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul – IFMS Câmpus Ponta Porã, com localização geográfica definida pelas coordenadas 22º 37' Latitude Sul (S) e 55º 36' Longitude Oeste (W)

e altitude média de 656 metros acima do nível do mar. A temperatura média anual é de 28°C (BRASILCHANNEL, 2016).

O biodigestor foi construído em parceria com um estudante do Curso Superior de Tecnologia em Agronegócio do IFMS Câmpus Ponta Porã que está desenvolvendo seu trabalho de conclusão de curso sobre essa temática. Para a construção do biodigestor foi utilizado um tambor de metal com 0,83m de altura, 0,56m de diâmetro e um raio de 0,28m, comportando um volume total de 200L (0,2m³) de substrato. Foram instalados conexões, tubos e registros para permitir a sua operação e, na parte superior, foi instalada uma mangueira para gás que conduz o biogás produzido ao módulo de análise proposto neste trabalho. O esquema de ligação entre biodigestor e módulo de análise está representado na figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquema de ligação entre biodigestor e módulo de análise



Fonte: o autor

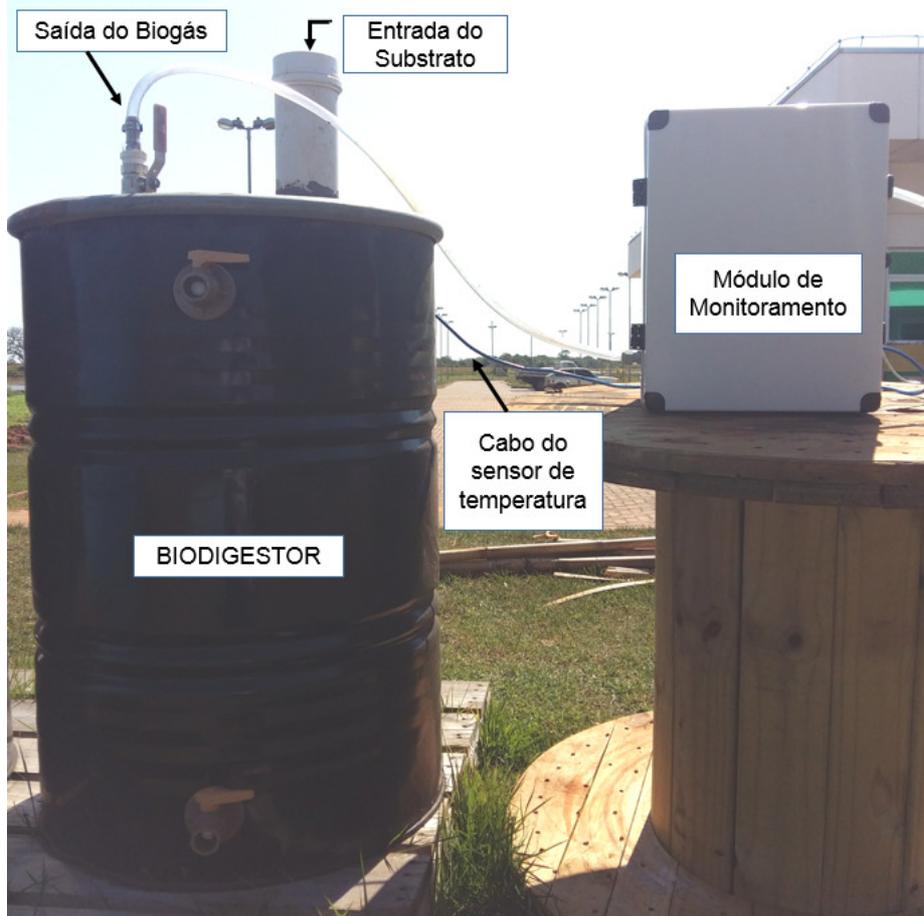
O preparo do substrato utilizado para o abastecimento dos biodigestores foi realizado misturando água e dejetos de suínos em uma proporção de 1:1 composto de 50kg de esterco sólido de suíno, coletados por raspagem proveniente de um abatedouro do município, misturados de forma uniforme com 50L de água. O biodigestor foi abastecido com 2L de substrato diariamente, durante 23 dias. O substrato utilizado para o abastecimento dos biodigestores foi o mesmo durante todo o experimento.

3.4 Coleta de dados

Os dados provenientes do ensaio de biodigestão foram coletados entre os dias 01 e 04 de agosto de 2016, quando o mesmo já estava em operação há 20 dias, a temperatura média ambiente local durante os 4 dias foi de 22,6°C.

A mangueira de saída do biogás, localizado na parte superior do biodigestor, foi conectada à mangueira de entrada do módulo de análise, tomando-se o cuidado de fechar a válvula de gás para não ocorrer a entrada de ar no reator. Para o termômetro DS18B20, no interior do biodigestor, foi adaptado um cabo de rede para aumentar sua extensão, que originalmente tinha 1,5m, para 6m. Então, o módulo de análise foi conectado a um computador, contendo o software supervisor, localizado no laboratório próximo ao biodigestor, através de uma extensão do cabo USB ligado ao módulo de análise. Dessa forma, o software supervisor foi configurado para realizar as análises a cada 1 hora, considerando as dimensões do biodigestor e sua estimativa de produção de biogás, ficando em operação durante os 4 dias de coleta. Neste momento, já era possível visualizar no computador supervisor, os gráficos demonstrando a concentração do biogás produzido em razão da temperatura interna do biodigestor. A figura 3.9 apresenta o biodigestor construído conectado ao módulo de análise durante a coleta de dados.

Figura 3.9 – Biodigestor construído e Sistema de Monitoramento



Fonte: o autor

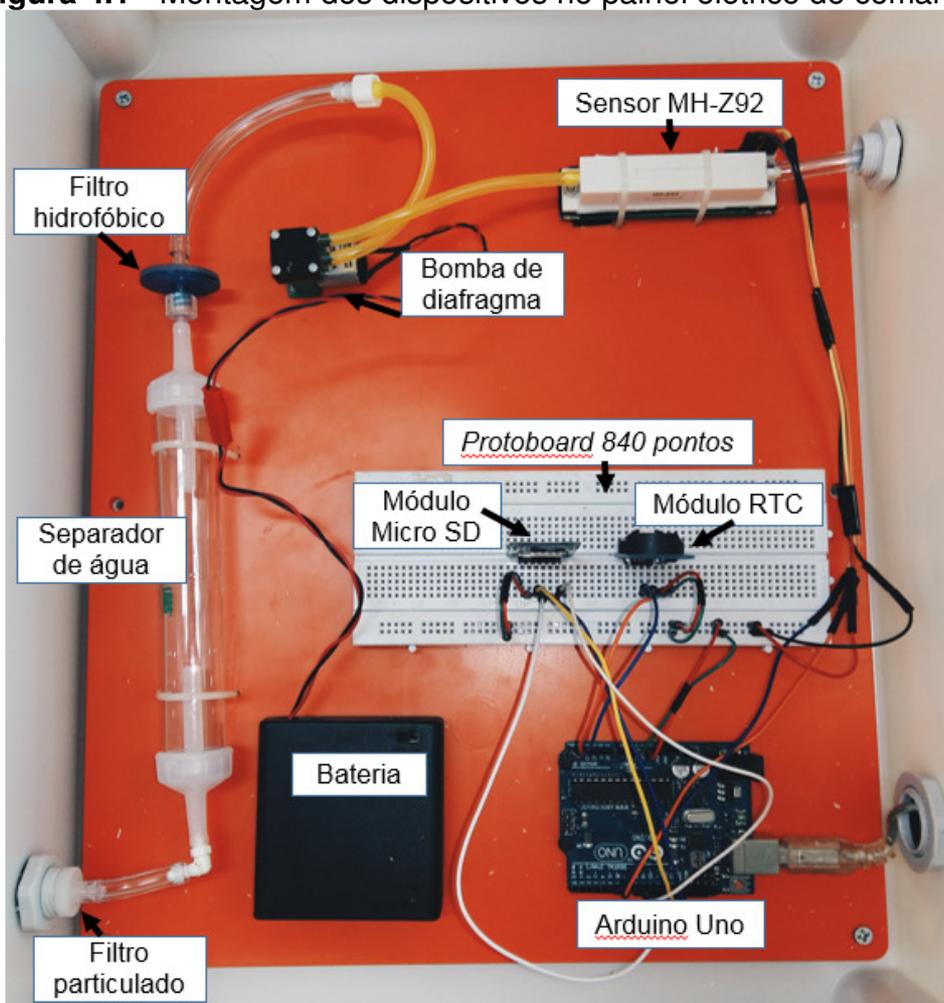
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Montagem e configuração do módulo de monitoramento

Para a montagem do módulo de monitoramento foi utilizado um painel elétrico de comando de tamanho 400x300x200mm fabricado em material termoplástico e com borracha de vedação em todo o contorno da tampa. Os componentes do módulo, descritos anteriormente, foram acomodados na base do painel elétrico utilizando parafusos e abraçadeiras plásticas.

Para a conexão dos sensores com o Arduino, utilizou-se uma *protoboard* de 840 pontos que, além de facilitar a conexão, permite uma melhor organização no interior do painel. Na figura 4.1, apresenta-se a parte frontal da montagem do painel.

Figura 4.1 - Montagem dos dispositivos no painel elétrico de comando

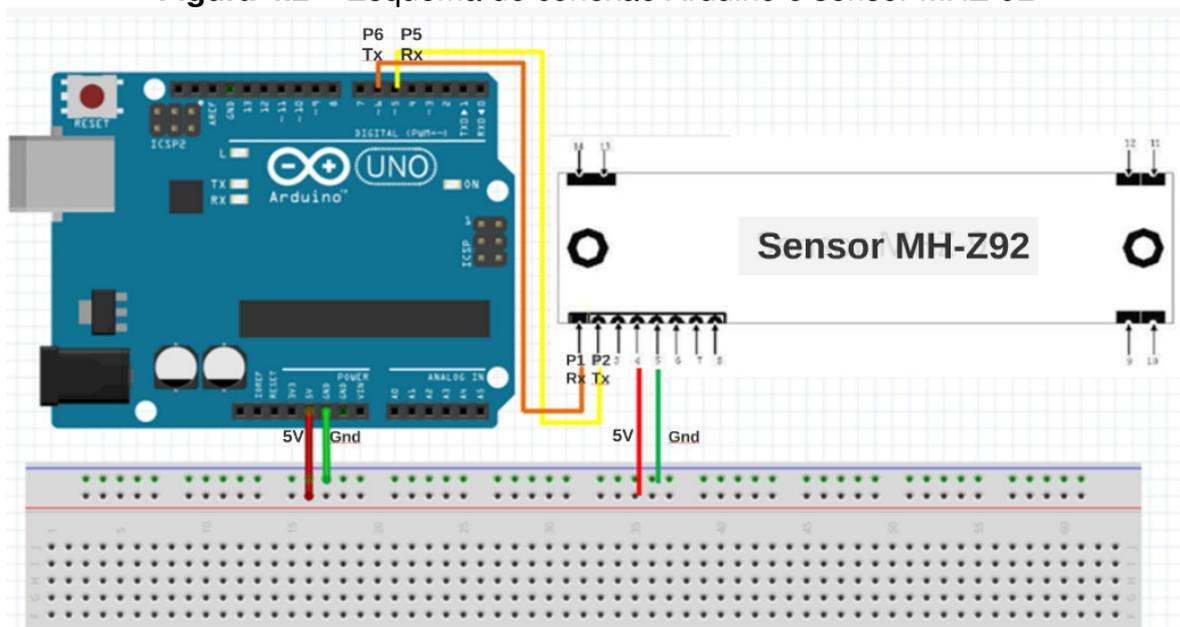


Fonte: O autor

Neste protótipo, a placa Arduino Uno funciona como central de comunicação entre o sistema supervisor e os sensores utilizados. O processamento digital dos dados dos sensores, para o software de supervisão no computador, é de responsabilidade da placa.

A conexão entre a placa Arduino e o sensor MHZ-92 foi realizada utilizando o padrão de comunicação serial (UART - *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), neste caso utilizando os pinos 1 (RxD - Recepção) do sensor, conectado à porta 6 (configurada como Tx) do Arduino e à porta 2 (Tx) do sensor, conectada à porta 5 do Arduino (configurada como RxD). A alimentação do sensor é realizada através do pino 4 (*Voltage in*) e 5 (*Ground*), esses foram conectados a *protoboard* sendo alimentadas pelo pino 5V e *Ground* da placa Arduino. A figura 4.2 a seguir, apresenta o esquema de conexão entre a placa Arduino e o sensor MHZ-92.

Figura 4.2 – Esquema de conexão Arduino e sensor MHZ-92



Fonte: o autor

A comunicação serial entre o sensor MHZ-92 e o Arduino foi realizada seguindo as especificações fornecidas pelo fabricante, que determinam a velocidade para a comunicação serial em 9600bps e o padrão para os comandos de comunicação estabelecidos da seguinte forma: 9bytes (0 a 8), sendo o primeiro *byte* de início da comunicação, 6 *bytes* para cabeçalho e dados e o

último *byte* para soma de verificação (*checksum*). A figura 4.3 apresenta a lista de comandos aceita pelo sensor e a figura 4.4 apresenta um exemplo de requisição e resposta utilizadas pelo sensor.

Figura 4.3 – Lista de Comandos (sensor MH-Z92)

0x72	Read CH ₄ concentration	0x87	Calibrate CH ₄ to zero
0x73	Read CO ₂ concentration	0x88	Calibrate CH ₄ to known concentration
0x74	Read sensor status	0x8E	Calibrate CO ₂ to zero
0x75	Set mode (Normal/Low power)	0x8F	Calibrate CO ₂ to known concentration
0x76	Read/Write EEPROM		

Fonte: (CO2METER.COM2, 2016)

Figura 4.4 – Exemplo de Requisição e Resposta da concentração de CO₂ (sensor MHZ-92)

Request								
0	1	2	3	4	5	6	7	8
Start Byte	Sensor #	Command						Checksum
0xFF	0x01	0x73	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x8C

Response(example)								
0	1	2	3	4	5	6	7	8
Start Byte	Command	CO ₂ Concentration (High Byte)	CO ₂ Concentration (Low Byte)					Checksum
0xFF	0x73	0x01	0xCE	0x00	0x00	0x00	0x00	0xBE

Fonte: (CO2METER.COM2, 2016)

A figura 4.5, apresenta o trecho de código desenvolvido para a comunicação serial com o sensor MHZ-92 para a realização da leitura das concentrações de CO₂ e CH₄, é possível observar na linha 8 e 9 da figura a declaração de um vetor de 9 posições para a requisição de leitura de cada um dos gases. Um detalhe importante é a posição 2 de ambos vetores com o valor 0x01, esse valor idêntico nos dois vetores denota a existência de apenas um sensor e não dois como possa parecer. O código foi escrito utilizando a linguagem própria do Arduino (*Arduino Programming Language*) e o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da própria placa. O código completo utilizado neste trabalho está disponível no apêndice A.

Figura 4.5 – Trecho de código utilizado para comunicação e requisição de dados entre Arduino e MH-Z92

```
1 //Inclusão da biblioteca necessária para Comunicação Serial - UART
2 #include "SoftwareSerial.h"
3
4 //Portas utilizadas para conexão:
5 SoftwareSerial MHZ92_Serial (5, 6); //Arduino(5 Rx ,6 Tx) - MHZ92 (1 = Rx, 2 = Tx)
6
7 //Declaração de valores padrão para requisição de leitura do CO2 e CH4
8 byte co2Check [9] = {0xFF, 0x01, 0x73, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x8C};
9 byte ch4Check [9] = {0xFF, 0x01, 0x72, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x8D};
10
11 //Declaração de valores padrão para resposta de CO2 e CH4
12 char responseCO2[9];
13 char responseCH4[9];
14
15 void setup() {
16     //Velocidade da comunicação serial do sensor MH-Z92
17     MHZ92_Serial.begin(9600);
18 }
19
20 float getPercentCO2() {
21     // Envia a solicitação (CO2) em bytes para o sensor MH-Z92
22     MHZ92_Serial.write(co2Check, 9);
23     // Recebe a solicitação (CO2) em bytes
24     MHZ92_Serial.readBytes(responseCO2, 9);
25     int high_Byte = (int)responseCO2[2];
26     int low_Byte = (int)responseCO2[3];
27     float percent = (float)((256*high_Byte)+low_Byte)/10;
28     return percent;
29 }
30 float getPercentCH4() {
31     // Envia a solicitação (CH4) em bytes para o sensor MH-Z92
32     MHZ92_Serial.write(ch4Check, 9);
33     // Recebe a solicitação (CH4) em bytes
34     MHZ92_Serial.readBytes(responseCH4, 9);
35     int high_Byte = (int)responseCH4[6];
36     int low_Byte = (int)responseCH4[7];
37     float percent = (float)((256*high_Byte)+low_Byte)/10;
38     return percent;
39 }
```

Fonte: o autor

Para implementar a funcionalidade do *data logger* (registrador de dados) ao sistema supervisorio utilizou-se um módulo *Micro SD Storage Board* da empresa Catalex (Figura 4.6), que incorpora a possibilidade de gravar os registros em um cartão de memória.

Figura 4.6 - Módulo *Micro SD Storage Board*



Fonte: o autor

Para que o registro ocorra com exatidão em relação às variáveis de tempo como data, hora, minutos e segundos, independente da alimentação elétrica do dispositivo, foi incorporado um módulo RTC (Relógio de Tempo Real), este circuito é composto de uma bateria de Lithium de 3v e um RTC (modelo ds3231) apresentado na figura 4.7.

Figura 4.7 - Módulo RTC DS3231



Fonte: o autor

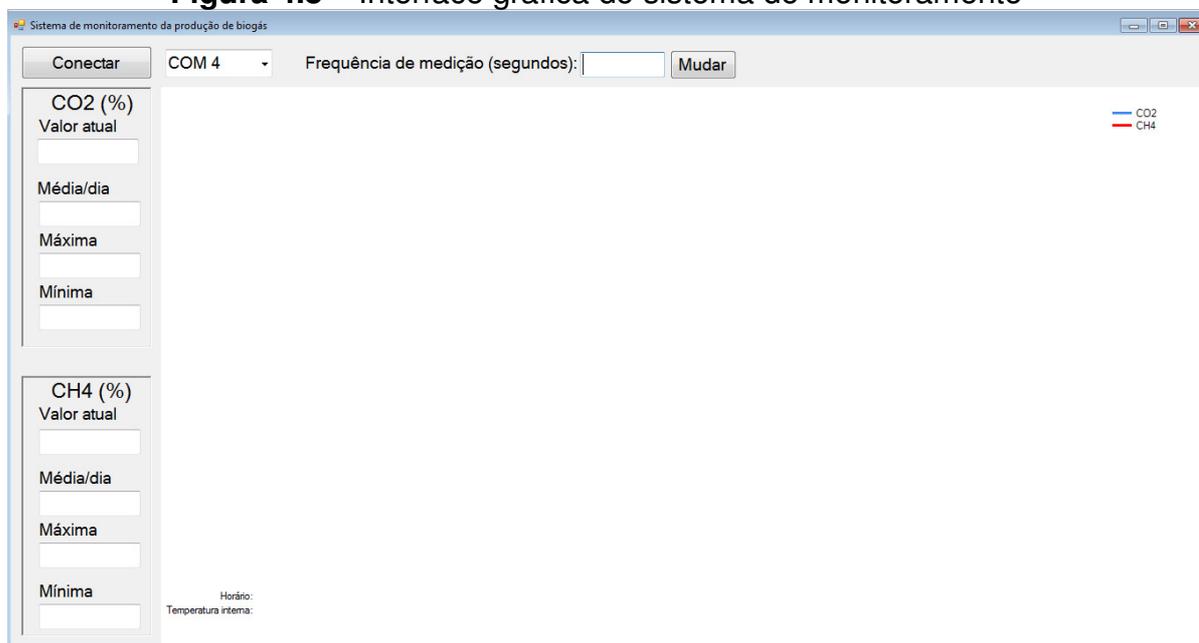
O termômetro digital DS18B20, no interior do biodigestor, bem como o módulo de caracterização do biogás, foram conectados à placa Arduino, cuja função é interligar os sensores, realizar a leitura dos dados e enviá-los ao software supervisor em um computador onde os mesmos são interpretados, armazenados e apresentados em tempo real em forma de gráficos, de maneira que o desempenho e a qualidade da produção do biogás possam ser analisados.

4.2 Desenvolvimento do sistema supervisor

Para o desenvolvimento do software optou-se pela utilização da linguagem C# (leia C *sharp*) utilizando o software *Visual Studio* como ambiente de desenvolvimento. A comunicação entre o software supervisor e o Arduino é feita utilizando comunicação serial (UART) através de uma porta serial emulada por meio do driver da porta USB, utilizada fisicamente como ligação entre Arduino e computador supervisor. Na figura 4.8 é apresentado a interface gráfica desenvolvida para o sistema de monitoramento, nela também é possível verificar

a porta serial identificada pelo computador como COM 4. O código completo utilizado neste trabalho está disponível no apêndice B.

Figura 4.8 – Interface gráfica do sistema de monitoramento

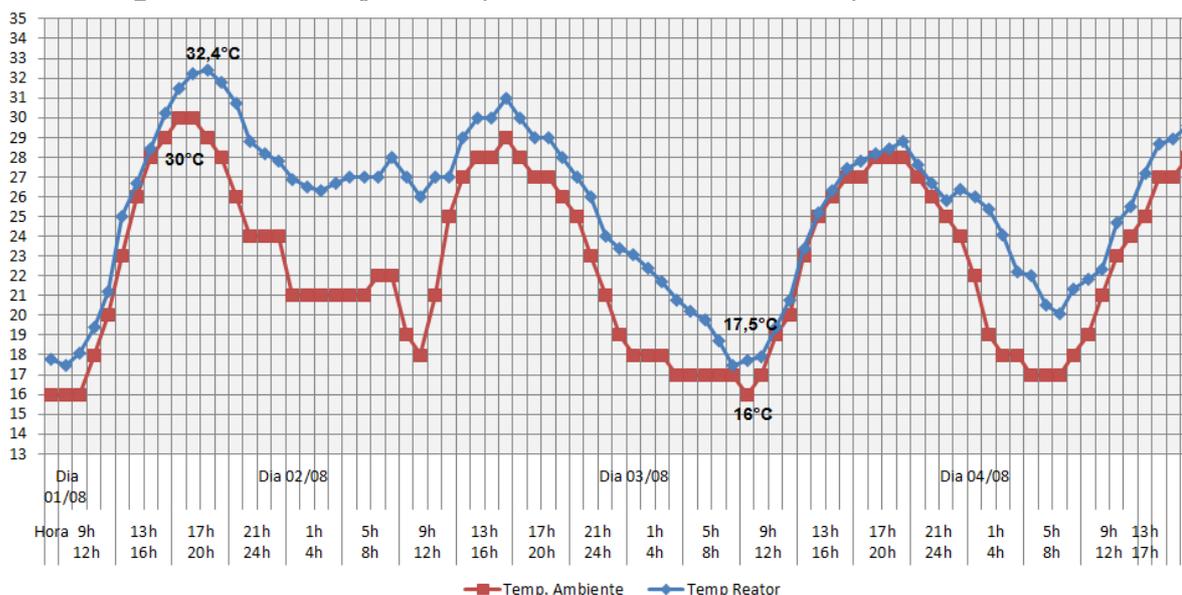


Fonte: o autor

4.3 Temperatura de operação do biodigestor

Apesar das reações bioquímicas envolvidas no processo de digestão anaeróbia apresentarem caráter exotérmico, a temperatura alcançada dentro do digestor sofre influência da temperatura ambiente local onde estão expostos, o material utilizado na construção do biodigestor também influencia nesse sentido. A relação entre a temperatura ambiente (coletada do site <http://www.inmet.gov.br>) e a temperatura interna do reator durante o período de coleta pode ser observada na Figura 4.9. Ressaltamos que o horário apresentado nas figuras corresponde ao horário de Mato Grosso do Sul que tem diferença de 1 hora a menos do horário de Brasília.

Figura 4.9 – Relação Temperatura Ambiente X Temperatura Reator



Fonte: o autor

Constata-se que a temperatura interna do reator sofreu oscilações em razão da temperatura ambiente durante o período de estudo, apresentando menor temperatura registrada no 3º dia de experimento, sendo atingida uma temperatura de 17,5°C, já a temperatura máxima foi registrada no 1º dia, alcançando 32,4°C. É possível observar que a temperatura interna do reator aumentava e alcançava as maiores temperaturas no período compreendido entre 11h e 17h, quando a temperatura ambiente estava mais alta e o reator recebia maior incidência de radiação solar, sofrendo um decréscimo e alcançado as menores temperaturas no período entre 1h e 9h, quando as temperaturas ambientes também eram reduzidas pela diminuição de incidência dos raios solares.

O biodigestor não foi colocado em isolamento térmico de forma a reproduzir as condições ambientais durante o seu funcionamento e foi mantido em área sem controle de temperatura. Apesar da oscilação de temperatura, a média de operação do reator foi de 25,4°C, essa temperatura corresponde ao limite máximo da faixa de operação psicrófila (15-25º) segundo BOUALLAGUI *et al.* (2004), já apresentado no capítulo 2.3 deste trabalho. Portanto, pode-se afirmar que, apesar de não operar nas duas temperaturas consideradas ótimas, mesófila (35°C) e termofílicas (55°C) pelo mesmo autor, o biodigestor esteve operando dentro de uma faixa aceitável de temperatura para a digestão anaeróbia.

Para CHERNICHARO (2010), é importante que haja uma estabilização da temperatura, ou seja, que não ocorram muitas variações térmicas no interior do biodigestor, pois tais variações podem ocasionar desequilíbrio na população microbiana, responsável pela degradação da matéria orgânica, o que ocasionaria falha no processo e conseqüentemente alterações na concentração do biogás. Essas alterações podem ser observadas nos gráficos de concentração dos gases apresentados a seguir, porém o desequilíbrio da população microbiana não é notado, uma vez que a leitura das concentrações dos gases não foi interrompida, o que indica que apesar de o experimento não quantificar a produção de biogás, o biodigestor não cessou sua produção neste período.

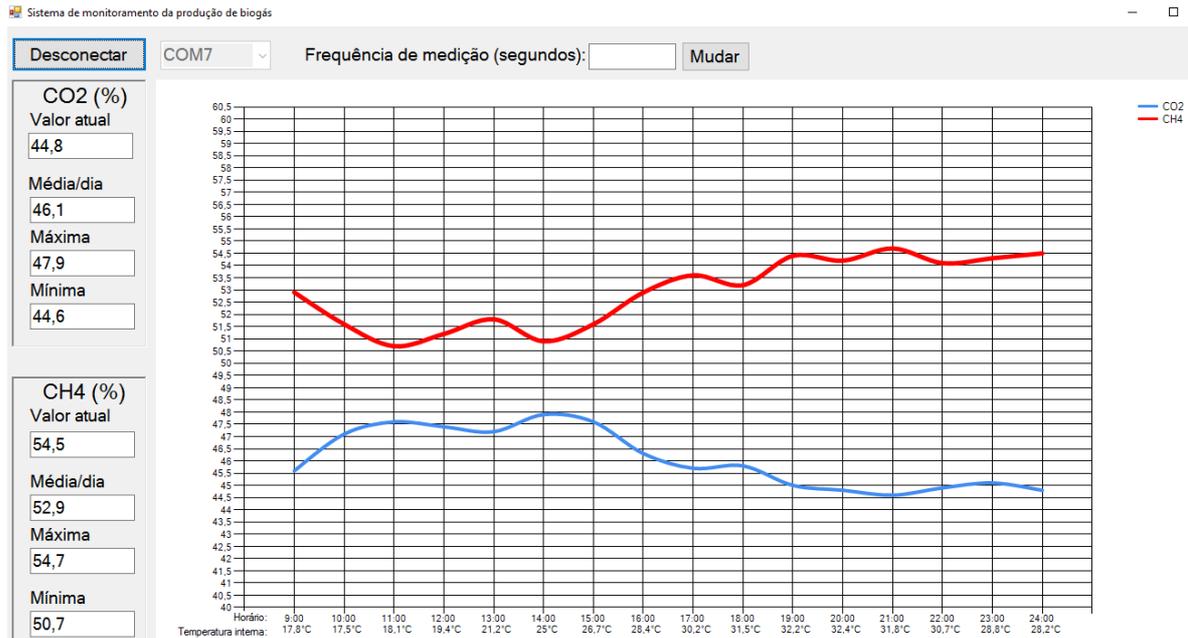
4.4 Concentração do biogás produzido

A partir da coleta de dados realizada através do módulo de análise, foram gerados gráficos demonstrando a concentração de CO₂ e CH₄ do biogás produzido em razão da temperatura interna do biodigestor.

A figura 4.10 apresenta a concentração de CO₂ e CH₄ no primeiro dia de coleta, quando o sistema começou a operar às 9h. A temperatura média de operação do biodigestor foi de 26,2°C. A concentração de CO₂ teve uma média de 46,1% e a máxima concentração de CO₂ observada foi de 47,9%, às 14h, quando a temperatura do reator era de 25°C, e, para fins de comparação, a temperatura ambiente era de 23°C. A concentração mínima de CO₂ foi de 44,6% observada às 21 horas, quando a temperatura do biodigestor era de 31,8°C e a temperatura ambiente de 28°C.

Já a média do CH₄ foi de 52,9%. A concentração máxima de CH₄ foi de 54,7% às 21 horas, no mesmo momento em que a concentração de CO₂ foi a mínima. A concentração mínima de CH₄ foi de 50,7%, às 11 horas, quando a temperatura no biodigestor era de 18,1°C e no ambiente de 16°C.

Figura 4.10 – Gráfico gerado pelo sistema no primeiro dia de coleta

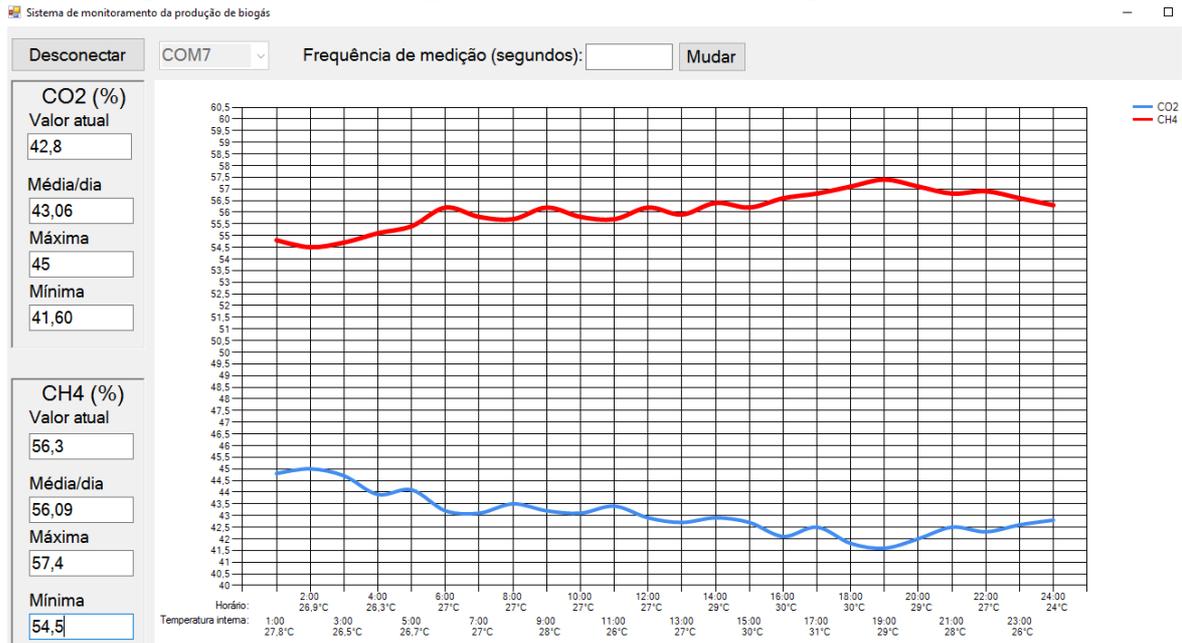


Fonte: o autor

A figura 4.11 apresenta a concentração de CO₂ e CH₄ no segundo dia de coleta, com 24h de análise. A temperatura média de operação do biodigestor foi de 27,6°C. A concentração de CO₂ teve uma média de 43,0% e máxima de 45%, às 2h, quando a temperatura do reator era de 26,9°C, e, para fins de comparação, a temperatura ambiente era de 21°C. A concentração mínima de CO₂ foi de 41,6% observada às 19 horas, quando a temperatura do biodigestor era de 29°C e a temperatura ambiente de 27°C.

Já a média do CH₄ foi de 56%. A concentração máxima de CH₄ foi de 57,4% às 19 horas, novamente no mesmo momento em que a concentração de CO₂ foi a mínima. A concentração mínima de CH₄ foi de 54,5%, às 2 horas, no mesmo momento em que a concentração de CO₂ alcançou a máxima.

Figura 4.11 - Gráfico gerado pelo sistema no segundo dia de coleta

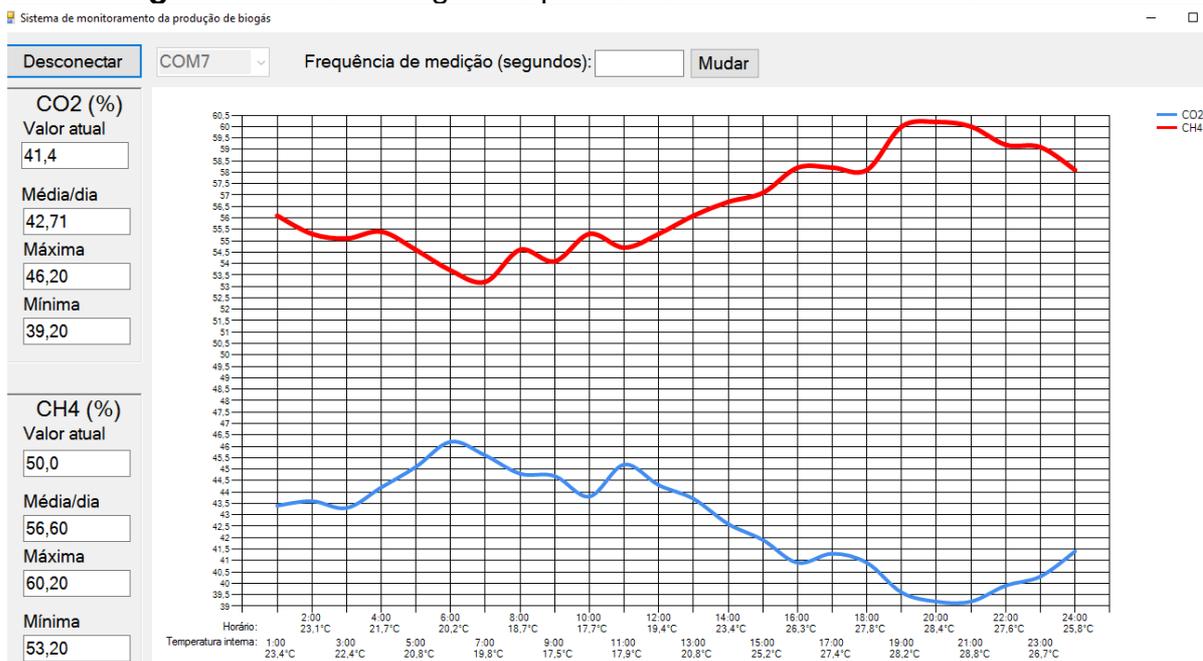


Fonte: o autor

A figura 4.12 demonstra os dados do terceiro dia de coleta, quando a temperatura média de operação do biodigestor foi de 23,2°C. A concentração de CO₂ teve uma média de 42,7% e a máxima concentração de CO₂ observada foi de 46,2%, às 6h, quando a temperatura do reator era de 20,2°C e a temperatura ambiente era de 17°C. A concentração mínima de CO₂ foi de 39,2% observada em duas medições consecutivas às 20h e 21h, quando a temperatura do biodigestor era de 28,4°C e 28,8°C e a temperatura ambiente de 28°C.

Já a média do CH₄ no terceiro dia foi de 56,6%. A concentração máxima de CH₄ foi de 60,2% às 20 horas, quando o CO₂ atingiu sua concentração mínima. A concentração mínima de CH₄ foi de 53,2%, às 7 horas, quando a temperatura no biodigestor era de 19,8°C e no ambiente de 17°C.

Figura 4.12 - Gráfico gerado pelo sistema no terceiro dia de coleta

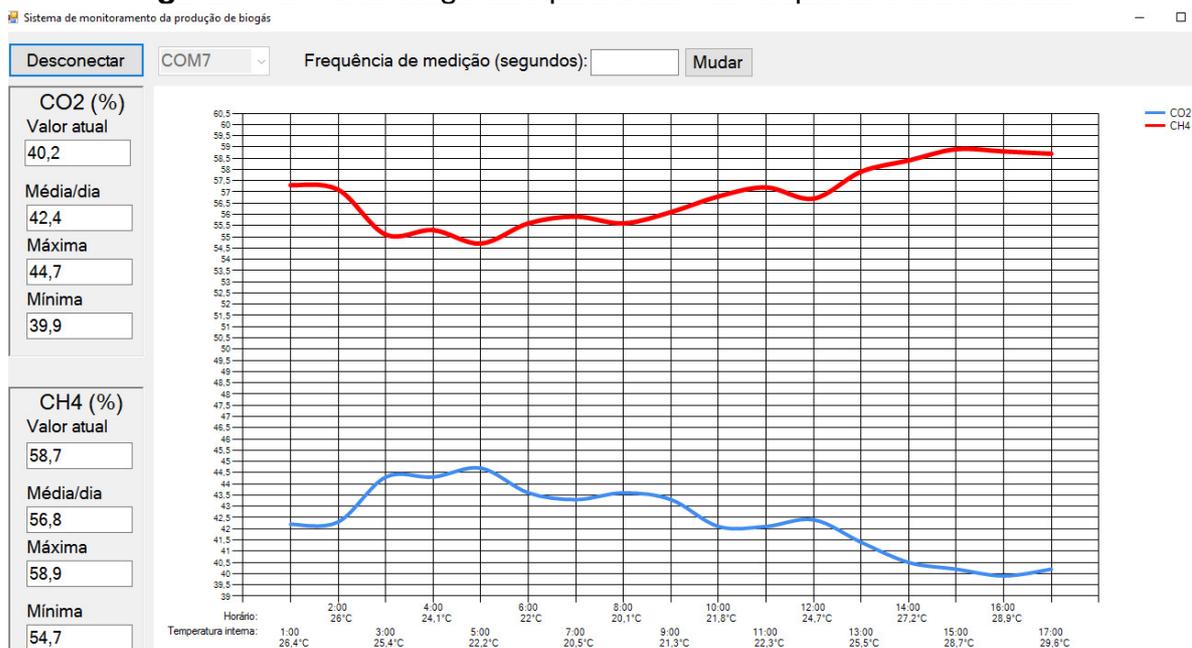


Fonte: o autor

A figura 4.13, apresentam os dados do quarto e último dia de coleta, finalizada às 17h. A temperatura média de operação do biodigestor no quarto dia foi de 24,5°C. A concentração de CO₂ teve uma média de 42,4% e a máxima concentração de CO₂ observada foi de 44,7%, às 5h, quando a temperatura do reator era de 22,2°C, e a temperatura ambiente era de 18°C. A concentração mínima de CO₂ foi de 39,9%, observada às 16h, quando a temperatura do biodigestor era de 28,9°C e a temperatura ambiente de 27°C.

A média do CH₄ no último dia de coleta foi de 56,8%. A concentração máxima de CH₄ foi de 58,9% às 15 horas, quando a temperatura no biodigestor era de 28,7°C e no ambiente de 27°C. A concentração mínima de CH₄ foi de 54,7%, às 5 horas, quando a temperatura no biodigestor era de 22,2°C e no ambiente de 18°C.

Figura 4.13 - Gráfico gerado pelo sistema no quarto dia de coleta



Fonte: o autor

No estudo de DAL MAGO (2009) a concentração de CH₄ nos biodigestores avaliados obteve uma média geral de 61,5%, sendo que as maiores concentrações predominaram nas estações do verão e primavera, devido à atividade microbiana mais elevada destes períodos.

DAL MAGO (2009) ainda afirma que as concentrações de CO₂ variam inversamente às concentrações de CH₄, isto é, se o percentual de um desses gases estiver de acordo com o que recomenda a literatura, significa que ambos estarão, pois constituem os principais componentes do biogás. Dessa forma, as menores concentrações de CO₂ irão corresponder às maiores de CH₄. Esse resultado pode ser observado nos Gráficos apresentados do ensaio da biodigestão realizado durante esta pesquisa.

Já no experimento de HONÓRIO (2009), utilizando um biodigestor em escala real, constatou-se que o biogás apresentou, em média, 62,64% de CH₄ e 36,98% de CO₂, que corresponde à concentração de 99,62% do biogás produzido.

No ensaio da biodigestão observamos que o biogás apresentou em média 55,8% de CH₄ e 43,4% de CO₂, correspondendo a 99,2% de todo o biogás gerado durante os 4 dias de coleta de dados. Apesar da concentração média de CH₄ ser

inferior aos resultados alcançados por Dal Mago e Honório, eles se apresentam dentro da concentração citada pela literatura, já apresentada no capítulo 2.5 que varia entre 50% e 80%.

Outro detalhe que deve ser salientado a respeito do ensaio da biodigestão é que a média obtida das concentrações de CH_4 e CO_2 se referem à um biodigestor com apenas 23 dias de operação. Considerando que o tempo de retenção hidráulica para o tipo de substrato utilizado (dejetos suínos), segundo a literatura, é de 20 dias, podemos observar que a concentração de CO_2 vai diminuindo no decorrer dos dias, quando a retenção hidráulica se aproxima de uma maior maturação. Além disso, observamos que quando a temperatura no reator aumenta, as concentrações de CH_4 se elevam, diminuindo então o CO_2 , já que suas concentrações variam inversamente.

Os gráficos produzidos pelo sistema de monitoramento se mostraram bastante eficazes para as discussões apresentadas referentes às variáveis temperatura e composição do biogás. Vale destacar que esses gráficos foram apresentados em tempo real no monitor do computador supervisor a cada nova leitura (definida em 1h), porém o sistema poderia ser configurado para um tempo menor de acordo com a necessidade apresentada e obviamente pela capacidade de produção do biodigestor.

Diante disso, pode-se concluir que o objetivo geral desta pesquisa, que era desenvolver um sistema de monitoramento da produção de biogás, capaz de permitir tempos de resposta aceitáveis permitindo por exemplo, a capacidade de detectar os primeiros indícios de uma instabilidade no processo e estabelecer contramedidas para compensar esta instabilidade, foi atingido. O sistema fez a leitura no tempo programado, que era de 1 hora, permitindo sua reprogramação para tempos menores, se necessário. Possibilitando respostas rápidas e, principalmente, detectar instabilidades no processo de biodigestão, otimizando a utilização do biogás para os fins esperados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do levantamento de dados e estudo bibliográfico de outras pesquisas realizadas com análises de emissão e caracterização do biogás, acredita-se que com a instalação do sistema proposto, conseguimos reduzir o tempo de obtenção de resultados da composição do biogás, uma vez que os dados são analisados de forma contínua e, também, reduzir os custos na coleta de amostras, dispensando a necessidade de um técnico para isso. Assim, é possível saber a quantidade de metano (CH₄) no biogás produzido e verificar o seu aproveitamento como combustível.

Devido ao grande número de variáveis (pH, humidade, temperatura, etc.) envolvidos na biodigestão anaeróbia , bem como a dificuldade de controle *in loco*, estudos de técnicas de monitoramento têm sido cada vez mais frequentes e importantes para otimizar os parâmetros de biodegradação. Neste sentido, o sistema de monitoramento proposto representa uma alternativa simples e de baixo custo operacional, pois permitiu o acompanhamento *online* de alguns parâmetros como a temperatura de operação do reator e a concentração dos principais gases que compõem o biogás produzido, permitindo a tomada de medidas corretivas a qualquer momento.

Além disso, a questão de pesquisa é respondida, uma vez que é possível analisar a qualidade de biogás por meio de sensores eletrônicos. O ensaio da biodigestão e os resultados encontrados apontaram que o sistema de monitoramento permitiu tempos de resposta aceitáveis que possibilitam a tomada de medidas corretivas em sistemas de produção de biogás.

Esta pesquisa pode contribuir para a área de bioenergia no sentido de otimizar o tempo de mensuração e caracterização dos gases emitidos por sistemas biodigestores, além de permitir uma quantificação mais precisa destes gases.

Outras pesquisas, nesta mesma linha, podem ainda, analisar a incorporação de sensores para análise da concentração de outros tipos de gases como o oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e o gás sulfídrico (H₂S), incorporar, também, ferramentas para quantificar o biogás produzido e sua vazão, além da

possibilidade de incluir mecanismos atuadores como, por exemplo, um aquecedor para o substrato do interior do biodigestor, que poderia ser acionado pelo sistema de forma automática de acordo com a programação dos dados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ANDRADE, Márcio Antônio Nogueira; NINO, Rafael ; RANZI, Tiago Jurua. **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental.** In: 4º Encontro de energia no meio rural - AGRENER 2002. Campinas. Anais do 4º Encontro de energia no meio rural - AGRENER 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/030.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- ARDUINO UNO. “**Arduino – ArduinoBoardUno**”. Disponível em: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acessado em: 08 jan. 2016.
- ARDUINO. **Arduino**. Disponível em: <http://www.arduino.cc/>. Acesso em: 14 mar. 2016.
- ARRUDA, Valmir Cristiano Marques de. **TRATAMENTO ANAERÓBIO DE EFLUENTES GERADOS EM MATADOUROS DE BOVINOS.** 2004.128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) -Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, PE, 2004. Disponível em: <http://www.liber.ufpe.br/teses/arquivo/20041111184737.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2016.
- AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental,** 2001. 111 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNESP. São Paulo, 2001.
- BARRERA, Paulo. **Biodigestores:** energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. 3. ed. [S.l.]: Ícone, 1993. 106 p.
- BOHRZ, G. I. **GERAÇÃO DE METANO EM LAGOA ANAERÓBIA: UM ESTUDO DE CASO EM ABATEDOURO DE BOVINOS.** 2010. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos)- Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), Santa Maria - RS, 2010. Disponível em: http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3281. Acesso em: 13 abr. 2016.
- BOUALLAGUI, H.; HAOUARI, O.; TOUHAMI, Y.; CHEIKH, R.B.; MAROUANI, L.; HAMDÍ, M. **Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste.** *Process Biochemistry*, Riekmansworth, v.39, n.12, p. 2143-2148, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223649727_Effect_of_temperature_on_the_performance_of_an_anaerobic_tubular_reactor_treating_fruit_and_vegetable_waste_Proc_Biochem Acesso em: 28 jan. 2016.

- BRASILCHANNEL. **PONTA PORÃ - MS**: Dados gerais. Disponível em: <<http://www.brasilchannel.com.br/municipios/>>. Acesso em: 28 jul. 2016.
- CAMPOS, A. T. **Análise energética de biodigestores tubulares usando dejetos de suínos**. Anais do Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Campinas: NIPE/SBEA/UNICAMP, 2004. v. 1. p. 1-6.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), 1997. 246 p.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2010. 588 p. v. 5.
- CO2METER.COM. **MH-Z92**: Mechanical and Electrical Characteristics. Disponível em: <<http://co2meters.com/Documentation/Manuals/Manual-WIN-0001.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2016.
- CO2METER.COM2. **Dual Gas (MH-Z92)** : Serial Host Protocol. Disponível em: <<http://co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN143-Serial-Protocol-WIN-0001.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2016.
- COELHO, S.T. **Biofuels – Advantages and Trade Barriers - Background Paper to the Expert Meeting for Sectoral Trade Review of Developing Country Participation in New and Dynamic Sectors Session on Biofuels -** Genebra, Fevereiro, 2005
- COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; FERRI, P.; KOLLING E. M. Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Informe GEPEC**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 44-55, 2008. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/2186/1698>>. Acesso em: 09 mar. 2016.
- COSTA, Eduardo da Silva Guimarães Martins da. **TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM REATOR ANAERÓBIO DE DUPLO ESTÁGIO VISANDO A OBTENÇÃO DE BIOENERGIA E CRÉDITOS DE CARBONO**: Estudo de Caso CEASAMINAS. 2011. 108f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-8NNMHA/disserta_o_eduardo_mar_tins_da_costa__no_429__vers_o_final.pdf?sequence=1>. Acesso em: 28 jan. 2016.
- CRAVEIRO, Américo Martins. **Influência da Proporção de Lixo e Lodo de Esgoto no Processo de Digestão Anaeróbia desses Resíduos**. 1982. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1984.

- DAL MAGO, Anigeli. **AValiação de Biodigestores com o uso de Dejetos de Suínos, em Braço do Norte e em Concórdia**. 2009. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93209/273368.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- DATASHEET DS18B20, Thermometer DS18B20. "**Datasheets**". Disponível em: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2015
- DEGANUTTI, R. P. et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Departamento de Arquitetura, Artes e Representações Gráficas, UNESP: Bauru, SP, 2002. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2016.
- DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika (Org.). **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. [S.l.: s.n.], 2008. 443 p. Disponível em: <http://zorg-biogas.com/upload/book_biogas_plant.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2016.
- DENNIS, A.; BURKE, P.E. Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook. **Environmental Energy Company**. Olympia, 2001. Disponível em: <<http://www.makingenergy.com/Dairy%20Waste%20Handbook.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2016.
- FDEZ-GÜELFO, L. A.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C.; SALES, D.; ROMERO, L.I. New indirect parameters for interpreting a destabilization episode in an anaerobic reactor. **Chemical Engineering Journal**, [S.l.], v. 180, p. 32 -38, jan. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711013490>>. Acesso em: 30 mar. 2016.
- GASPAR, Rita M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias Propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-PR**. 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, SC, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85585/224646.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- GOMES, André Luiz. **Análise técnica e econômica de filtro anaeróbio utilizado para o tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios: Estudo de caso**. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2006. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/197M.PDF>>. Acesso em: 28 jan. 2016.
- HAACK, Sheyla. Caetano. **Análise técnica e econômica para aproveitamento dos dejetos de caprinos em biodigestores no semiárido baiano**. 2009.

215f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/8931>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

HENN, Alan. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – condição de partida.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 157 p., 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102858/214231.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 fev. 2016.

HIGARASHI, M. M.; SARDÁ, L. G.; MULLER, S.; OLIVEIRA, P. A. V. de; MATTEI, R. M.; COMIN, J. J. **Metodologia para medir a emissão de CH₄, CO₂ e H₂S em compostagem de dejetos de suínos.** Concórdia: Embrapa, 2010. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58043/1/CUsersPiazzonDocuments479.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

HONÓRIO, M. O. **Estimativa de crédito de carbono da produção e queima do biogás proveniente de dejetos suínos:** Estudo de caso. 93 p. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/92884>>

IANNICELLI, André Luiz. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira.** 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2008. Disponível em: <http://www.bdt.unitau.br/tesdesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=352>. Acesso em: 10 mar. 2016.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS:** Ponta Porã - MS. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 04 ago. 2016.

INSTITUTO WINROCK. **Manual de treinamento em biodigestão.** 2.ed. Brasil, 2008. 18 p. Disponível em: http://www.ieham.org/html/docs/Manual_Biodigestao.pdf. Acesso em: 13 jan. 2016.

JANTSCH, T. G.; MATTIASSON, B.. An automated spectrophotometric system for monitoring buffer capacity in anaerobic digestion processes. **Water Research**, [S.l.], v. 38, n. 17, p. 3645-3650, maio. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135404002714>>. Acesso em: 17 set. 2015.

LIMA, K. M. G. et al. Sensores ópticos com detecção no infravermelho próximo e médio, **Revista Química Nova**, Vol. 32, No. 6, 1635-1643, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n6/47.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2015.

- LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil: novos estudos. **CEBRAP**, São Paulo, n. 78, p. 15-21, jul. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 15 jan. 2014.
- MARQUES, C. A. **Microgeração de Energia Elétrica em uma Propriedade Rural Utilizando Biogás como Fonte Primária de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2012.
- MORAES, Luciana de Mattos . **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de dejetos oriundos de atividades zootécnicas**. 2000. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Área de Concentração: Água e Solo)- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2000. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000205778&opt=4>>. Acesso em: 20 jan. 2016.
- NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Biodigestão: A alternativa energética**. São Paulo, SP: Nobel, 1986. 93 p.
- OLIVEIRA, P.A.V. de; HIGARASHI, M.M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006. (Documentos, 115). Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_14177t4r.PDF>. Acesso em: 29 jan. 2016.
- PIEROTTI, Sulita Mendes. **Avaliação da partida de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis**. 2007. 141 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)- Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-28032007-134003/publico/SulitaPierotti.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2016.
- PINTO, Rafael de Oliveira. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. 2006. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/89180/235699.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 fev. 2016.
- RIBEIRO, R. J. **Simulação de espectros de absorção para determinação de temperaturas em chamas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2006.
- SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para**

- geração de eletricidade.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá – 2007.
- SCHAEFFER, R. D. **Estudo e desenvolvimento de um sensor de CO₂ de baixo custo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.
- SIQUEIRA, J. **Co-digestão de glicerina bruta associada a esterco bovino na produção de biogás.** Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2012. Disponível em: http://200.201.88.199/portalpos/media/Disserta_Jesse_final.pdf. Acesso em: 14 mai. 2015.
- SOUTO, T. F. S.; AQUINO, S.; CHERNICHARO, C. A. L. Estudo comparativo de diferentes metodologias de quantificação de metano no teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) de lodos anaeróbios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007. Belo Horizonte. **Saneamento ambiental: compromisso ou discurso?** Belo Horizonte: ABES, 2007. Disponível em: <http://ufpa.fadensp.org.br/gphs/anais_congresso_detalhes>. Acesso em: 07 jun. 2015.
- SOUZA, Marcos Eduardo de. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, [S.l.], v. 44, n. 137, p. 88-94, jun. 1984. Disponível em:<http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_137_n_1173.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2016.
- STAISS, C.; PEREIRA, H. **Biomassa Energia Renovável na Agricultura e no Setor Florestal Instituto Superior de Agronomia.** Portugal, Revista Agros n. 01 p. 21-28, 2001.
- STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos.** 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia)- Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, 2001. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/88047>>. Acesso em: 28 jan. 2016.
- VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos:** Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande, PB:UFPB, 1994. 232p.
- VERMA, SHEFALI. **ANAEROBIC DIGESTION OF BIODEGRADABLE ORGANICS IN MUNICIPAL SOLID WASTES.** 2002. 50p. Dissertação (Master of Science Degree in Earth Resources Engineering) - Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, Columbia University, New York, NY, Estados Unidos, 2002. Disponível em: <<http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE COMPLETO E COMENTADO, DO SKETCH UTILIZADO NO ARDUINO

```
1 //Inclusão das bibliotecas necessárias
2 #include "SoftwareSerial.h" //Comunicação Serial - UART (para sensor MH-Z92)
3 #include <SPI.h> //Comunicação Serial - SPI - (para sensor DS18B20)
4 #include <SD.h> //Módulo SD
5 #include <DS1307.h> //RTC
6 #include <OneWire.h> //Comunicação utilizada pelo Sensor DS18B20
7 //Criação de objetos das classes
8 File arquivoCSV;
9 OneWire ds(8); //Sensor de Temperatura na porta 8 do Arduino (Resistor de 4,7K necessário)
10 DS1307 rtc(A4, A5);
11 //Portas utilizadas para conexão com o Arduino (5 = Rx , 6 = Tx), (MHZ92 (1 = Rx, 2 = Tx))
12 SoftwareSerial MHZ92_Serial (5, 6); //(Rx , Tx), (MHZ92 (1 = Rx, 2 = Tx))
13 //Declaração de valores padrão para requisição de CO2 e CH4
14 byte co2Check [9] = {0xFF, 0x01, 0x73, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x8C};
15 byte ch4Check [9] = {0xFF, 0x01, 0x72, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x8D};
16 //Declaração de valores padrão para resposta de CO2 e CH4
17 char responseCO2[9];
18 char responseCH4[9];
19 String horario = "";
20 String data = "";
21 String comando = "";
22 int tempo_delay = 30000;
23 int motor = 10; //porta utilizada para acionamento do motor da bomba de diafragma
24 float percentCO2;
25 float percentCH4;
26 float temperatura;
27
28 void setup() {
29 SD.begin(9); // o parâmetro é a porta conectado ao CS do módulo SD
30 pinMode(13, OUTPUT);
31 pinMode(motor, OUTPUT);
32 rtc.halt(false);
33 arquivoCSV = SD.open("BIOGAS.CSV", FILE_WRITE);
34
35 //Velocidade da comunicação serial padrão
36 Serial.begin(57600);
37
38 //Velocidade da comunicação serial do sensor MH-Z92
39 MHZ92_Serial.begin(9600);
40
41 if(arquivoCSV){
42 //Serial.println("Arquivo criado.");
43 }else{
44 //Serial.println("Arquivo não criado.");
45 }
46 }
47 void loop() {
48 if(Serial.available()){
49 while(Serial.available()){
50 comando += (char)Serial.read();
51 tempo_delay = comando.toInt();
52 }
53 comando = "";
54 }
55 //if(MHZ92_Serial.available()){
56 temperatura = getTemperatura();
57 percentCO2 = getPercentCO2();
58 percentCH4 = getPercentCH4();
59 digitalWrite(motor, LOW); //Desliga o motor
60 horario = rtc.getTimeStr();
61 data = rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT);
62 arquivoCSV = SD.open("BIOGAS.CSV", FILE_WRITE);
```

```

63     arquivoCSV.print(data);
64     arquivoCSV.print("");
65     arquivoCSV.print(horario);
66     arquivoCSV.print(";");
67     arquivoCSV.print(percentCO2);
68     arquivoCSV.print("%");
69     arquivoCSV.print(";");
70     arquivoCSV.print(percentCH4);
71     arquivoCSV.print("%");
72     arquivoCSV.print(";");
73     arquivoCSV.print(temperatura);
74     arquivoCSV.println("C");
75     arquivoCSV.close();
76     // Serial.print("CO2:");
77     Serial.print(percentCO2);
78     Serial.print("-");
79     // Serial.print("CH4:");
80     Serial.print(percentCH4);
81     Serial.print("-");
82     Serial.print(temperatura);
83     Serial.print("-");
84     Serial.println(tempo_delay);
85 }
86 delay(tempo_delay-2000); //Retira 2s do tempo
87 delay(tempo_delay);
88 digitalWrite(motor, HIGH); //Liga o motor por 2s
89 }
90 // Função de Solicitação das concentrações dos gases em % ao sensor MH-Z92
91 float getPercentCO2(){
92     // Envia a solicitação (CO2) em bytes para o sensor MH-Z92
93     MHZ92_Serial.write(co2Check, 9);
94     // Recebe a solicitação (CO2) em bytes
95     MHZ92_Serial.readBytes(responseCO2, 9);
96     int high_Byte = (int)responseCO2[2];
97     int low_Byte = (int)responseCO2[3];
98     float percent = (float)((256*high_Byte)+low_Byte)/10;
99     return percent;
100 }
101 float getPercentCH4(){
102     // Envia a solicitação (CH4) em bytes para o sensor MH-Z92
103     MHZ92_Serial.write(ch4Check, 9);
104     // Recebe a solicitação (CH4) em bytes
105     MHZ92_Serial.readBytes(responseCH4, 9);
106     int high_Byte = (int)responseCH4[6];
107     int low_Byte = (int)responseCH4[7];
108     float percent = (float)((256*high_Byte)+low_Byte)/10;
109     return percent;
110 }
111
112 // Função para retornar a temperatura do sensor DS18B20
113 float getTemperatura() {
114     float celsius, fahrenheit;
115     byte i;
116     byte present = 0;
117     byte type_s;
118     byte data[12];
119     byte addr[8];
120     if ( !ds.search(addr) ) {
121         ds.reset_search();
122         delay(250);
123     }
124
125     //o primeiro byte ROM indica qual o chip
126     switch (addr[0]) {
127     case 0x10: //indica que o chip é o DS1820
128         type_s = 1;
129         break;

```

```

130     case 0x28: //indica que o chip é o DS18B20 (utilizado na presente pesquisa)
131         type_s = 0;
132         break;
133     case 0x22: //indica que o chip é o DS1822
134         type_s = 0;
135         break;
136     }
137     ds.reset();
138     ds.select(addr);
139     ds.write(0x44, 1);
140     delay(1000);
141     present = ds.reset();
142     ds.select(addr);
143     ds.write(0xBE);
144     for ( i = 0; i < 9; i++) {
145         data[i] = ds.read();
146     }
147     int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];
148     if (type_s) {
149         raw = raw << 3;
150         if (data[7] == 0x10) {
151             raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6];
152         }
153     } else {
154         byte cfg = (data[4] & 0x60);
155         if (cfg == 0x00) raw = raw & ~7;
156         else if (cfg == 0x20) raw = raw & ~3;
157         else if (cfg == 0x40) raw = raw & ~1;
158     }
159     celsius = (float)raw / 16.0; // Conversão temperatura em Fahrenheit para Celsius
160     return celsius;
161 }

```

APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE (C#) COMPLETO E COMENTADO, DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.ComponentModel;
4 using System.Data;
5 using System.Drawing;
6 using System.Linq;
7 using System.Text;
8 using System.Threading.Tasks;
9 using System.Windows.Forms;
10 using System.IO.Ports;
11
12 namespace BioGas_
13 {
14     public partial class Form1 : Form
15     {
16         //Declaração de variáveis
17         delegate void SetTextCallback(string text); //Método utilizado para mudança de texto do TextBox
18         //Variáveis utilizadas para receber os valores do sensor de CO2 e CH4
19         double CO2;
20         double CH4;
21         //Cálculo da média
22         double valorTotalCO2;
23         double valorTotalCH4;
24         double mediaCO2;
25         double mediaCH4;
26         //Valores máximos
27         double maximaCO2;
28         double maximaCH4;
29         //Valores mínimos
30         double minimaCO2;
31         double minimaCH4;
32         //Recebe o valor do sensor DS18B20
33         double temperatura;
34         //Auxiliares
35         int contadorMedia;
36         int delay;
37         //Responsável por saber se está conectado ou não ao Arduino
38         bool estadoCOM;
39         //Método inicial do formulário
40         public Form1()
41         {
42             InitializeComponent(); //Inicia todos os componentes da tela
43             CenterToScreen(); //Posiciona o formulário no centro da tela do computador
44             atualizaListaCOMs(); //Chamada deste método
45             timerCOM.Enabled = true; //Inicia o timer, responsável pelas medições de acordo com a frequência escolhida
46             //Seleciona o tipo visual de gráfico
47             chtGraficoCO2.Series[0].ChartType = System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
48             chtGraficoCO2.Series[1].ChartType = System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
49             //Ativa o modo de data no gráfico
50             chtGraficoCO2.Series[0].XValueType = System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.ChartValueType.DateTime;
51             chtGraficoCO2.Series[1].XValueType = System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.ChartValueType.Time;
52             //Atribui os textos para as legendas de CO2 e CH4
53             chtGraficoCO2.Series[0].LegendText = "CO2";
54             chtGraficoCO2.Series[1].LegendText = "CH4";
55         }
56         //Método responsável por atualizar a lista de COMs (Arduinos) disponíveis na USB
57         private void atualizaListaCOMs()
58         {
59             int i; //Variável auxiliar
60             bool quantDiferente; //Variável para sinalizar que a quantidade de portas mudou
61             i = 0;
62             quantDiferente = false;
63             //Se a quantidade de portas mudou, então
```

```

64     if (cbCom.Items.Count == SerialPort.GetPortNames().Length)
65     {
66         foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
67         {
68             if (cbCom.Items[i++].Equals(s) == false)
69             {
70                 quantDiferente = true;
71             }
72         }
73     }
74     else
75     {
76         quantDiferente = true;
77     }
78     //Se não foi detectado diferença
79     if (quantDiferente == false)
80     {
81         return; //retorna
82     }
83     //Limpa o comboBox
84     cbCom.Items.Clear();
85     //Adiciona todas as COMs disponíveis na lista de COMs
86     foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
87     {
88         cbCom.Items.Add(s);
89     }
90     //Seleciona a primeira posição da lista, esta é mostrada no comboBox
91     cbCom.SelectedIndex = 0;
92 }
93 //Após o formulário ser totalmente carregado novamente se faz a atualização de portas
94 private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
95 {
96     atualizaListaCOMs();
97 }
98 //Este método é acionado quando o botão "Conectar/Desconectar" é apertado
99 private void bttConectar_Click(object sender, EventArgs e)
100 {
101     if (serialPort.IsOpen == false) //Verifica se há comunicação serial.
102     {
103         try
104         {
105             serialPort.PortName = cbCom.Items[cbCom.SelectedIndex].ToString(); //Pega a COM que está selecionada
106             no comboBox
107             serialPort.Open(); //Tenta iniciar uma comunicação serial com a COM selecionada
108         }
109         catch
110         {
111             return;
112         }
113         if (serialPort.IsOpen) //Se for estabelecida a comunicação, muda-se o texto do botão e deixa inativo a
114         comboBox
115         {
116             bttConectar.Text = "Desconectar";
117             cbCom.Enabled = false;
118             estadoCOM = true;
119         }
120     }
121     else //Caso já exista comunicação serial
122     {
123         try
124         {
125             //Para a comunicação serial, muda o texto do botão e ativa a comboBox
126             serialPort.Close();
127             cbCom.Enabled = true;
128             bttConectar.Text = "Conectar";
129             estadoCOM = false;
130         }

```

```

131     catch
132     {
133         return;
134     }
135 }
136 }
137 //Este método é responsável por consultar os dados provenientes da COM
138 private void consultaDados()
139 {
140     this.SetText(serialPort.ReadExisting());
141 }
142 //Este método tem como objetivo receber os dados da COM e analisar os mesmos
143 private void SetText(string text)
144 {
145     String[] valores = new String[3]; //Cria-se um vetor de 4 índices
146     if (this.txtCO2.InvokeRequired) //Verifica se a thread que criou o objeto está sendo utilizada para alteração do
147 texto do mesmo
148     {
149         SetTextCallback d = new SetTextCallback(SetText);
150         this.Invoke(d, new object[] { text });
151     }
152 else //Como não está, pois utiliza-se o componente Timer como thread, sempre cairá nesta opção
153     {
154         //Verifica se os dados da COM estão vazios
155         if (text == "")
156         {
157         }
158         //Caso não estejam
159         else
160         {
161             valores = text.Split('-'); //Divide o texto a partir do traço existente no mesmo e atribui à variável "valores"
162 //Converte os índices de valores para double e atribui-os às variáveis CO2, CH4, temp, além de trocar o ponto por vírgula
163             CO2 = Convert.ToDouble(valores[0].Replace('.', ','));
164             CH4 = Convert.ToDouble(valores[1].Replace('.', ',')); //
165             temperatura = Convert.ToDouble(valores[2].Replace('.', ','));
166             delay = (int)Convert.ToInt64(valores[3]); //Recebe o valor de delay ou tempo da frequência de medição
167             //Coloca os valores atuais dos gases nos textBox
168             this.txtCO2.Text = CO2.ToString() + "%";
169             this.txtCH4.Text = CH4.ToString() + "%";
170             //Manda aos métodos de média, máxima e mínima os valores dos gases
171             mediaDia(CO2, CH4);
172             maximaDia(CO2, CH4);
173             minimaDia(CO2, CH4);
174         }
175     }
176 }
177 //Método que calcula a média do dia
178 private void mediaDia(double CO2, double CH4)
179 {
180     contadorMedia++; //A cada medição adiciona-se mais 1 para a variável, pois trata-se de média aritmética
181     //Os valores atuais dos gases são adicionados no valor total já armazenado
182     valorTotalCO2 += CO2;
183     valorTotalCH4 += CH4;
184     //A média é calculada pela divisão do valor total pela quantidade de medições
185     mediaCO2 = (float)valorTotalCO2/contadorMedia;
186     mediaCH4 = (float)valorTotalCH4/contadorMedia;
187     //Os dados de média de cada gás são associados aos textBox respectivos
188     this.txtMediaCO2.Text = mediaCO2.ToString() + "%";
189     this.txtMediaCH4.Text = mediaCH4.ToString() + "%";
190 }
191 //Método que calcula a máxima do dia
192 private void maximaDia(double CO2, double CH4)
193 {
194     if (CO2 > maximaCO2) //Se o valor atual de CO2 for maior que o valor máximo armazenado
195     {
196         maximaCO2 = CO2; //O valor máximo será o valor atual de CO2
197         this.txtMaximaCO2.Text = maximaCO2.ToString() + "%"; //Associa-se o valor máximo ao textBox

```

```

198     }
199     if(CH4 > maximaCH4) //Se o valor atual de CH4 for maior que o valor máximo armazenado
200     {
201         maximaCH4 = CH4; //O valor máximo será o valor atual de CH4
202         this.txtMaximaCH4.Text = maximaCH4.ToString() + "%"; //Associa-se o valor máximo ao textBox
203     }
204 }
205 //Método que calcula a mínima do dia
206 private void minimaDia(double CO2, double CH4)
207 {
208     if (contadorMedia == 1) //Caso seja a primeira medição, os valores mínimos serão os primeiros valores recebidos
209     {
210         minimaCO2 = CO2;
211         minimaCH4 = CH4;
212     }
213     else
214     {
215         if (CO2 < minimaCO2) //Se o valor atual de CO2 é menor que o valor mínimo armazenado
216         {
217             minimaCO2= CO2; //O valor mínimo será o valor atual de CO2
218         }
219         if (CH4 < minimaCH4) //Se o valor atual de CH4 é menor que o valor mínimo armazenado
220         {
221             minimaCH4 = CH4; //O valor mínimo será o valor atual de CH4
222         }
223     }
224     //Associa-se os valores mínimos aos textBoxs respectivos
225     this.txtMinimaCO2.Text = minimaCO2.ToString() + "%";
226     this.txtMinimaCH4.Text = minimaCH4.ToString() + "%";
227 }
228 //Método que é chamado a cada certo intervalo de tempo do componente Timer
229 private void timerCOM_Tick_1(object sender, EventArgs e)
230 {
231     try
232     {
233         atualizaListaCOMs(); //Atualiza a lista de COMs novamente
234         //Verifica se o número de pontos no gráfico é maior que 26, caso sim, remove os pontos e os atualiza
235         if ((chtGraficoCO2.Series[0].Points.Count >= 26)&&(chtGraficoCO2.Series[1].Points.Count >= 26))
236         {
237             chtGraficoCO2.Series[0].Points.RemoveAt(0);
238             chtGraficoCO2.Series[1].Points.RemoveAt(0);
239             chtGraficoCO2.Update();
240         }
241         if (estadoCOM == true) //Verifica se existe uma comunicação entre o software e o Arduino
242         {
243             consultaDados(); //Chama o método consultaDados, responsável pela recepção dos dados do sensor
244             DateTime timeStamp = DateTime.Now; //Cria-se um objeto para calcular o horário atual
245             //Recebe o horário atual e concatena com a temperatura lida no sensor DS18B20
246             String data = timeStamp.ToLongTimeString()+"\n"+temperatura+"°C";
247             //Cria os pontos no gráfico a partir da data/temperatura e os valores dos gases do sensor
248             chtGraficoCO2.Series[1].Points.AddXY(data, CH4);
249             chtGraficoCO2.Series[0].Points.AddXY(data, CO2);
250         }
251     }
252     catch //Caso não consiga realizar os processos acima, indica que foi perdida a conexão entre o software e o
253     Arduino
254     {
255         Console.WriteLine("Conexão perdida.");
256     }
257 }
258 private void label1_Click(object sender, EventArgs e)
259 {
260 }
261 private void lblFrequencia_Click(object sender, EventArgs e)
262 {
263 }
264

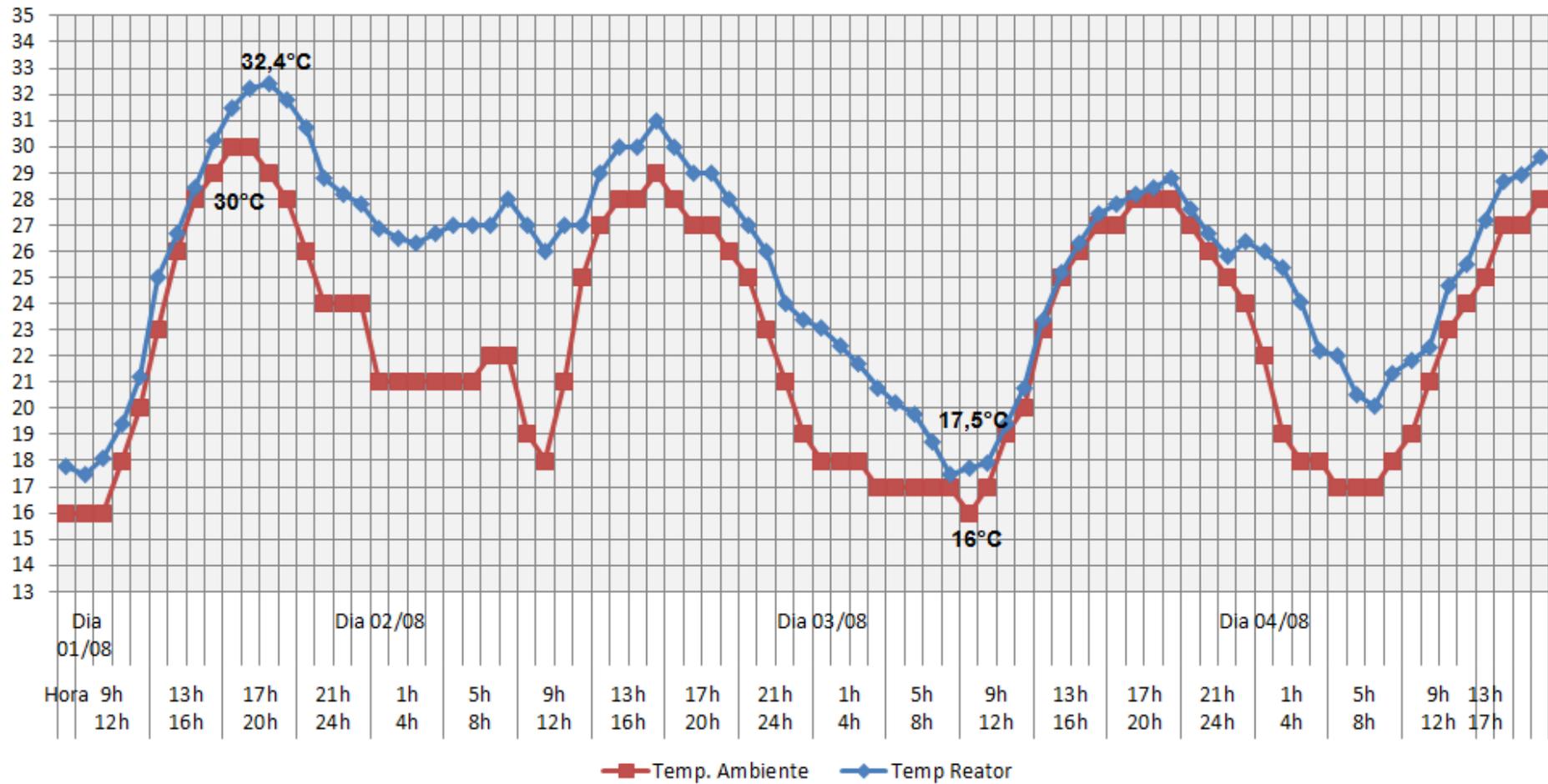
```

```

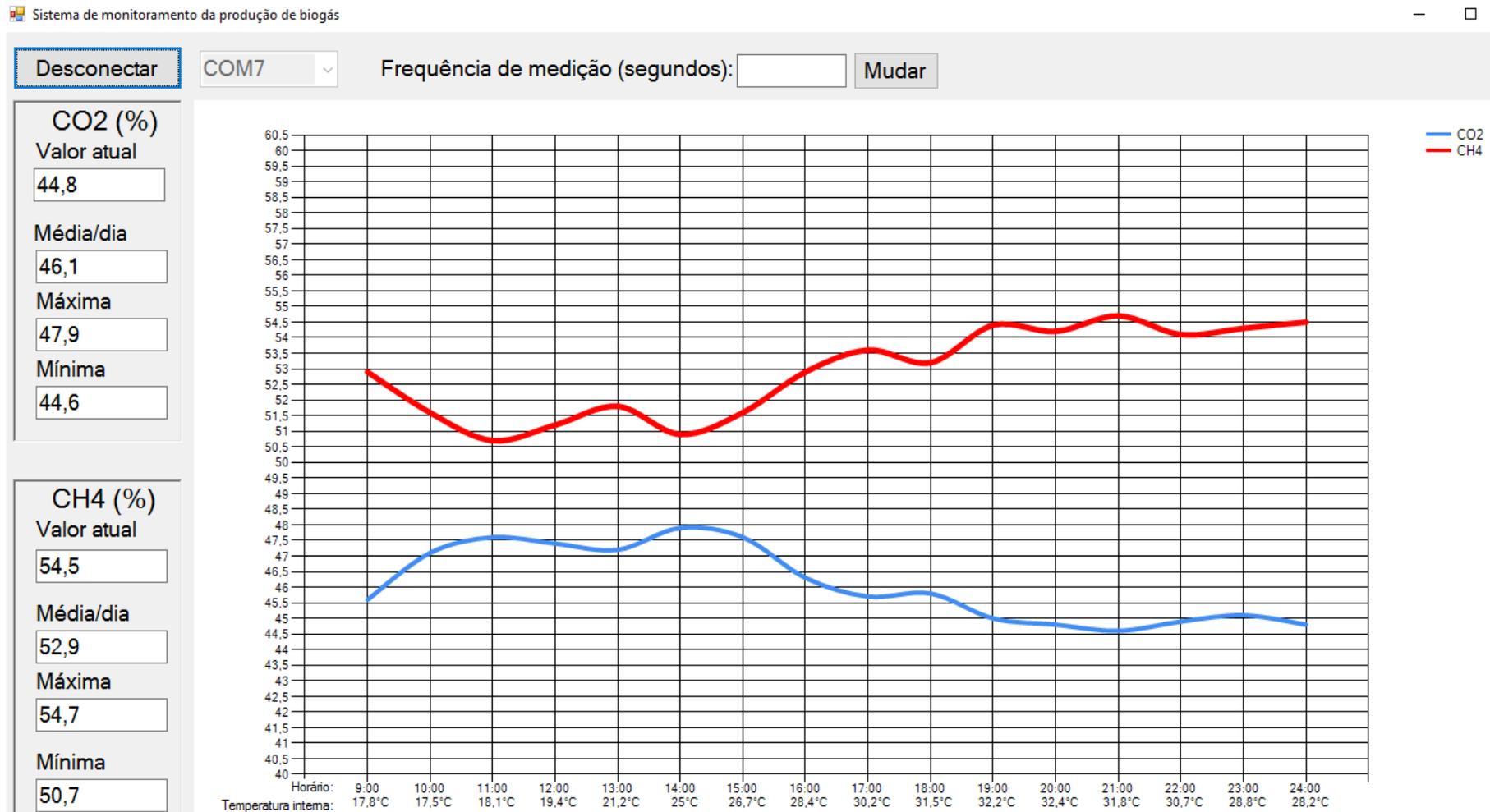
265 //Método que é chamado ao clicar no botão de "Mudar" a frequência de medição
266 private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
267 {
268 //Converte o valor escrito no textBox e converte para inteiro (segundos)
269 delay = (int)Convert.ToInt64(txtFrequencia.Text);
270 serialPort.Write(delay.ToString()); //Manda para o Arduino em forma de String
271 }
272 private void label10_Click(object sender, EventArgs e)
273 {
274 }
275
276 private void chtGraficoCO2_Click(object sender, EventArgs e)
277 {
278 }
279
280 private void Form1_Load_1(object sender, EventArgs e)
281 {
282 }
283
284 private void label11_Click(object sender, EventArgs e)
285 {
286 }
287 }
288 }

```

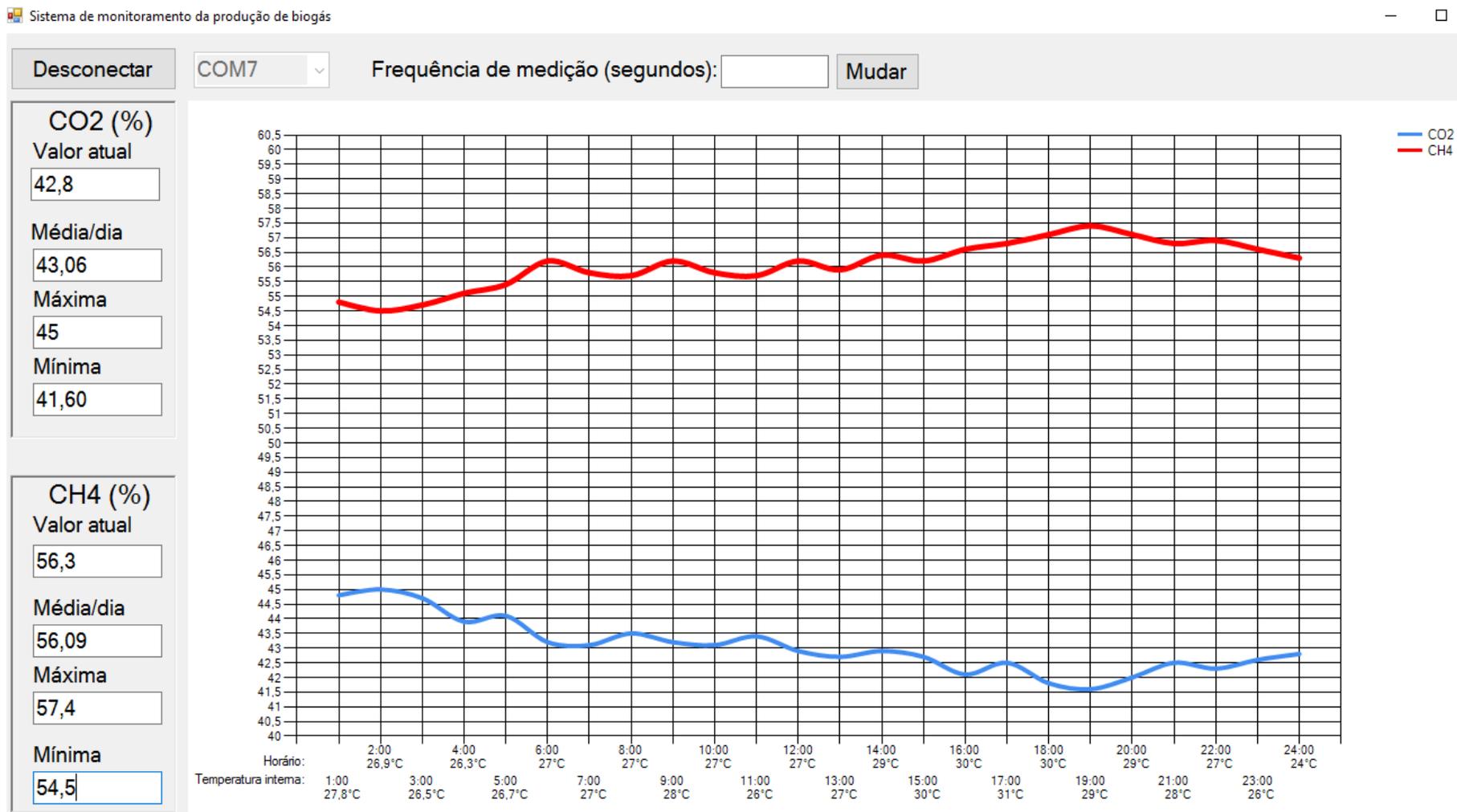
APÊNDICE C - RELAÇÃO TEMPERATURA AMBIENTE X TEMPERATURA REATOR



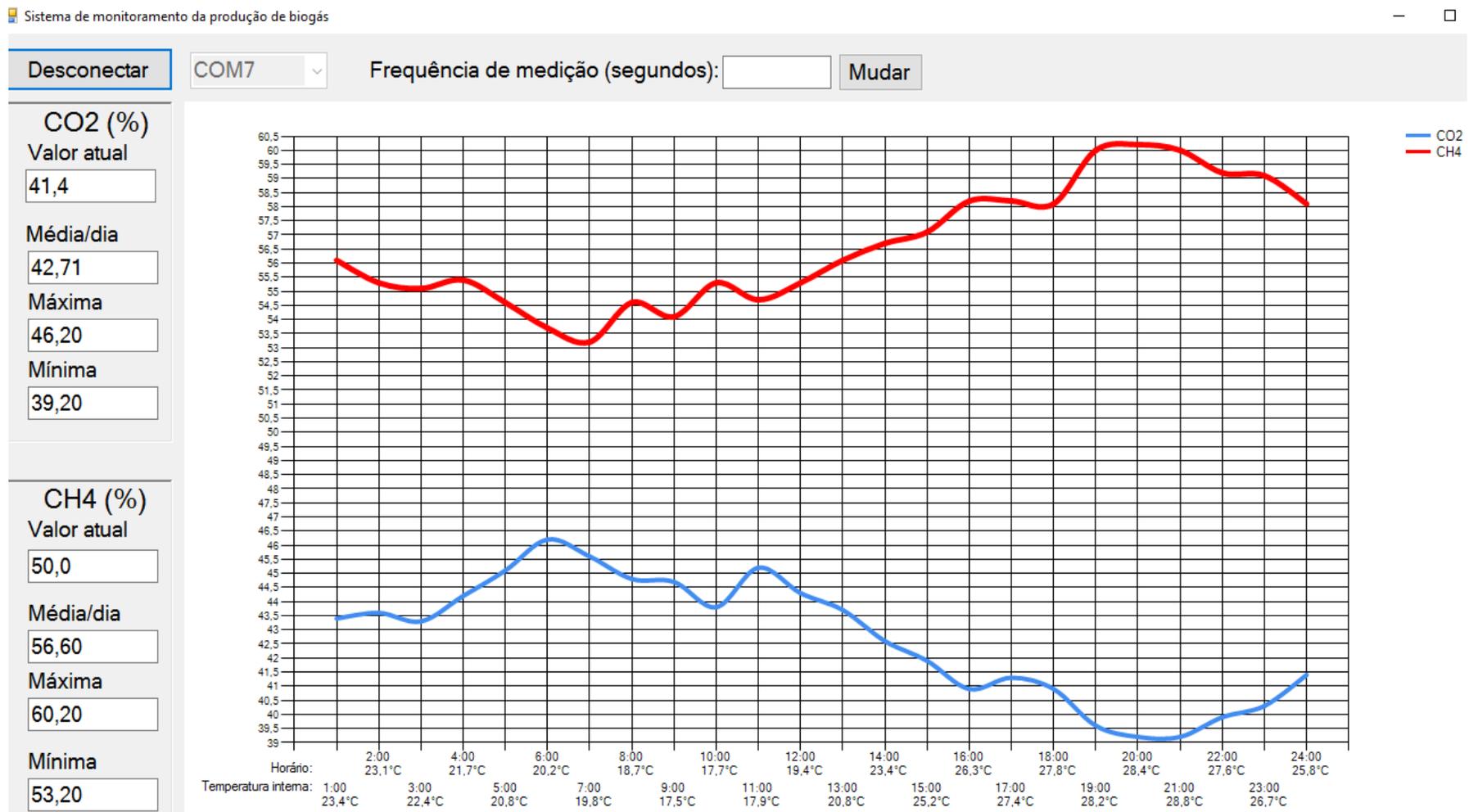
APÊNDICE D - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO PRIMEIRO DIA DE COLETA



APÊNDICE E - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO SEGUNDO DIA DE COLETA



APÊNDICE F - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO TERCEIRO DIA DE COLETA



APÊNDICE G - GRÁFICO GERADO PELO SISTEMA NO QUARTO DIA DE COLETA

