

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ – UNITAU
RAFAELA RIBEIRO CUNHA

**SISTEMA GASÔMETRO AUTOMATIZADO PARA QUANTIFICAÇÃO
EXATA E ARMAZENAMENTO DE BAIXAS VAZÕES DE BIOGÁS**

TAUBATÉ

2019

RAFAELA RIBEIRO CUNHA

**SISTEMA GASÔMETRO AUTOMATIZADO PARA QUANTIFICAÇÃO
EXATA E ARMAZENAMENTO DE BAIXAS VAZÕES DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso de Pós-
Graduação do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Automação.
Orientador: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

TAUBATÉ

2019

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C972s Cunha, Rafaela Ribeiro
Sistema gasômetro automatizado para quantificação exata e armazenamento de baixas vazões de biogás / Rafaela Ribeiro Cunha. -- 2019.
90 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior, Departamento de Engenharia Mecânica

1. Gasômetro. 2. Biogás. 3. Quantificação. 4. Arduino. I. Título.
II. Mestrado em Engenharia Mecânica.

CDD – 665.776

RAFAELA RIBEIRO CUNHA

**SISTEMA GASÔMETRO AUTOMATIZADO PARA QUANTIFICAÇÃO EXATA E
ARMAZENAMENTO DE BAIXAS VAZÕES DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso de Pós-
Graduação do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Automação.
Orientador: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

Data: / / 2019

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

Assinatura: _____

Prof. Dr. Herlandi de Souza Andrade

Assinatura: _____

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu esposo Charleston que sempre me incentivou, aos meus pais por todos os ensinamentos, à empresa onde trabalho, pois sem ela não seria possível arcar com os custos envolvidos e ao meu Orientador, Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior, pela paciência e apoio durante todo o trabalho.

Embora ninguém possa voltar atrás e
fazer um novo começo, qualquer um
pode começar agora e fazer um novo fim.

Chico Xavier

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal, o desenvolvimento de uma solução prática e de baixo custo para a quantificação exata e o armazenamento de biogás gerado em baixas vazões (bancadas laboratoriais, semi-industriais e residenciais), uma vez que os trabalhos utilizando gasômetros do tipo telescópico existentes, ou fazem a estimativa de produção do biogás de forma manual, ou os sistemas automatizados não fazem a contagem corretamente. A metodologia utilizada foi uma pesquisa aplicada, pois o sistema necessitava ser desenvolvido fisicamente para a avaliação da viabilidade técnica e do funcionamento. Para isso, foi construído o protótipo e configurado de duas maneiras, a primeira (teste 1) com a configuração dos gasômetros tipo telescópico automatizados dos trabalhos utilizados como referência (mas que não possuíam protótipos e dados para comparação) e a segunda (teste 2) com as melhorias propostas neste trabalho. O gasômetro proposto foi confeccionado com garrafas de 10 e 20 litros em PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e materiais de baixo custo, e a automatização foi feita utilizando a plataforma Arduino. O sistema é composto por um gasômetro principal, um gasômetro auxiliar, válvulas solenoides na entrada e na saída do gasômetro principal e um sistema de controle das válvulas. A comparação dos resultados dos testes 1 e 2 provou que o gasômetro auxiliar é fundamental para a correta contabilização do biogás. Foi possível identificar que 20% do biogás produzido deixa de ser computado nos sistemas existentes. O sistema ainda deve ser testado com biogás, porém, pode-se concluir que as evoluções aplicadas atenderam o objetivo de ter uma medição exata do biogás produzido e armazenado em gasômetros do tipo telescópico, tornando a obtenção dos dados de quantificação de biogás armazenado mais confiável, visto que enquanto o biogás é liberado no gasômetro principal para a queima ou utilização, o biogás que continua a ser produzido no biodigestor é armazenado separadamente no gasômetro auxiliar, possibilitando a geração e gravação de dados de qualidade.

Palavras-chave: Gasômetro. Biogás. Quantificação. Arduino.

ABSTRACT

This work had as main objective, the development of a practical and low cost solution for the exact quantification and storage of biogas generated in low-flow (laboratory benches, industry and residences), once the gasometer telescopic type existing works or they estimate the biogas production manually, or the automated systems do not count correctly. The methodology used was an applied research, because the system needed to be developed physically for the evaluation of technical feasibility and operation. The prototype was constructed and configured in two ways, the first one (test 1) with the configuration of the automated telescopic type gasometers of the works used as reference (but that did not have prototypes and data for comparison) and the second one (test 2) with the improvements proposed in this work. The proposed gasometer was made with bottles of 10 and 20 liters in HDPE (High Density Polyethylene) and low-cost materials, and the automation was done using the Arduino platform. The system consists of a main gasometer, an auxiliary gasometer, solenoid valves at the inlet and outlet of the main gasometer and a system to control the valves. The comparison of the results of tests 1 and 2 proved that the auxiliary gasometer is fundamental for the correct accounting of biogas. It was possible to identify that 20% of the biogas produced is no longer computed in the existing systems. The system still has to be tested with biogas, however, it can be concluded that the applied evolutions met the objective of having an accurate measurement of the biogas produced and stored in telescopic type gasometers, making the obtaining of the stored biogas quantification data more reliable, since while the biogas is released into the main gasometer for burning or use, the biogas that is still produced in the biodigester is stored separately in the auxiliary gasometer, enabling the generation and recording of quality data.

Keywords: Gasometer. Biogas. Quantification. Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil – 2016 (%)	20
Figura 2 - Etapas de produção do biogás	22
Figura 3 - CSTR com misturador central	25
Figura 4 - Lagoa anaeróbia coberta	26
Figura 5 - Desenho esquemático de um reator UASB	27
Figura 6 - Diagrama de blocos da tecnologia de armazenamento de biogás a baixa pressão	28
Figura 7 - Esquemático do gasômetro tipo telescópico	29
Figura 8 - Gasômetro do tipo Zeppelin, fora de operação por motivos de segurança	30
Figura 9 – Vistas de gasômetro tipo balão / travesseiro	31
Figura 10 – Vistas de gasômetro tipo cúpula ou campânula flexível de lagoa coberta	32
Figura 11 – Desenho esquemático e foto de gasômetro tipo dupla membrana	33
Figura 12 – <i>GAS COLLECTION DIAPHRAGM®</i> fabricado pela MESAETP	34
Figura 13 - Sistema queimador registrador de biogás vazio	36
Figura 14 - Sistema queimador registrador de biogás cheio	37
Figura 15 - Circuito de interface da válvula	40
Figura 16 - Diagrama de blocos do circuito controlador do sistema	41
Figura 17 - Diagrama de blocos do circuito controlador do módulo controlador	42
Figura 18 - Gráfico comparativo do algoritmo de igualdade consecutiva	43
Figura 19 - Contador com valor incrementado	43
Figura 20 - Bancada configurada para o teste 1	46
Figura 21 - Bancada configurada para o teste 2	47
Figura 22 - Sistema do Gasômetro Completo	49
Figura 23 - Copo fixo do gasômetro principal	50
Figura 24 - Campânula do gasômetro principal	51
Figura 25 - Gasômetro auxiliar	52
Figura 26 - Válvulas solenoides	52

Figura 27 - Diagrama de blocos do circuito controlador de Simões (2012), indicando a parte alterada pelo circuito proposto	53
Figura 28 - Sistema de controle do gasômetro.....	55
Figura 29 - Diagrama de blocos do circuito controlador proposto com a substituição de componentes.....	56
Figura 30 - Diagrama de blocos simplificado do circuito controlador proposto	56
Figura 31 - Fluxograma do funcionamento do controle do gasômetro	57
Figura 32 - Teste 1 - Tempos de enchimento e esvaziamento do gasômetro com ar (gás simulado pela bomba de aquário)	60
Figura 33 - Sistema somente com gasômetro principal em funcionamento (teste 1)	61
Figura 34 - Teste 2 - Tempos de enchimento e esvaziamento do gasômetro com ar (gás simulado pela bomba de aquário)	63
Figura 35 - Condição inicial do sistema (teste 2).....	64
Figura 36 - Volume total de biogás após 92 ciclos (teste 2)	64
Figura 37 - Gasômetro principal vazio (teste 2).....	65
Figura 38 - Gasômetro principal cheio (teste 2)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do biogás	22
Tabela 2 – Componentes do gasômetro tipo telescópico.....	37
Tabela 3 - Tabela de estados do multivibrador biestável RS	41
Tabela 4 – Amostragem de dados gravados de 23 ciclos (teste 1).....	59
Tabela 5 – Amostragem de dados gravados de 92 ciclos (teste 2).....	62
Tabela 6 - Dados dos testes realizados	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSTR	<i>Continuous Flow Stirred Tank Reactor</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Gás Sulfídrico
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 DISCUSSÃO DO PROBLEMA	15
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 IMPACTO AMBIENTAL DAS EMISSÕES	18
2.2 ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS	21
2.3 FONTES DE GERAÇÃO DE BIOGÁS	23
2.3.1 Aterros Sanitários	23
2.3.2 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).....	23
2.4 BIODIGESTORES	24
2.4.1 Reatores de Mistura Contínua (<i>CSTR - Continuous Flow Stirred Tank Reactor</i>)..	24
2.4.2 Lagoas Anaeróbias	26
2.4.3 Reatores UASB (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i>).....	27
2.5 ESTADO DA ARTE DOS GASÔMETROS DE BAIXA PRESSÃO	28
2.5.1 Gasômetros Tipo Telescópico	29
2.5.2 Gasômetros Tipo Zeppelin / Balão / Travesseiro	30
2.5.3 Gasômetros Tipo Cúpula ou Campânula Flexível de Lagoa Coberta.....	31
2.5.4 Gasômetros Tipo Dupla Membrana.....	32
2.5.5 Gasômetros Tipo Diafragma.....	33
2.6 ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE BIOGÁS EM BAIXAS VAZÕES UTILIZANDO GASÔMETROS TIPO TELESCÓPICOS...	34
2.7 ESTADO DA ARTE DOS GASÔMETROS TIPO TELESCÓPICOS AUTOMATIZADOS	35
2.7.1 Descrição do funcionamento do gasômetro.....	38
2.7.2 Sistemas de Interface e Controle.....	39
3 METODOLOGIA	45
3.1 TESTE 1 – SOMENTE COM O GASÔMETRO PRINCIPAL	45
3.2 TESTE 2 – SISTEMA COMPLETO	47

4 PROPOSTA DO GASÔMETRO AUTOMATIZADO VISANDO A MEDIÇÃO EXATA DO BIOGÁS PRODUZIDO	49
4.1 APRIMORAMENTO DA PARTE MECÂNICA DO PROJETO	49
4.2 APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE	53
4.3 FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	57
5 RESULTADOS.....	59
5.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
CONCLUSÃO	70
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	701
REFERÊNCIAS.....	73
APÊNDICE A - Código do programa.....	78
APÊNDICE B – Dados Gravados no cartão SD para o teste 1	83
APÊNDICE C – Dados extraídos do cartão SD para cálculo das médias do teste 1	84
APÊNDICE D – Dados Gravados no cartão SD para o teste 2.....	85
APÊNDICE E – Dados extraídos do cartão SD para cálculo das médias do teste 2	89

1 INTRODUÇÃO

O planeta vem enfrentando muitos problemas relacionados ao meio ambiente atualmente e o interesse em preservação ambiental tem aumentado. Uma das formas de preservar o meio ambiente é evitando o uso de combustíveis fósseis, substituindo-o por combustíveis provenientes de fontes de energias renováveis (GALIK, *et al.*, 2016). Com isso, muitos estudos têm sido feitos para a utilização dos mais diversos tipos de material orgânico para a geração de biogás (energia renovável).

Porém, não existem meios automatizados confiáveis para a contabilização deste biogás produzido e, dos estudos realizados, muitos fazem medições manuais diárias para o cálculo do volume armazenado (DIAS, *et al.*, 2013; MANARELLI, *et al.*, 2011) e, mesmo nos gasômetros automatizados existentes, a contagem do volume de biogás não é exata (conforme descrito no 1.3 – Discussão do Problema).

Este trabalho vem trazer um aperfeiçoamento nos sistemas de gasômetro automatizado do tipo telescópico, tendo como base os trabalhos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012), que serão detalhados no item 2.7 - Estado da arte dos gasômetros tipo telescópico automatizados.

1.1 JUSTIFICATIVA

O aumento da demanda por energia no mundo todo e os problemas relacionados ao meio ambiente fazem com que se busque uma maior utilização de energias renováveis. Porém, quando se trata da produção de biogás em baixas vazões, como pequenas indústrias, residências, ou mesmo para testes em laboratórios, há uma deficiência quanto a equipamentos confiáveis para a quantificação deste biogás gerado.

Conforme será descrito ao longo deste trabalho, alguns projetos utilizam um tempo considerável para a medição e cálculo manual de volume de biogás produzido, e os sistemas de quantificação automática existentes não são confiáveis, pois apresentam perdas em suas medições.

Por estes motivos, este trabalho vem trazer um aperfeiçoamento do sistema automatizado de controle e armazenamento de biogás em gasômetro do tipo telescópico existente, de maneira a tornar a quantificação de biogás produzido exata, prática e confiável.

1.2 DISCUSSÃO DO PROBLEMA

Nos sistemas automatizados existentes, de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012), a contagem do biogás produzido não é exata, devido ao sistema utilizar somente um gasômetro.

Nestes sistemas, a entrada do biogás no gasômetro é diretamente conectada à saída do biodigestor, não havendo qualquer isolamento entre eles. Na ocasião do gasômetro estar esvaziando (biogás queimando ou gerando energia), a produção do biogás pelo biodigestor continua, isto é, há biogás entrando e saindo no gasômetro ao mesmo tempo, o que torna a contagem imprecisa.

A contagem errônea pode trazer perdas no caso da utilização do volume de biogás produzido para a geração de créditos de carbono, e na estimativa de retorno de capital no caso de estudos de biodigestores a serem instalados.

A descrição dos projetos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012) e as melhorias propostas neste projeto serão demonstradas nos capítulos posteriores (2 - Revisão da literatura e 4 – Proposta do gasômetro automatizado visando a medição exata do biogás produzido).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma solução prática e de baixo custo para corrigir o problema encontrado nos projetos anteriores (quantificação incorreta devido ao biogás entrar e sair ao mesmo tempo do gasômetro) e proporcionar a quantificação exata e o armazenamento de baixas vazões de biogás

produzidos em sistemas biotecnológicos de bancadas laboratoriais, semi-industriais e residenciais.

Também são objetivos específicos deste trabalho:

- Aperfeiçoar o sistema gasômetro tipo telescópico e implantá-lo em bancada laboratorial de reatores de biodigestão anaeróbia e aeróbia;
- Apresentar os principais parâmetros operacionais e de projeto do protótipo desenvolvido;
- Avaliar o desempenho do sistema do gasômetro aperfeiçoado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1, faz-se uma contextualização, dá-se a justificativa, a discussão do problema, a descrição dos principais objetivos do trabalho e a sua organização.

No Capítulo 2, faz-se a revisão da literatura referente ao impacto das emissões de gases no meio ambiente, o estado da arte da produção do biogás, as principais fontes de geração de biogás, os tipos de biodigestores, o estado da arte dos gasômetros, o estado da arte dos sistemas de quantificação do volume de biogás em baixas vazões utilizando gasômetros do tipo telescópicos e o estado da arte dos gasômetros tipo telescópicos automatizados.

No Capítulo 3, faz-se a apresentação da metodologia e dos tipos de testes que foram realizados com o protótipo, que são: teste 1, somente com o gasômetro principal e teste 2, com o sistema completo.

No Capítulo 4, faz-se uma proposta do gasômetro automatizado visando a medição exata do biogás produzido, apresentando o aprimoramento da parte mecânica do projeto, o aprimoramento do sistema de controle e o fluxograma de funcionamento do sistema.

No Capítulo 5, faz-se a apresentação dos resultados dos testes com o protótipo.

No Capítulo 6, faz-se a discussão dos resultados obtidos nos testes.

E, por fim, é apresentada a conclusão do trabalho e as sugestões para melhorias em trabalhos posteriores.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 IMPACTO AMBIENTAL DAS EMISSÕES

O efeito estufa é um fenômeno natural indispensável para a sobrevivência na Terra. Ele é responsável pela manutenção da temperatura na superfície terrestre em uma média de 15°C e sem ele, a temperatura seria -18°C (XAVIER; KERR, 2004).

Esta manutenção da temperatura se dá devido a concentração de alguns gases na atmosfera (vapor d'água, dióxido de carbono, metano e outros gases). Quando em equilíbrio, estes gases funcionam como uma barreira que impede que toda a radiação emitida sobre a Terra volte para o espaço. Então, o sol emite a radiação, que chega à Terra e é absorvida pelos oceanos, terra e ar. Esta radiação é convertida em calor e tende a subir novamente, mas é parcialmente impedida pelos gases de efeito estufa. Uma parte do calor volta para o espaço e outra parte, mantém o planeta aquecido (XAVIER; KERR, 2004).

Mas, nas últimas décadas, o planeta vem passando por mudanças e perdendo esse equilíbrio que antes existia. Isto porque, principalmente após a Revolução Industrial, com a constante queima de combustíveis fósseis como petróleo, gás natural, florestas, etc., a emissão de gases de efeito estufa aumentou desenfreadamente (principalmente gás carbônico e metano), o que faz com que uma parte maior de calor seja mantida na Terra, ocasionando o aquecimento global (ALVES, 2014).

Pesquisas sugerem que desde a Revolução Industrial a Terra está 1,02°C mais quente, e alguns cientistas alertam que se este aumento passar dos 2°C, a humanidade perderá o controle sobre o meio ambiente (GRANDELLE, 2016).

Já é possível notar as consequências desse aumento gradativo da temperatura. O aquecimento global provoca o aumento da temperatura das águas dos oceanos, derretimento das calotas polares, aumento do nível das águas e por consequência, inundação de cidades litorâneas. Também causa o aumento de furacões, tufões, ondas de calor onde não se via antes, além do surgimento de desertos e a morte de várias espécies (RIBEIRO; SANTOS, 2016).

É preciso uma conscientização da população enquanto indivíduos para que se tomem ações para diminuir o impacto no meio ambiente e ajudar a frear essas mudanças, assim como as indústrias e os governos, que também devem tomar medidas para a redução da emissão de poluição e a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis oriundos de fontes renováveis (RIBEIRO; SANTOS, 2016).

Diversas campanhas incentivam pequenas mudanças que contribuem com a preservação, como: desligar equipamentos que não estão em uso, instalação de placas solares para esquentar a água do banho, substituição de lâmpadas fluorescentes por LED, construir e reformar casas considerando uma maior participação da iluminação natural, manter fechados os ambientes com temperatura condicionada, etc. (RIBEIRO; SANTOS, 2016).

Já os governos têm uma responsabilidade muito mais ampla, principalmente a partir de 1997, quando foi criado o Protocolo de Kyoto que é um acordo internacional entre os países da Organização das Nações Unidas (ONU). Nesta ocasião, os países assumiram o compromisso de amenizar os problemas causados pelo desenvolvimento industrial. O protocolo entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005 e a princípio, o propunha uma redução nas emissões de gases de efeito estufa de pelo menos 5% abaixo dos valores registrados em 1990. Isto deveria ocorrer entre 2008 e 2012. Porém, esta meta não foi alcançada e então, estabeleceram uma emenda ao protocolo e um segundo período, de 2013 a 2020. Nesta nova fase, a redução deve ser de 18% abaixo dos níveis de 1990 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 201-?).

De acordo com o *United Nations Treaty Collection* (2012), até o momento, 128 países ratificaram sua participação no protocolo, entre eles, o Brasil, que o fez em 13 de fevereiro de 2018 (para que a nova fase possa entrar em vigor, é necessária a ratificação de 144 países).

Como se pode observar, uma grande parte da população mundial está preocupada com os efeitos da ação do homem sobre o meio ambiente e muito pode ser feito para que se atinja a meta que o protocolo estabelece. Uma maneira de buscar o atendimento desta meta, é a redução da utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia e a utilização de combustíveis provenientes de fontes de energias renováveis (GALIK, *et al.*, 2016).

Apesar de o Brasil já ter sua matriz energética baseada em energias renováveis (81,7%), ainda é possível diminuir ainda mais a utilização de combustíveis fósseis. Seguem as principais fontes de energia elétrica renováveis utilizadas no país (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017):

- Hidráulica: é a mais comum no Brasil (representa 83,3% da oferta interna). A força das águas move uma turbina e gera energia elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017; PINHEIRO, 2016).
- Solar: representatividade ainda tímida de menos de 0,1%. É a utilização dos raios solares para a geração de energia. Uma das fontes menos nocivas ao meio ambiente e umas das principais fontes de energia livre e inesgotável do planeta (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017; RODRIGUES, J. A., 2019).
- Eólica: representa 6,6% da oferta. Também é uma fonte de energia muito limpa, favorece a proteção ambiental e requer área reduzida de terra. Utiliza o vento para rotacionar as hélices e gerar energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017; RODRIGUES, J. A., 2019).
- Biomassa: representa 7% da oferta. Utiliza material orgânico animal ou vegetal e pode ser queimado para a geração de energia térmica, ou, em outros processos, gerar combustíveis líquidos e gasosos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A Figura 1 representa graficamente a distribuição da oferta de energia elétrica no Brasil.

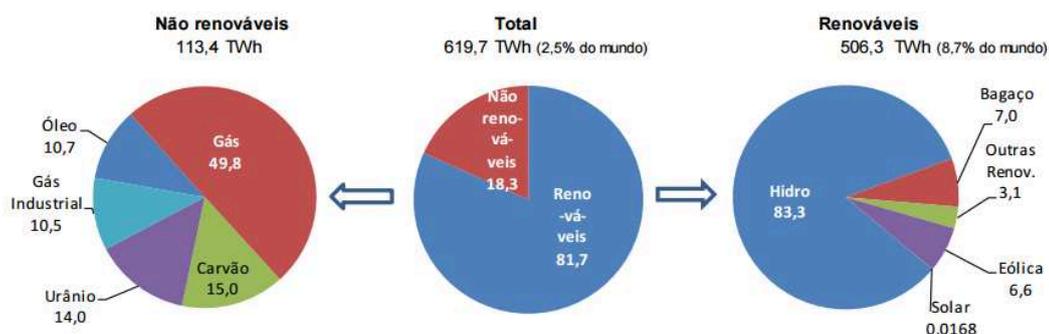


Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil – 2016 (%)
Fonte: Ministério de Minas e Energia (2017)

De forma a tratar sobre como aumentar a oferta de energias renováveis, será abordado um pouco mais sobre a biomassa, ou, mais precisamente, a geração de energia através do combustível gerado na forma gasosa, o biogás.

2.2 ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Primeiramente é importante salientar que o gás natural é diferente do biogás. O gás natural é considerado um combustível fóssil e, portanto, fonte esgotável de energia e é proveniente da decomposição anaeróbia de matéria orgânica que está depositada nos solos por milhões e milhões de anos (KARLSSON, *et al.*, 2014).

O biogás também é formado da mesma maneira, pela decomposição anaeróbia de material orgânico. Porém, estes materiais utilizados para a geração do biogás estão presentes em abundância no nosso dia a dia. São eles: chorume animal, resíduos vegetais, frações orgânicas de resíduos sólidos urbanos, resíduos de indústria alimentar, águas residuais, etc. Por este motivo, o biogás é considerado uma fonte renovável de geração de energia (ANASTÁCIO, 2010).

De acordo com Silva (2009), o processo de digestão anaeróbia para a geração de biogás ocorre em quatro fases. São elas: hidrólise (primeira fase, onde o material orgânico é transformado em compostos dissolvidos de menor peso molecular), acidogênese (os produtos gerados na hidrólise são absorvidos por bactérias acidogênicas fermentativas e transformados em substâncias como ácidos graxos voláteis), acetogênese (os ácidos graxos voláteis são convertidos em compostos que formam o substrato para a produção de metano) e metanogênese (quarta e última fase onde é produzido principalmente o metano e dióxido de carbono). A Figura 2 ilustra as etapas da produção de biogás.

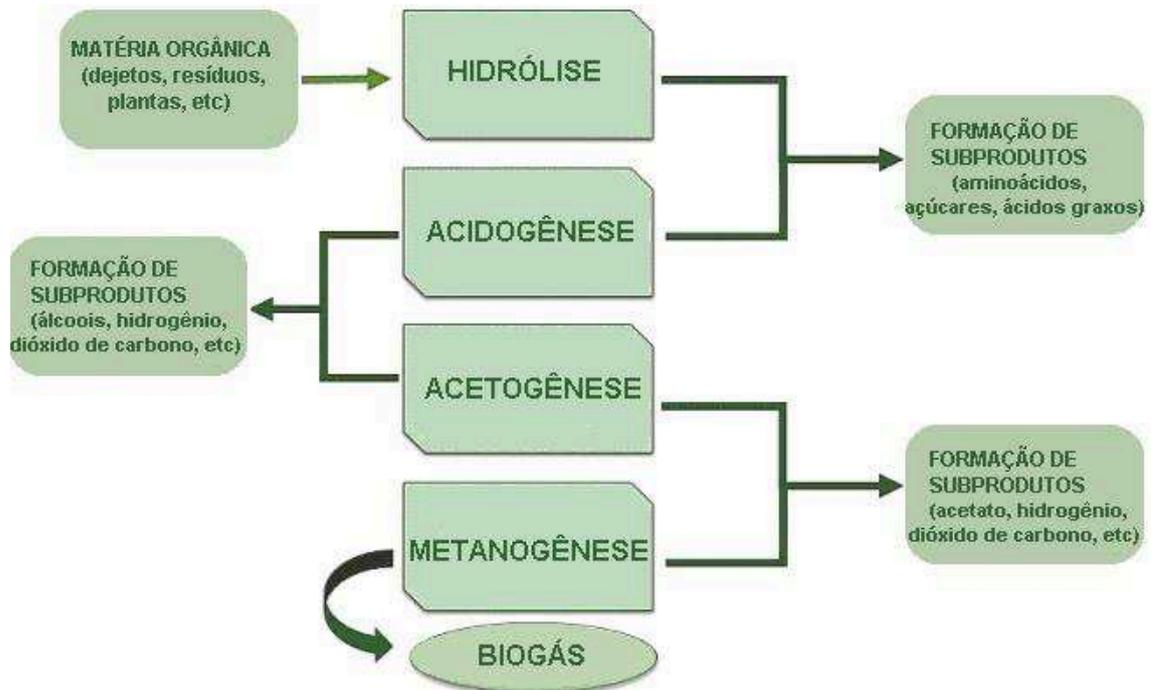


Figura 2 - Etapas de produção do biogás
Fonte: Adaptado de Silva (2009)

A composição média do biogás é descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição média do biogás

Composição média do biogás		
Gás	Teor em volume	Fórmula química
Metano	55 – 75	CH ₄
Dióxido de carbono	25 – 45	CO ₂
Nitrogênio	0 – 3	N ₂
Hidrogênio	0 – 2	H ₂
Oxigênio	0 – 0,1	O ₂
Gás sulfídrico	0 – 1	H ₂ S

Fonte: Nogueira (1986)

2.3 FONTES DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

No Brasil, existem duas grandes fontes de geração de biogás que são pouco exploradas e têm um enorme potencial. São elas: os aterros sanitários e as estações de tratamento de esgoto (MILANES, *et al.*, 2018).

2.3.1 Aterros Sanitários

De acordo com dados da ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016), o Brasil coletou mais de 70 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU em 2016. Deste total, aproximadamente 58% foram destinados a aterros sanitários (locais onde o solo recebeu uma camada impermeabilizante, drenagem para chorume e captação dos gases liberados), 24% à aterros controlados (um intermediário entre o aterro sanitário e o lixão, geralmente, uma tentativa de minimizar o impacto ambiental de um lixão, fazendo a cobertura dos resíduos com terra) e 17% à lixões (lixo descartado a céu aberto, locais que não foram preparados previamente para receber os RSUs).

No saneamento básico, a possibilidade de biodigestão de esgotos e resíduos orgânicos para geração de biogás é enorme. Existem cerca de 2 mil aterros no Brasil todo, mas apenas 15 geram energia elétrica a partir do biogás. O biogás de aterro é uma das alternativas para gerar energia elétrica nas cidades a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), pois se trata de uma fonte com produção local e regular. (CANAL BIOENERGIA, 2017)

É a maneira mais econômica de aproveitamento do biogás, pois o mesmo já é gerado pela decomposição dos resíduos e, no caso da maioria dos aterros, o biogás gerado é queimado antes de ser lançado à atmosfera. Este processo de queima, transforma o metano (CH₄) em gás carbônico (CO₂), que é 21 vezes menos prejudicial à camada de ozônio (COSTA, 2011).

2.3.2 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs)

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2017), o panorama geral dos serviços de esgotamento sanitário para a população urbana do país pode ser

resumido nas seguintes parcelas: 43% possuem seu esgoto coletado e tratado e 12% utilizam-se de solução individual, ou seja, 55% da população urbana brasileira pode ser considerada provida com atendimento adequado à luz dos conceitos do PLAN SAB (Plano Nacional de Saneamento Básico); 18% têm seu esgoto coletado e não tratado, o que pode ser considerado como um atendimento precário; e 27% não possuem coleta nem tratamento, isto é, sem atendimento por serviço de esgotamento sanitário.

Na maioria das ETEs existentes, o biogás gerado durante a digestão anaeróbia é desprezado e, assim como nos aterros, é queimado para minimizar o impacto ambiental. Porém, a geração de energia a partir do biogás se apresenta como uma grande oportunidade para reduzir custos operacionais e promover a eficiência energética, contribuindo sensivelmente para a diminuição do consumo de energia elétrica da rede, além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa (ZILOTTI, 2012).

2.4 BIODIGESTORES

De acordo com Seadi, *et al.* (2008), o núcleo de uma usina de produção de biogás é o biodigestor. Um biodigestor é um tanque reator anaeróbio, onde é armazenada e onde ocorre a decomposição da matéria orgânica e a produção do biogás. Podem ser feitos de concreto, aço, tijolo ou plástico, em forma de silos, cavidades, bacias ou lagos, e podem ser colocados no subsolo ou na superfície.

O tamanho dos biodigestores varia de poucos metros cúbicos, no caso de instalações domésticas a vários milhares de metros cúbicos, como no caso de grandes plantas comerciais, muitas vezes com vários biodigestores (SEADI, *et al.*, 2008).

Aqui são apresentados 3 modelos de biodigestores, que são mais utilizados no Brasil.

2.4.1 Reatores de Mistura Contínua (*CSTR - Continuous Flow Stirred Tank Reactor*)

É a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos, sendo a mais aplicada nos setores da agropecuária, da indústria e no tratamento de

lodos sanitários, utilizada com menor frequência no tratamento de resíduos orgânicos urbanos (PROBIOGÁS, 2015).

A versão básica é mais empregada para o tratamento de dejetos animais e tem sua construção, equipamentos, operação e manutenção mais simples (PROBIOGÁS, 2015).

A versão avançada é utilizada em substratos mais complexos e com maior valor energético, como resíduos de açougue, da indústria de frutas, etc. e tem processo de construção mais elaborado, necessitando de mais investimentos pois inclui gastos com automação e maior qualidade de materiais (PROBIOGÁS, 2015).

Este tipo de reator pode ter sua capacidade de produção de biogás aumentada quando provido com um sistema de aquecimento para a manutenção da temperatura, o que colabora com a estabilização do reator e manutenção da população de microrganismos (KUNZ, *et al.*, 2019).

A Figura 3 representa o biodigestor CSTR e suas partes.

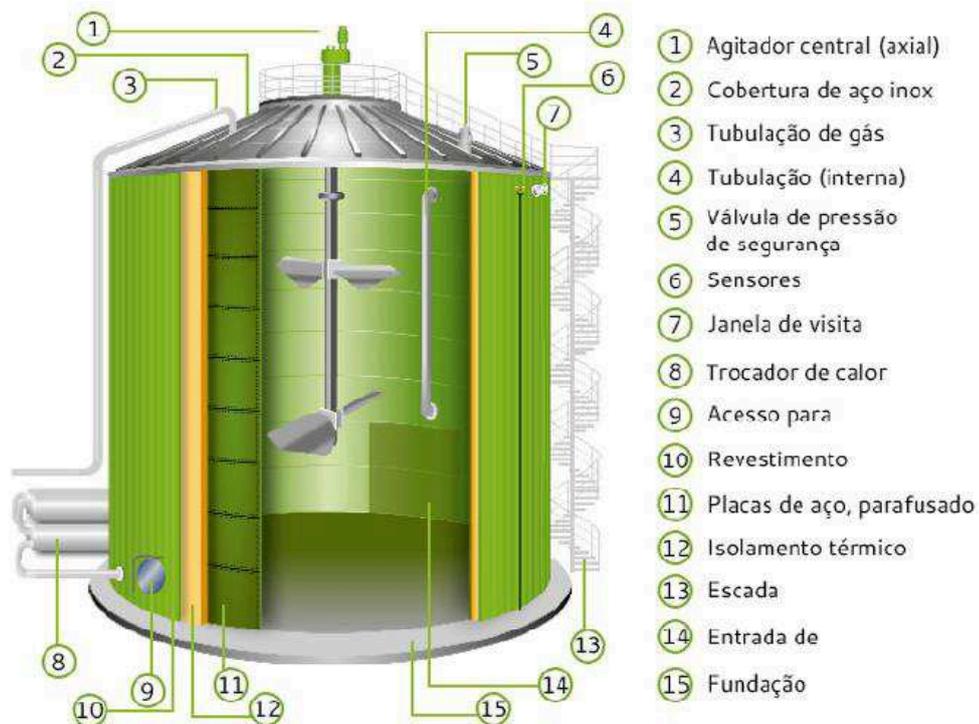


Figura 3 - CSTR com misturador central
Fonte: Probiogás (2015)

2.4.2 Lagoas Anaeróbias

As lagoas anaeróbias cobertas são sistemas tradicionais para tratamento de esgoto (também são conhecidas como biodigestores tipo canadense) e são bastante utilizadas no sul do país (região com maior número de biodigestores implantados em propriedades rurais). É formado por uma caixa de entrada onde é encaminhada a matéria orgânica, uma câmara de fermentação subterrânea revestida, uma manta superior que é utilizada como gasômetro para armazenamento do biogás, um registro para saída do biogás e uma caixa de saída para o biofertilizante (PEREIRA, *et al.*, 2009; PROBIOGÁS, 2015).

As lagoas são fáceis de serem construídas, porém, não são capazes de tratar completa e adequadamente os efluentes e, em muitos casos, não apresentam cobertura eficaz, deixando escapar gás metano para a atmosfera (PROBIOGÁS, 2015).

A Figura 4 representa uma lagoa anaeróbia coberta.

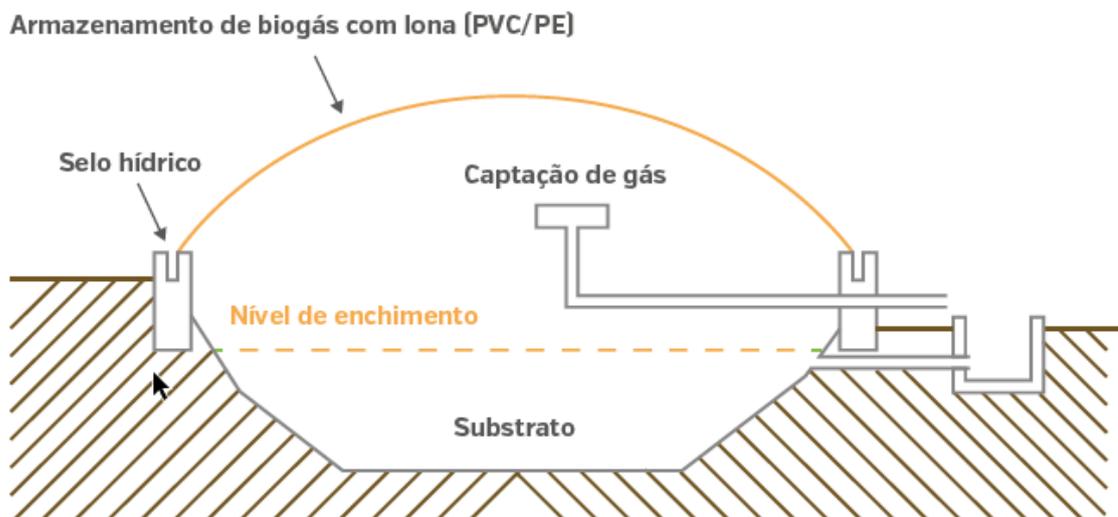


Figura 4 - Lagoa anaeróbia coberta
Fonte: Probiogás (2015)

2.4.3 Reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*)

O Brasil é um dos países com mais experiência na utilização de UASB, principalmente pelo clima que favorece o tratamento de esgotos sanitários. Também é utilizado para tratamento de efluentes industriais (PROBIOGÁS, 2015).

As características básicas do UASB são: baixo tempo de retenção hidráulica (7-12h), a entrada de efluente no fundo do reator, onde se forma um filtro biologicamente ativo de grânulos (lodo), e o fluxo ascendente à parte superior, onde se separam a biomassa e o biogás, através do separador trifásico (RODRIGUES, J. I.; RATUZNIEI, 2005).

A Figura 5 ilustra o desenho esquemático de um reator UASB.

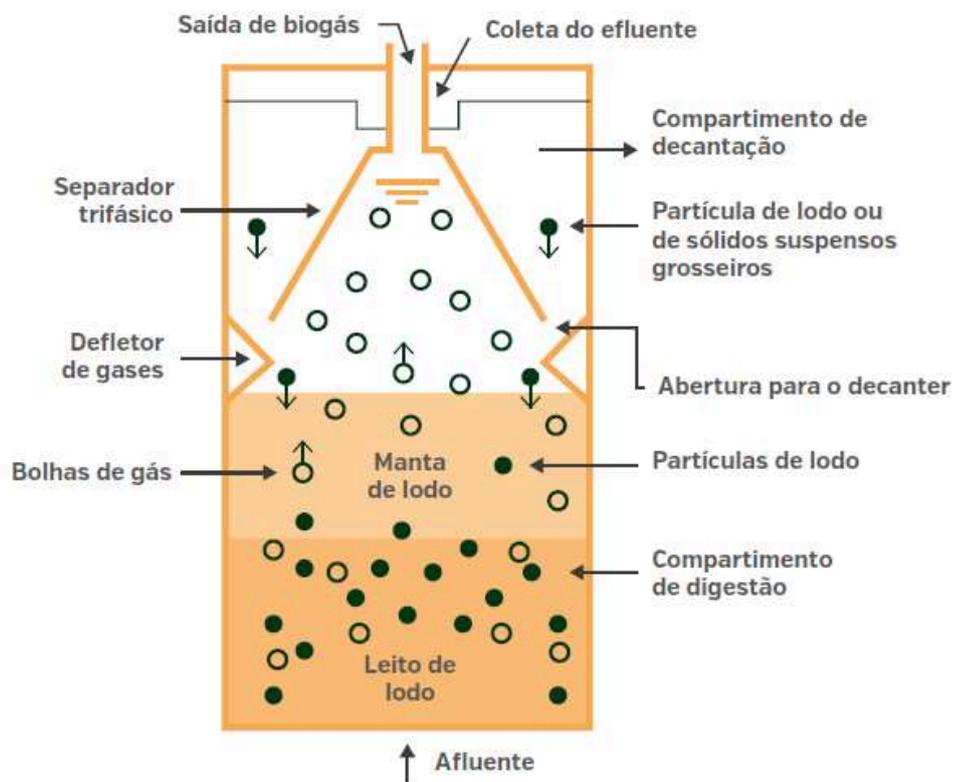


Figura 5 - Desenho esquemático de um reator UASB
Fonte: Probiogás (2015)

2.5 ESTADO DA ARTE DOS GASÔMETROS DE BAIXA PRESSÃO

Após a separação do biogás nos biodigestores, o biogás deve ser armazenado em um recipiente próprio para recebê-lo, o gasômetro (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015).

O gasômetro é um reservatório em que o gás é armazenado próximo à pressão atmosférica e temperatura ambiente. Podem ser classificados em função da sua faixa de pressão de trabalho, sendo os de alta, de média e de baixa pressão e, também pela sua forma construtiva, como em materiais rígidos, em materiais flexíveis e os híbridos (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015).

A Figura 6 ilustra os tipos de gasômetros de baixa pressão de acordo com sua forma construtiva.

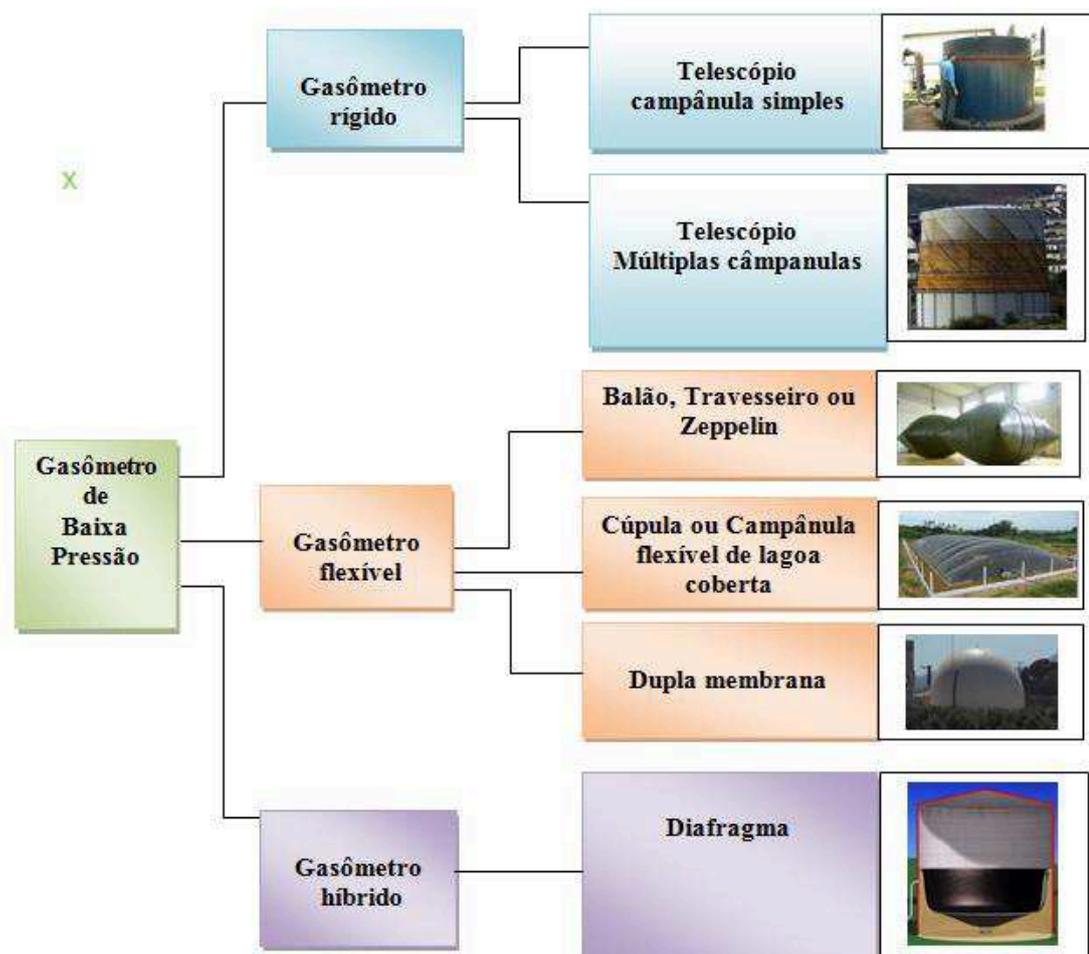


Figura 6 - Diagrama de blocos da tecnologia de armazenamento de biogás a baixa pressão
Fonte: Godoy Junior e Jesus (2015)

2.5.1 Gasômetros Tipo Telescópico

Gasômetros tipo telescópicos são basicamente compostos por um conjunto de vasos, onde, um vaso posicionado com a boca para cima, preenchido com água tem inserido um outro vaso na posição invertida, denominado de campânula do gasômetro. Na medida em que recebe o gás, a campânula se eleva verticalmente (na forma de um telescópio), aumentando assim o volume e mantendo o processo isobárico (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015).

Existem também gasômetros tipo telescópico com múltiplas campânulas elevadoras, situadas umas no interior das outras, de modo que, quando o elevador campânula interior for totalmente estendido, o próximo elevador campânula exterior também irá começar a subir. Uma vez que o gasômetro tenha atingido a capacidade plena e vai se consumindo o gás, o fluido volta através do tubo principal, fazendo com que a câmara formada pelo conjunto de campânulas telescópicas baixe (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015).

O gasômetro do tipo telescópico é representado pela Figura 7.

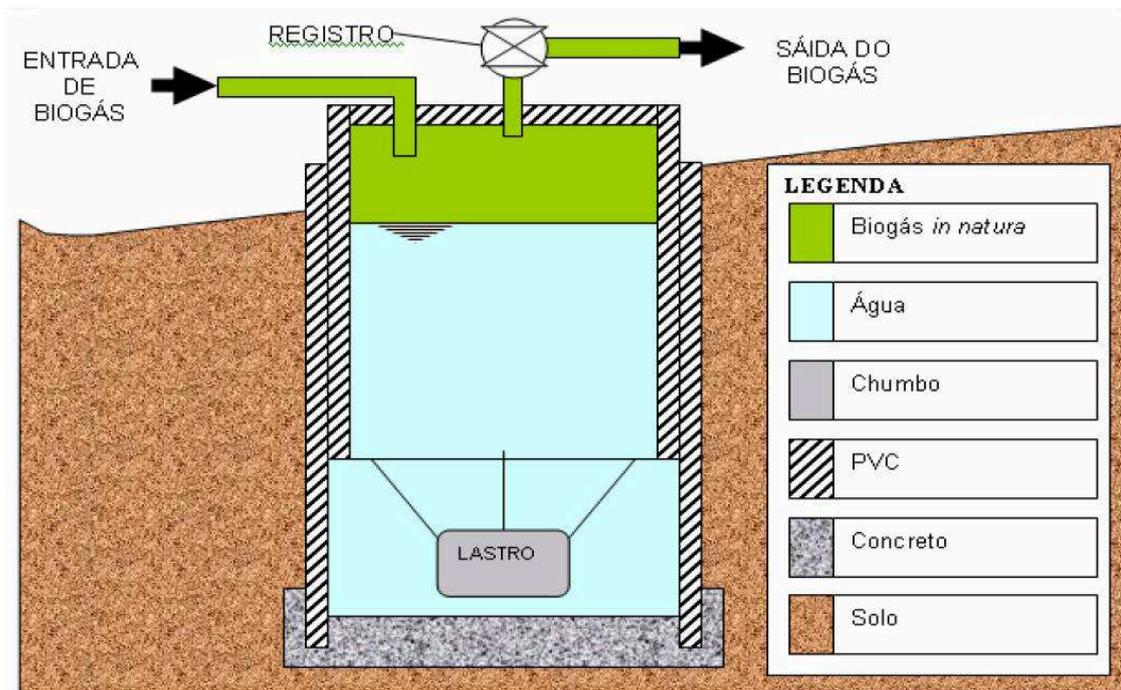


Figura 7 - Esquemático do gasômetro tipo telescópico
 Fonte: Godoy Junior, E. et.al. (2006)

2.5.2 Gasômetros Tipo Zeppelin / Balão / Travesseiro

A Figura 8 ilustra um gasômetro do tipo Zeppelin em polímero cujo nome comercial é hypalon, que seria utilizado para estocar biogás em projeto de aproveitamento energético, localizado na estação anaeróbia de tratamento de efluentes em uma cervejaria no município de Jacareí – SP, Brasil. O projeto não foi operacionalizado devido a potenciais riscos de segurança do sistema na área industrial da ETE (GODOY JUNIOR, 2010).



**Figura 8 - Gasômetro do tipo Zeppelin, fora de operação por motivos de segurança
Fonte: Godoy Junior (2010)**

Os gasômetros tipo balão/travesseiro são fabricados em geomembrana de PEAD ou PVC e é um modelo de armazenamento de biogás relativamente simples. A membrana se infla e armazena o biogás produzido e, devido a flexibilidade do material, a pressão se mantém constante (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015; LIMA, 2011).

A categoria gasômetro flexível do tipo balão/travesseiro é ilustrado na Figura 9.



Figura 9 – Vistas de gasômetro tipo balão / travesseiro

Fonte: Godoy Junior e Jesus (2015)

2.5.3 Gasômetros Tipo Cúpula ou Campânula Flexível de Lagoa Coberta

O gasômetro acoplado ao biodigestor é chamado de cúpula ou campânula flexível de lagoa coberta. A ideia de armazenamento é parecida com a do gasômetro tipo balão, entretanto, estes modelos estão associados aos reatores anaeróbios. Esse gasômetro faz parte da cobertura do biodigestor (uma manta de PVC flexível), que infla e armazena o biogás produzido. Ao inflar, a pressão do biogás se mantém constante devido à flexibilidade da manta do gasômetro (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015; LIMA, 2011).

A Figura 10 ilustra os gasômetros tipo cúpula ou campânula flexível de lagoa coberta.



Figura 10 – Vistas de gasômetro tipo cúpula ou campânula flexível de lagoa coberta
Fonte: Godoy Junior e Jesus (2015)

2.5.4 Gasômetros Tipo Dupla Membrana

Os gasômetros tipo dupla membrana são compostos por duas câmaras independentes e flexíveis, enclausuradas dentro de uma outra câmara maior flexível ou rígida. As câmaras flexíveis interagem exercendo forças entre si, uma câmara de ar e uma câmara de gás. A câmara de ar é pressurizada por meio de um soprador, que exerce e transfere pressão para a câmara flexível de biogás em contato, compensando e equilibrando a pressão de trabalho (BRIGNOL, 2017).

Os gasômetros de dupla membrana ilustrados nas imagens da Figura 11, apresentam como principais características: o armazenamento totalmente hermético; a membrana externa pressurizada resistente a ações adversas climáticas, biológicas e atmosféricas; garantia de resistência mecânica e química do sistema (GODOY JUNIOR; JESUS, 2015).

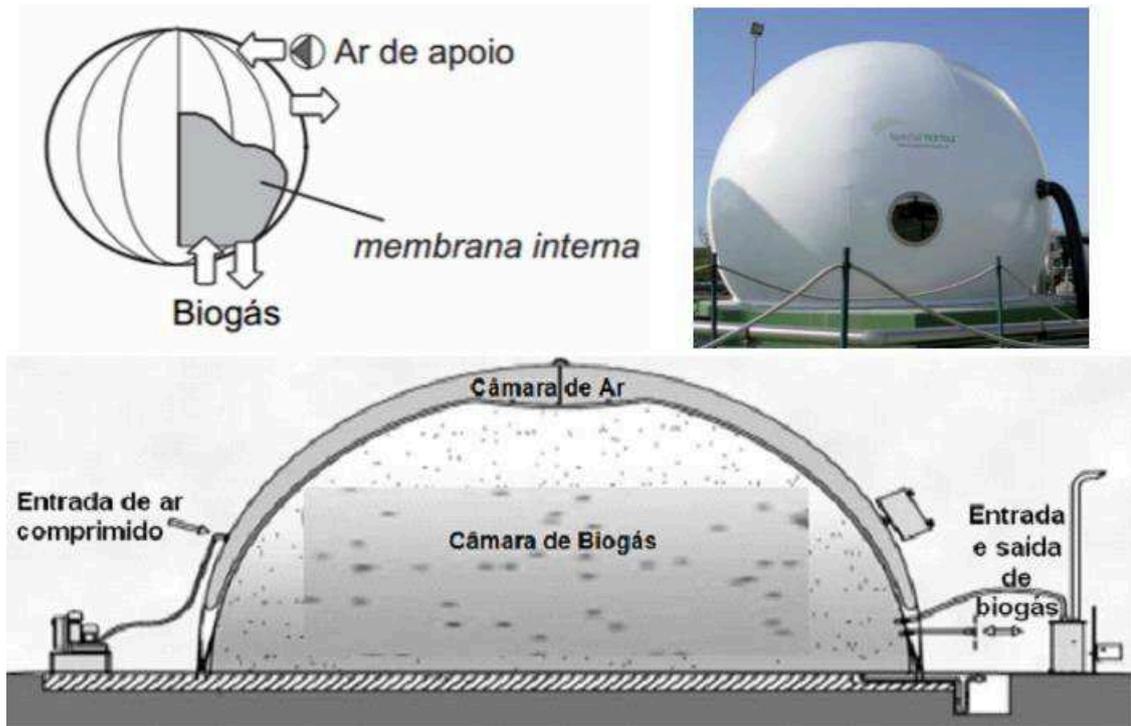


Figura 11 – Desenho esquemático e foto de gasômetro tipo dupla membrana
Fonte: Godoy Junior e Jesus (2015)

2.5.5 Gasômetros Tipo Diafragma

A empresa Mesaetp fabrica diversos produtos e equipamento para armazenamento do biogás como o gasômetro diafragma. Segundo a Mesaetp (2018), o *Vapor Bladder* dispõe de vantagens e benefícios, como o de eliminar a necessidade de tratamento dos gases de grande escala, equilibrar o fluxo de gás no sistema, permitir a possibilidade de regular a armazenagem (através do lastro), e sua grande vida útil é comprovada (no âmbito dos procedimentos normais de operação).

A Figura 12 ilustra o funcionamento do modelo de gasômetro denominado *Gas Collection Diaphragm* fabricado pela MESAETP.

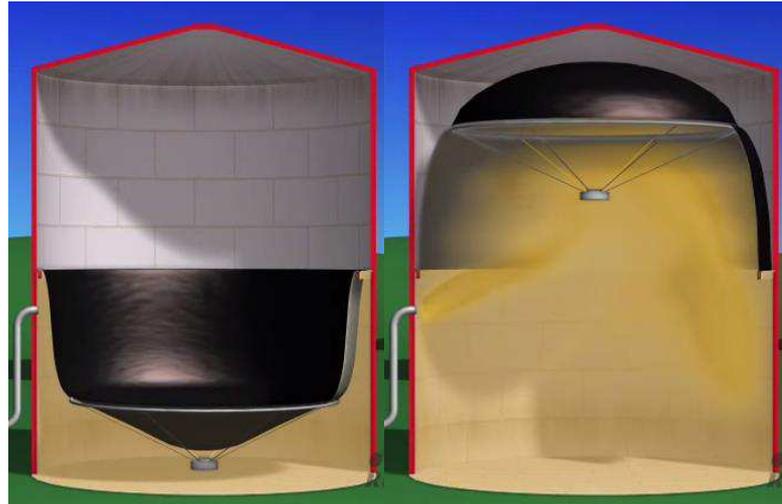


Figura 12 – GAS COLLECTION DIAPHRAGM® fabricado pela MESAETP

Fonte: MESAETP (2018)

2.6 ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE BIOGÁS EM BAIXAS VAZÕES UTILIZANDO GASÔMETROS TIPO TELESCÓPICOS

Como citado anteriormente, a utilização do biogás como fonte de energia renovável está em franca expansão e é possível encontrar inúmeros estudos acerca da produção e da quantificação de biogás a partir de determinados tipos de matéria orgânica. Muitos destes estudos utilizam gasômetros do tipo telescópico, mas, em nenhum destes estudos foi utilizado um sistema automatizado para estimar a quantificação de biogás.

Os estudos em questão utilizaram de sistemas manuais para fazer a quantificação, através do cálculo do volume do deslocamento vertical do gasômetro pela sua área da seção transversal. Seguem exemplos:

Em seu projeto, Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida, Aires, (2009, p.41) descreve que:

As produções de biogás foram calculadas com base na leitura das régua dispostas ao lado dos eixos de condução dos gasômetros que continham setas que apontavam nas régua o deslocamento vertical do gasômetro obtido no intervalo entre as leituras. O número obtido na leitura foi multiplicado pela área da seção transversal interna dos gasômetros, que no caso dos biodigestores batelada em questão era igual a $0,2827 \text{ m}^2$. Após cada leitura, os gasômetros foram zerados utilizando-se o registro de descarga do biogás.

No projeto, Avaliação das reduções de sólidos totais voláteis, produções de biogás e metano de qualidade do biofertilizante produzido a partir da biodigestão anaeróbia da água residuária de abatedouro avícola, Manarelli *et al.*, (2011, p.8) afirma que:

Os volumes de biogás produzidos diariamente foram determinados medindo-se o deslocamento vertical dos gasômetros, e multiplicando-se pela área da seção transversal interna dos mesmos. Após cada leitura os gasômetros foram zerados utilizando-se o registro de descarga do biogás.

No projeto, Biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar, Machado, (2011, p.34) destaca que:

As produções de biogás foram calculadas em volume com base no deslocamento vertical obtido na leitura das réguas graduadas dispostas verticalmente nos gasômetros. O número obtido na leitura foi multiplicado pela área da seção transversal interna dos gasômetros, que no caso dos biodigestores em questão é igual a 0,2827 m², para determinar o volume de gás produzido. Após cada leitura, o biogás era eliminado pela abertura de saída do gasômetro, a qual era fechada após o procedimento.

Em mais um exemplo, no projeto, Potencial de produção de biogás a partir de biomassa de suinocultura com culturas energéticas, Almeida, (2016, p. 45), demonstra que:

A produção de biogás foi definida analisando-se o deslocamento vertical dos gasômetros, multiplicando pela área da seção transversal dos gasômetros, ou seja, 0,0079 m². Logo após cada leitura, o biogás produzido foi incinerado, por meio da válvula de descarga.

Percebe-se que é dedicado um tempo precioso das pesquisas para a tomada das medidas (muitas vezes diárias) para a quantificação do biogás. Sendo assim, automatização do sistema de gasômetro vem se mostrar como uma grande oportunidade para otimização de tempo e obtenção de dados de maior qualidade.

Com este propósito, a seguir é demonstrado o estado da arte dos gasômetros automatizados.

2.7 ESTADO DA ARTE DOS GASÔMETROS TIPO TELESCÓPICOS AUTOMATIZADOS

Não existem muitos estudos focados somente em gasômetros do tipo telescópico e tampouco na automatização da quantificação do biogás produzido.

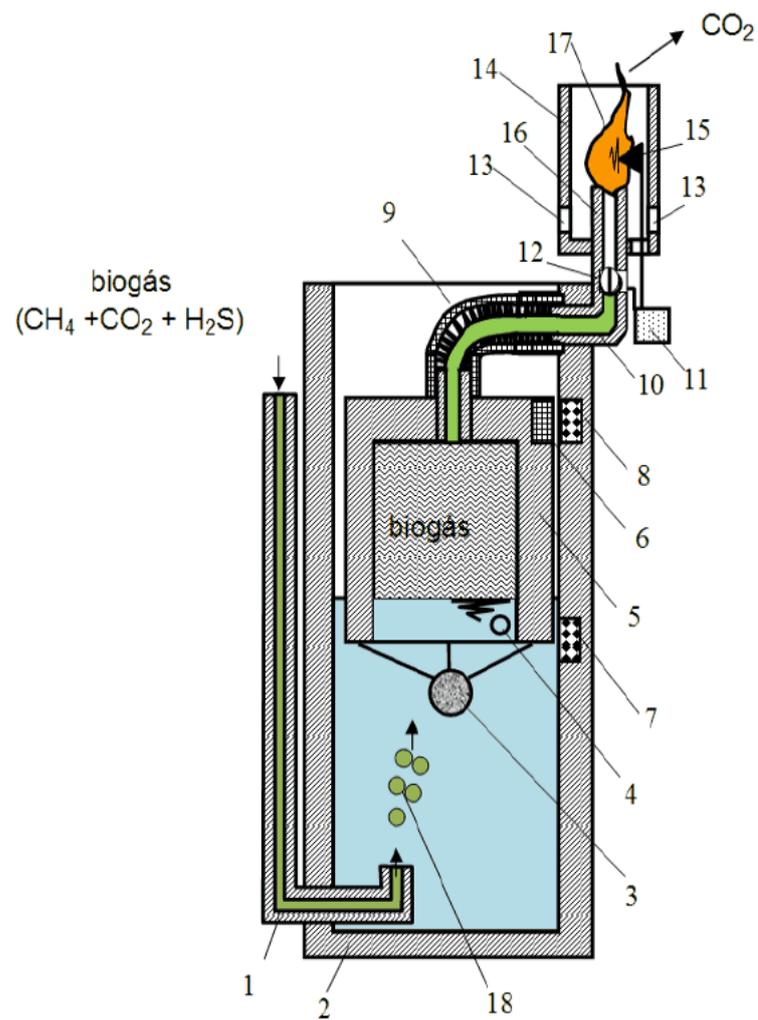


Figura 14 - Sistema queimador registrador de biogás cheio
 Fonte: Marcelino e Godoy Junior (2011)

Tabela 2 – Componentes do gasômetro tipo telescópico

COMPONENTE	DESCRIÇÃO
1	Tubo de entrada
2	Copo cilíndrico maior (fixo)
3	Lastro
4	Válvula de segurança
5	Copo cilíndrico menor (campânula)
6	Imã permanente
7	Micro chave inferior
8	Micro chave superior
9	Tubo sanfonado
10	Tubo rígido
11	Ignitor eletrônico

12	Válvula eletromecânica
13	Entrada de ar
14	Protetor de chamas
15	Eletrodo
16	Biqueira queimadora
17	Chama contínua
18	Biogás

Fonte: Adaptado de Marcelino e Godoy Junior (2011)

2.7.1 Descrição do funcionamento do gasômetro

O gasômetro tipo telescópio representado nas figuras 13 e 14, utilizado nos projetos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012) foi construído com dois copos cilíndricos, um de diâmetro maior (2) e um menor (5), encaixados de maneira invertida, sendo o menor, a parte móvel, chamado campânula (5). A campânula é submersa em água e tem um lastro (3) instalado na parte inferior para evitar o tombamento quando cheia de biogás (18). Possui um tubo de entrada (1) e um de saída do biogás. A saída é realizada por um tubo de material flexível (9), que se retrai conforme o gasômetro enche.

A saída é controlada através de uma válvula eletromecânica (12) tipo ON/OFF, normalmente fechada e impede a saída do biogás enquanto o gasômetro não está cheio (Figura 13). Quando a campânula está cheia, a válvula se abre (Figura 14).

O acionamento da válvula (12) é feito a partir de uma lógica de atuação de duas micro chaves acionadas por um ímã permanente (6) fixado na parte superior da campânula (5). As micro chaves são instaladas no copo cilíndrico de diâmetro maior (2), uma na parte inferior (7), que indica o gasômetro vazio (GV) e outra na parte superior (8), que indica o gasômetro cheio (GC).

Assim que o gasômetro está cheio, indicado pela chave GC (8), a válvula eletromecânica (12) é acionada e libera o biogás e aciona o ignitor eletrônico (11), gerando faíscas no eletrodo (15) garantindo a queima com chama contínua (17).

O tubo sanfonado (9) está conectado a um tubo rígido (10), que por sua vez está conectado à válvula (12) e a mesma, conectada a uma biqueira queimadora de biogás (16). A biqueira está dentro de um protetor de chamas (14) que possui duas entradas de ar (13) comburente na mistura de combustível.

Após o início da queima, a operação continua até que a micro chave (7) seja acionada novamente, indicando o gasômetro vazio. Neste momento o ignitor (11) é desligado e a válvula (12) é fechada, iniciando o ciclo novamente.

É muito importante notar que enquanto a válvula eletromecânica (12) é acionada e libera o biogás, o tubo de entrada (1) continua a receber biogás proveniente do biodigestor, causando uma contagem errônea da quantidade de biogás produzido e utilizado (principal problema a ser solucionado por este trabalho).

O sistema ainda dispõe de uma válvula de segurança (4), que é um furo na parte inferior da campânula, e na ausência de energia elétrica, quando o volume do biogás ultrapassar a capacidade máxima, é liberado para a atmosfera sem queima.

2.7.2 Sistemas de Interface e Controle

Os trabalhos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012) apresentam dois sistemas de interface: interface do ignitor e interface da válvula. O sistema de interface do ignitor não será abordado neste trabalho.

O sistema de interface da válvula conta com um microcontrolador, que faz o acionamento da válvula responsável pela liberação do gás contido na campânula, através de um transistor. A válvula utilizada é uma válvula do tipo eletromecânica, com alimentação de 12V, confeccionada em material PVC. O circuito de interface da válvula é apresentado na Figura 15.

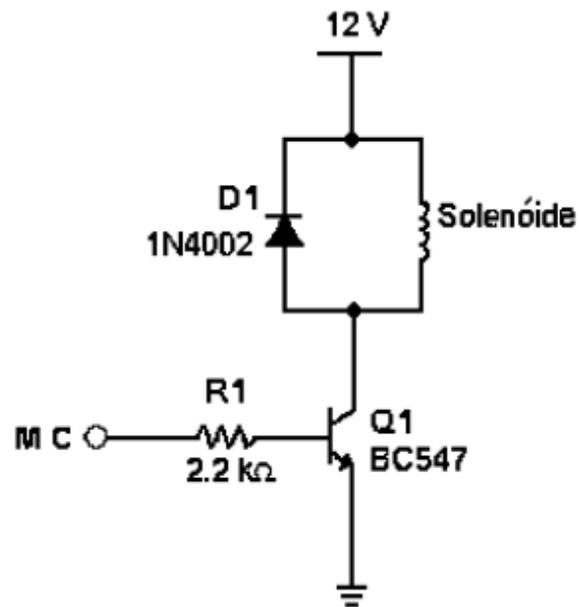


Figura 15 - Circuito de interface da válvula
Fonte: Marcelino e Godoy Junior (2011)

O sistema de controle de Marcelino e Godoy Junior (2011) é representado na Figura 16 e a tabela de estados do multivibrador biestável RS é representada na Tabela 2. A parte tracejada referente ao microcontrolador e medidor móvel é opcional e possibilita a contabilização do volume de gás queimado e a comunicação serial com o meio externo.

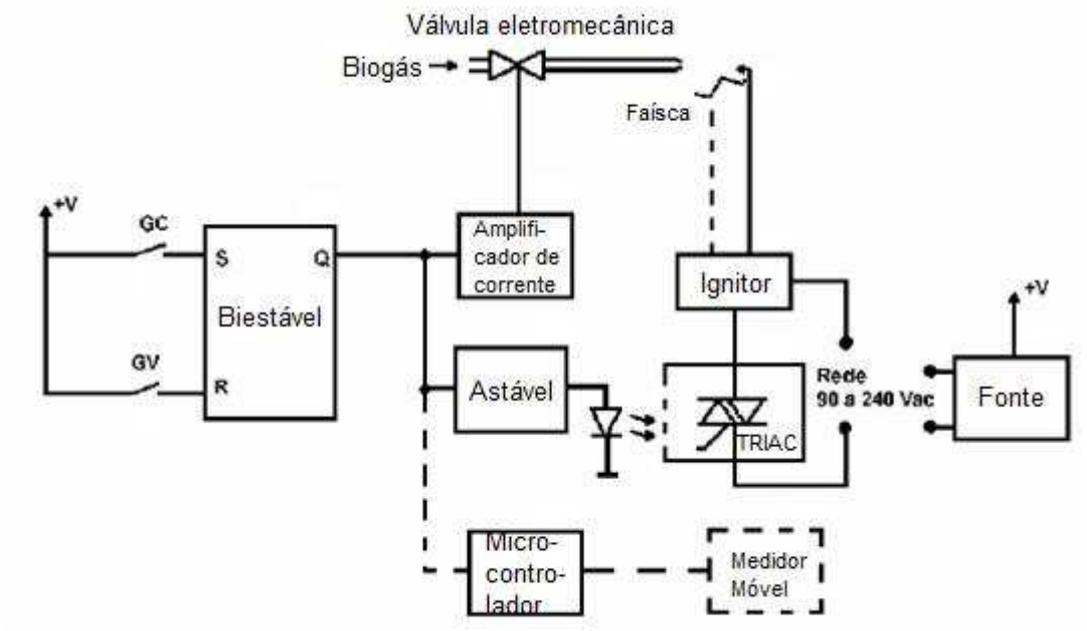


Figura 16 - Diagrama de blocos do circuito controlador do sistema
Fonte: Marcelino e Godoy Junior (2011)

Tabela 3 - Tabela de estados do multivibrador biestável RS

Entradas		Saídas	
Set (GC)	Reset (GV)	Válvula	Ignitor
on	off	on	1 on / 4 off
off	on	off	off
off	off	(estado anterior)	(estado anterior)
on	on	(estado proibido)	(estado proibido)

Fonte: Marcelino; Godoy Junior (2011)

A condição de estado proibido (duas micro chaves em *on*) é mecanicamente protegida e a condição das duas chaves desligadas é a condição de manutenção do estado anterior, que é quando o biogás está sendo queimado, esvaziando a campânula ou quando está enchendo.

Já o trabalho de Simões (2012) apresenta uma melhoria do trabalho de Marcelino e Godoy Junior (2011) no que se refere ao sistema de controle, onde propõe que a parcela referente aos circuitos biestável e astável sejam substituídas por um microcontrolador (Figura 17).

O microcontrolador quantifica o número de vezes que o gasômetro é esvaziado, substituindo também o microcontrolador opcional no trabalho anterior.

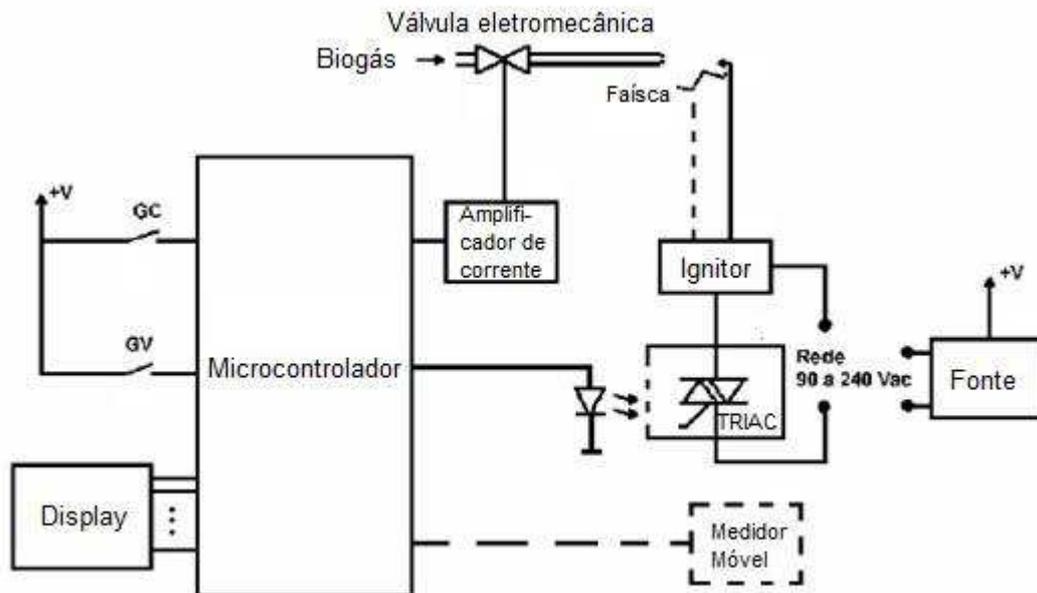


Figura 17 - Diagrama de blocos do circuito controlador do módulo controlador

Fonte: Simões (2012)

O projeto de Simões (2012) tem as funções de controle de armazenamento, queima e contabilização do biogás queimado, além da apresentação do resultado através de um display de cristal líquido (outra evolução em relação ao projeto anterior). Tudo isso utilizando apenas um microcontrolador de baixo custo.

Devido a possibilidade de repiques nos sinais das chaves que podem ser gerados pela ondulação do copo móvel do gasômetro, um filtro de repiques por software foi implementado, de acordo com Simões (2012). A Figura 18 representa o algoritmo.

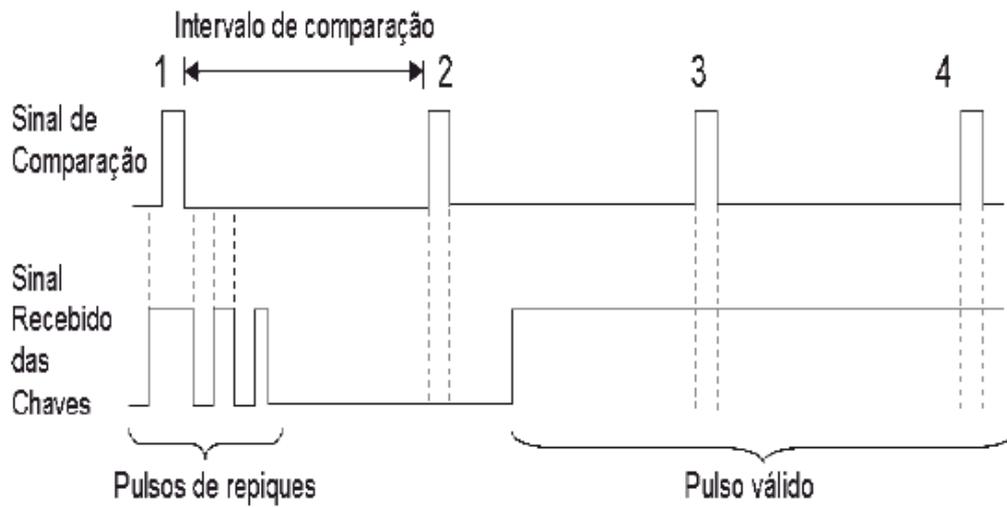


Figura 18 - Gráfico comparativo do algoritmo de igualdade consecutiva

Fonte: Simões (2012)

O circuito do projeto de Simões (2012) montado em protoboard é representado pela Figura 19.

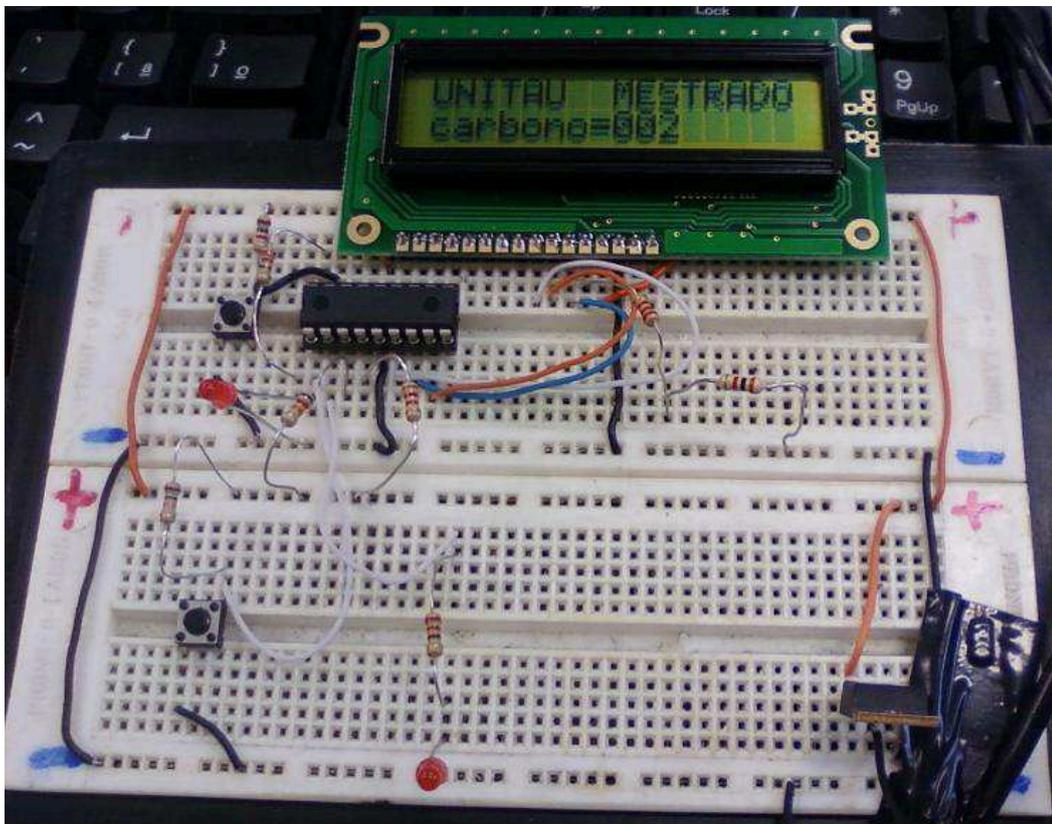


Figura 19 - Contador com valor incrementado

Fonte: Simões (2012)

Em ambos os projetos não foram desenvolvidos protótipos para o sistema completo (gasômetro e interfaces) e, portanto, não possuem dados operacionais do funcionamento.

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi realizada uma pesquisa aplicada através do desenvolvimento físico de um protótipo para se avaliar a viabilidade técnica e o funcionamento do sistema, e assim, através dos dados gerados, provar a solução do problema de contabilização dos dados de geração de biogás identificado nos trabalhos anteriores.

No desenvolvimento do protótipo foram utilizados os trabalhos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012) como referenciais teóricos, uma vez que estes trabalhos não possuíam protótipo físico.

Para a execução dos testes com o protótipo, a bancada foi configurada de duas maneiras (chamadas de teste 1 e teste 2). Em ambas foi utilizado um compressor de ar de aquário para a simulação do biogás produzido em baixas vazões.

Conforme visto anteriormente, os projetos de Marcelino e Godoy Júnior (2011) e Simões (2012) não desenvolveram protótipos para o sistema completo (gasômetro e interface), não possuindo dados de operação para comparação com os resultados deste projeto. Por este motivo, a primeira configuração da bancada (teste 1) visa obter os resultados numa condição próxima a dos projetos de referência. Já o teste 2 foi configurado com o sistema completo, com as modificações propostas por este trabalho.

3.1 TESTE 1 – SOMENTE COM O GASÔMETRO PRINCIPAL

No teste 1, o protótipo foi configurado simulando a entrada do biogás diretamente conectada à entrada do gasômetro principal, sem o gasômetro auxiliar e sem a utilização da válvula normalmente aberta na entrada do gasômetro principal (assim como foi proposto nos projetos anteriores).

A figura 20 mostra o sistema configurado para o teste 1, somente com o gasômetro principal (2), alimentado diretamente pelo compressor de ar (1), o sistema de controle (3) e a válvula de saída (4).

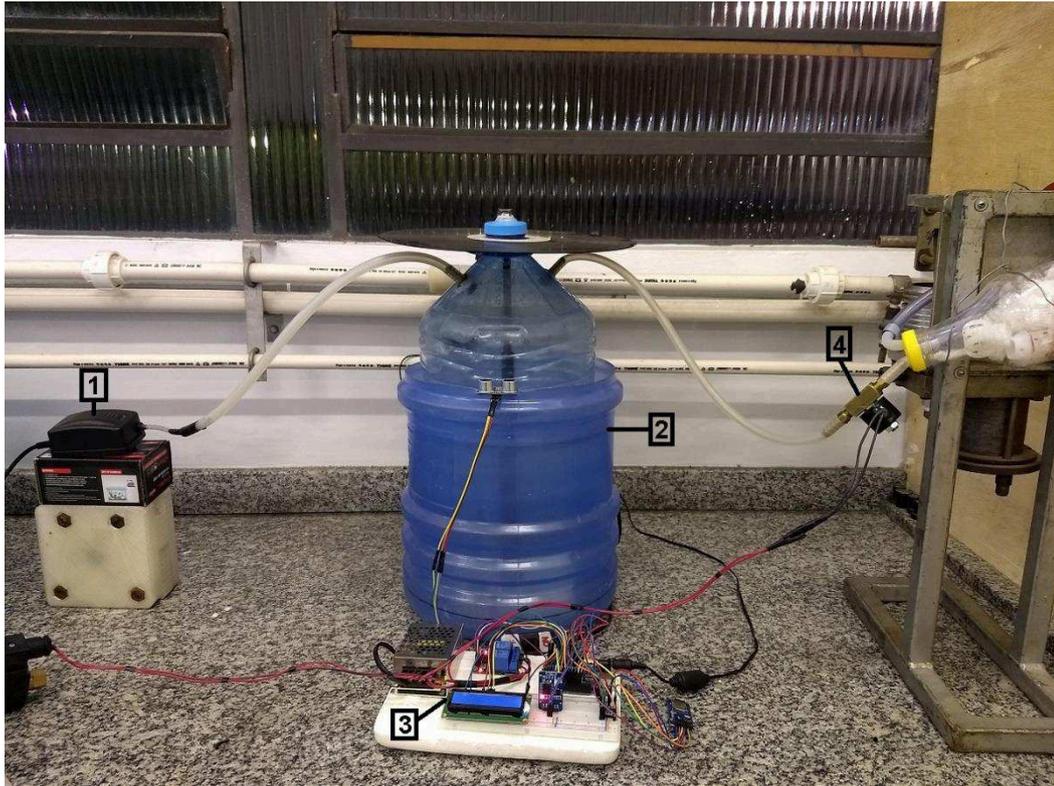


Figura 20 - Bancada configurada para o teste 1

Fonte: Autor (2019)

Nesta configuração (teste 1), o biogás entra no gasômetro (2) e vai preenchendo a campânula. Assim que o sensor ultrassônico indica que a campânula atingiu a altura programada no sistema Arduino de 18 cm (gasômetro cheio), é enviado um comando para um relé abrir a válvula de saída (4) e assim enviar o biogás para a utilização ou queima.

Neste passo é importante notar o problema a ser resolvido por este projeto: enquanto a válvula de saída está aberta e a campânula é esvaziada, o biogás continua a ser produzido pelo biodigestor (1), isto é, tem biogás entrando e saindo ao mesmo tempo no gasômetro.

Assim que o sensor ultrassônico indica que a campânula atingiu 3 cm (gasômetro vazio), é enviado um novo comando para o relé fechar a válvula de saída. Neste momento, o sistema Arduino incrementa o volume de biogás e apresenta o valor no *display* LCD (cada vez que os relés comandam para abrir ou fechar as válvulas, um comando também é enviado para o módulo de cartão SD gravar os dados). Então, o ciclo é reiniciado.

Nessa configuração (teste 1) foram realizados 23 ciclos, totalizando aproximadamente 7 horas.

3.2 TESTE 2 – SISTEMA COMPLETO

Para o teste 2, o protótipo foi configurado com o sistema completo (com gasômetro auxiliar e válvula normalmente aberta na entrada do gasômetro principal - melhorias propostas por este trabalho) e o compressor de ar de aquário instalado na entrada do gasômetro auxiliar. A configuração do teste 2 pode ser observada na Figura 21, que ilustra o sistema no estado inicial, com o gasômetro auxiliar (1), gasômetro principal (2), sistema de controle (3), válvula de entrada (4) e válvula de saída (5).

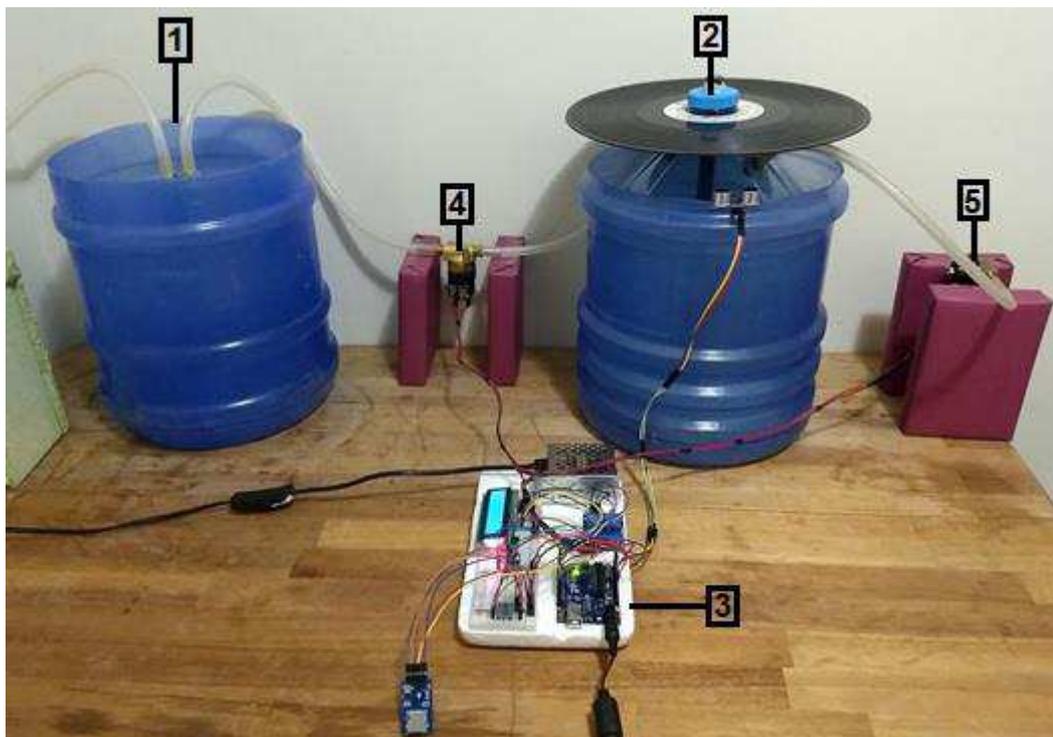


Figura 21 - Bancada configurada para o teste 2

Fonte: Autor (2019)

Na condição inicial, os dois gasômetros do sistema estão vazios. Primeiramente o biogás entra pelo gasômetro auxiliar (1), passa pela válvula

normalmente aberta (4) e entra no gasômetro principal (2). O gasômetro principal vai enchendo e quando o sensor ultrassônico indica que a campânula atingiu a altura de 18 cm (gasômetro cheio) programada no Arduino, é emitido um comando para um relé fechar a válvula de entrada (4) e o outro relé abrir a válvula de saída (5). Então, o biogás é enviado para a utilização/queima, esvaziando o gasômetro principal.

Enquanto o gasômetro principal esvazia, a válvula instalada na entrada do gasômetro principal está fechada, isolando-o. Então, o gasômetro auxiliar vai sendo abastecido. Assim que o sensor ultrassônico indica que a campânula atingiu a altura de 3 cm (gasômetro principal vazio), um novo comando é enviado pelo Arduino para um relé abrir a válvula de entrada e o outro relé fechar a válvula de saída. Assim, o biogás que havia sido armazenado no gasômetro auxiliar é transferido para o gasômetro principal.

Neste momento, o Arduino incrementa o volume de biogás e apresenta o valor no *display* LCD (cada vez que os relés comandam para abrir ou fechar as válvulas, um comando também é enviado para o módulo de cartão SD gravar os dados). O ciclo se inicia novamente.

Nessa configuração (teste 2), foram realizados 92 ciclos, totalizando aproximadamente 12 horas e 30 minutos.

Esses 2 testes buscaram provar que o gasômetro auxiliar é fundamental para a medição correta dos valores de biogás produzido.

4 PROPOSTA DO GASÔMETRO AUTOMATIZADO VISANDO A MEDIÇÃO EXATA DO BIOGÁS PRODUZIDO

Este trabalho propõe um aprimoramento de todo o sistema, tanto na parte mecânica quanto na parte de controle. A Figura 22 representa o sistema completo. Basicamente, o sistema é composto por mangueiras de silicone (1), gasômetro auxiliar (2), gasômetro principal (3), sistema eletrônico de controle (4), válvula normalmente aberta (5), válvula normalmente fechada (6) e sensor ultrassônico (7). Os detalhes das partes serão abordados nas seções seguintes.

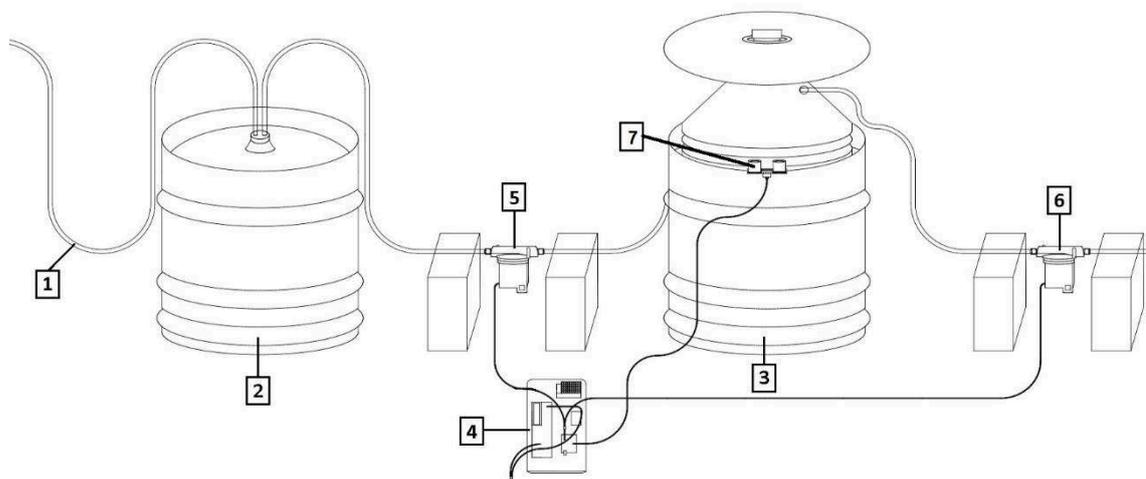


Figura 22 - Sistema do Gasômetro Completo

Fonte: Autor (2019)

4.1 APRIMORAMENTO DA PARTE MECÂNICA DO PROJETO

Os projetos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012) apresenta uma campânula com um lastro que evita o tombamento, mas que pode gerar repique nas micro chaves de fim de curso devido a oscilação da campânula na água. A fim de evitar estas oscilações, é sugerido um guia para a campânula. A entrada e a saída do biogás também foram alteradas para a parte superior da campânula para evitar possíveis vazamentos de água durante a operação.

Conforme ilustra a Figura 23, o guia (2) confeccionado em um tubo de cobre, é fixado em uma placa de nylon (3) que serve como base para ele e é colada no fundo

do copo fixo do gasômetro (1). Para a confecção do copo fixo do gasômetro foi utilizado um garrafão em PEAD de 20 litros.

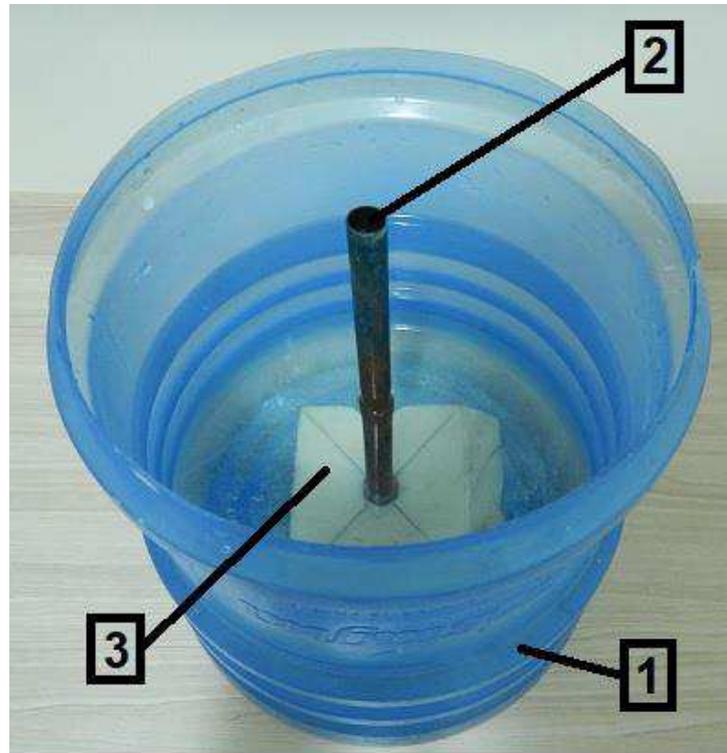


Figura 23 - Copo fixo do gasômetro principal

Fonte: Autor (2019)

A Figura 24 ilustra a campânula (1), confeccionada utilizando um garrafão em PEAD de 10 litros e que possui a entrada e a saída do biogás. Duas conexões são fixadas na parte superior da campânula, por onde são conectadas as mangueiras de silicone (3). Ainda possui a outra parte do guia, que é um tubo de cobre de diâmetro um pouco menor que o da base e é instalado na tampa da campânula através de conexões de latão (2). Este, é encaixado dentro do tubo do copo fixo e evita que a campânula oscile ou tombe quando estiver cheia.

A campânula também conta com uma superfície instalada na parte superior que serve como referência para o sensor ultrassônico (que será descrito na próxima seção) para a medição da distância (4). E há ainda um furo na parte inferior da campânula que funciona como uma válvula de segurança (5), caso o volume de biogás armazenado ultrapasse a capacidade máxima do gasômetro devido a alguma falha nas válvulas ou no sistema de controle. Neste caso o biogás é liberado para a atmosfera sem queima.



Figura 24 - Campânula do gasômetro principal

Fonte: Autor (2019)

Assim como a otimização mecânica, que foi a principal mudança comparada aos sistemas de Godoy Junior (2011) e Simões (2012), outra ação relevante foi a implementação da instalação de um gasômetro auxiliar, antes do gasômetro principal.

A função do gasômetro auxiliar é garantir uma contagem exata do volume de biogás queimado, pois enquanto o gasômetro principal é esvaziado, uma válvula fecha e o isola e então o biogás é armazenado no gasômetro auxiliar.

O gasômetro auxiliar, ilustrado na Figura 25 é simples, sem sensores e sem guia. Possui um copo fixo (1), uma campânula (2) e duas mangueiras de silicone instaladas na parte superior (3), uma para a entrada do gás proveniente do biodigestor e outra de saída para a válvula normalmente aberta. Assim como no gasômetro principal, há um furo na parte inferior da campânula que funciona como uma válvula de segurança, caso o volume de biogás armazenado ultrapasse a capacidade máxima do gasômetro devido a válvula na saída do gasômetro auxiliar travar na posição fechada.

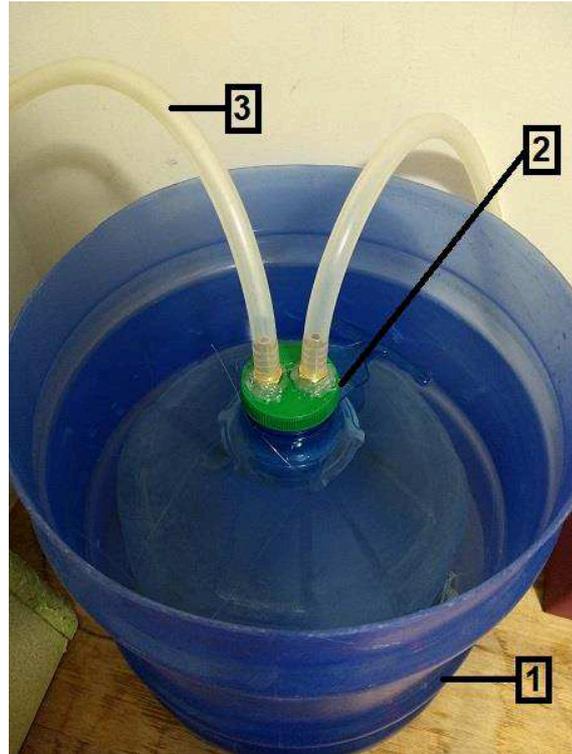


Figura 25 - Gasômetro auxiliar

Fonte: Autor (2019)

Na entrada e na saída do gasômetro principal foram instaladas duas válvulas solenoides com corpo de latão, alimentadas por 12 Volts. A válvula de entrada é normalmente aberta e a válvula de saída normalmente fechada. Os detalhes das válvulas podem ser observados na Figura 26.



Figura 26 - Válvulas solenoides

Fonte: Autor (2019)

4.2 APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE

No aprimoramento do sistema de controle foram propostas algumas melhorias nos sistemas desenvolvidos por Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012). A Figura 27 ilustra no retângulo tracejado, a porção do circuito que foi alterada visando melhorar o desempenho para quantificar o volume real de biogás produzido.

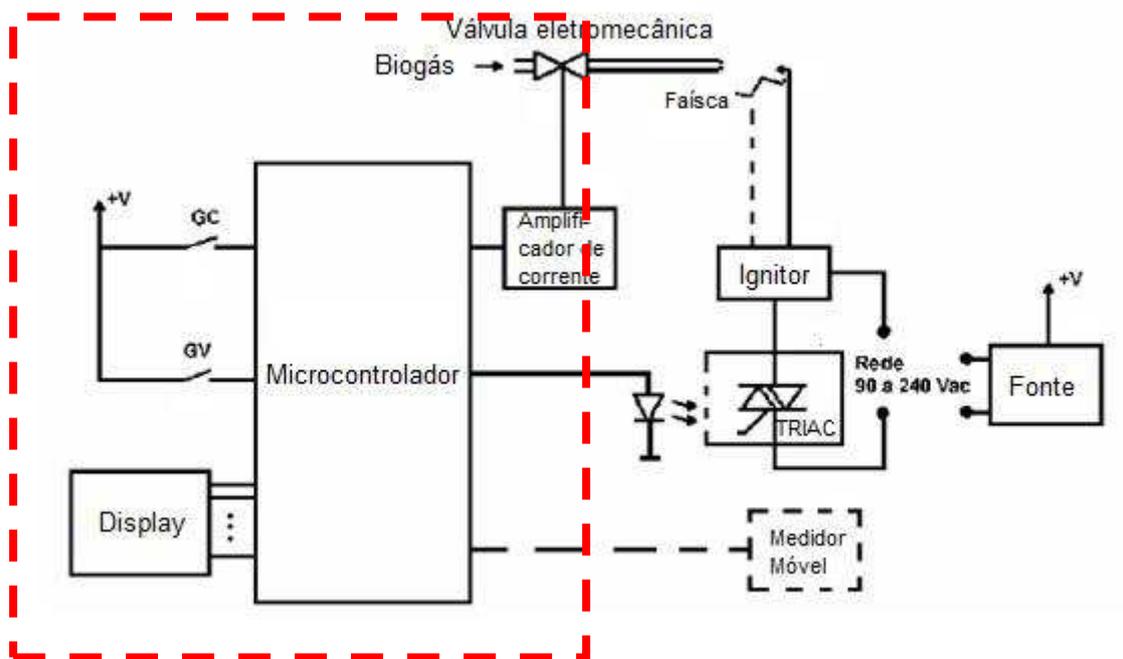


Figura 27 - Diagrama de blocos do circuito controlador de Simões (2012), indicando a parte alterada pelo circuito proposto

Fonte: Adaptado de Simões (2012)

As alterações no circuito proposto que são descritas a seguir, podem ser identificadas na Figura 28.

A primeira melhoria é a substituição do microcontrolador simples por um Arduino.

De acordo com Palmiere (2016), um dos maiores problemas dos microcontroladores é que um código escrito e compilado para um modelo, pode não funcionar em outro fabricante e existem casos de incompatibilidade até mesmo em modelos de um mesmo fabricante.

O Arduino é flexível, relativamente barato, fácil de utilizar por possuir inúmeras bibliotecas disponíveis e por possuir código aberto. Também por ser considerado uma

plataforma e não um hardware, pois possui um ambiente de desenvolvimento IDE (*integrated development environment*) que utiliza linguagem C/C++, pode ser baixada gratuitamente no site oficial do Arduino e é compatível com Windows, Mac OS X, e Linux. Além disso não necessita de equipamentos extras, somente um cabo USB (*Universal Serial Bus*) (Banzi; Shiloh, 2015). Por estes motivos, foi escolhido para este projeto.

O modelo utilizado no projeto foi o Arduino UNO (1), que possui 14 portas digitais e 6 portas analógicas.

A segunda solução proposta é a substituição das micro chaves e do imã permanente do sistema anterior por um sensor ultrassônico (4).

O sensor ultrassônico HC-SR04 (4) permite a leitura de distâncias entre 2 centímetros e 4 metros com boa precisão (3 mm). É instalado na parte superior do copo fixo do gasômetro e seu ponto de referência é a superfície instalada na parte superior da campânula (no protótipo desenvolvido, um disco de vinil).

Também fazem parte do sistema de controle do gasômetro, um módulo com dois relés de 5V (2) que controlam as válvulas solenoides de entrada e saída.

Além das mudanças descritas, foram adicionados um *real time clock* (RTC) - Ds3231 (5), que é um relógio de tempo real com sensor de temperatura embutido (o RTC fornece informações de data, hora e a temperatura na faixa de 0 a 40°C) e também um leitor/gravador de *Micro SD Card* (6).

Em complemento ao RTC, o leitor/gravador de *Micro SD* grava os dados do sistema a cada abertura e fechamento das válvulas. Os dados gravados são: data, hora, estado do gasômetro (cheio ou vazio), temperatura e volume total queimado.

Com estes componentes, é possível garantir uma maior confiabilidade ao sistema, uma vez que, na falta de energia elétrica, os dados já estão gravados no cartão SD, possibilitando a recuperação dos mesmos.

O sistema ainda conta com um *display* LCD 16x2 (3) para a apresentação da quantidade de volume de biogás queimado, como mostra a Figura 28.

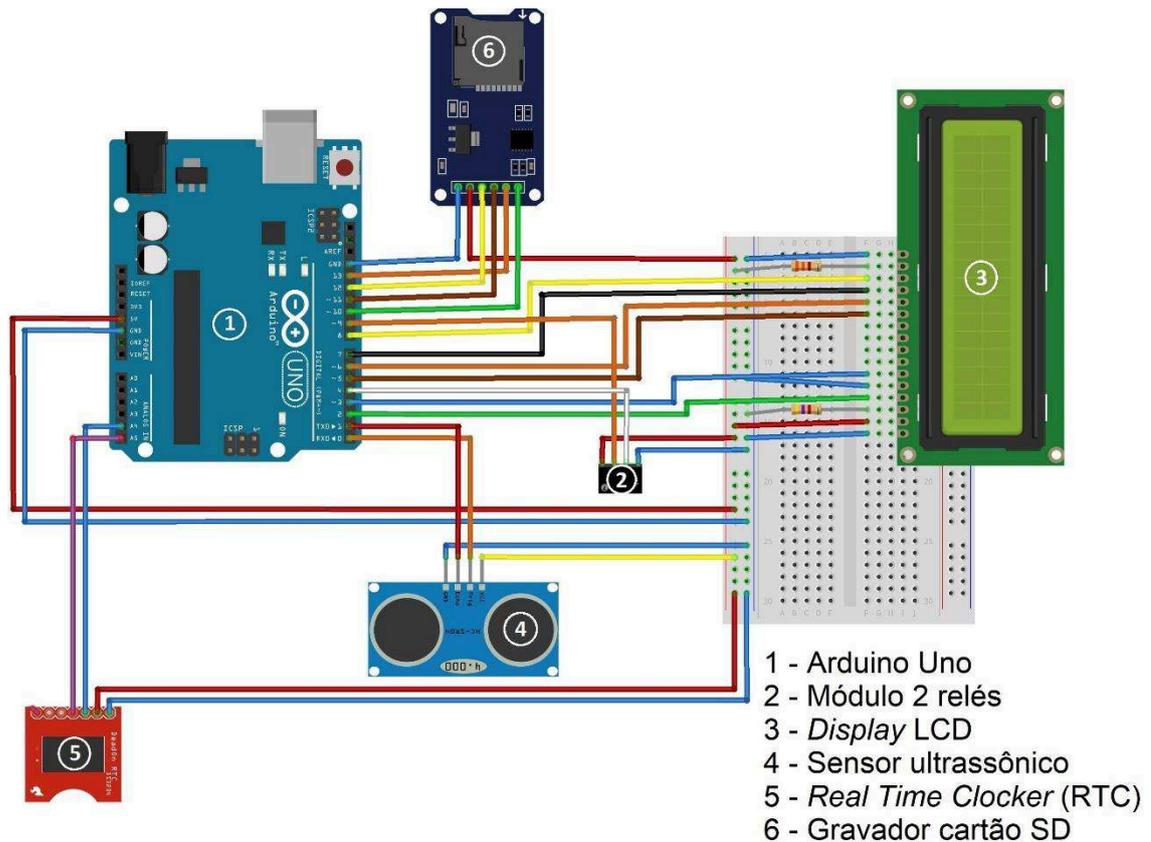


Figura 28 - Sistema de controle do gasômetro

Fonte: Autor (2019)

A Figura 29 ilustra o diagrama de blocos do circuito controlador proposto (a porção referente à interface do ignitor foi substituída por um único bloco, pois, conforme citado anteriormente, o sistema de interface do ignitor não será abordado neste trabalho, mas pode ser implementado futuramente).

O diagrama de blocos representa o Arduino fazendo a interface com todos os outros componentes do sistema: gravador de dados (módulo de cartão SD e módulo RTC), display LCD, sensor ultrassônico, as válvulas de entrada e saída do gasômetro principal e a interface do ignitor, que pode ser implementada futuramente.

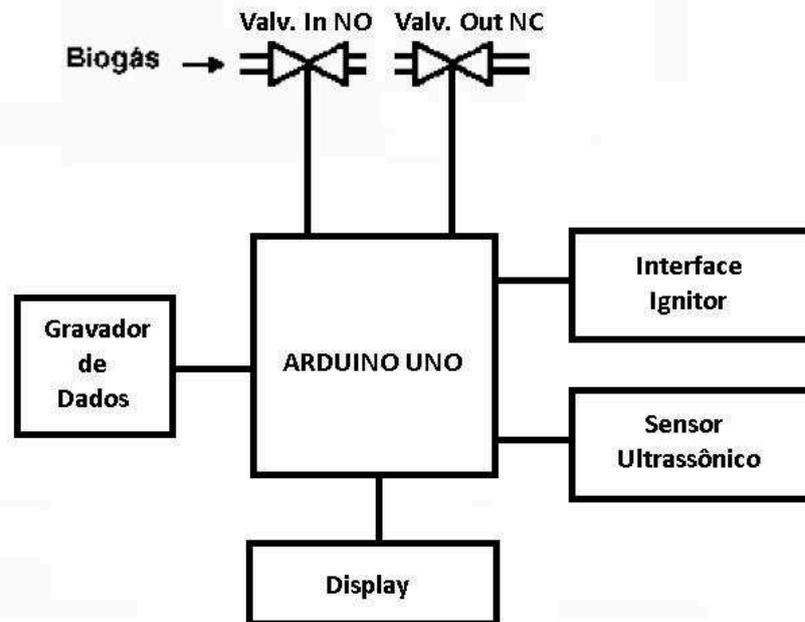


Figura 29 - Diagrama de blocos do circuito controlador proposto com a substituição de componentes

Fonte: Autor (2019)

A Figura 30 ilustra o diagrama de blocos simplificado e mostra o sensor ultrassônico dando a entrada no controlador (Arduino), que faz o controle das interfaces do ignitor e a interface das válvulas.

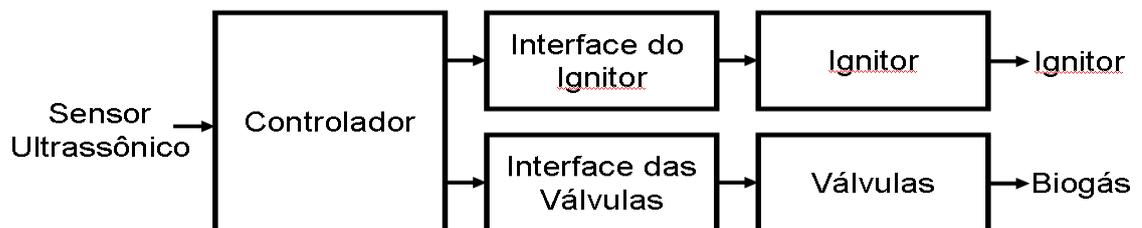


Figura 30 - Diagrama de blocos simplificado do circuito controlador proposto

Fonte: Autor (2019)

4.3 FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O fluxograma de funcionamento do sistema é representado pela Figura 31.

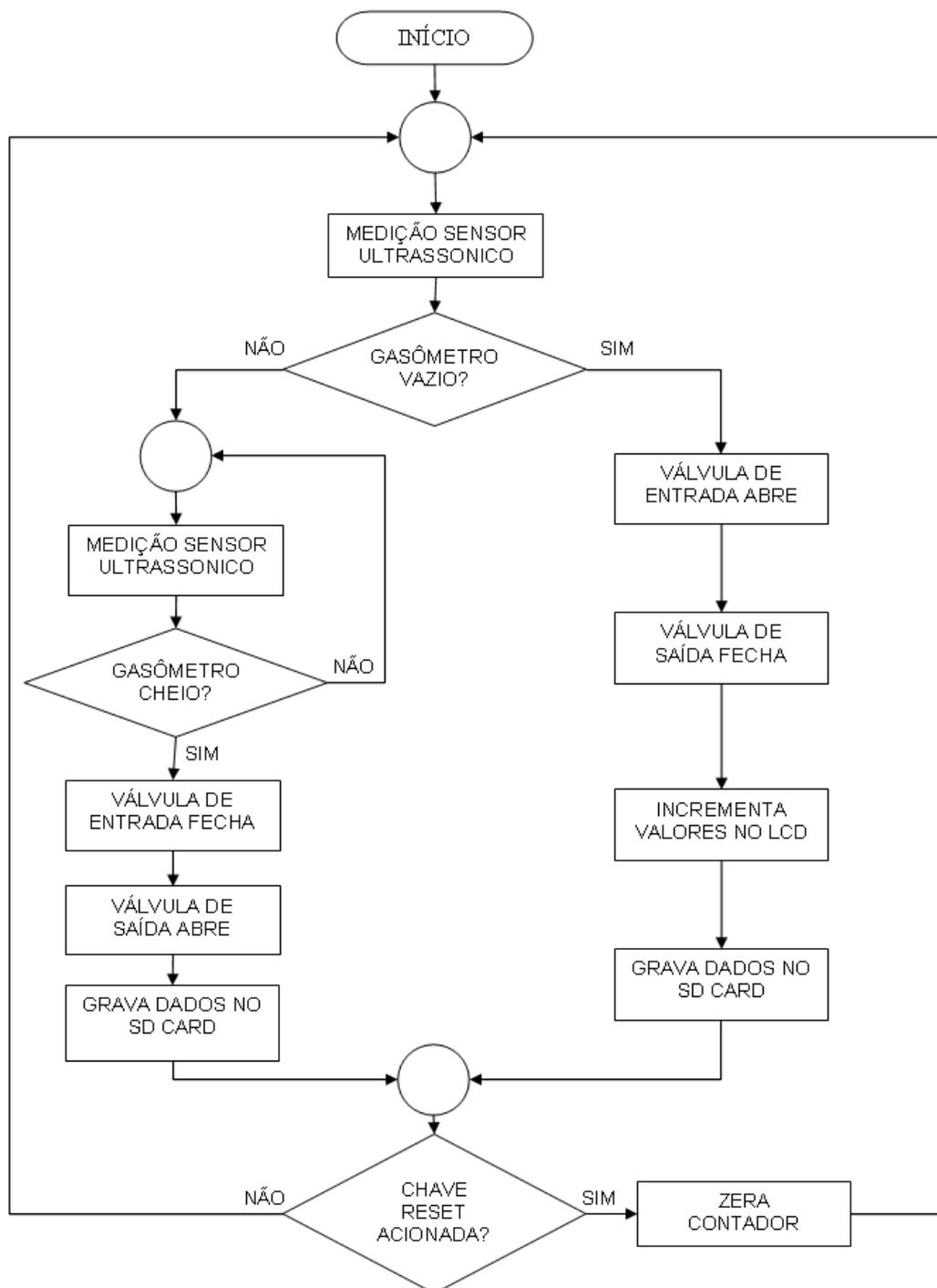


Figura 31 - Fluxograma do funcionamento do controle do gasômetro

Fonte: Autor (2019)

Ao ligar o sistema, o Arduino pega a medição da distância feita pelo sensor ultrassônico. Caso indique que o gasômetro está vazio (sensor ultrassônico indicando menos de 3 cm), ele abre a válvula de entrada, fecha a de saída, incrementa o valor do volume mostrado no LCD (desde que não seja o primeiro ciclo) e grava os valores no cartão SD. Caso a chave de reset não tenha sido pressionada, então o fluxograma volta para o início.

Se o sensor ultrassônico indicar que o gasômetro não está vazio (sensor ultrassônico indicando algo acima de 3 cm e abaixo de 18 cm), o sistema permanece monitorando a medida do sensor até que ele indique gasômetro cheio (sensor ultrassônico indicando mais de 18 cm). Ao indicar cheio, o Arduino envia um comando para fechar a válvula de entrada, abrir a válvula de saída e gravar os dados de transição de estado no cartão SD. Caso a chave de reset não tenha sido pressionada, então o fluxograma volta para o início.

No caso da chave de *reset* ter sido pressionada, o Arduino zera o contador e reinicia o ciclo.

O código de programação do Arduino de acordo com o que foi descrito acima se encontra no Apêndice A.

5 RESULTADOS

Para fazer a correta contabilização dos dados, o volume de gás útil do gasômetro principal foi calculado a partir das medidas da campânula - 10 cm diâmetro e 15 cm de altura (18 cm da indicação de gasômetro cheio menos 3 cm da indicação de gasômetro vazio), obtendo-se um volume equivalente a 4712,39 cm³.

Para o teste 1, somente com o gasômetro principal, cada ciclo do gasômetro (vazio - cheio - vazio) levou aproximadamente 18:48 minutos. Em média 13:16 minutos para encher o gasômetro e 05:32 minutos para esvaziá-lo.

Neste teste foram realizados 23 ciclos, totalizando aproximadamente 7 horas e o volume total de biogás armazenado foi 103.672,59 cm³.

A Tabela 4 mostra uma amostragem dos dados que foram gravados no cartão SD: a data e hora que as válvulas solenoides mudaram de estado, indicando o gasômetro principal cheio ou vazio, a temperatura e o volume total de biogás armazenado (os valores dos dados gravados durante todo o teste 1 podem ser verificados no Apêndice B).

Tabela 4 – Amostragem de dados gravados de 23 ciclos (teste 1)

Data	Hora	Temperatura	Gasômetro	Volume Queimado
2/08/2018	23:34:23	21.75 °C	Gasômetro Cheio	4712.39 cm ³
2/08/2018	23:39:34	21.50 °C	Gasômetro Vazio	
2/08/2018	23:52:07	21.75 °C	Gasômetro Cheio	9424.78 cm ³
2/08/2018	23:57:33	21.50 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	00:10:48	21.50 °C	Gasômetro Cheio	14137.17 cm ³
3/08/2018	00:16:23	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	00:29:10	21.50 °C	Gasômetro Cheio	18849.56 cm ³
3/08/2018	00:34:42	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	00:47:27	21.50 °C	Gasômetro Cheio	23561.95 cm ³
3/08/2018	00:53:01	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	01:05:35	21.25 °C	Gasômetro Cheio	28274.34 cm ³
.
.
.
3/08/2018	03:38:26	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	03:52:15	21.50 °C	Gasômetro Cheio	70685.85 cm ³
3/08/2018	03:57:45	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	04:11:43	21.50 °C	Gasômetro Cheio	75398.25 cm ³
3/08/2018	04:17:11	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	04:31:24	21.50 °C	Gasômetro Cheio	80110.64 cm ³
3/08/2018	04:36:54	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	04:51:41	21.50 °C	Gasômetro Cheio	84823.03 cm ³
3/08/2018	04:57:15	21.25 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	05:11:42	21.25 °C	Gasômetro Cheio	89535.42 cm ³
3/08/2018	05:17:07	21.00 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	05:31:29	21.00 °C	Gasômetro Cheio	94247.81 cm ³
3/08/2018	05:36:56	20.75 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	05:51:15	20.75 °C	Gasômetro Cheio	98960.20 cm ³
3/08/2018	05:56:41	20.75 °C	Gasômetro Vazio	
3/08/2018	06:11:42	20.75 °C	Gasômetro Cheio	103672.59 cm ³
3/08/2018	06:17:24	20.75 °C	Gasômetro Vazio	

Fonte: Autor (2019)

Através destes dados gravados pelo cartão SD, foi possível extrair os dados dos tempos de enchimento e esvaziamento e traçar um gráfico de como o sistema se

comportou durante todo o teste 1. A Figura 32 ilustra o comportamento do sistema (os valores dos tempos em todos os ciclos do teste 1 podem ser verificados no Apêndice C).

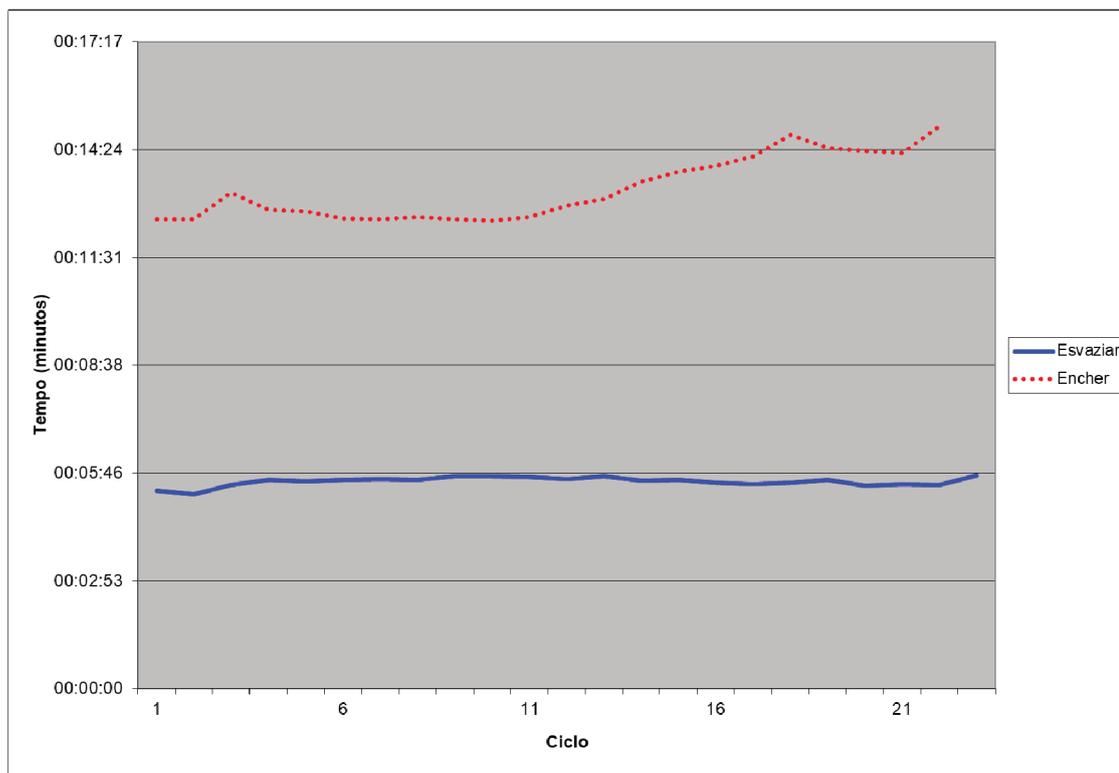


Figura 32 - Teste 1 - Tempos de enchimento e esvaziamento do gasômetro com ar (gás simulado pela bomba de aquário)

Fonte: Autor (2019)

A Figura 33 ilustra a configuração do sistema para o teste 1, somente com o gasômetro principal (2), alimentado diretamente pelo compressor de ar de aquário (1), o sistema de controle (3) e a válvula de saída (4).

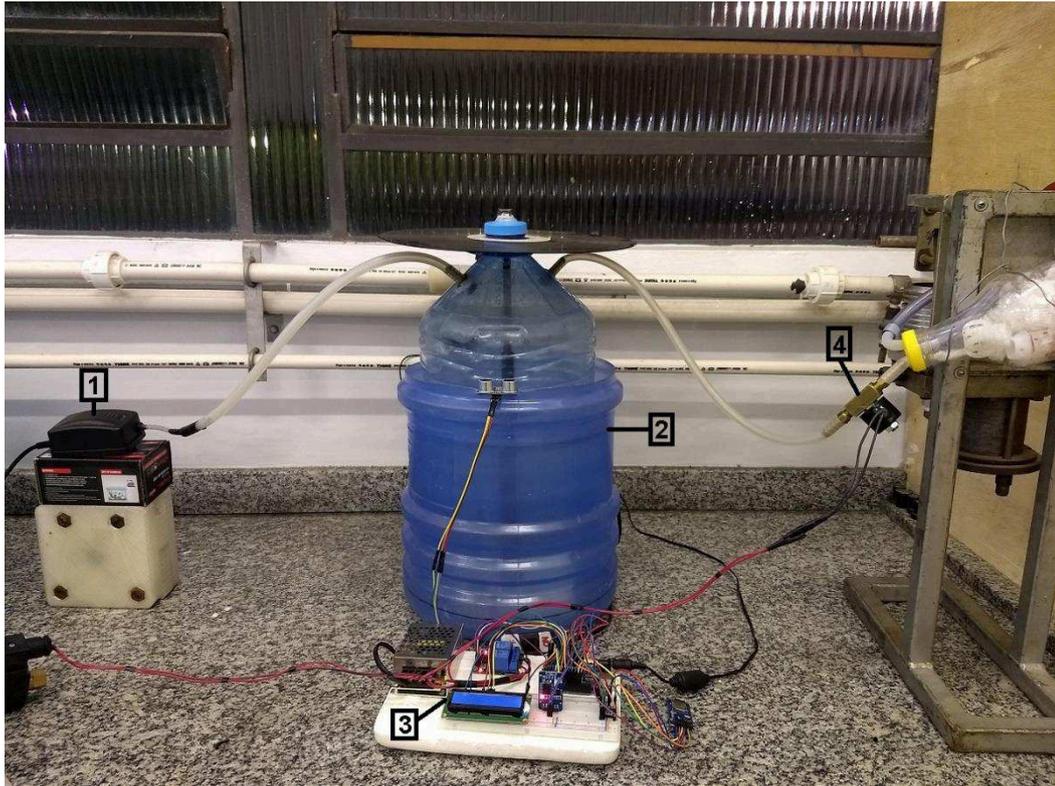


Figura 33 - Sistema somente com gasômetro principal em funcionamento (teste 1)

Fonte: Autor (2019)

Para o teste 2, com o sistema gasômetro completo, cada ciclo do gasômetro principal (vazio - cheio - vazio) levou aproximadamente 8:11 minutos. Em média 05:17 minutos para encher e 02:54 minutos para esvaziar.

Neste teste foram realizados 92 ciclos, totalizando aproximadamente 12 horas e 30 minutos e o volume total de biogás armazenado foi 433.539,90 cm³.

A Tabela 5 mostra uma amostragem dos dados que foram gravados no cartão SD: a data e hora que as válvulas solenoides mudaram de estado, indicando o gasômetro principal cheio ou vazio, a temperatura e o volume total de biogás armazenado (os valores dos dados gravados durante todo o teste 2 podem ser verificados no Apêndice D).

Tabela 5 – Amostragem de dados gravados de 92 ciclos (teste 2)

20_42_18.txt - Notepad							
Data:	Hora:	Temperatura:	Gasômetro	Cheio	Vazio	Volume:	
8/06/2018	20:54:48	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		4712.39	cm3
8/06/2018	20:57:41	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:02:11	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		9424.78	cm3
8/06/2018	21:05:00	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:10:06	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		14137.17	cm3
8/06/2018	21:12:56	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:18:38	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		18849.56	cm3
8/06/2018	21:21:28	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:27:27	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		23561.95	cm3
8/06/2018	21:30:20	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:37:04	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		28274.34	cm3
8/06/2018	21:39:53	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:45:54	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		32986.73	cm3
8/06/2018	21:48:42	22.25 °C	Gasômetro	Vazio			
8/06/2018	21:54:52	22.25 °C	Gasômetro	Cheio		37699.12	cm3
.
.
.
.
9/06/2018	08:28:56	19.75 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	08:33:58	19.75 °C	Gasômetro	Cheio		405265.56	cm3
9/06/2018	08:36:49	19.75 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	08:41:46	20.25 °C	Gasômetro	Cheio		409977.93	cm3
9/06/2018	08:44:39	20.25 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	08:49:28	20.00 °C	Gasômetro	Cheio		414690.34	cm3
9/06/2018	08:52:21	20.00 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	08:57:11	20.25 °C	Gasômetro	Cheio		419402.71	cm3
9/06/2018	09:00:12	20.00 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	09:05:01	20.25 °C	Gasômetro	Cheio		424115.12	cm3
9/06/2018	09:07:55	20.00 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	09:12:45	20.25 °C	Gasômetro	Cheio		428827.50	cm3
9/06/2018	09:15:38	20.25 °C	Gasômetro	Vazio			
9/06/2018	09:19:14	20.75 °C	Gasômetro	Cheio		433539.90	cm3
9/06/2018	09:22:08	20.25 °C	Gasômetro	Vazio			

Fonte: Autor (2019)

Através destes dados gravados pelo cartão SD, foi possível extrair os dados dos tempos de enchimento e esvaziamento e traçar um gráfico de como o sistema se comportou durante todo o teste 2. A Figura 34 ilustra o comportamento do sistema (os valores dos tempos em todos os ciclos do teste 2 podem ser verificados no Apêndice E).

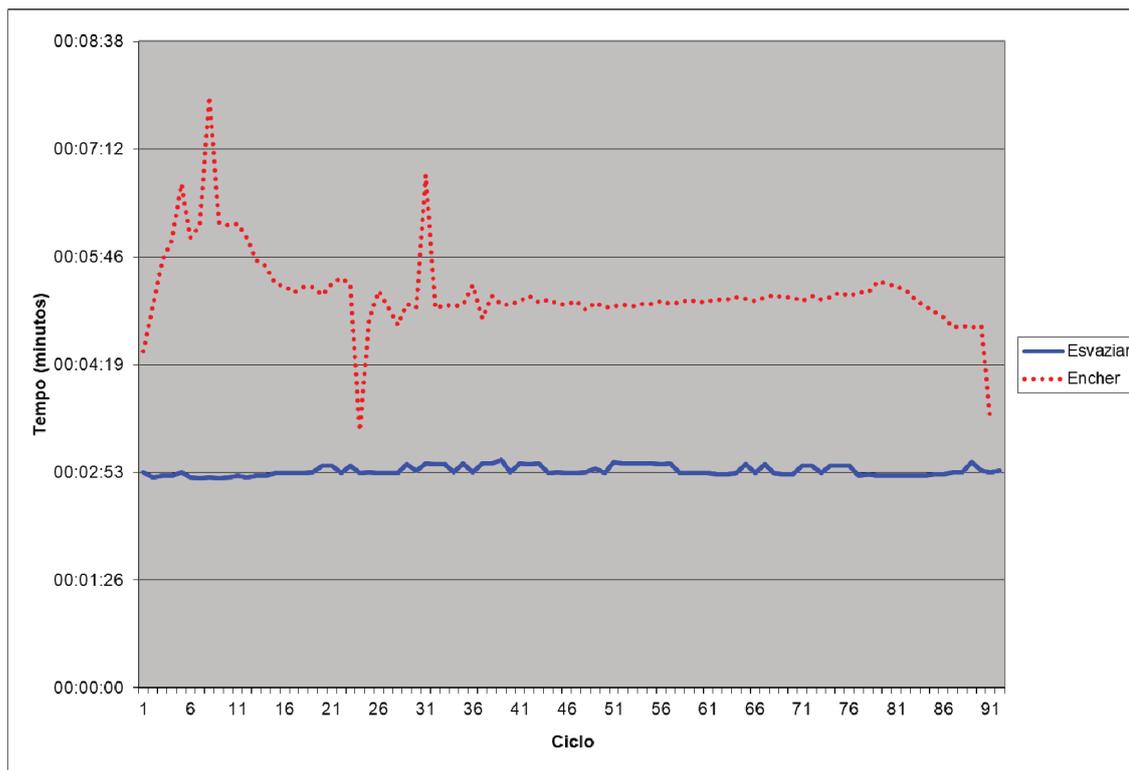


Figura 34 - Teste 2 - Tempos de enchimento e esvaziamento do gasômetro com ar (gás simulado pela bomba de aquário)

Fonte: Autor (2019)

A Figura 35 ilustra o *display* LCD (1) com a condição inicial do sistema ao ser energizado, indicando Volume = 0 cm³ e a válvula de entrada aberta, o módulo RTC (2), o módulo de gravação de cartão SD (3), o Arduino (4), o módulo de relé duplo (5) e a fonte de 12V (6).

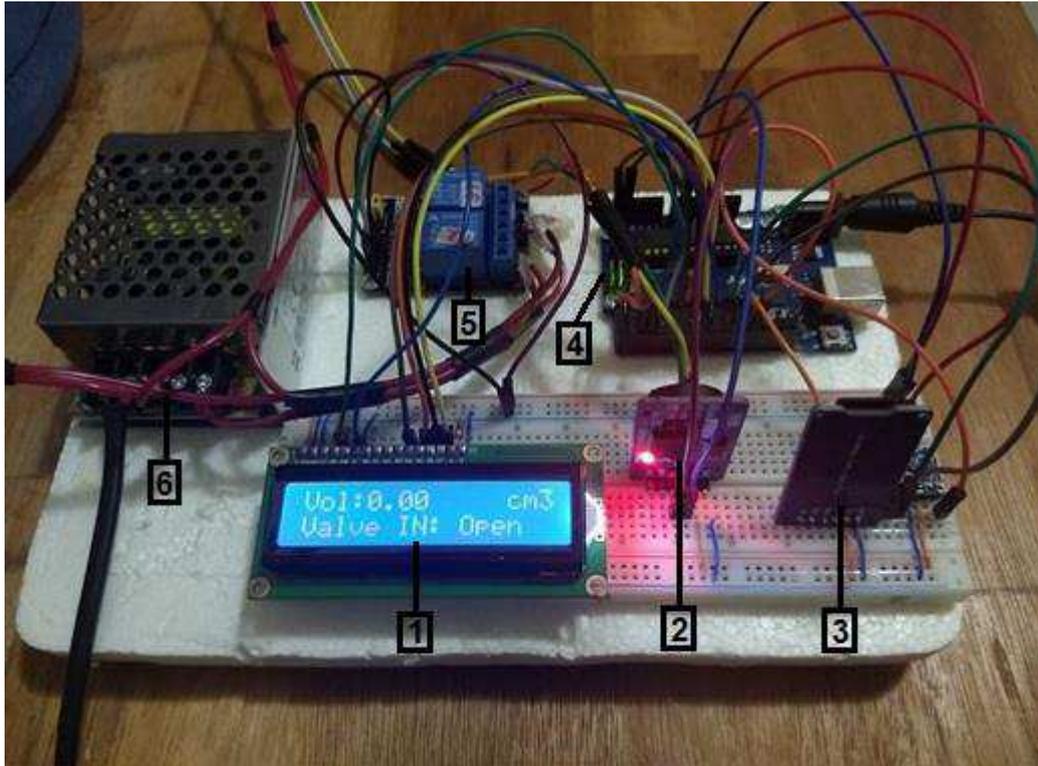


Figura 35 - Condição inicial do sistema (teste 2)

Fonte: Autor (2019)

Na Figura 36, o *display* LCD indica o volume total de biogás que passou pelo gasômetro principal (e que foi enviado para queima ou aproveitamento energético) após os 92 ciclos, totalizando um volume de 433.539,90 cm³ de biogás.



Figura 36 - Volume total de biogás após 92 ciclos (teste 2)

Fonte: Autor (2019)

A Figura 37 ilustra o sistema configurado para o teste 2 no seu estado inicial, com o gasômetro auxiliar (1) e o gasômetro principal (2) vazios. Neste momento o sistema de controle (3) mantém a válvula de entrada (4) aberta e a válvula de saída (5) fechada.

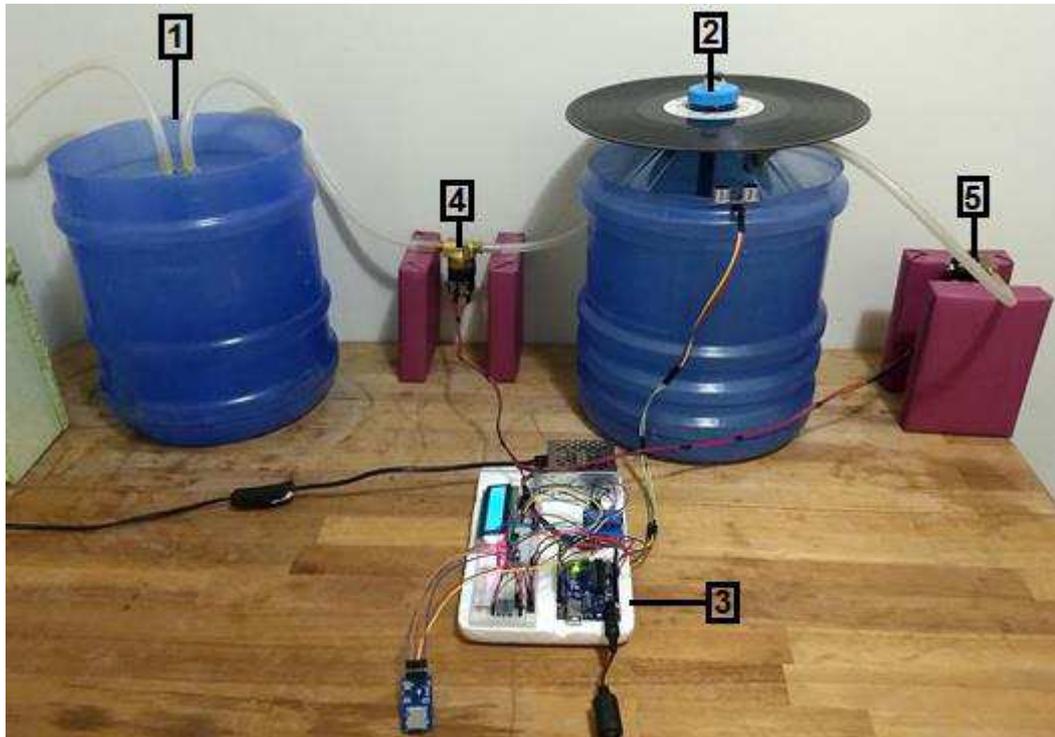


Figura 37 - Gasômetro principal vazio (teste 2)

Fonte: Autor (2019)

A Figura 38, ilustra o sistema com o gasômetro principal (2) cheio e o gasômetro auxiliar (1) vazio. Neste momento o sistema de controle (3) fecha a válvula de entrada (4) e abre a válvula de saída (5), para esvaziar o gasômetro principal (2).

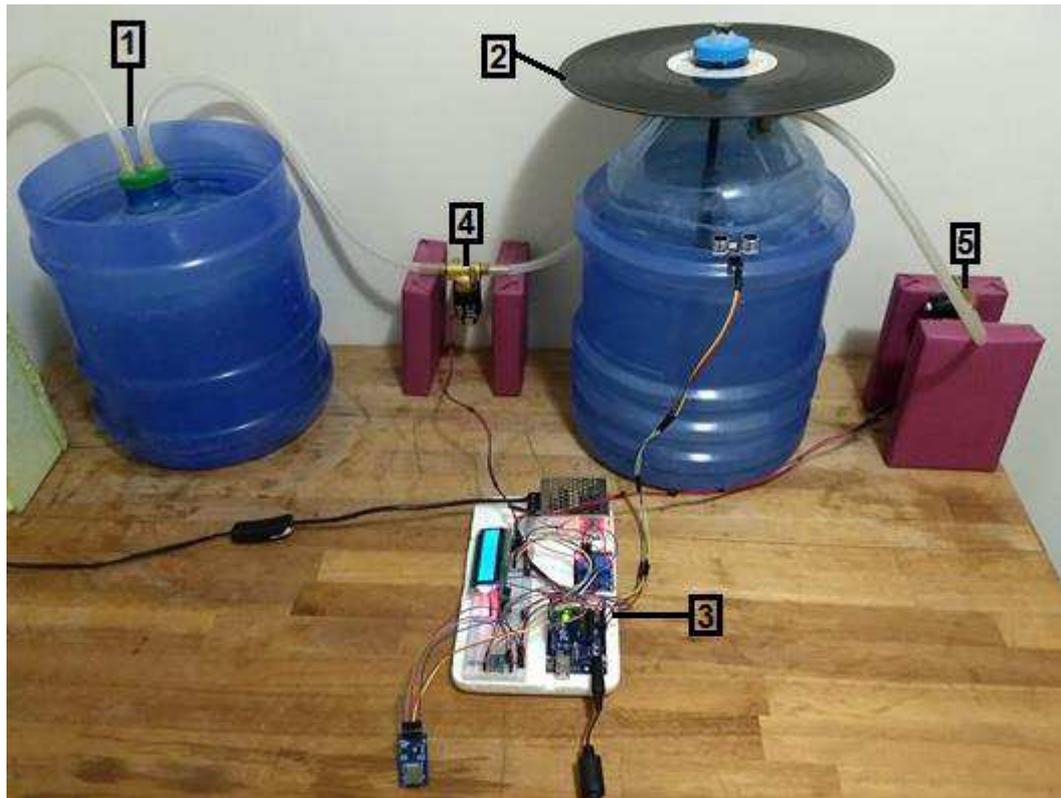


Figura 38 - Gasômetro principal cheio (teste 2)

Fonte: Autor (2019)

Dos resultados dos testes 1 e 2 (dados que foram gravados no cartão SD e que podem ser verificados nos Apêndices B e D), foi possível extrair a média dos tempos de enchimento e esvaziamento do gasômetro principal e o tempo do ciclo completo.

A Tabela 6 mostra as médias dos tempos de enchimento e esvaziamento do gasômetro principal para o sistema completo (SC) e para o sistema sem o gasômetro principal (SI), bem como a diferença entre eles em minutos (coluna SC-SI) e em segundos (coluna t(s)). As médias dos tempos de enchimento e esvaziamento dos testes 1 e 2 podem ser verificados nos Apêndices C e E.

Tabela 6 - Dados dos testes realizados

Tempos (min)	Sistema Compl. (SC)	Sem Gas. Auxiliar (SI)	SC-SI	t (s)
Enchimento	0:05:17	0:13:21	0:08:04	404
Esvaziamento	0:02:54	0:05:32	0:02:38	158
Ciclo Completo	0:08:11	0:18:53	0:10:42	642

Fonte: Autor (2019)

Para calcular a vazão de enchimento do gasômetro principal, sem a utilização do gasômetro auxiliar, foi utilizado o volume total do gasômetro 4712,39 cm³ dividido pelo tempo de enchimento do sistema sem gasômetro auxiliar (13:21 min = 801 s).

Foram denominados a vazão de enchimento sem gasômetro auxiliar de Q_{si} , o volume total do gasômetro principal de V_t e o tempo de enchimento sem gasômetro auxiliar de t_{si} . Deste modo, temos a equação (1):

$$Q_{si} = V_t / t_{si} = 4712,39 / 801 = 5,88 \text{ cm}^3/\text{s} \quad (1)$$

Para fazer o cálculo do volume não computado, isto é, o biogás que é perdido no sistema sem o gasômetro auxiliar, foi utilizado o produto do tempo em segundos da diferença de esvaziamento do gasômetro principal (158 s) e a vazão de enchimento do sistema sem gasômetro auxiliar (5,88 cm³/s).

Foram denominados o volume não computado de V_{nc} , a vazão de enchimento sem gasômetro auxiliar de Q_{si} e o tempo em segundos da diferença de esvaziamento do gasômetro principal de t_{de} . Deste modo, temos a equação (2):

$$V_{nc} = Q_{si} * t_{de} = 5,88 * 158 = 929,04 \text{ cm}^3 \quad (2)$$

Portanto, 929,04 cm³ ou 0,929 litros de biogás que deixam de ser computados a cada ciclo, equivalem a 20% de perda. Isto é, 1/5 de todo biogás produzido simplesmente deixou de ser computado.

5.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Não existem resultados de testes dos trabalhos anteriores, pois não foram construídos protótipos. Por este motivo, houve a necessidade da realização dos testes 1 e 2 (o teste 1 com a configuração dos trabalhos anteriores e o teste 2 com as modificações propostas por este trabalho). Sendo assim, a discussão é feita comparando somente estes 2 tipos de testes.

Os resultados se mostraram satisfatórios e todo o sistema se comportou conforme esperado.

Quando comparados os resultados dos testes somente com o gasômetro principal (teste 1) e o teste com o gasômetro completo (teste 2), nota-se que no teste 1, com a entrada do biogás conectada diretamente no gasômetro principal, ele leva em média 02:32 min a mais para esvaziar (devido ao biogás continuar entrando no gasômetro enquanto ele é esvaziado – biogás entrando e saindo ao mesmo tempo). Este tempo é quase o dobro do tempo de quando o gasômetro auxiliar está conectado no sistema, isolando o gasômetro principal.

Conforme provado pelos resultados, 929,04 cm³ litros de biogás, ou seja, 20% do total produzido a cada ciclo, deixa de ser contabilizado.

Este problema da contabilização do biogás produzido e utilizado, encontrado nos projetos utilizados como motivação para este trabalho, foi solucionado com a utilização do gasômetro auxiliar, juntamente com a válvula normalmente aberta na entrada do gasômetro principal, pois no momento que este está esvaziando, a válvula é fechada e o isola, atingindo o objetivo de quantificar o biogás produzido corretamente.

A substituição das duas micro chaves pelo sensor ultrassônico também se mostrou bastante satisfatória, visto que o sensor tem uma boa precisão (3mm) e juntamente com o tubo guia instalado no interior da campânula, evita o problema dos repiques apresentados nos trabalhos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012).

Além disso, a implementação de um gravador de cartão SD e do *Real Time Clocker*, proporciona uma maior confiabilidade ao sistema, considerando que na falta de energia elétrica, os valores armazenados anteriormente permanecem gravados no cartão.

Um problema detectado durante os testes realizados é que enquanto o gasômetro principal é esvaziado e as válvulas estão energizadas (durante aproximadamente 3 ou 5 minutos, dependendo da configuração), as válvulas vão aquecendo a cada ciclo. Na condição de biogás simulado com o compressor de ar, como o tempo de enchimento é relativamente curto, não há tempo suficiente para as válvulas esfriarem. O aquecimento da válvula é característico do componente, porém, na condição real de utilização do sistema com biogás, esse tempo de enchimento será maior, permitindo que as válvulas esfriem antes da próxima energização.

Exceto pelo fato citado a respeito das válvulas, todos os outros componentes do sistema de controle se comportaram conforme esperado. Não houve desligamentos ou superaquecimentos.

A operação do gasômetro feita com o biogás simulado pelo ar do compressor de aquário se mostrou bastante satisfatória, visto que todos os componentes atenderam às expectativas. Porém, o projeto ainda deve ser testado com o biogás propriamente dito.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como um dos objetivos específicos, o aperfeiçoamento do sistema gasômetro automatizado e o atendeu propondo algumas alterações no sistema de controle, sendo a substituição do microcontrolador por uma placa Arduino, substituição das micro-chaves por um sensor ultrassônico para a detecção de gasômetro vazio e cheio e a implementação de um gravador de dados, além de melhorias no sistema mecânico, que foram a alteração do ponto de entrada de biogás no gasômetro principal para a parte superior, substituição dos lastros que davam estabilidade à campânula por um tubo guia de cobre e a inclusão de um gasômetro auxiliar, separado do gasômetro principal por uma válvula solenoide normalmente aberta para otimizar a contabilização do biogás gerado.

As melhorias efetuadas nos sistemas mecânico e de controle e os testes realizados sem a utilização do gasômetro auxiliar (teste 1) e com a utilização da válvula de entrada e do gasômetro auxiliar (teste 2), evidenciaram através da apresentação dos parâmetros operacionais e de projeto, que foi possível aumentar a confiabilidade dos dados de quantificação do biogás gerado em sistemas de baixa vazão. De parâmetros de projeto foram apresentados através do detalhamento das partes mecânica e do sistema de controle, e de parâmetros operacionais foram apresentados os resultados dos testes 1 e 2.

Quando avaliado o desempenho do sistema de gasômetro aprimorado comparando os dados gravados nos testes 1 e 2, foi comprovado que 20% do biogás produzido deixava de ser contabilizado nos projetos anteriores, provando que o sistema aprimorado faz a contabilização dos dados do biogás gerado corretamente.

Portanto, o projeto desenvolvido neste trabalho atendeu o objetivo de resolver o problema da contabilização do biogás dos trabalhos de Marcelino e Godoy Junior (2011) e Simões (2012) e torna a obtenção dos dados de quantificação de biogás armazenado mais exata, uma vez que enquanto o biogás é liberado no gasômetro principal para a queima ou utilização, o biogás que continua a ser produzido no biodigestor é armazenado separadamente no gasômetro auxiliar, possibilitando a geração e gravação de dados de qualidade.

Isto mostra que é possível a aplicação deste sistema em bancadas laboratoriais, semi-industriais e residenciais, evitando a necessidade de se fazer tomadas de medidas para cálculos manuais de volumes armazenados e evitando 20% de perda nos sistemas automatizados existentes.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para projetos posteriores, é sugerida a implementação do sistema de interface do ignitor na lógica do Arduino. Também é sugerido fazer a substituição do módulo de cartão SD por um módulo wi-fi ou a adição deste módulo ao sistema de controle para envio dos dados gravados nos testes via internet, a fim de se obter maior praticidade na captura e tratamento dos dados.

REFERÊNCIAS

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2016. São Paulo - SP. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em 11 abr 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **ATLAS ESGOTOS: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. 88 f. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2017.

AIRES, A. M., **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal. 2009.

ALMEIDA, C., **Potencial de produção de biogás a partir de biomassa de suinocultura com culturas energéticas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Cascavel. 2016.

ALVES, José Eustáquio Diniz. **Sustentabilidade, Aquecimento Global e o Decrescimento Demo-econômico**. Revista Espinhaço. UFVJM, p. 4-16, mar. 2014. ISSN 2317-0611.

ANASTÁCIO, M. C. F., **Produção de energia na forma de biogás a partir de resíduos animais para o desenvolvimento rural**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto. Portugal. Faculdade de Engenharia, 2010.

BANZI, M., SHILOH, M. **Getting started with Arduino**. 3rd edition. Sebastopol, California, USA. 2015.

BRIGNOL, W. S., **Otimização do armazenamento e geração de energia a biogás visando ao gerenciamento das redes de distribuição**. 133 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2017.

CANAL BIOENERGIA. **Produção em ritmo acelerado**. A Biogás - Associação Brasileira de Biogás e Biometano. 2017. Disponível em: <<https://www.abiogas.org.br/producao-ritmo-acelerado>>. Acesso em 11 abr 2018.

COSTA, L. F. B., **O gás metano do aterro sanitário de Manaus e as possibilidades de uso social**. 51 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2011.

DIAS, M. I. A. *et al.* **Viabilidade econômica do uso do biogás proveniente da suinocultura, em substituição a fontes externas de energia**. Revista Energia na Agricultura. Botucatu, vol. 28, n.3, p.155-164, julho-setembro, 2013. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/137367/ISSN1808-8759-2013-28-03-155-164.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 27 maio 2019.

GALIC, C. S. *et al.* **Meeting renewable energy and land use objectives through public-private biomass supply partnerships**. Applied Energy. Ed. 172. p. 264-274, mar. 2016. ISSN 0306-2619.

GODOY JUNIOR, E., **Desenvolvimento e avaliação de uma miniestação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de águas, com sistema registrador queimador, para baixas vazões de biogás e cogeração de energia**. 158 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2010.

GODOY JUNIOR, E. *et al.* **Sistema de armazenamento e aproveitamento energético de GNB (gás natural a baixa pressão) de biogás de esgoto**. In: xii SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Figueira da Foz. Resumo das Comunicações do XII SILUBESA. Lisboa, Portugal: ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RECURSOS HÍDRICOS. 2006.

GODOY JUNIOR, E.; JESUS, P. E. **Estado da Arte dos Sistemas de Armazenamento de Biogás a Baixas Pressões - Panorama Nacional e Internacional**. Taubaté - SP. 2015.

GRANDELLE, R. **Temperatura média da Terra cresceu 1,02 grau Celsius desde século XIX**. O Globo. 2016. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/sociedade/sustentabilidade/temperatura-media-da-terra-cresceu-102-grau-celsius-desde-seculo-xix-18002272>>. Acesso em 10 out 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global Energy and CO2 Status Report. The latest trends in energy and emissions in 2018. França. 2019

KARLSSON, T. *et al.*, **Manual básico de biogás**. 69 f. Editora Univates. 2014.

KUNZ, A., *et al.*, **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 209 f. Embrapa Suínos e Aves. 2019.

LIMA, H. Q. **Avaliação dos modelos Hashimoto e AMS-III.D para produção de metano com dejetos de suínos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-graduação em Energia. Santo André. 2011.

MACHADO, C. R., **Biodigestão anaeróbia de dejetos bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. 2011.

MANARELLI, D. M. *et al.*, **Avaliação das reduções de sólidos totais voláteis, produções de biogás e metano de qualidade do biofertilizante produzido a partir da biodigestão anaeróbia da água residuária de abatedouro avícola**. Trabalho apresentado ao ENEPE – Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão. Universidade Federal da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul. 2011.

MARCELINO, M. A.; GODOY JUNIOR, E. **Sistema armazenador e queimador automático com registro de volume de biogás queimado**. (PI 0902381-0 A2). Revista da Propriedade Industrial, ed. 2095. 2011.

MESAETP. **Vapor Bladder Gas Holder Diaphragm**. Disponível em: <<http://www.mesaetp.com/tank-products/vapor-bladders/>>. Acesso em 27 ago 2018.

MILANES, A. Y., *et al.*, **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial. Rio de Janeiro. n. 47. p. 221-275. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Protocolo de Quioto**. 201-?. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>. Acesso em 06 maio 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético**. Brasília - DF. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>>. Acesso em 11 abr 2018.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. ed. Nobel. São Paulo. 1986.

OLIVEIRA, A. P. M. *et al.*, **Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis**. The Journal of Engineering and Exact Science – JCEC, Vol. 04 N.01. 2018. ISSN 2527-1075.

PALMIERE, S. E. **CLP versus Microcontrolador**. Embarcados. 2016. Disponível: <<https://www.embarcados.com.br/clp-versus-microcontrolador/>>. Acesso em 17 abr 2018.

PEREIRA, E. R. *et al.* **Biodigestores: Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária**. 2009. Disponível em: <http://www.iz.sp.gov.br/pdfs/1255981651.pdf>. Acesso em 16 maio 2018.

PINHEIRO, V. C. N., **Contribuição aos estudos regulatórios para inserção de sistemas de geração de energia elétrica compostos por fontes hidráulicas reversíveis, solares e eólicas no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas. 2016.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de Digestão Anaeróbia com Relevância para o Brasil - Substratos, Digestores e Uso de Biogás**. Brasília - DF. 2015.

RIBEIRO, S.K., SANTOS, A.S. **Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9. 2016.

RODRIGUES, J. A. D.; RATUSZNEI, S. M., **Tratamento anaeróbio de águas residuárias**. 2005. Texto de apoio didático – Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul. 2005.

RODRIGUES, J. I. P., **Integração de fontes de energia renovável em sistemas elétricos isolados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica na Especialidade de Energia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra. Portugal. 2019.

SEADI, T. A., *et al.*, **Biogas Handbook**. Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark. 2008.

SILVA, W. R., **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. 159 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2009.

SIMÕES, O. d. **Queima Microcontrolada de Baixas e Inconstantes Vazões de Biogás para Estações de Tratamento de Esgoto**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Taubaté. Taubaté - SP. 2012.

UNITED NATIONS TREATY COLLECTION. 7.c Doha Amendment to the Kyoto Protocol. 2012. Disponível em:
<https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-c&chapter=27&clang=_en>. Acesso em 29 maio 2019.

XAVIER, M. E. R.; KERR, A. S. **A análise do efeito estufa em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 325-349, jan. 2004. ISSN 2175-7941. Disponível em:
<<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6423>>. Acesso em: 06 maio 2019

ZILOTTI, H. A. R., **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 52 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 2012.

APÊNDICE A - Código do programa

```

//Inclusão de todas as bibliotecas abaixo
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Ultrasonic.h>
#include <DS3232RTC.h>
#include <Streaming.h>
#include <Time.h>
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

//Pinos Relés de Contole das Válvulas
#define pino_valv_A 9
#define pino_valv_B 4

//Pinos Sensor Ultrassônico
#define pino_trigger 2
#define pino_echo 3

//Pinos Display LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

Ultrasonic ultrasonic(pino_trigger, pino_echo);

float cmMsec = 0.0; //Distância em Centímetros
float inMsec = 0.0; //Distância em Polegadas
long microsec = 0.0;
float volume = 0.0;
int contador_valv = 0;

/*****/
//Configuração dos valores para o sensor ultrassônico
float dist_max = 18.0; //em cm
float dist_min = 3.0; //em cm
float raio = 10.0; //em cm
float volume_garrafa = 4712.39; //cm3
/*****/

boolean vazio = true;

//Pino CS do modulo cartao SD
int CS_PIN = 10;

File file;
String folder ;

time_t t;

void setup()
{

```

```

//Inicia o display LCD
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16, 2);
lcd.print(" Rafa's Project ");
pinMode(pino_valv_A, OUTPUT);
pinMode(pino_valv_B, OUTPUT);
pinMode(CS_PIN, OUTPUT);
delay(3000);

//Sincroniza a biblioteca Time com o RTC a cada 5 minutos e inicia SD Card
setSyncProvider(RTC.get);
t = now();
inicia_SD(t);
delay(3000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Vol: ");

//Faz a gravação dos dados no SD card ao iniciar o sistema
vazio = true;
t = now();
volume = contador_valv * volume_garrafa;
float c = RTC.temperature() / 4.;
float f = c * 9. / 5. + 32.;
grava_SD(t, 0, volume);
}
void loop()
{
  microsec = ultrasonic.timing();
  cmMsec = ultrasonic.convert(microsec, Ultrasonic::CM);
  delay(100);

  //Se o sensor ultrassônico indicar distância menor que dist_min, comanda relés para abrir válvula de
  entrada e fechar a de saída
  if (cmMsec < dist_min)
  {
    volume = contador_valv * volume_garrafa;
    lcd.setCursor(4, 0);
    lcd.print(volume);
    lcd.setCursor(13, 0);
    lcd.print("cm3");
    digitalWrite(pino_valv_A, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(pino_valv_B, HIGH);
    vazio = true;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Valve IN: Open");
  }

  //Se o sensor ultrassônico indicar distância maior que dist_max, comanda relés para fechar válvula
  de entrada e abrir a de saída
  if (cmMsec > dist_max)

```

```

{
  t = now();
  volume = contador_valv * volume_garrafa;
  float c = RTC.temperature() / 4.;
  float f = c * 9. / 5. + 32.;
  grava_SD(t, 1, volume);
  contador_valv++;
  vazio = false;
  while (!vazio)
  {
    microsec = ultrasonic.timing();
    cmMsec = ultrasonic.convert(microsec, Ultrasonic::CM);
    delay(100);
    digitalWrite(pino_valv_A, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(pino_valv_B, LOW);

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Valve IN: Closed");

    if (cmMsec < dist_min)
    {
      vazio = true;
      t = now();
      volume = contador_valv * volume_garrafa;
      float c = RTC.temperature() / 4.;
      float f = c * 9. / 5. + 32.;
      grava_SD(t, 0, volume);
    }
  }
}
}
}
}

```

```

//Grava dados no cartao SD
void grava_SD(time_t t, int val, float vol)
{
  float c = RTC.temperature() / 4.;
  int flag = abre_arquivo_gravacao(folder + "/data.txt");
  file.print("Data: ");
  file.print(day(t));
  file.print("/");
  if (month(t) < 10)
  {
    file.print("0");
  }
  file.print(month(t));
  file.print("/");
  file.print(year(t));
  file.print(" Hora: ");
  if (hour(t) < 10)
  {
    file.print("0");
  }
}

```

```

}
file.print(hour(t));
file.print(":");
if (minute(t) < 10)
{
  file.print("0");
}
file.print(minute(t));
file.print(":");
if (second(t) < 10)
{
  file.print("0");
}
file.print(second(t));
file.print(" --- Temperatura: ");
file.print(c);
file.print(" °C");
if (val == 1)
{
  file.println(" --- Gasômetro Cheio");
}
else
{
  file.print(" --- Gasômetro Vazio");
  file.print(" --- Volume Queimado: ");
  file.print(volume);
  file.println(" cm3");
}
fecha_arquivo();
}

```

//Teste inicial para verificar que o SD card foi inserido e está funcionando corretamente
void inicia_SD(time_t tempo)

```

{
  if (!SD.begin(CS_PIN))
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SD card FAILED ");
  }
  else
  {
    folder = String(hour(tempo))+ "_" +String(minute(tempo))+ "_" +String(second(tempo));
    SD.mkdir(folder);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SD INITIALIZED");
    return;
  }
}
}

```

//Cria arquivo .txt dentro do SD card

```
int abre_arquivo_gravacao(String filename)
{
    file = SD.open(filename, FILE_WRITE);

    if (file)
    {
        return 1;
    } else
    {
        return 0;
    }
}

void fecha_arquivo()
{
    if (file)
    {
        file.close();
    }
}
```

APÊNDICE B – Dados Gravados no cartão SD para o teste 1

Data: 2/08/2018 Hora: 23:16:33 - Temp: 22.00 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 0.00 cm³
 Data: 2/08/2018 Hora: 23:21:50 - Temp: 21.75 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 2/08/2018 Hora: 23:34:23 - Temp: 21.75 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 4712.39 cm³
 Data: 2/08/2018 Hora: 23:39:34 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 2/08/2018 Hora: 23:52:07 - Temp: 21.75 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 9424.78 cm³
 Data: 2/08/2018 Hora: 23:57:33 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 00:10:48 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 14137.17 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 00:16:23 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 00:29:10 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 18849.56 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 00:34:42 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 00:47:27 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 23561.95 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 00:53:01 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 01:05:35 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 28274.34 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 01:11:11 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 01:23:44 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 32986.73 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 01:29:19 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 01:41:55 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 37699.12 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 01:47:35 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:00:07 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 42411.51 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:05:47 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:18:17 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 47123.90 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:23:56 - Temp: 20.75 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:36:32 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 51836.29 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:42:08 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 02:55:02 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 56548.68 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:00:42 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:13:47 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 61261.07 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:19:20 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:32:52 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 65973.46 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:38:26 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:52:15 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 70685.85 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 03:57:45 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 04:11:43 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 75398.25 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 04:17:11 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 04:31:24 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 80110.64 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 04:36:54 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 04:51:41 - Temp: 21.50 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 84823.03 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 04:57:15 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 05:11:42 - Temp: 21.25 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 89535.42 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 05:17:07 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 05:31:29 - Temp: 21.00 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 94247.81 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 05:36:56 - Temp: 20.75 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 05:51:15 - Temp: 20.75 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 98960.20 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 05:56:41 - Temp: 20.75 °C - Gasômetro Vazio
 Data: 3/08/2018 Hora: 06:11:42 - Temp: 20.75 °C - Gasômetro Cheio - Volume Queimado: 103672.59 cm³
 Data: 3/08/2018 Hora: 06:17:24 - Temp: 20.75 °C - Gasômetro Vazio

APÊNDICE C – Dados extraídos do cartão SD para cálculo das médias do teste
1

Tempos Teste 1			
Esvaziar		Encher	
Semiciclo	Tempo	Semiciclo	Tempo
1	00:05:17	2	00:12:33
3	00:05:11	4	00:12:33
5	00:05:26	6	00:13:15
7	00:05:35	8	00:12:47
9	00:05:32	10	00:12:45
11	00:05:34	12	00:12:34
13	00:05:36	14	00:12:33
15	00:05:35	16	00:12:36
17	00:05:40	18	00:12:32
19	00:05:40	20	00:12:30
21	00:05:39	22	00:12:36
23	00:05:36	24	00:12:54
25	00:05:40	26	00:13:05
27	00:05:33	28	00:13:32
29	00:05:34	30	00:13:49
31	00:05:30	32	00:13:58
33	00:05:28	34	00:14:13
35	00:05:30	36	00:14:47
37	00:05:34	38	00:14:27
39	00:05:25	40	00:14:22
41	00:05:27	42	00:14:19
43	00:05:26	44	00:15:01
45	00:05:42	46	
Média	00:05:32	Média	00:13:21

APÊNDICE D – Dados Gravados no cartão SD para o teste 2

Data: 8/06/2018 Hora: 20:48:18 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 0.00 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 20:51:05 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 20:54:48 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 4712.39 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 20:57:41 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:02:11 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 9424.78 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:05:00 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:10:06 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 14137.17 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:12:56 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:18:38 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 18849.56 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:21:28 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:27:27 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 23561.95 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:30:20 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:37:04 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 28274.34 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:39:53 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:45:54 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 32986.73 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:48:42 - Temp: 22.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:54:52 - Temp: 22.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 37699.12 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 21:57:41 - Temp: 22.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:05:35 - Temp: 21.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 42411.51 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:08:23 - Temp: 21.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:14:36 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 47123.90 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:17:25 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:23:36 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 51836.29 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:26:26 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:32:38 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 56548.68 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:35:27 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:41:28 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 61261.07 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:44:18 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:50:01 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 65973.46 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:52:51 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 22:58:29 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 70685.85 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:01:21 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:06:45 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 75398.25 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:09:37 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:14:59 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 80110.64 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:17:51 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:23:08 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 84823.03 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:26:00 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:31:21 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 89535.42 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:34:14 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:39:35 - Temp: 21.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 94247.81 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:42:33 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:47:48 - Temp: 21.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 98960.20 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:50:46 - Temp: 21.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:56:10 - Temp: 21.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 103672.59 cm3
 Data: 8/06/2018 Hora: 23:59:02 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:04:31 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 108384.98 cm3
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:07:29 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:12:52 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 113097.36 cm3
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:15:44 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:19:10 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 117809.75 cm3
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:22:03 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:26:59 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 122522.14 cm3
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:29:51 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:35:09 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 127234.53 cm3
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:38:01 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
 Data: 9/06/2018 Hora: 00:43:06 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 131946.92 cm3

Data: 9/06/2018 Hora: 00:45:58 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 00:50:49 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 136659.31 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 00:53:48 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 00:58:56 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 141371.70 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:01:50 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:06:55 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 146084.09 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:09:55 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:16:46 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 150796.48 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:19:45 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:24:49 - Temp: 21.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 155508.87 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:27:48 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:32:55 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 160221.26 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:35:48 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:40:54 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 164933.65 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:43:54 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:49:01 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 169646.04 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 01:51:54 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 01:57:17 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 174358.43 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:00:17 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:05:13 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 179070.82 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:08:13 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:13:27 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 183783.21 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:16:30 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:21:37 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 188495.60 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:24:30 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:29:37 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 193208.00 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:32:37 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:37:47 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 197920.39 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:40:46 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:46:00 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 202632.78 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:49:00 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 02:54:09 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 207345.17 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 02:57:01 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:02:12 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 212057.56 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:05:05 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:10:13 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 216769.95 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:13:05 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:18:12 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 221482.34 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:21:04 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:26:14 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 226194.71 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:29:07 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:34:10 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 230907.10 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:37:06 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:42:15 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 235619.50 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:45:07 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:50:12 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 240331.89 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 03:53:13 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 03:58:19 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 245044.28 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:01:19 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:06:26 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 249756.67 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:09:26 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:14:32 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 254469.06 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:17:32 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:22:40 - Temp: 21.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 259181.45 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:25:40 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:30:48 - Temp: 21.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 263893.84 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:33:47 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:38:57 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 268606.25 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:41:57 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:47:05 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 273318.62 cm3

Data: 9/06/2018 Hora: 04:49:57 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 04:55:06 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 278031.03 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 04:57:58 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:03:09 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 282743.40 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:06:01 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:11:10 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 287455.81 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:14:02 - Temp: 21.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:19:12 - Temp: 21.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 292168.18 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:22:03 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:27:14 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 296880.59 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:30:05 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:35:16 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 301592.96 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:38:08 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:43:21 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 306305.34 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:46:20 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:51:32 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 311017.75 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 05:54:24 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 05:59:34 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 315730.12 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:02:33 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:07:46 - Temp: 20.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 320442.53 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:10:38 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:15:53 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 325154.90 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:18:44 - Temp: 20.50 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:23:57 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 329867.31 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:26:48 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:32:01 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 334579.68 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:34:59 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:40:09 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 339292.09 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:43:07 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:48:21 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 344004.46 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:51:13 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 06:56:24 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 348716.87 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 06:59:22 - Temp: 21.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:04:35 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 353429.25 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:07:33 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:12:50 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 358141.65 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:15:48 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:21:02 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 362854.03 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:23:52 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:29:09 - Temp: 21.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 367566.43 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:32:00 - Temp: 20.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:37:17 - Temp: 20.50 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 372278.81 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:40:07 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:45:33 - Temp: 20.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 376991.21 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:48:23 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 07:53:47 - Temp: 20.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 381703.59 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 07:56:37 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:01:59 - Temp: 20.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 386416.00 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 08:04:49 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:10:08 - Temp: 20.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 391128.37 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 08:12:58 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:18:09 - Temp: 20.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 395840.78 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 08:20:59 - Temp: 19.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:26:05 - Temp: 19.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 400553.15 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 08:28:56 - Temp: 19.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:33:58 - Temp: 19.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 405265.56 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 08:36:49 - Temp: 19.75 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:41:46 - Temp: 20.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 409977.93 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 08:44:39 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:49:28 - Temp: 20.00 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 414690.34 cm3

Data: 9/06/2018 Hora: 08:52:21 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 08:57:11 - Temp: 20.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 419402.71 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 09:00:12 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 09:05:01 - Temp: 20.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 424115.12 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 09:07:55 - Temp: 20.00 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 09:12:45 - Temp: 20.25 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 428827.50 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 09:15:38 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia
Data: 9/06/2018 Hora: 09:19:14 - Temp: 20.75 °C - Válvula FECHADA - Garrafa Vazia - Volume: 433539.90 cm3
Data: 9/06/2018 Hora: 09:22:08 - Temp: 20.25 °C - Válvula ABERTA - Garrafa Cheia

**APÊNDICE E – Dados extraídos do cartão SD para cálculo das médias do teste
2**

Tempos Teste 2			
Esvaziar		Encher	
Semiciclo	Tempo	Semiciclo	Tempo
1	00:02:53	2	00:04:30
3	00:02:49	4	00:05:06
5	00:02:50	6	00:05:42
7	00:02:50	8	00:05:59
9	00:02:53	10	00:06:44
11	00:02:49	12	00:06:01
13	00:02:48	14	00:06:10
15	00:02:49	16	00:07:54
17	00:02:48	18	00:06:13
19	00:02:49	20	00:06:11
21	00:02:50	22	00:06:12
23	00:02:49	24	00:06:01
25	00:02:50	26	00:05:43
27	00:02:50	28	00:05:38
29	00:02:52	30	00:05:24
31	00:02:52	32	00:05:22
33	00:02:52	34	00:05:17
35	00:02:52	36	00:05:21
37	00:02:53	38	00:05:21
39	00:02:58	40	00:05:15
41	00:02:58	42	00:05:24
43	00:02:52	44	00:05:29
45	00:02:58	46	00:05:23
47	00:02:52	48	00:03:26
49	00:02:53	50	00:04:56
51	00:02:52	52	00:05:18
53	00:02:52	54	00:05:05
55	00:02:52	56	00:04:51
57	00:02:59	58	00:05:08
59	00:02:54	60	00:05:05
61	00:03:00	62	00:06:51
63	00:02:59	64	00:05:04
65	00:02:59	66	00:05:07
67	00:02:53	68	00:05:06
69	00:03:00	70	00:05:07
71	00:02:53	72	00:05:23
73	00:03:00	74	00:04:56
75	00:03:00	76	00:05:14
77	00:03:03	78	00:05:07
79	00:02:53	80	00:05:07
81	00:03:00	82	00:05:10
83	00:02:59	84	00:05:14
85	00:03:00	86	00:05:09
87	00:02:52	88	00:05:11
89	00:02:53	90	00:05:08

91	00:02:52	92	00:05:07
93	00:02:52	94	00:05:10
95	00:02:53	96	00:05:03
97	00:02:56	98	00:05:09
99	00:02:52	100	00:05:05
101	00:03:01	102	00:05:06
103	00:03:00	104	00:05:07
105	00:03:00	106	00:05:06
107	00:03:00	108	00:05:08
109	00:03:00	110	00:05:08
111	00:02:59	112	00:05:10
113	00:03:00	114	00:05:08
115	00:02:52	116	00:05:09
117	00:02:52	118	00:05:11
119	00:02:52	120	00:05:09
121	00:02:52	122	00:05:10
123	00:02:51	124	00:05:11
125	00:02:51	126	00:05:11
127	00:02:52	128	00:05:13
129	00:02:59	130	00:05:12
131	00:02:52	132	00:05:10
133	00:02:59	134	00:05:13
135	00:02:52	136	00:05:15
137	00:02:51	138	00:05:13
139	00:02:51	140	00:05:13
141	00:02:58	142	00:05:10
143	00:02:58	144	00:05:14
145	00:02:52	146	00:05:11
147	00:02:58	148	00:05:13
149	00:02:58	150	00:05:17
151	00:02:58	152	00:05:14
153	00:02:50	154	00:05:17
155	00:02:51	156	00:05:17
157	00:02:50	158	00:05:26
159	00:02:50	160	00:05:24
161	00:02:50	162	00:05:22
163	00:02:50	164	00:05:19
165	00:02:50	166	00:05:11
167	00:02:50	168	00:05:06
169	00:02:51	170	00:05:02
171	00:02:51	172	00:04:57
173	00:02:53	174	00:04:49
175	00:02:53	176	00:04:50
177	00:03:01	178	00:04:49
179	00:02:54	180	00:04:50
181	00:02:53	182	00:03:36
183	00:02:54		
Média	00:02:54	Média	00:05:17