



Desenvolvimento de Biodigestores Anaeróbios em escala de bancada com sistema de automação e controle para produção de biogás

David Rodrigues da Silva Maia

PROJETO DE FINAL DE CURSO

Orientador:
Prof. Claudinei de Souza Guimarães, *D. Sc.*

Junho de 2014

DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS EM ESCALA DE BANCADA COM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

David Rodrigues da Silva Maia

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Prof^a. Melissa Limoeiro Estrada Gutarra, D.Sc.

Carlos Eduardo Cunha Felipe, Eng.

João Luiz Rodrigues do Nascimento, M. Sc.

Orientado por:

Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

Junho de 2014

Maia, David Rodrigues da Silva.

Desenvolvimento de biodigestores anaeróbicos em escala de bancada com sistema de automação e controle para produção de biogás. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

xi, 71 p.;il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientador: Claudinei de Souza Guimarães

1. Fontes de energia renovável. 2. Digestão Anaeróbia. 3. Resíduos Alimentares. 4.

Projeto final (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Claudinei de Souza Guimarães. I.

Desenvolvimento de biodigestores anaeróbicos em escala de bancada com sistema de automação e controle para produção de biogás.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, professor Claudinei de Souza Guimarães, pela dedicação, instrução e paciência durante o projeto.

Agradeço a Prof^a. Magali Christe Cammarota por ceder o espaço e o uso de alguns equipamentos do Laboratório de Tecnologia Ambiental.

Agradeço a Prof^a. Maria Antonieta P. Gimenes Couto pela dedicação e orientação acadêmica.

Agradeço aos meus familiares, amigos e minha namorada pela paciência, compreensão e estímulo durante a realização do projeto.

Resumo do Projeto Final de curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS EM ESCALA DE BANCADA COM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

David Rodrigues da Silva Maia

Junho, 2014

Orientador: Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

A dependência energética é, cada vez mais, um problema para as sociedades desenvolvidas e em desenvolvimento. Sobretudo no que diz respeito aos combustíveis fósseis, devido as limitações quantitativas das suas fontes produtoras e pela dimensão política estratégica que assumem. Por isso, a recuperação de energia (biogás) de resíduos orgânicos pelo processo de digestão anaeróbia utilizando biodigestores vem se tornando uma alternativa cada vez mais atraente, como fonte de energia renovável. A digestão anaeróbia trata-se de um processo através do qual a matéria orgânica é biologicamente degradada por uma variedade de microorganismos na ausência de oxigênio. Os produtos finais são um resíduo sólido rico em nitrogênio, que pode ser usado como condicionador de solo ou fertilizante, e o biogás, de concentração de 60 a 70% de metano, que pode ser usado como combustível devido ao seu alto poder calorífico. O presente trabalho tem como objetivos a construção de 4 biodigestores anaeróbicos do tipo batelada em escala de bancada, dotados de sistemas de aquecimento, agitação, alimentação e retirada de material e coleta do biogás gerado; além do desenvolvimento e implementação de um sistema embarcado de controle e automação e um *software* supervisor. Os biodigestores foram construídos utilizando materiais de baixo custo, porém com tecnologias atuais, e métodos simples de utilização do sistema visando à

reprodutibilidade em larga escala futuramente. No sistema embarcado de controle e automação foi desenvolvido um controlador lógico programável, especificamente projetado para aplicações de controle de variáveis através de módulos de entradas e saídas digitais e analógicas, para o controle de temperatura, de agitação e da bomba d'água, através de sensores devidamente calibrados, durante todo o processo de digestão anaeróbica. A eficiência dos biodigestores foi verificada através do biogás gerado em um experimento "teste" utilizando resíduos alimentares coletados no restaurante universitário do centro de tecnologia da UFRJ. O biogás gerado foi coletado em bolsas de *Tedlar* e analisado por cromatografia gasosa, utilizando-se um cromatógrafo da marca VARIAN MICRO CG 4900. Os biodigestores e o sistema de controle e automação foram avaliados e se mostraram eficientes e com potencial na produção de biogás.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
I.1 INTRODUÇÃO	1
I.2 OBJETIVOS	4
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
II.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA	5
II.1.1 Energia Solar	7
II.1.1.1 Energia Solar Fotovoltaica	8
II.1.1.2 Energia Termossolar	9
II.1.1.3 Energia Solar Termoelétrica.	11
II.1.2 Energia eólica	11
II.1.3 Energia Hidráulica	12
II.1.4 Biomassa	14
II.1.4.1 Combustão direta	15
II.1.4.2 Processos termoquímicos	15
II.1.4.2.1 Pirólise	15
II.1.4.2.2 Gaseificação	16
II.1.4.3 Processos Biológicos	16
II.1.4.3.1 Fermentação	16
II.1.4.3.2 Digestão anaeróbia	16
II.2 PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	17
II.2.1 Fases da digestão anaeróbia	18
II.2.1.1 Hidrólise	19
II.2.1.2 Acidogênese	19
II.2.1.3 Acetogênese	20
II.2.1.4 Metanogênese	20
II.2.2 Condições do meio	21
II.2.2.1 Temperatura	21
II.2.2.2 pH	22
II.2.2.3 Disponibilidade de nutrientes	22
II.2.2.3 Substancias inibidoras	23

II.3 BIOGÁS	24
II.4 BIODIGESTORES	27
II.4.1 Tipos de biodigestores	27
II.4.1.1 Biodigestores contínuos	27
II.4.1.2 Biodigestores descontínuos ou em batelada	27
II.4.2 Estrutura dos biodigestores em batelada e parâmetros operacionais	28
II.4.2.1 Biorreatores	28
II.4.2.2 Sistemas de aquecimento	29
II.4.2.3 Sistemas de agitação	31
II.4.2.3.1 Agitação por meios mecânicos	31
II.4.2.3.2 Agitação hidráulica	34
II.4.2.3.3 Agitação pneumática	34
II.4.2.4 Sistemas de controle e automação	34
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	38
III.1 DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA	38
III.2 SISTEMA EMBARCADO DE CONTROLE	43
III.3 SOFTWARE SUPERVISÓRIO	48
III.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	54
III.4.1 Descrição do resíduo orgânico	54
III.4.2 Lodo anaeróbio	54
III.4.2 Preparo das amostras e do biodigestor	55
III.5 ANÁLISE DO BIOGÁS PRODUZIDO	59
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
IV.1 DESEMPENHO GLOBAL DO BIODIGESTOR	60
IV.2 AVALIAÇÃO DO SOFTWARE SUPERVISÓRIO	62
IV.3 PRODUÇÃO DO BIOGÁS NOS BIODIGESTORES	62
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	64
V.1 CONCLUSÕES	64

V.2 SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade instalada de coletores termossolares em 2009 (MWt) (WEISS E MAUTHNER, 2011).	10
Tabela 2: Capacidade instalada em hidrelétricas no ano de 2010 (REN21, 2011).	13
Tabela 3: Composição típica do biogás (adaptado de Coelho et al., 2006).	24
Tabela 4: Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia (SGANZERLA, 1983).	25
Tabela 5: Funções do microcontrolador PIC16f877a (MICROCHIP TECHNOLOGY INC, 2003).	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico da Composição percentual do consumo global de energia (STATISTICAL REVIEW, 2013)	6
Figura 2: Mapa da média anual de radiação solar (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006).	7
Figura 3: Painel Solar Fotovoltaico (MILLER, 2006).	8
Figura 4: Taxa média anual de utilização da energia fotovoltaica no mundo (EPIA, 2012)	9
Figura 5: Evolução da capacidade eólica mundial em GW (GWEC, 2012)	12
Figura 6: Composição de uma usina hidrelétrica (ANEEL, 2008)	13
Figura 7: Etapas de conversão da digestão anaeróbia (os números referem-se as porcentagens, expressas como DQO) (CAMPOS, 1999)	18
Figura 8: Construção de um biodigestor de concreto (LIEBETRAU, 2010)	28
Figura 9: Sistema de aquecimento de uma unidade de biogás (RUTZ, 2008)	30
Figura 10: Sistema de aquecimento, instaladas no interior do digestor (AL SEADI, 2008).	30
Figura 11: Agitador de motor submersível (Al SEADI, 2008)	32
Figura 12: Agitador de eixo longo (Al SEADI, 2008).	33
Figura 13: agitadores axiais (<i>ENTEC - Environmental Technology Umwelttechnik GmbH</i>)	33
Figura 14: Recipiente de vidro utilizado como biorreator	39

Figura 15: Tampa do biorreator	39
Figura 16: Sensor de temperatura LM35DZ	41
Figura 17: Resistência elétrica utilizada no sistema de aquecimento	42
Figura 18: Hastes de agitação	43
Figura 19: Sistema embarcado (hardware e firmware) montado	45
Figura 20: Circuito Integrado Programável - PIC16f877a (MICROCHIP TECHNOLOGY INC, 2003)	45
Figura 21: Esquema de ligação básico para comunicação	47
Figura 22: Caixa utilizada para organizar o sistema de controle	48
Figura 23: Tela de abertura do <i>software</i> supervisor	49
Figura 24: Tela inicial do <i>software</i> supervisor	50
Figura 25: Tela de controle do <i>software</i>	51
Figura 26: Tela de gráfico do <i>software</i>	52
Figura 27: Tela da tabela do <i>software</i>	53
Figura 28: Tela de visualização do <i>software</i>	53
Figura 29: Resíduo alimentar triturado	55
Figura 30: Biodigestor de controle (direita) e biodigestor inoculado (esquerda) e seus respectivos sistemas de controle	57
Figura 31: Quatro biodigestores em escala de bancada do tipo batelada com sistema de controle e automação	58
Figura 32: Cromatograma dos compostos identificados nas bolsas de Tedlar	63

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

I.1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energias renováveis aumenta a cada ano. Segundo a Agência Internacional de Energia (2013) a expectativa de crescimento dessa fonte de energia nos próximos cinco anos será de até 40% e sua produção deverá alcançar 25% da produção energética mundial. Questões como a preocupação com a segurança energética e o combate às mudanças climáticas decorrentes da elevação dos gases de efeito estufa na atmosfera impulsionam ainda mais esse crescimento.

Quando se analisam as tecnologias de fontes energéticas alternativas renováveis, observa-se que a fonte com maior potencial de crescimento e uma das principais alternativas para diversificação da matriz energética nos próximos anos é a biomassa. Isto é devido ao fato de que somente a biomassa possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes (CORTEZ, 2008).

A quantidade de biomassa existente na terra é da ordem de dois trilhões de toneladas; o que significa cerca de 400 toneladas per capita. Em termos energéticos, isso corresponde a mais ou menos 3.000 EJ por ano, ou seja, oito vezes o consumo mundial de energia primária (da ordem de 400 EJ por ano) (RAMAGE; SCURLOCK, 1996).

A digestão anaeróbia dessa biomassa, em biodigestores, apresenta uma excelente alternativa, pois além de gerar biogás, utilizado como fonte de energia e biofertilizante, também desempenha um importante papel no gerenciamento de resíduos sólidos.

Segundo Barcelos (2009), são produzidos cerca de 100.000 t/dia de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Desse quantitativo, cerca de 55%, em peso, é de matéria orgânica, passível de fermentação, mas apenas 10% recebem tratamento e/ou disposição final adequada, ou seja, cerca de 50.000 t/dia de matéria orgânica são dispostas irregularmente.

Do ponto de vista econômico a utilização de biodigestores anaeróbios é valorizada por acabar com os altos custos envolvidos no gerenciamento de resíduos como transporte, destinação correta, aterros e sua manutenção, saúde pública, etc.

O biogás gerado no processo de digestão anaeróbia apresenta um alto poder calorífico, aproximadamente, 5.500 kcal/m^3 devido ao considerável percentual de gás metano em sua composição. As aplicações mais comuns do biogás são para aquecimento e geração de energia elétrica. Além disso, após um processo de purificação, o biogás também pode ser injetado na rede de gás natural ou até mesmo ser utilizado como gás veicular.

O processo de digestão anaeróbia ocorre em uma câmara de fermentação fechada, Chamada de biodigestor. É neste local que a biomassa sofre a digestão por microorganismos anaeróbicos. Devido a vários fatores que influenciam o

desempenho da digestão anaeróbia, tais como temperatura, pH, nutrientes, homogeneidade do meio, é recomendado que os biodigestores possuam um sistema de controle e automação propiciando ao sistema operar em suas condições ótimas.

Os sistemas de controle e automação de um biodigestor deverão proporcionar uma capacidade de degradação elevada e constante ao processo biológico, além de oferecerem segurança operacional e funcionalidade ao sistema.

I.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver e analisar uma estratégia mais eficiente para a conversão de resíduos orgânicos em energia, em particular o biogás, a partir de biodigestores anaeróbios, construídos em escala de bancada, com sistema embarcado de controle e automação, de forma a implementar um sistema que seja economicamente viável e de alta eficiência.

Para alcançar o objetivo principal do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- Construção de 4 biodigestores anaeróbios do tipo batelada em escala de bancada;
- Desenvolvimento e implementação de sistemas de: aquecimento, agitação, alimentação e retirada de material e coleta do biogás gerado;
- Desenvolvimento e implementação de um sistema embarcado de controle e automação específico para os biodigestores;
- Desenvolvimento de um *software* supervisor.
- Realização de um experimento teste;
- Caracterização do biogás produzido.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

As fontes de energia podem ser divididas em dois tipos:

- Fontes de energia renováveis: são fontes de energia, que ocorrem na natureza, consideradas inesgotáveis, pois são produzidas continuamente ou que podem ser repostas a curto ou médio prazo espontaneamente ou por intervenção humana. Nesse caso tem-se as energias vindas diretamente do sol, do vento, da biomassa e do movimento das águas.

- Fontes de energia não renováveis: são aquelas disponíveis na natureza e que se formaram durante um longo intervalo de tempo, milhares de anos, e que não podem ser repostas com a velocidade exigida pelo consumo. Enquadram nesse tipo o petróleo, gás natural, carvão mineral, nuclear, etc.

O suprimento energético mundial é feito, majoritariamente, por fontes de energia não renovável 87% (IEA, 2011a), como podemos observar na Figura 1, em particular, os combustíveis fósseis, carvão mineral e gás natural. Contudo, esse predomínio fez surgir duas preocupações atuais da comunidade internacional, a segurança energética e as mudanças climáticas tornando essencial a substituição energética de fontes não renováveis por fontes renováveis.

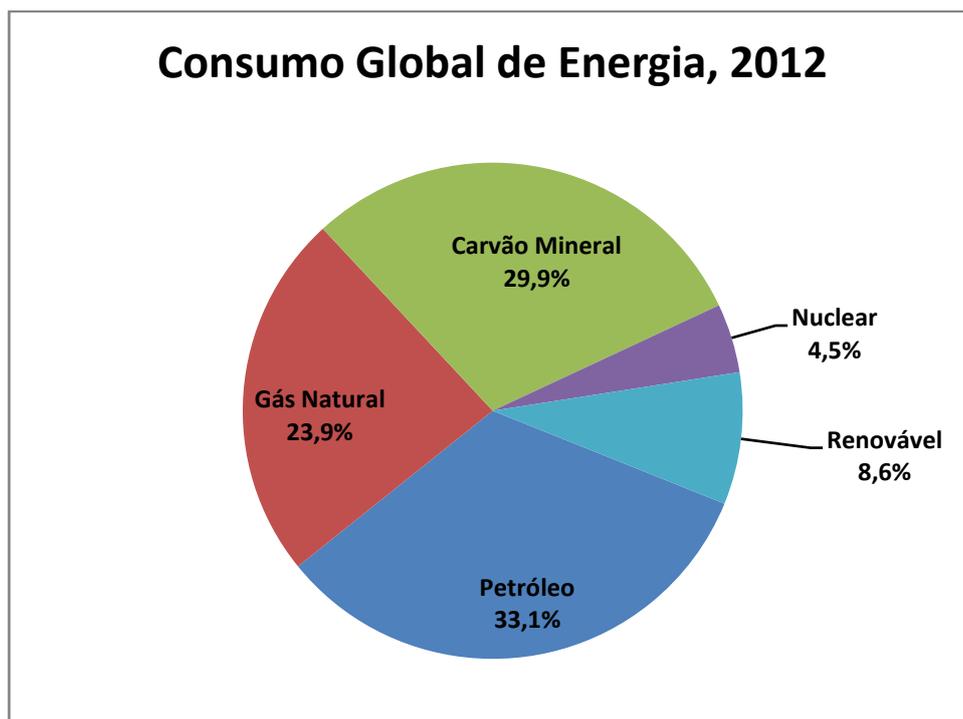


Figura 1: Gráfico da Composição percentual do consumo global de energia (STATISTICAL REVIEW, 2013).

No que se refere à segurança energética, observa-se que as principais potências econômicas são dependentes da importação de insumos energéticos, tendo em vista que as maiores reservas de fontes fósseis estão distantes dos maiores centros consumidores. Logo, a implantação de produções locais de energia renovável diminuiria essa dependência externa que torna a economia refém a choques de preço e de oferta.

No contexto do combate às mudanças climáticas decorrentes da emissão de gases do efeito estufa, a implementação de fontes de energia renovável diminuiria o lançamento de gases como dióxido de carbono e metano relativo ao uso de combustíveis fósseis.

II.1.1 Energia Solar

As fontes de energia hidráulica, eólica, dos oceanos, biomassa e combustíveis fósseis são formas indiretas de energia solar. Contudo a radiação vinda do sol também é aproveitada diretamente para a produção de energia. A radiação solar atinge a terra com um fluxo energético de densidade máxima de 1.0 KW/m². (TWIDELL, 2006). Esse fluxo pode ser utilizado para produzir energia de duas maneiras: convertida diretamente em eletricidade – solar fotovoltaica e convertida em energia térmica - através das tecnologias termosolar ou solar termoelétrica.

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o Brasil tem um grande potencial para o aproveitamento desta energia durante todo o ano por possuir médias anuais de irradiação solar relativamente altas e uniformes em todo o país, conforme é mostrada na Figura 2.

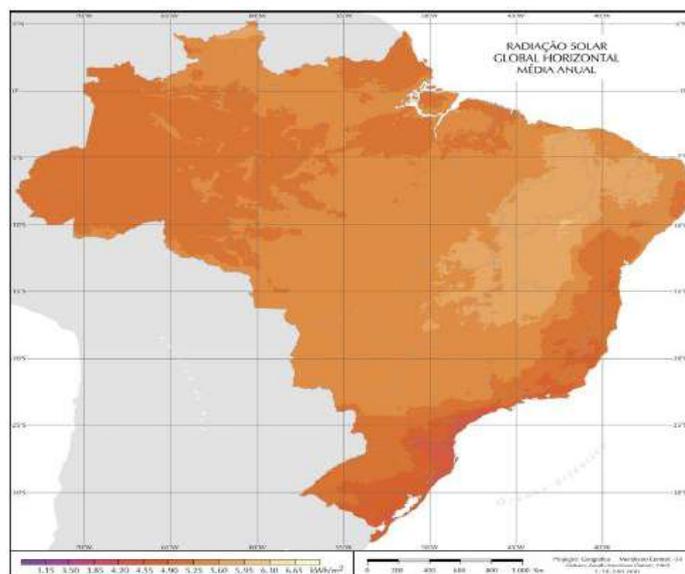


Figura 2: Mapa da média anual de radiação solar (Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006).

II.1.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

A tecnologia fotovoltaica é composta por um sistema onde o componente básico é a célula fotovoltaica. Essa célula é constituída de um material semicondutor, geralmente o silício, que converte a energia solar em eletricidade de corrente contínua. Essas células, em geral, são ligadas em série formando um painel fotovoltaico, mostrada na Figura 3, cuja a capacidade típica está entre 50 e 200 Watts.

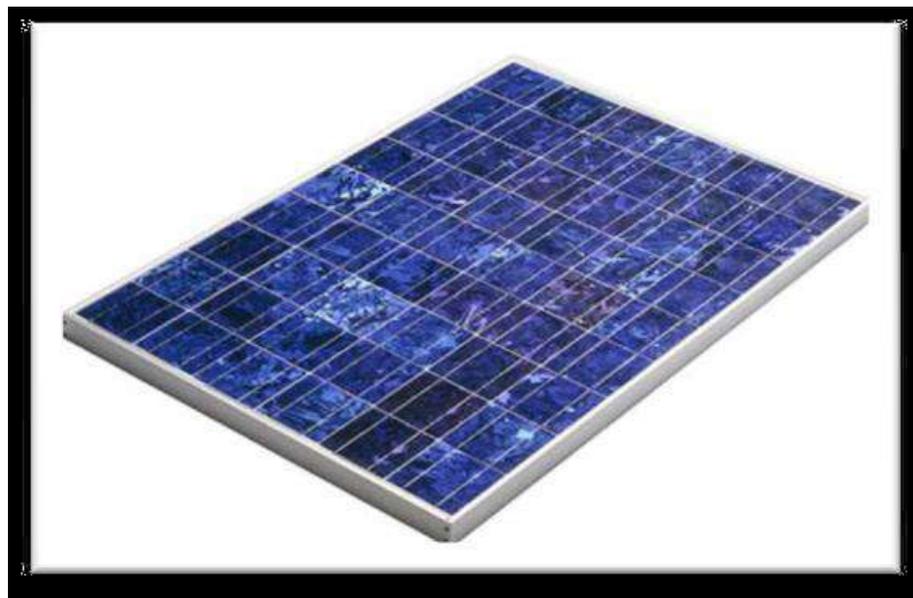


Figura 3: Painel Solar Fotovoltaico (MILLER, 2006).

A energia fotovoltaica foi a fonte que apresentou maior crescimento no mundo apresentando uma taxa média de cerca de 39% ao ano, entre os anos de 2000 a 2010, uma evolução praticamente exponencial, conforme observado na Figura 4.

A capacidade instalada atingiu cerca de 40 gigawatts (GW) no final de 2010, contra 1,5 GW em 2000. Entre os anos de 2005 e 2010, o crescimento foi ainda mais expressivo, alcançando uma taxa média de 49% (IEA, 2011 e EPIA, 2012).

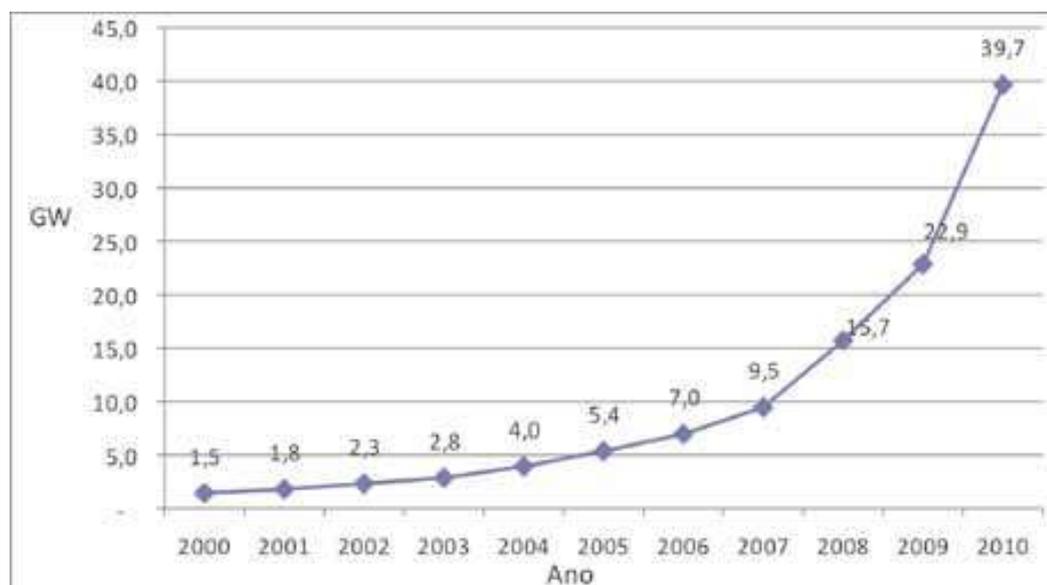


Figura 4: Taxa média anual de utilização da energia fotovoltaica no mundo (EPIA, 2012).

II.1.1.2 Energia Termossolar.

A tecnologia termossolar é composta por um sistema de aquecimento onde um coletor transforma a radiação solar em calor, por meio de um fluido, geralmente a água, e o transfere para armazenamento em reservatório termicamente isolado para posterior utilização.

As principais tecnologias utilizadas nos coletores para aquecimento de água são os coletores planos, envidraçados ou não envidraçados e os coletores de tubos à vácuo.

A maior parte das aplicações dos coletores solares é para o aquecimento de água em habitações individuais.

Entre os anos de 2004 e 2009 a área de coletores solares instalada no mundo praticamente triplicou e a taxa de crescimento anual entre 2000 e 2009 foi de 20,8% (WEISS E MAUTHNER, 2011). Na Tabela 1 podemos verificar os países com maior capacidade instalada de coletores solares para aquecimento de água, inclusive o Brasil.

Tabela 1: Capacidade instalada de coletores termossolares em 2009 (MWt) (WEISS E MAUTHNER, 2011).

País	Não envidraçados	Envidraçados	Tubo à vácuo	Total
China	–	7105,00	94395,00	101500,00
Estados Unidos	12455,50	1787,80	61,40	14304,70
Alemanha	504,00	7508,70	844,50	8857,20
Turquia	-	8424,50	-	8424,50
Austrália	3304,00	1710,50	51,70	5066,20
Japão	-	3936,10	68,10	4004,20
Brasil	890,30	2799,70	-	3690,00
Áustria	431,90	2543,80	38,40	3014,10
Grécia	-	2852,20	1,80	2854,00
Israel	20,60	2827,50	-	2848,10

II.1.1.3 Energia Solar Termoelétrica.

As usinas solares termoelétricas funcionam concentrando a radiação solar direta para aquecimento de um receptor, que, por sua vez, aquece um fluido. O calor absorvido pelo fluido é então transformado em energia mecânica, por meio de turbinas a vapor, por exemplo, e então convertido em energia elétrica.

Atualmente as usinas solares termoelétricas utilizam, basicamente, quatro tecnologias de concentração solar: sistemas de calhas parabólicas, sistemas de refletores Fresnel lineares, torres solares e discos parabólicos.

No final de 2010 a capacidade instalada no mundo atingiu, aproximadamente, 764 MW.

II.1.2 Energia eólica

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade. Os sistemas eólicos podem ser instalados em terra (*onshore*) ou sobre o mar (*offshore*).

As turbinas eólicas produzem energia com ventos a partir de 15 quilômetros por hora (km/h) até 90 km/h (IEA, 2009a). Quanto à capacidade de geração elétrica, as turbinas comerciais atuais tem potências nominais entre 1,5 MW e 3 MW.

De acordo com Conselho Global de Energia Eólica (*Global Wind Energy Council - GWEC*), a capacidade instalada em energia eólica no mundo, em 2011, cresceu 21%, alcançando assim um total de 238 GW (GWEC, 2012a). Contudo, estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano.

O Brasil foi o país que apresentou o maior crescimento relativo no mundo no ano de 2011, equivalente a 63%, com sua capacidade instalada passando de 927 MW, em 2010, para 1.509 MW (GWEC, 2012).

A evolução da capacidade instalada mundial a partir de 2001 até 2011 pode ser observada na Figura 5.

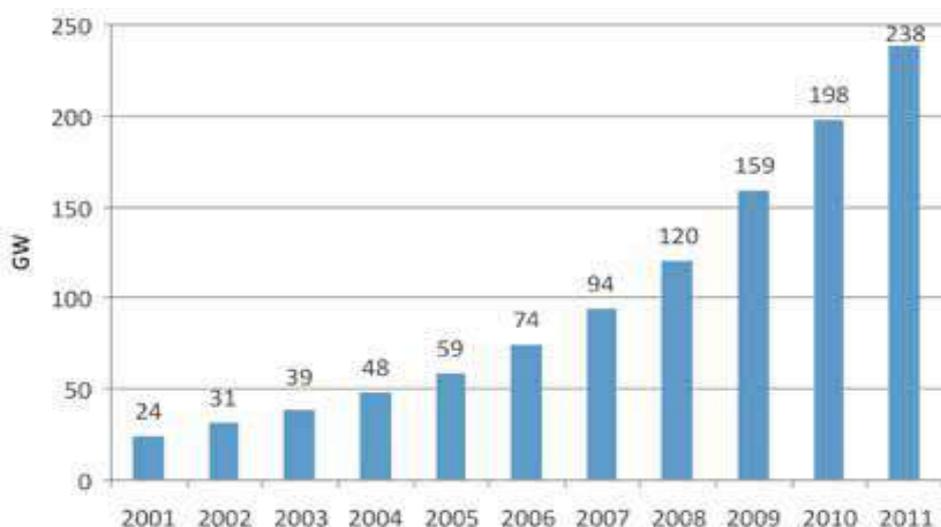


Figura 5: Evolução da capacidade eólica mundial (GWEC, 2012).

II.1.3 Energia Hidráulica

A hidroeletricidade é proveniente da energia da água dos rios que flui de elevações mais altas para mais baixas (REN21, 2011). A energia potencial da água

é transformada em energia cinética, que por seguinte é convertida para energia mecânica, em uma turbina, que por sua vez é transformada em energia elétrica no gerador. Essa conversão de energia é realizada em uma usina hidrelétrica como é mostrada na Figura 6.

A capacidade instalada mundial teve um acréscimo de 30 GW, chegando a 1010 GW em 2010 (REN21, 2011). A China é o país que mais investe em energia hidrelétrica e o que também possui a maior capacidade instalada seguida pelo Brasil, como pode ser observado na Tabela 2.

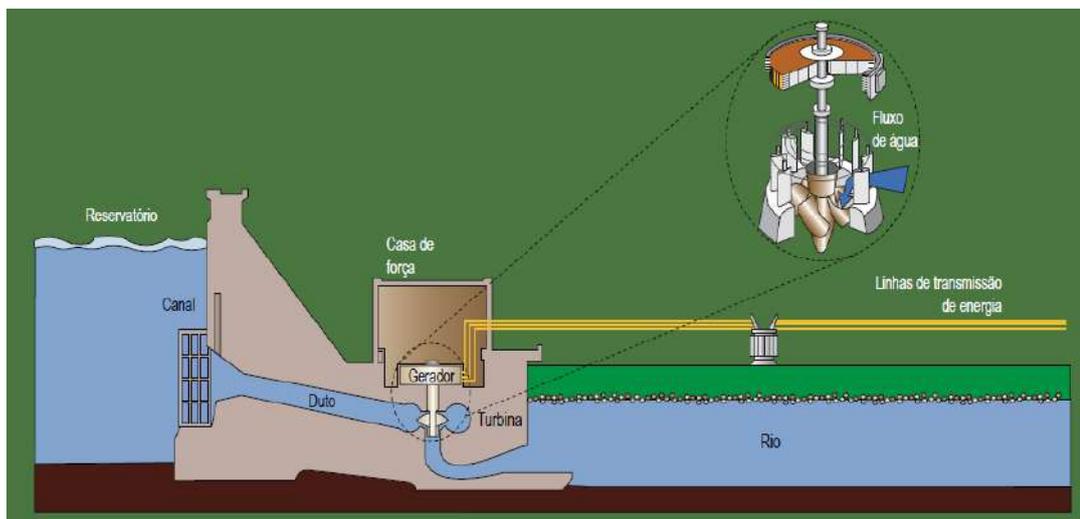


Figura 6: Composição de uma usina hidrelétrica (ANEEL, 2008)

Tabela 2: Capacidade instalada em hidrelétricas no ano de 2010 (REN21, 2011).

País	Capacidade (GW)
China	213
Brasil	80,7
Estados Unidos	78
Canadá	75,6

Segundo o Atlas Mundial e Guia da Indústria 2010 estima-se que o mundo possui um potencial técnico para a produção de energia hidráulica de 14.576 TWh por ano. Além disso, o Brasil é o país com maior potencial hidrelétrico, em todo o mundo, um total de 260 mil MW, segundo o Plano 2015 da Eletrobrás.

II.1.4 Biomassa

A biomassa é toda matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia. A biomassa pode ser obtida de resíduos agrícolas, dejetos de animais, resíduos das indústrias florestais, de papel e celulose e alimentícia, resíduos urbanos (lixo), matéria orgânica de esgotos sanitários e de culturas energéticas, como as provenientes de rotação de cultura, florestas energéticas (eucalipto e pinus), gramíneas (capim elefante), culturas de açúcar (cana-de-açúcar e beterraba), culturas de amido (milho e trigo) e oleaginosas (soja, girassol, colza, sementes oleaginosas, pinhão-manso e óleo de palma). Os principais processos de conversão da biomassa em energia são a combustão direta, processos termoquímicos e biológicos.

A quantidade estimada de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhão de toneladas. De acordo com o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em novembro de 2008 existiam 302 termelétricas movidas a biomassa no país, que correspondem a um total de 5,7 mil

MW instalados. Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro (resíduo da celulose) com potência total de 944 MW; 27 por madeira (232 MW); três por biogás (45 MW); quatro por casca de arroz (21 MW) e 252 por bagaço de cana (4 mil MW).

II.1.4.1 Combustão direta

Combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Geralmente esse processo é utilizado para produção de eletricidade, ou de eletricidade e calor (co-geração), por intermédio de sistemas que utilizam caldeira, turbina a vapor e gerador elétrico. A capacidade típica dessas plantas varia de 1 a 100 MW.

II.1.4.2 Processos termoquímicos

Baseiam-se na utilização de calor como fonte de transformação da biomassa.

II.1.4.2.1 Pirólise

Esse processo se caracteriza pela queima e degradação da biomassa a temperaturas, aproximadamente, de 500°C, na ausência de oxigênio. O produto final tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas.

II.1.4.2.2 Gaseificação

É um processo de conversão da biomassa em gás combustível. Há vários tipos de gaseificadores. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado.

II.1.4.3 Processos Biológicos

Os processos biológicos de transformação da biomassa se divide em fermentação e digestão anaeróbia.

II.1.4.3.1 Fermentação

A fermentação é um processo biológico anaeróbio em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e, principalmente, a cana de açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos, usualmente leveduras.

Em termos energéticos, o produto final, o álcool, é composto por etanol e, em menor proporção, metanol, e pode ser usado como combustível.

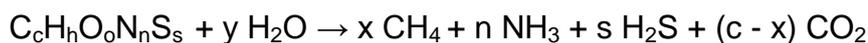
II.1.4.3.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbica é o processo de degradação biológica da biomassa por bactérias (microrganismos acidogênicos e metanogênicos), na ausência de oxigênio, produzindo, como principal produto, o biogás.

II.2 PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo no qual diferentes tipos de microorganismos, em ausência de oxigênio, degradam compostos orgânicos complexos (carboidratos, lipídeos e proteínas) produzindo biogás e um efluente líquido (digestato).

O biogás, resultante do processo, é composto essencialmente de metano e gás carbônico. Esse processo pode ser descrito, de forma geral, pela equação:



$$x = 1/8.(4c + h - 2o - 3n - 2s)$$

$$y = 1/4.(4c - h - 2o + 3n + 3s)$$

O biogás produzido pode ser transformado em energia elétrica e em energia térmica ou, alternativamente, pode ser purificado e introduzido na rede de gás natural ou servir de combustível para o setor de transportes (RODRIGUES, 2005).

O digestato é rico em nutrientes e portanto pode ser utilizado como fertilizante e como condicionador de solos (CHEN *et al*, 2010), o que propicia um aumento nos benefícios econômicos e ambientais do processo de digestão anaeróbia.

II.2.1 Fases da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo (AQUINO E CHERNICHARO, 2005) e que pode ser dividida em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Grupos específicos de bactérias estão envolvidas em cada uma dessas fases (AL SEADI, 2008). Esses grupos funcionam em sequência, onde o produto de uma fase serve como substrato para a fase seguinte. A representação esquemática, simplificada, de degradação anaeróbica da matéria orgânica é dada na Figura 7.

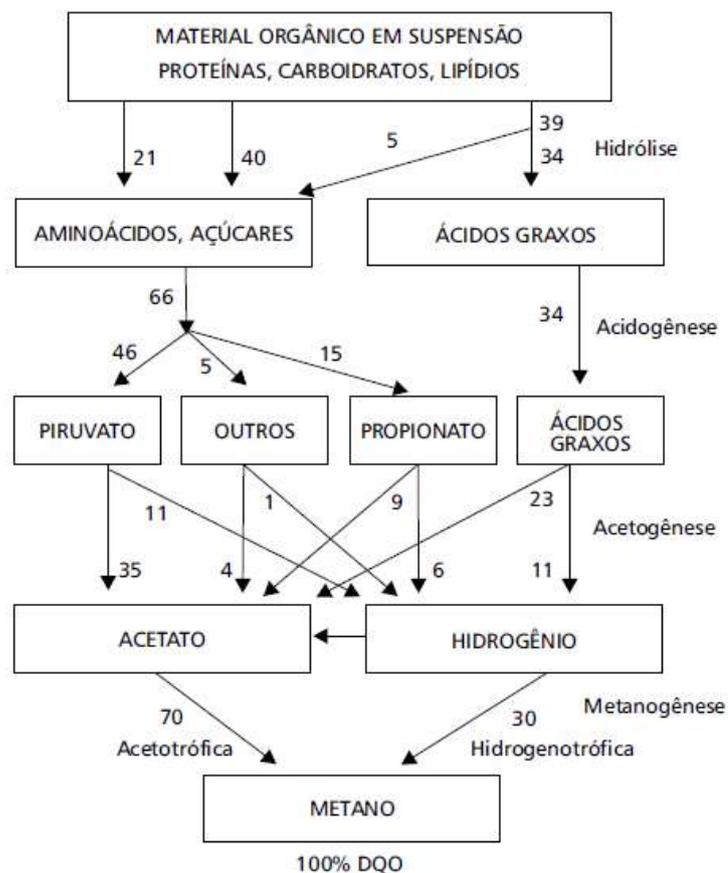
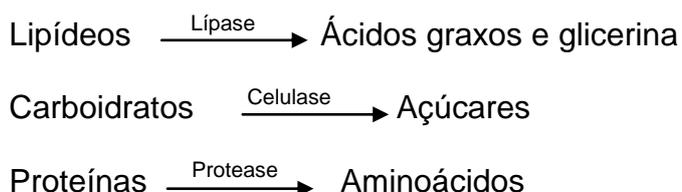


Figura 7: Etapas de conversão da digestão anaeróbia (os números referem-se as porcentagens, expressas como DQO) (CAMPOS, 1999).

II.2.1.1 Hidrólise

A hidrólise, teoricamente, é o primeiro passo da digestão anaeróbia, onde moléculas orgânicas complexas são convertidas em compostos mais simples e solúveis. Esta reação é catalisada por enzimas excretadas a partir das bactérias hidrolíticas e fermentativas (celulase, protease e lipase). Os produtos finais desta reação são os açúcares solúveis (mono e dissacarídeos), aminoácidos; ácidos graxos de cadeia longa (C₁₅ a C₁₇) e glicerina. (RALPH & DONG, 2010), como é mostrado a seguir:



A hidrólise dos carboidratos realiza-se dentro de algumas horas, enquanto que proteínas e lipídios ocorre dentro de alguns dias (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

II.2.1.2 Acidogênese

Nessa fase, os produtos solúveis, oriundos da hidrólise, são metabolizados, na forma intracelular, por uma grande diversidade de bactérias, a maioria anaeróbias obrigatórias, porém, cerca de 1%, são facultativas (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994); através de muitos processos fermentativos. A degradação desses compostos resulta na produção de substâncias orgânicas simples, tais como, ácidos

graxos voláteis de cadeia curta (C_1 a C_5), alcoóis, ácido láctico e compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S , etc.).

Em geral , a população acidogénica representa, aproximadamente, 90% do total da população microbiana presente nos digestores anaeróbicos (ZEIKUS, 1980). Essas bactérias têm um tempo de duplicação curto e, portanto, acidogênese não é considerada como um passo limitante no processo de digestão anaeróbica (GUJER & ZEHNDER, 1983).

II.2.1.3 Acetogênese

Durante a acetogênese ocorre a conversão dos produtos gerados na acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano. Os produtos formados durante essa fase são acetato, hidrogênio, dióxido de carbono. Sendo que, apenas o acetato e o hidrogênio podem ser utilizados diretamente pelas arqueas metanogênicas.

II.2.1.4 Metanogênese

Na quarta fase, as arqueas metanogênicas convertem principalmente o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano em condições estritamente anaeróbia. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as metanogênicas são divididas em metanogênicas acetoclásticas que formam metano a partir do ácido acético e metanogênicas

hidrogenotróficas que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (COSTA *et al*, 2007).

II.2.2 Condições do meio

Os processos de metabolismo microbiano são dependentes de vários parâmetros relativos ao meio, de modo que, durante o processo de fermentação ótima, numerosos parâmetros devem ser levados em consideração e serem controlados.

II.2.2.1 Temperatura

A temperatura é um dos principais parâmetros a serem controlados na digestão anaeróbia, uma vez que afeta as atividades metabólicas dos microorganismos, dado que as bactérias acidogénicas e as arqueas metanogénicas são altamente sensíveis a variações bruscas de temperatura; que, por sua vez, afetam a velocidade de digestão e produção de CH₄ (WARD *et al*, 2008). Existem três faixas de temperatura comuns para digestão anaeróbia: psicofílica, a faixa de temperatura mais baixa, temperaturas inferiores a 20 °C; mesofílicas temperaturas dentro de 20-45 °C e termofílicas com temperaturas na gama de 45-60 °C. No entanto, segundo RODRIGUES (2005) a temperatura de 37°C corresponde ao ponto ótimo de crescimento da maioria dos microorganismos anaeróbios.

II.2.2.2 pH

As etapas de digestão anaeróbia requerem diferentes níveis de pH. O pH ótimo para as arqueas metanogênicas é cerca de 7,0 enquanto que o pH ótimo da hidrólise e da acidogênese tem sido relatada como sendo entre 5,5 e 6,5 (KIM et al, 2003;. YU & FANG, 2002). O processo de digestão anaeróbia ocorre em uma estreita faixa de pH ótimo entre 6,8 e 7,2. Para além destes limites, a digestão anaeróbia processa-se com menor eficiência.

II.2.2.3 Disponibilidade de nutrientes

Cada espécie de microrganismo envolvido na decomposição anaeróbia tem sua necessidade própria de nutrientes. O carbono e o nitrogênio, respectivamente, são os dois nutrientes mais importantes para a formação de enzimas responsáveis pela realização do metabolismo. Diante disso, é importante uma relação C/N correta. Uma relação C/N muito elevada acarreta uma redução na atividade metabólica. Enquanto que o excesso de nitrogênio pode causar a formação excessiva de amônia, capaz de inibir o crescimento dos microorganismos (BRAUN, 1982). A razão C/N ótima deve estar na faixa entre 20 e 30, sendo a relação ideal igual a 25 (RODRIGUES, 2005).

Além do carbono e o nitrogênio, os macronutrientes fósforo e enxofre também são essenciais a metanogênese. Para que a dose de nutrientes para os microorganismos seja adequada e suficiente, a relação C:N:P:S no biodigestor deve ser de 600:15:5:3 (WEILAND, 2000).

A disponibilidade de micronutrientes também é essencial para a sobrevivência dos microrganismos. As arqueas metanogênicas necessitam de cobalto, níquel, molibdênio e selênio (ABDOUN, 2009).

II.2.2.3 Substancias inibidoras

Substancias inibidoras influenciam a atividade de microrganismos anaeróbios. Elas podem ser introduzidos no sistema em conjunto com a matéria-prima ou serem geradas durante o processo. Alguns nutrientes, se presentes em quantidades muito elevadas, poderão ter um efeito inibidor da atividade microbiana; como é o caso dos íons de cálcio, sódio, potássio e magnésio, além de compostos como amônia, sulfetos e metais pesados (CHERNICHARO, 1997).

II.3 BIOGÁS

O biogás é composto de uma mistura gasosa produzida, principalmente, de metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de outros gases. A composição do biogás gerado, em geral, depende do substrato e do tipo de processo do qual é produzido. Na Tabela 3 pode-se observar a composição típica do biogás.

Tabela 3: Composição típica do biogás (adaptado de Coelho et al., 2006).

Componente	% em volume
Metano (CH ₄)	55-65
Dióxido de carbono (CO ₂)	35-45
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0-1
Nitrogênio (N ₂)	0-3
Hidrogênio (H ₂)	0-1
Oxigênio (O ₂)	0-2
Amônia (NH ₃)	0-1

O poder calorífico do biogás depende do teor de metano e do grau de umidade do gás (NOGUEIRA, 1986). O biogás com um teor de metano de 60% terá um poder calorífico inferior, aproximado, de 5.500 kcal/m³ (JAIN, 2004).

A utilização do biogás como recurso energético se deve principalmente ao metano, a Tabela 4, relaciona a equivalência energética do biogás com as principais fontes de energia.

Tabela 4: Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia (SGANZERLA, 1983).

Fonte de energia	Quantidade equivalente a 1 m ³ de biogás
Gasolina (L)	0,613
Querosene (L)	0,579
Diesel (L)	0,553
GLP (Kg)	0,454
Álcool (L)	0,790
Carvão (Kg)	0,735
Lenha (Kg)	1,538
Eletricidade (kWh)	1,428

O biogás produzido em processos de digestão anaeróbia pode ter diferentes usos:

- Em uma caldeira para gerar calor ou eletricidade;
- Nos motores ou turbinas para gerar eletricidade;
- Nas células de combustível, após a retirada do H₂S e outros contaminantes;
- Após purificação pode ser injetado em uma rede de gás natural;
- Utilização para a síntese de produtos de maior valor agregado como o metanol;
- Como combustível para automóveis.

Segundo Moço (2012) o biogás apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

- Vantagens:

- Em termos de tratamento de resíduos:

É um processo natural para tratar resíduos orgânicos;

Requer menos espaço que aterros sanitários ou compostagem;

Diminui o volume de resíduo a ser descartado.

- Em termos de energia:

É uma fonte de energia renovável;

Produz um combustível de alta qualidade, através deste processo evita-se a liberação de metano para a atmosfera.

- Em termos ambientais:

Reaproveitamento da matéria orgânica;

Produz como resíduo um biofertilizante, rico em nutrientes e livres de microrganismos patogênicos;

Reduz significativamente a quantidade de metano emitida para a atmosfera.

- Em termos econômicos:

Apesar do elevado custo inicial, numa perspectiva a longo prazo resulta uma grande economia, pois reduz, gastos com eletricidade, descarte de resíduos, etc.

- Desvantagens:

Caso a biodigestão não funcione corretamente, ocorre a produção de gás sulfídrico (H_2S), um gás tóxico;

Escolha cuidadosa do material a utilizar na construção do biodigestor, pois há formação de gases altamente corrosivos durante a formação do biogás.

Custo inicial elevado e possível manutenção de equipamentos.

II.4 BIODIGESTORES

Um biodigestor ou digestor anaeróbio pode ser definido como uma câmara hermeticamente fechada onde ocorre a digestão anaeróbia (EPA, 2012).

II.4.1 Tipos de biodigestores

Do ponto de vista da alimentação, existem dois tipos básicos de biodigestores: contínuos e em batelada ou descontínuo.

II.4.1.1 Biodigestores contínuos

Nos biodigestores contínuos, o substrato é continuamente adicionado ao biorreator e ao mesmo tempo a matéria tratada é retirada continuamente, permitindo que o volume se mantenha constante ao longo do tempo. Nesse sentido as reações ocorrem simultaneamente produzindo biogás de forma contínua.

II.4.1.2 Biodigestores descontínuos ou em batelada

No processo em batelada, a matéria orgânica é introduzida na totalidade no biorreator, ficando retida durante um determinado período de tempo até o final da

degradação. Isto implica que as diferentes fases de degradação ocorrem sequencialmente e que a produção de biogás se processa de forma descontínua.

II.4.2 Estrutura dos biodigestores em batelada e parâmetros operacionais

Os biodigestores em batelada são compostos, essencialmente, de um reator, propriamente dito, construído, geralmente, com isolamento térmico; de um sistema de aquecimento, equipamentos de agitação e, em muitos casos, de um sistema de controle e automação que tem como objetivo manter os parâmetros operacionais em seu ponto ótimo.

II.4.2.1 Biorreatores

Os reatores de um biodigestor industrial são confeccionados, em geral, em aço, aço inoxidável ou concreto armado e no caso de escala de bancada, em plástico ou vidro. Na Figura 8, a seguir, podemos ver um biodigestor, em fase de construção, de concreto armado.



Figura 8: Construção de um biodigestor de concreto (LIEBETRAU, 2010).

II.4.2.2 Sistemas de aquecimento

A temperatura no interior do digestor deve ser constante para que o processo de digestão ocorra em condições ótimas. Segundo AL SEADI (2008) diversos fatores podem ocasionar variações de temperatura:

- alimentação do substrato fresco, com uma temperatura diferente da temperatura do processo;
- formação de camadas ou zonas de temperatura em função do isolamento térmico insuficiente ou mau dimensionamento do sistema de aquecimento; agitação insuficiente;
- inadequada posição dos elementos de aquecimento;
- temperaturas extremas nas diferentes estações do ano;
- falha nos equipamentos.

Para o fornecimento da temperatura ótima do processo e para compensar eventuais perdas de calor os biodigestores devem ser isolados termicamente e aquecidos por um sistema de aquecimento, conforme observado na Figura 9.

O aquecimento do sistema pode ser feito, quer durante o processo de alimentação (pré-aquecimento), por meio de trocadores de calor, ou pode ser feito no interior do digestor, com elementos de aquecimento externos ou integrados ao biodigestor. Na Figura 10 podemos ver um sistema de aquecimento integrado ao biodigestor. O aquecimento da matéria-prima durante a alimentação tem a vantagem de evitar variações de temperatura no interior do digestor, contudo, na maioria dos casos, ainda se faz necessário um sistema de aquecimento adicional.



Figura 9: Sistema de aquecimento de uma unidade de biogás (RUTZ, 2008)

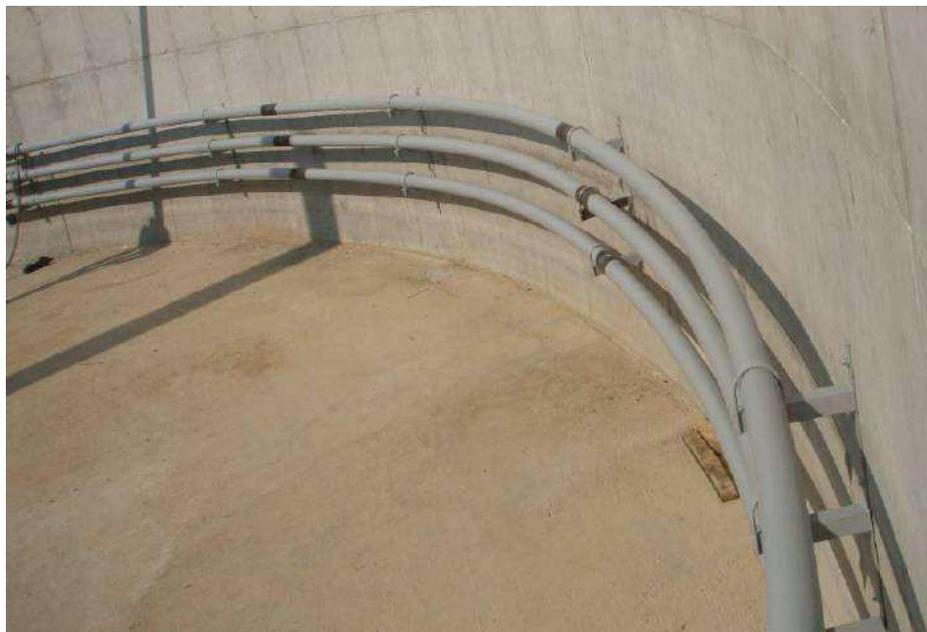


Figura 10: Sistema de aquecimento, instaladas no interior do digestor (AL SEADI, 2008).

II.4.2.3 Sistemas de agitação

Segundo AL SEADI (2008), o substrato em fermentação sofre um processo de mistura passiva em função da convecção térmica, da ascensão das bolhas de gás ou até mesmo pela introdução de um novo substrato. Contudo, essa agitação passiva não é suficiente para a operação otimizada do digestor exigindo a implementação de uma agitação ativa.

A finalidade da agitação consiste em: distribuir os nutrientes no digestor de maneira uniforme, evitar a sedimentação de partículas, assegurar uma distribuição uniforme do calor, evitar a formação de espuma e facilitar a liberação do biogás gerado. Contudo, uma mistura muito vigorosa pode ocorrer a ruptura celular destruindo os microorganismos, portanto uma agitação lenta é recomendada.

Existem três formas principais de técnicas de agitação - mecânica, hidráulica e pneumática. Sendo a por meios mecânicos a mais utilizada em unidades de biogás.

II.4.2.3.1 Agitação por meios mecânicos

A agitação por meios mecânicos é realizada por agitadores. Eles se distinguem pela sua forma, velocidade de rotação e diâmetro. Os tipos mais comuns de agitadores mecânicos são:

- Agitadores de motor submersíveis, os quais podem ser observado na Figura 11, operam através do princípio da propulsão e são completamente imersos

no meio, normalmente, têm duas ou três hélices, geometricamente otimizadas, que são tracionados por motores elétricos.



Figura 11: Agitador de motor submersível (Al SEADI, 2008).

- agitadores de eixo longo também operam sob o princípio da propulsão, porém o motor se encontra fora do digestor na extremidade de um eixo montado obliquamente passando pelo seu teto ou, no caso de teto de lona, pela área superior da parede do biodigestor, conforme mostrado na Figura 12.

- Agitadores axiais são, normalmente, montados no eixo localizado no centro do teto do digestor, como pode ser observado na Figura 13. A velocidade do motor, montado externamente ao biodigestor, é reduzida a poucas rotações por minuto. No interior do biodigestor, os agitadores geram uma corrente contínua que desce pelo centro e sobe próximo às paredes.



Figura 12: Agitador de eixo longo (AI SEADI, 2008).

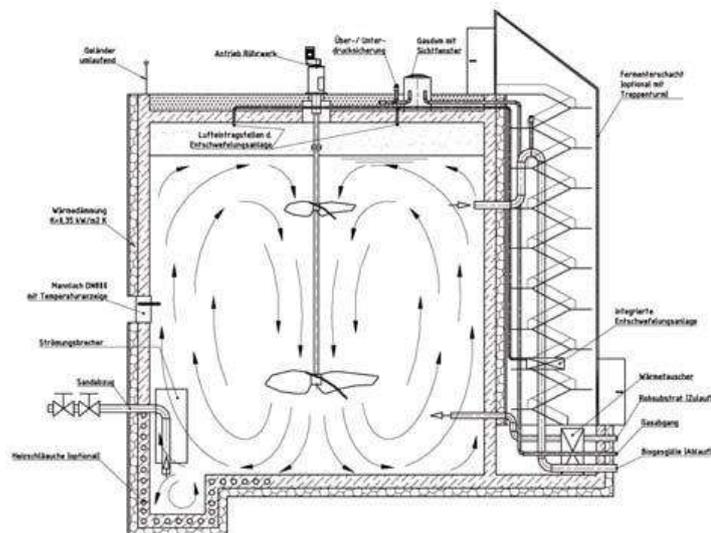


Figura 13: Agitadores axiais (ENTEC - Environmental Technology Umwelttechnik GmbH).

II.4.2.3.2 Agitação hidráulica

Na agitação hidráulica, o substrato é sugado e introduzido para o interior do biodigestor por meio de bombas e bicos agitadores giratórios, horizontais ou também verticais. Sistemas hidraulicamente agitados tem a vantagem de que as partes mecânicas dos agitadores são colocados fora do digestor, o que propicia um menor desgaste e uma fácil manutenção. (SEADI, 2008). Todavia, existe o risco de entupimento do sistema dependendo do substrato (WELLINGER, 2013).

II.4.2.3.3 Agitação pneumática

A agitação pneumática ocorre através da injeção de biogás, sob pressão, na parte inferior do digestor. A subida de bolhas de gás provocam o movimento vertical no tanque, promovendo a mistura do substrato. Os bicos de gás têm de ser distribuídos uniformemente para evitar zonas estáticas no reator (WELLINGER, 2013).

II.4.2.4 Sistemas embarcado de controle e automação

Entende-se por sistemas embarcados todo dispositivo ou sistema limitado a executar uma tarefa específica ou um conjunto restrito de funções específicas e correlacionadas. Em outras palavras, um Sistema Embarcado é um sistema baseado em um computador dedicado para implementar uma aplicação ou produto. Esse sistema é constituído, em geral, por três componentes principais:

1. *Hardware*, para dar a funcionalidade de um computador;
2. *Software* da aplicação principal interpolado no dispositivo de hardware, denominado por *firmware*, para realização de tarefas concorrentes;
3. *Software* Operacional em Tempo Real (RTOS), denominado por *software* supervisor, supervisiona as tarefas do *software* aplicativo, instalado no hardware, e organiza o acesso aos recursos do sistema de acordo com as prioridades e restrições de temporização das tarefas em execução.

O sistema embarcado de controle mais utilizado pela indústria, graças à sua grande flexibilidade de programação e de *hardware* é o Controlador Lógico Programável (CLP).

Os CLPs são equipamentos microprocessados, projetados para comandar e monitorar máquinas ou processos industriais. Sua operação se baseia na execução de um programa previamente armazenado em sua memória, que tem por função executar o processamento de sinais de entrada provenientes de diferentes tipos de sensores, chaves e botoeiras e fornecer sinais de saída compatíveis com o acionamento de diversos atuadores como motores elétricos, válvulas, etc. Os principais componentes de um CLP são:

1. Fonte de alimentação: alimenta a CPU e demais dispositivos, além de converter corrente alternada em corrente contínua;
2. Unidade Central de Processamento (CPU): responsável pela tomada de decisões. Através do programa ela analisa o estado das entradas e altera o estado das saídas, de acordo com a lógica programada;

3. Memória: responsável pelo armazenamento de todas as informações necessárias ao funcionamento do CLP;
4. Módulos de entrada e saída: são os meios de comunicação do CLP com o processo a ser controlado. As entradas recebem os sinais do campo e os transformam em sinais digitais para serem processados pela CPU. Após o processamento, os dados enviados pela CPU (digitais) são convertidos pelas saídas em sinais que possam acionar cargas externas (sinais elétricos);
5. Módulos de comunicação: responsáveis principalmente pela ligação do CLP com os seus periféricos: microcomputadores dotados de software supervisorio, terminais de vídeo, impressoras, instrumentos digitais e quaisquer instrumentos que possam se comunicar através de portas seriais tipo RS-232.

No controle de processos em usinas de biogás, geralmente, são usados Controladores Lógicos Programáveis (CLP), que assumem diversas tarefas da automação ligadas ao processo. Essas tarefas incluem o controle de processos operacionais, tais como a monitoração da temporização das bombas, intervalos de alimentação, períodos de agitação, como também dos processos biológicos. Além disso, o CLP deve garantir a medição dos parâmetros necessários (estados de ligação de motores, potência de entrada, rotações, parâmetros de processos como o pH, temperaturas, taxas de produção de gás, sua composição, etc.), bem como acionar atuadores como válvulas, agitadores, elementos de aquecimento e motores de bombas (LIEBETRAU, 2010).

O controle e automação de uma unidade de digestão anaeróbia também dispõe de um *software* supervisorio, que forma a base dos controles de processo em atividade. Esse programa é desenvolvido e personalizado durante a fase de

configuração por meio de um ambiente de programação. Conforme os objetivos do CLP, esse programa pode conter simples tarefas de controle até complexos mecanismos de regulação. O software permite, através da configuração dos parâmetros de controle, a automação do sistema. Contudo, também é necessário uma opção de operação manual. Caso ocorram estados operacionais não previstos pelo programa do controle, como a parada de uma bomba por exemplo, deve haver por segurança do sistema como um todo a possibilidade de operação manual.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 DESCRIÇÃO GERAL DA PARTE FÍSICA DO SISTEMA

O presente estudo é fruto da necessidade de construir quatro biodigestores em batelada anaeróbios automatizados para geração de biogás. E para isso foram utilizados materiais de baixo custo, porém com tecnologias atuais, e métodos simples de utilização do sistema visando à reprodutibilidade em larga escala futuramente.

Seguindo a tendência de utilização de materiais simples, primeiramente, foi selecionado o recipiente do biodigestor, sendo utilizado um pote de geometria cilíndrica, hermeticamente fechado, feito de vidro e com um volume de dois litros, conforme mostrado na Figura 14. Na tampa do recipiente foram feitos quatro furos, os quais podem ser observados na Figura 15, sendo um furo central para passagem da haste de agitação e os outros três para: saída de gás, alojamento do sensor de temperatura e, o último, para entrada e retirada de material do biodigestor.

O gás gerado pelos biodigestores é direcionado para ser armazenado em bolsas de *tedlar*, através uma mangueira de Poliuretano (PU) facilmente encontrada no mercado. Sua vedação é feita com cola silicone para garantir que o gás dentro da bolsa seja somente o gerado pelo biodigestor. Nas mangueiras foram instaladas válvulas de aquário para que pudesse retirar as bolsas de *tedlar* sem que entrasse gás do meio ambiente para dentro do sistema fechado.



Figura 14: Recipiente de vidro utilizado como biorreator.



Figura 15: Tampa do biorreator.

Foi desenvolvido um sistema de controle da temperatura para utilização em bancada nos biodigestores empregando dois sensores de temperatura de precisão transistorizados LM35DZ, um internamente ao biodigestor, junto à amostra, e outro externamente ao biodigestor; um recipiente em acrílico, confeccionado

especialmente para utilização no biodigestor, com água para que pudesse comportar o biorreator, a resistência para aquecimento e o sensor de temperatura externo.

Os dois sensores de temperatura centígrado de precisão LM35DZ dispõe de uma saída analógica de 0.5v proporcional a temperatura do meio em que está inserido seguindo a linearidade de 10mV /°C e possui a capacidade de operar numa ampla faixa de temperatura (-55°C a 150°C) (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2013). Este tipo de sensor, mostrado na Figura 16, além do baixo custo, tem tamanho reduzido e fácil instalação na CLP que tenha um conversor analógico digital. Os sensores foram alimentados com uma voltagem de cinco volts.

Os sensores de temperatura não podem ficar diretamente expostos ao ambiente interno do biodigestor nem tão pouco submerso. A solução empregada, após ter feito as ligações utilizando fios com isolamento elétrico e ao mesmo tempo impermeável a líquidos, foi inseri-los internamente em tubos de ensaio finos e vedar a entrada dos mesmos com cola de silicone. Depois de testes houve a necessidade de colocar entre o sensor de temperatura LM35DZ e o tubo de ensaio uma pasta de condução térmica para que diminuísse o gradiente de temperatura causado pelo tubo de ensaio.

parte inferior para a parte superior resolvendo assim o problema do gradiente de temperatura do banho.



Figura 17: Resistência elétrica utilizada no sistema de aquecimento.

O sistema de agitação foi desenvolvido utilizando um motor, comumente, utilizado para girar o prato de fornos de microondas. Esse tipo de motor foi escolhido por apresentar um baixo custo e por funcionar em baixa rotação o que é preferível em digestores anaeróbios. A esse motor foi fixado uma haste de agitação desenvolvida especialmente para a utilização no biodigestor em desenvolvimento, conforme é mostrado na Figura 18 a seguir:



Figura 18: Hastes de agitação.

III.2 SISTEMA EMBARCADO DE CONTROLE

O sistema embarcado de controle escolhido para compor cada um dos quatro biodigestores foi um Controlador Lógico Programável (CLP) que se comunica com um microcomputador supervisor. Esse sistema foi desenvolvido por completo: *hardware, firmware e software* supervisor.

O *hardware* projetado visa a atender as necessidades do sistema, que são de dois Conversores Analógico Digital (ADC) para os sensores de temperatura LM35DZ, três atuadores de alta potência um para a resistência elétrica, outro para a bomba d'água e o último para o motor de agitação e o sistema de comunicação com o microcomputador.

A fonte escolhida para alimentar o *hardware* foi uma fonte ATX (*Advanced Technology Extended*), utilizada comumente como fonte de computadores do tipo *desktop*, que fornece uma voltagem de 12V estabilizada necessária para suprir tanto a própria CLP bem como a bomba d'água.

O *hardware* construído pode ser dividido em quatro partes principais: microcontrolador, Unidade Central de Processamento, comunicação entre o microcomputador – microcontrolador, módulos de potencia e módulos de condicionamento de sinais dos sensores. Essas partes foram montadas sobre uma placa de ilha e soldados, conforme mostrado na Figura 19.

O microcontrolador coordenada toda a ação do sistema coletando os sinais analógicos devidamente tratados e os envia para o PC que por sua vez irá analisar os dados retornando com um comando de ação. Mais especificamente, nesse sistema de controle, o valor da temperatura é informado ao PC e o mesmo retorna informando ao módulo de controle se será necessário ligar ou não a resistência elétrica.

O microcontrolador utilizado foi o PIC16f877a, mostrado na Figura 20, do fabricante *Microchip*. Com este Circuito Integrado Programável (PIC) pode-se executar todas as tarefas necessárias ao sistema do biodigestor e ao mesmo tempo possibilitar mudanças de programação para a utilização de *software* bem como de *hardware* durante o desenvolvimento.

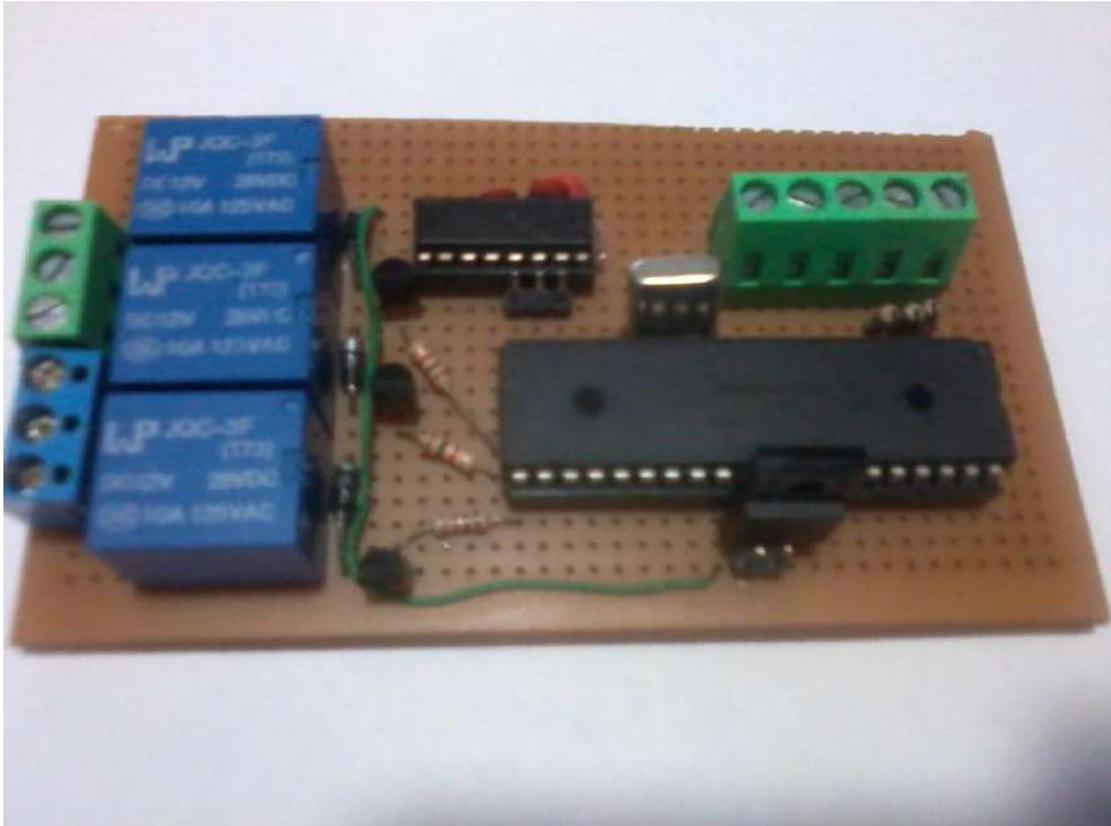


Figura 19: Sistema embarcado (*hardware e firmware*) montado.

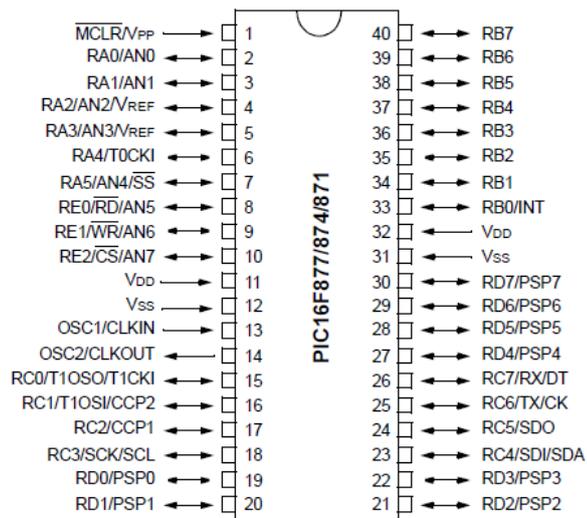


Figura 20: Circuito Integrado Programável - PIC16f877a (MICROCHIP TECHNOLOGY INC, 2003).

O microcontrolador PIC16f877a possui as seguintes funções descritas na Tabela 5, a seguir:

Tabela 5: Funções do microcontrolador PIC16f877a (*MICROCHIP TECHNOLOGY INC*, 2003).

Frequência de operação	DC - 20MHz
Memória de programa	8K x 14 bits
Memória de dados (RAM)	368 x 8 bytes
Memória de dados EEPROM	256 x 8 bytes
Interrupções	14 fontes
Conjuntos de instruções	35 instruções simples
Portas de entrada e saída (E/S)	Porta A,B,C,D e E
Temporizadores	3
Conversor analógico digital de 10 bits	8 canais de entrada

O *firmware* foi programado e gravado no microcontrolador utilizando o programa de compilação MikroC, desenvolvido pela *Mikroelektronika*. Para desenvolver esse *software* aplicativo foi utilizada a linguagem de programação C.

O modulo de comunicação tem como base o Circuito Integrado (CI) MAX232 que é responsável em mudar os níveis TTL (*Transistor-Transistor Logic*) de 5V do microcontrolador PIC em 12V da porta de comunicação do tipo serial RS232 do microcomputador (PC). O esquema básico de ligação entre o microcontrolador PIC e o PC de forma que os mesmos possam se comunicar, está apresentado na Figura 21.

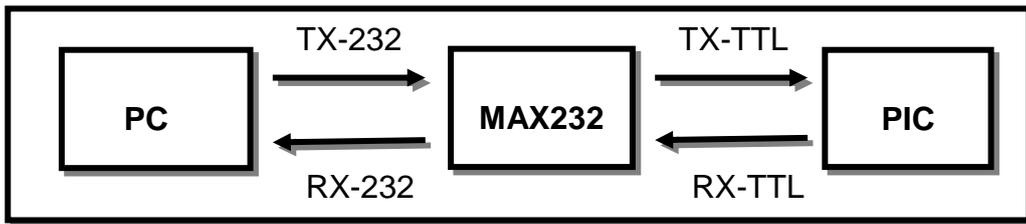


Figura 21: Esquema de ligação básico para comunicação.

Nos módulos de potência foram empregados relés com acionamento de 12V em sua bobina onde foi ligado a resistência e o motor de agitação em 110V e a bomba d'água em 12V.

Os módulos de condicionamento de sinais dos sensores LM35DZ constam de um filtro do tipo passa baixa onde são atenuados os sinais de altas frequências deixando passar somente sinais de baixa frequência a fim de que o ruído elétrico gerado por outras fontes, como exemplo os relés, não interfira no sinal causando oscilações e nem tão pouco variações que não sejam das causadas pela função do sensor de temperatura.

Para comportar todo aparato: *hardware*, fonte ATX, bomba d'água e motor de agitação, empregou-se uma caixa de policloreto de vinila, anti chama, para organizar todo o sistema, conforme pode ser observado na Figura 22.

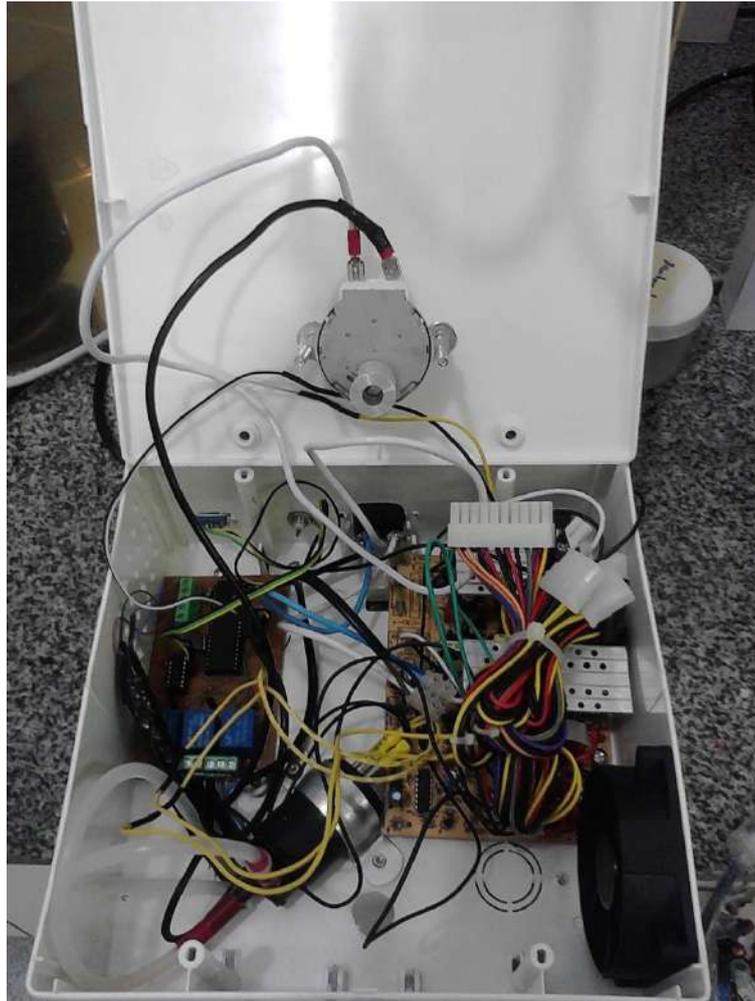


Figura 22: Caixa utilizada para organizar o sistema de controle.

III.3 SOFTWARE SUPERVISÓRIO

O *Software* supervisor ou *software* de supervisão é uma ferramenta de desenvolvimento de aplicativos capaz de fazer a comunicação entre um computador e uma rede de automação. Esse tipo de *software* possui ferramentas padronizadas para construção de interfaces entre o operador e o processo.

A concepção inicial, antes de iniciar a programação, foi desenvolver um *software* supervisor que proporcione ao operador a interação, o monitoramento, o controle, o armazenamento de dados, a análise e a visualização de informações do equipamento.

O software supervisor foi desenvolvido utilizando o Microsoft Visual Studio 2012. Esse pacote de programas da Microsoft é utilizado para o desenvolvimento de software, suportando diversas linguagens de programação como C, C++, C# (C Sharp) e J# (J Sharp). O software de controle e automação de biodigestores foi criado utilizando a programação orientada a objetos através da linguagem visual basic.

Primeiramente foi criada uma tela de abertura do programa, *Splash Screen*. Esse tipo de tela tem como objetivos mascarar o tempo de carregamento do programa durante sua inicialização e exibir informações gerais do *software*, conforme visto na Figura 23.

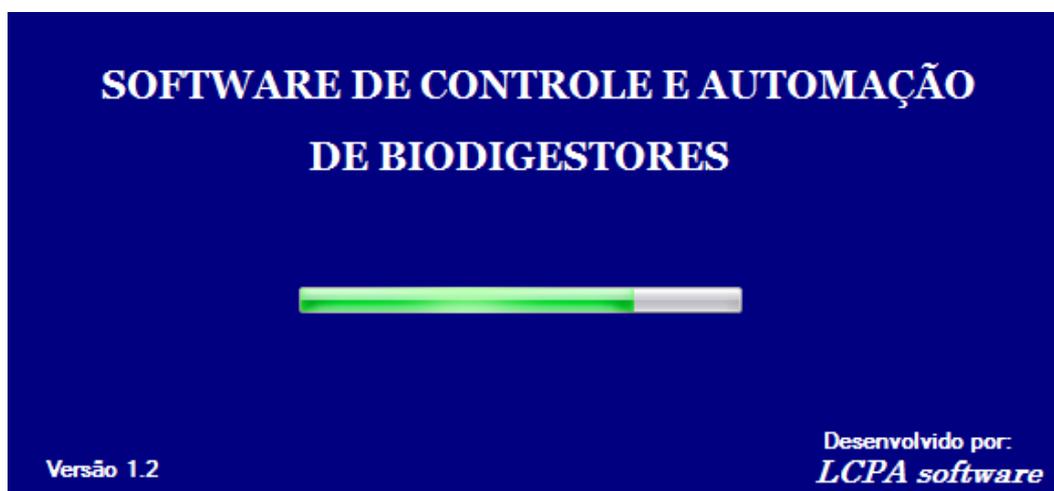


Figura 23: Tela de abertura do *software* supervisor.

Após o carregamento do programa, a *Splash Screen* fecha e é aberta automaticamente a tela inicial do *software*, apresentada na Figura 24. Nessa janela o usuário poderá determinar os parâmetros de controle do biodigestor. No campo denominado controle de temperatura é determinado o *setpoint* de temperatura, isto é, a temperatura que o sistema de controle tentará alcançar e manter automaticamente durante todo o experimento. No campo nomeado por controle de agitação são determinados o modo de controle: manual ou automático, o tempo de funcionamento da agitação e o intervalo de tempo entre os acionamentos do motor de agitação. Por fim, os parâmetros de controle manual ou automático, tempo de funcionamento e intervalo de tempo entre os acionamentos da bomba d'água são determinados no campo designado por controle de circulação d'água.

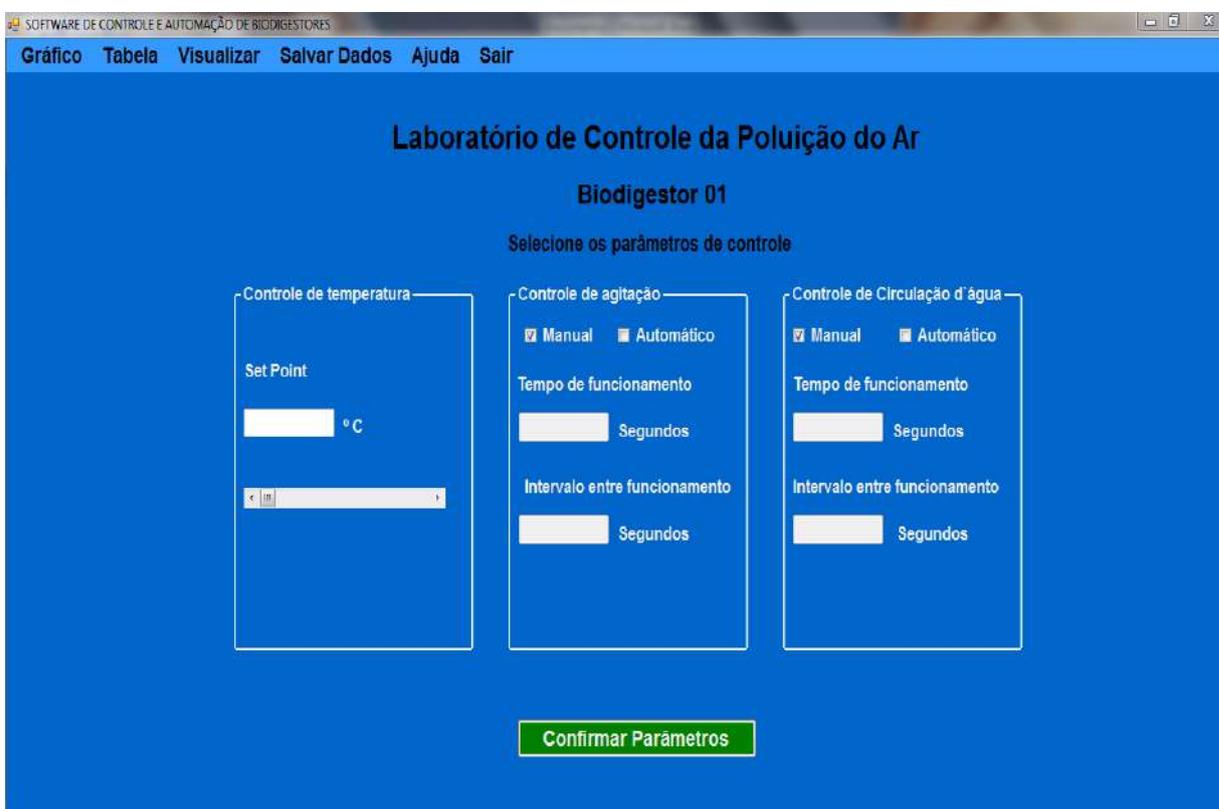


Figura 24: Tela inicial do *software* supervisor.

Definidos todos os parâmetros e acionado o botão Confirmar Parâmetros é, automaticamente, inicializada a tela de controle. Essa interface, além de herdar todos os valores definidos anteriormente, apresenta os valores de temperatura da amostra e de controle lidos pelos dois sensores de temperatura presentes no biodigestor, conforme pode ser observado na Figura 25.

Por questões de segurança o experimento só é iniciado ao ativar o botão iniciar experimento, proporcionando ao operador a possibilidade de confirmar novamente todos os parâmetros escolhidos na tela anterior.

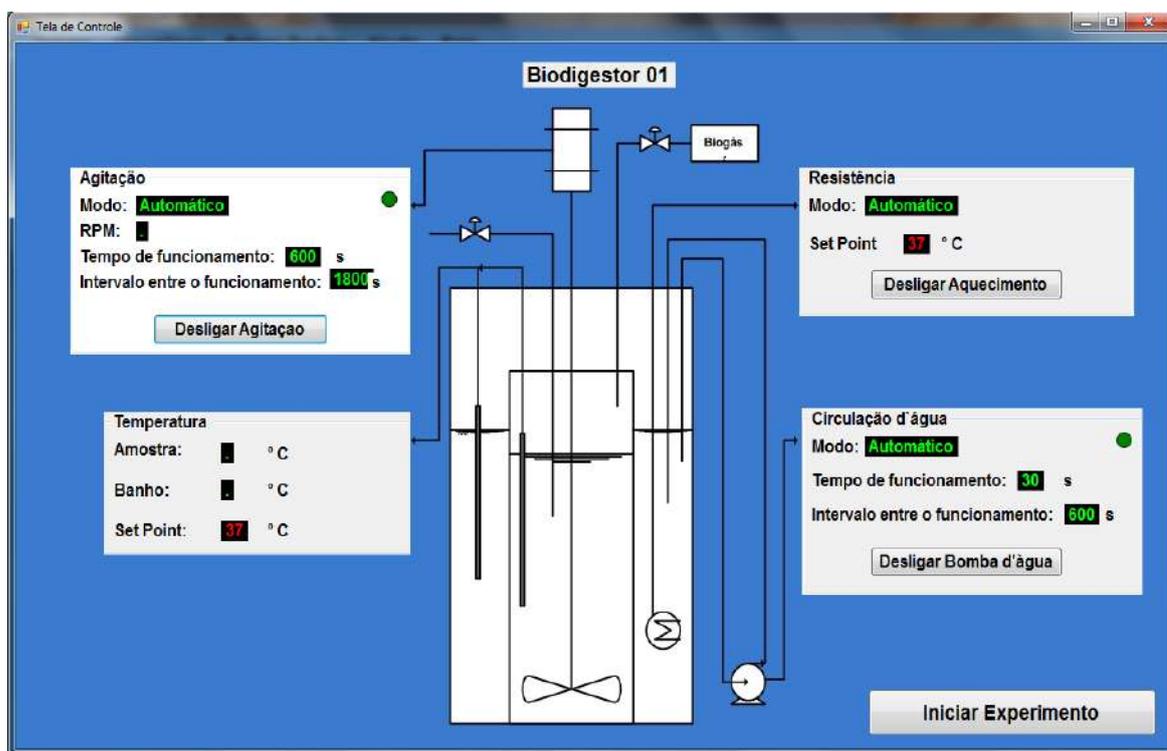


Figura 25: Tela de controle do software.

Vale ressaltar que o usuário pode mudar qualquer parâmetro de controle, em qualquer momento do experimento, modificando o mesmo na tela inicial e acionando o botão confirmar parâmetros. A modificação é atualizada instantaneamente pelo software.

O software cria, automaticamente, um banco de dados com as temperaturas da amostra e de controle lidas a cada segundo pelos sensores. O local onde é salvo esse banco de dados pode ser determinado utilizando a opção salvar dados localizada na aba superior da tela inicial. O programa permite apresentar esses dados por duas maneiras: via gráfico (Figura 26) ou em forma de tabela (Figura 27).

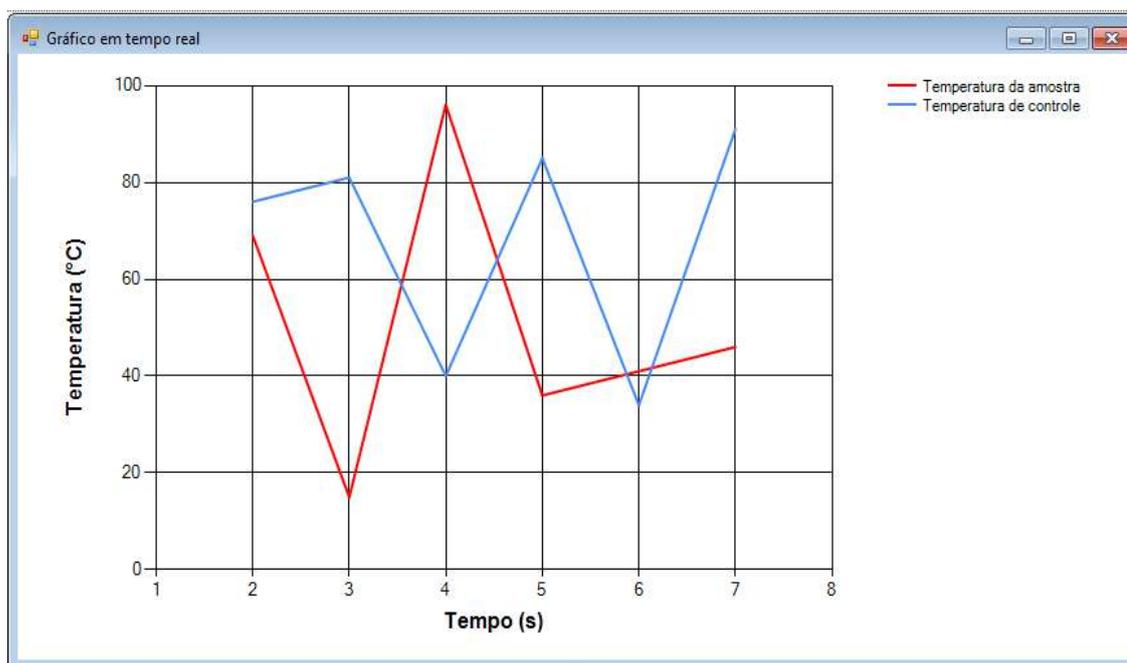


Figura 26: Tela de gráfico do *software*.

Por fim foi desenvolvido a janela denominada visualizar que permite ao usuário acompanhar visualmente, por meio de câmeras, o experimento de qualquer ponto fora do laboratório, utilizando um computador ou até mesmo um *smartphone* com acesso a internet, conforme pode ser observado na Figura 28. A finalidade dessa tela é permitir, através do acesso remoto, o acompanhamento por completo do experimento, por intermédio da tela de controle e pelas câmeras que permitem observar o correto funcionamento, ou não, dos sistemas de agitação e circulação d'água, além do meio em fermentação dentro do biorreator.

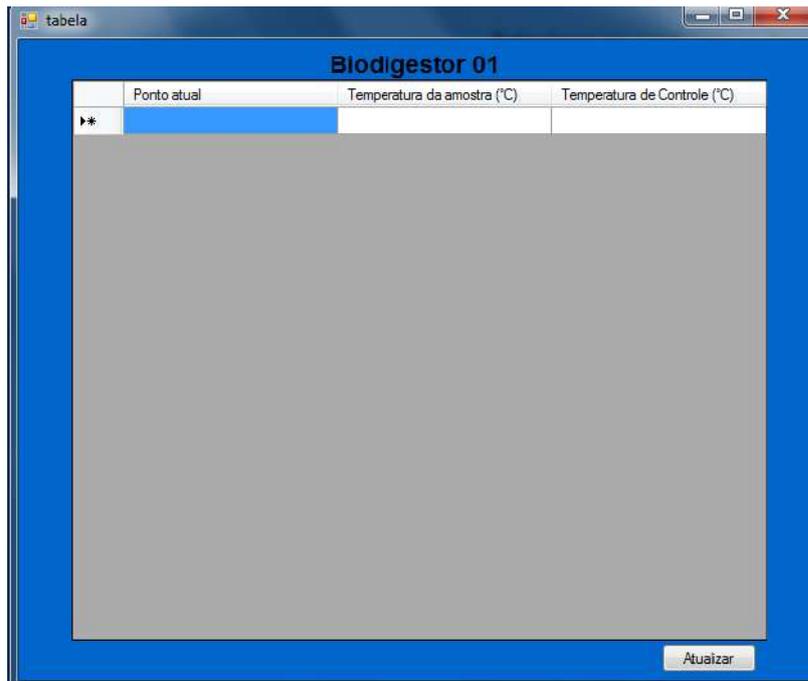


Figura 27: Tela da tabela do *software*.

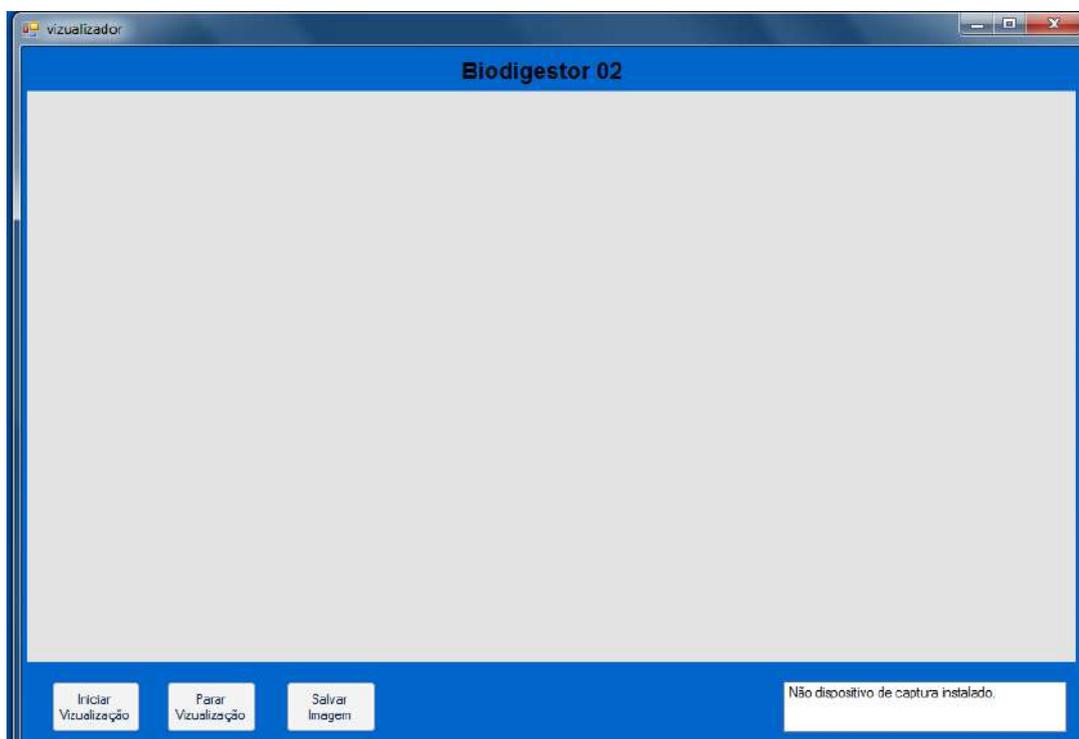


Figura 28: Tela de visualização do *software*.

III.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com a finalidade de realizar um teste ao biodigestor automatizado construído foi realizado um experimento durante 30 dias visando verificar a eficácia do biodigestor e do sistema de controle e automação em operação contínua, bem como a produção de biogás.

III.4.1 Descrição do resíduo orgânico

O resíduo orgânico utilizado foi o resíduo alimentar gerado pelo restaurante universitário do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Ao final do expediente do restaurante, o resíduo foi coletado e encaminhado ao Laboratório de Controle da Poluição do Ar (LCPA).

III.4.2 Lodo anaeróbio

O inóculo utilizado no experimento foi o lodo anaeróbio gerado de uma Estação de Tratamento de Efluentes Líquidos de um abatedouro de frangos localizado no Município do Rio de Janeiro.

Este material foi coletado e acondicionado em um recipiente devidamente higienizado para esta finalidade. Após coleta e acondicionamento, o lodo foi transportado até o LCPA.

III.4.2 Preparo das amostras e do biodigestor

O preparo do experimento seguiu as cinco etapas:

1º) Primeiramente os resíduos sofreram um processo de separação para a retirada de qualquer material que pudesse causar danos ao equipamento de trituração. Em seguida, os resíduos foram colocados em um liquidificador de uso doméstico, com o intuito que os mesmos fossem triturados até apresentarem aspecto pastoso, conforme apresentado na Figura 29;



Figura 29: Resíduo alimentar triturado.

2º) Nesta etapa, foi adicionado Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3) ao resíduo obtido, na primeira etapa, para que o pH atingisse valores próximos de 7,0, de forma a criar a condição ideal do meio;

3º) Na terceira etapa, ocorreu o preparo de dois biorreatores, utilizados no experimento teste, sendo o primeiro definido como biodigestor de controle/branco, onde não foi utilizado o lodo e o segundo, como biodigestor inoculado. No

biodigestor de controle foram adicionados 800 g de resíduo, preparado nas etapas 1 e 2, e 200 mL de água destilada. Em seguida, foi iniciado um processo de mistura até atingir a homogeneidade. Já no biodigestor inoculado foi adicionado 700 g de resíduo, 100 mL de água destilada e 200 mL de lodo anaeróbio, gerando, assim como no biodigestor de controle, um volume nominal de um litro; que também foram misturados até ficar homogêneo;

4º) Nesta etapa, inicia-se o preparo do biodigestor, onde os dois biorreatores, com as amostras preparadas na etapa anterior, foram vedados hermeticamente com suas respectivas tampas, as quais já possuíam fixadas as mangueiras de coleta/retirada de material e retirada do biogás, sensor de temperatura da amostra e a haste de agitação, com borracha e cola de silicone. Em seguida os biorreatores foram colocados dentro do recipiente em acrílico. Nesse recipiente foi adicionado água destilada e nele foram inseridos a resistência do sistema de aquecimento, as mangueiras da bomba d'água e o sensor de temperatura de controle. Por fim a haste de agitação foi fixada ao motor e a mangueira de retirada do biogás gerado foi conectada a bolsas de *Tedlar* de 5 litros. A Figura 30 mostra o sistema, descrito anteriormente, montado;

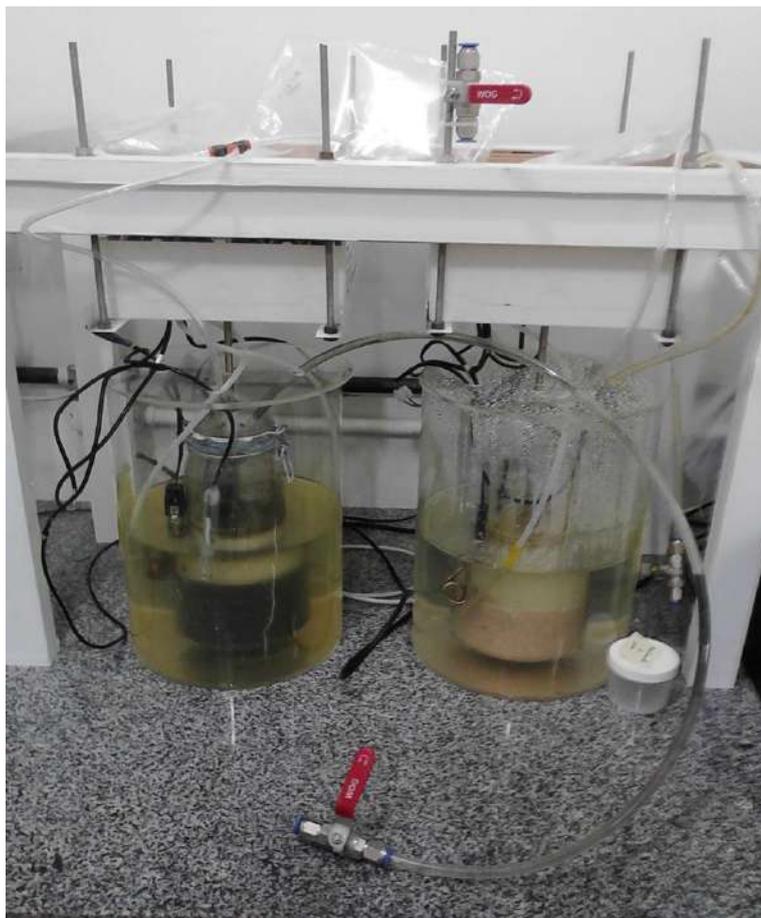


Figura 30: Biodigestor de controle (direita) e biodigestor inoculado (esquerda) e seus respectivos sistemas de controle.

5°) Na quinta e última etapa os parâmetros de controle foram definidos e implementados ao *software* supervisor, a saber:

- *Set point:* 37°C;
- Modo de agitação: Automático;
- Tempo de Agitação: 600 segundos
- Intervalo entre as agitações: 1800 segundos;
- Modo de circulação d`água: Automático;
- Tempo de funcionamento da bomba: 30 segundos

- Intervalo entre o funcionamento da bomba: 600 segundos.

A Figura 31 mostra o sistema composto pelos quatro biodigestores automatizados.



Figura 31: Quatro biodigestores em escala de bancada do tipo batelada com sistema de controle e automação.

III.5 ANÁLISE DO BIOGÁS PRODUZIDO

A composição do biogás gerado nos biodigestores foi analisada por cromatografia em fase gasosa em um cromatógrafo da marca VARIAN MICRO CG 4900, disponível no Laboratório de Tecnologia Ambiental. O biogás coletado nas bolsas de *Tedlar* foi injetado diretamente no CG. As condições de análise dos gases foram: Coluna- PPQ – 10 m x 0,32 mm; Temperatura da coluna – 50 °C; Detector – condutividade térmica (TCD); Temperatura do detector – 250 °C; Temperatura do injetor – 80 °C; Gás de arraste – Hélio; Tempo de análise – 1,5 minutos.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1 DESEMPENHO GLOBAL DO BIODIGESTOR

Durante os trinta dias do experimento, foi possível observar o funcionamento dos biodigestores; dos sistemas de aquecimento, de agitação e circulação d'água, do sistema embarcado de controle e automação e do *software* supervisor em operação contínua. Após esse período foi possível analisar e avaliar, através do processo de observação; a eficiência e as possíveis falhas do sistema como um todo.

O sistema físico do biorreator mostrou-se adequado, tanto pelo material escolhido, o vidro, em virtude das suas características que permitem uma clara visualização do meio em fermentação propiciando observar se o sistema de agitação está sendo efetivo ou não; como também por serem fácil de limpar após o termino do experimento; quanto no volume. Contudo, o sistema de vedação utilizado nas tampas apresentou falhas permitindo o vazamento de gás. Esse problema foi solucionado na época com a aplicação de uma quantidade maior de silicone na região entre a tampa e o recipiente.

O sistema de aquecimento desenvolvido foi extremamente eficaz e superou todas as expectativas. A resistência utilizada foi capaz de aquecer o volume de água do banho, aproximadamente 7,5 litros, em um curto intervalo tempo no inicio do experimento e não apresentou nenhuma falha durante todo o procedimento. O

sistema de circulação da água, montado com a finalidade de evitar o gradiente de temperatura no banho, foi testado semanalmente, através da medição da temperatura na parte superior e inferior apresentando um excelente resultado. A maior diferença entre as temperaturas registradas foi de apenas 0,3°C. Por fim, o banho se mostrou adequado em aquecer a amostra até a temperatura estabelecida previamente no setpoint.

O torque do motor, utilizado no sistema de agitação, foi suficiente para produzir a rotação da haste mesmo com a resistência efetuada pelo meio. Todavia, apenas uma pá no final da haste de agitação comprometeu a eficiência do sistema, em virtude da demora significativa em realizar a homogeneização por completa do meio. Um intervalo de tempo menor é preferível, principalmente, quando é adicionada a solução de bicarbonato de sódio para a correção do pH e é necessário a homogeneização do meio para coletar uma nova amostra a fim de verificar o novo pH.

O sistema embarcado de controle mostrou-se adequado a sua finalidade e não apresentou nenhuma falha durante o período de teste. Contudo, no final do experimento foi possível observar que dentro dos tubos de ensaio, onde estavam inseridos os sensores de temperatura, havia um pouco de água. Isso representa uma falha no sistema de vedação e que poderia acarretar na danificação dos sensores e conseqüentemente afetaria o sistema de controle de temperatura.

IV.2 AVALIAÇÃO DO SOFTWARE SUPERVISÓRIO

Todas as funcionalidades do *software* supervisor foram testadas durante o experimento teste e se mostraram extremamente confiáveis. Vale ressaltar que a opção de escolha, no sistema de agitação, em modo automático ou manual apresentou uma funcionalidade que não foi prevista durante a sua concepção, onde o modo manual era acionado sempre que era necessário adicionar a solução básica para corrigir o pH e após a completa homogeneização do meio era novamente acionado o modo automático.

O sistema de acesso remoto também foi testado e surpreendeu. Foi possível inclusive acessar o *software* e visualizar o experimento utilizando um *smartphone*.

IV.3 PRODUÇÃO DO BIOGÁS NOS BIODIGESTORES

Na Figura 32 é apresentado um cromatograma dos compostos identificados e quantificados das amostras da produção de biogás. Os picos (em azul) são resultado de uma amostra de biogás produzida no biodigestor de controle e os picos (em vermelho) são de uma amostra de biogás produzida no biodigestor inoculado. Nesse cromatograma também pode ser observado que o biodigestor de controle teve um pico de N_2 maior se comparado com o biodigestor inoculado e que apenas o biogás gerado no biodigestor inoculado apresentou em sua composição o gás metano.

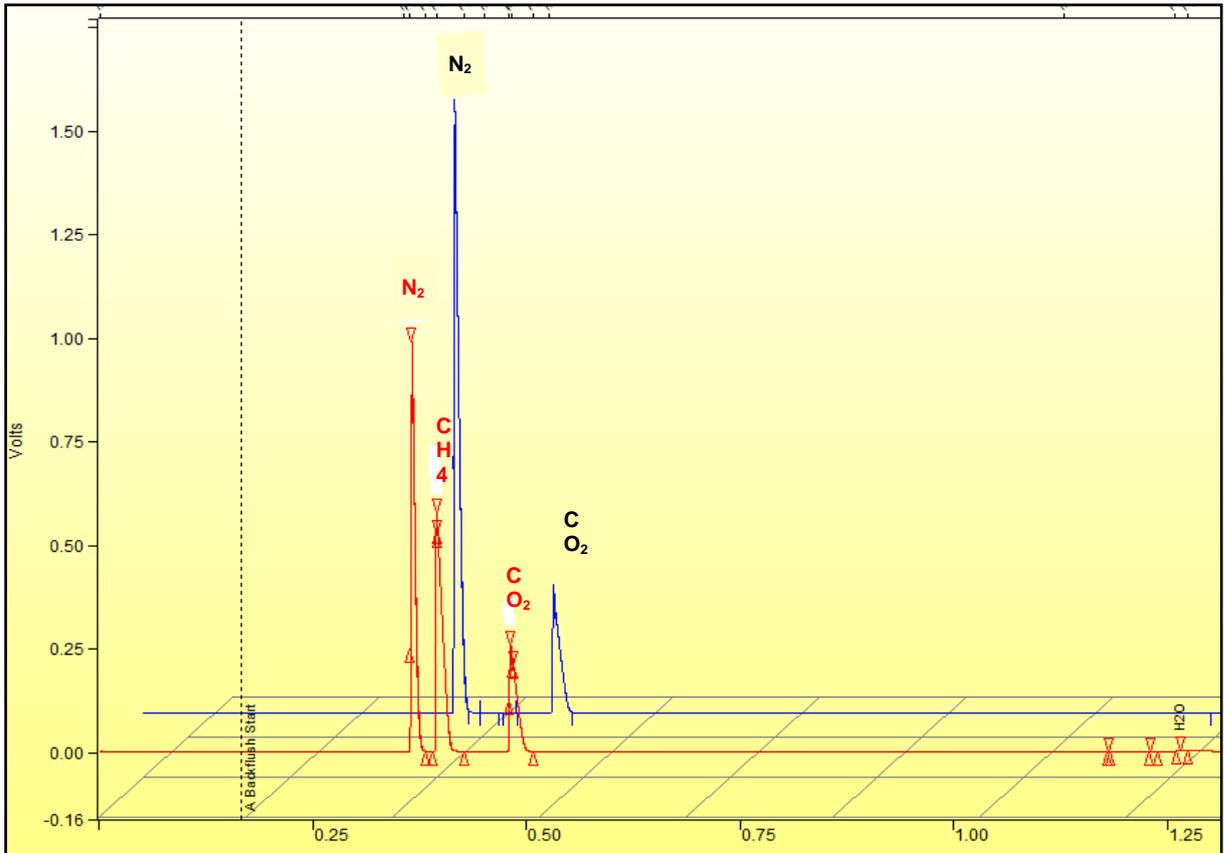


Figura 32: Cromatograma dos compostos identificados nas bolsas de Tedlar.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

V.1 CONCLUSÕES

- Pôde-se comprovar que os biodigestores construídos, além da flexibilidade de operação, são de fácil operação e limpeza.
- Os sistemas de aquecimento, agitação e circulação d'água, em geral, funcionaram com a eficiência esperada, exceto a haste de agitação.
- O sistema embarcado de controle e automação mostrou-se simples, eficaz e robusto. O controlador lógico programável desenvolvido contém a mesma arquitetura dos utilizados pela indústria e por isso possui potencial para ser utilizados em escala maiores.
- O *software* supervisor foi eficiente em todos os quesitos definidos na sua concepção: monitoramento, controle, armazenamento de dados, análise e visualização de informações do equipamento.
- A partir do experimento teste, pode-se concluir que os biodigestores e o sistema de controle e automação são eficientes e possuem potencial na produção de biogás.
- O experimento teste mostrou que apenas o biodigestor inoculado produziu metano, o que justifica um aprofundamento futuro nessa linha de pesquisa.

V.2 SUGESTÕES

- Como objetivos futuros sugere-se o desenvolvimento e implementação aos biodigestores de um sistema de monitoramento *on-line* do pH para tornar o sistema de controle mais robusto, monitorando os principais parâmetros de controle da digestão anaeróbia.
- Recomenda-se a instalação de mais uma pá, acima da existente, na haste de agitação, a fim de tornar o sistema de agitação mais eficaz.
- Testar novos tipos de resíduos e inóculos para verificar a eficiência na produção do biogás e a adaptação dos biodigestores desenvolvidos.
- Desenvolver a partir da otimização em bancada os biodigestores pilotos e em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOUN, E.; WEILAND, P. Optimierung der Monovergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch die Zugabe von Spurenelementen; Bornimer Agrartechnische Berichte nº 68, Potsdam, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. – Brasília : Aneel, 2008.

AQUINO, S. F., CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis em reatores anaeróbicos sob estresse, com causas e estratégias de controle. Rio de Janeiro: Revista Engenharia sanitária e ambiental, vol. 10, no 2, 2005.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2013: ANO BASE 2012, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro : EPE, 2013.

BARCELOS, B. R. Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos orgânicos. Dissertação de Mestrado do Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. 2009. 90p.

[BRAUN, R. Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe. Springer Verlag Via, Nova Iorque, 1982.](#)

CAMPOS, J. R. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, 1ª edição, Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CHEN, X.; ROMANO, R.; T. ZHANG, R. Anaerobic digestion of food wastes for biogás production. **Internatonal Journal of Agriculture & Biology Engineering**, v. 3, n. 4, pp. 51 –62. 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Volume 5: Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 1997.

COELHO, S. T.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Rio de Janeiro: Congresso Brasileiro de Energia, 2006.

CORREA, T.; COSTA, C. Operação, monitoramento e manutenção da Estação de Tratamento de Esgotos na Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas: Embrapa Milho Sorgo, 2007.

CORTEZ, L. A. B; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. “Biomassa para energia”. Campinas, São Paulo: Editora da UNICAMP, 2008

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). *Global Wind Statistics 2011*. Disponível em: < [http://www.gwec.net/fileadmin/ images/ News/Press/GWEC _- _Global _Wind _ Statistics_2011. pdf](http://www.gwec.net/fileadmin/images/News/Press/GWEC_-_Global_Wind_Statistics_2011.pdf)>. GWEC, 2012.

GUJER W. & ZEHNDER A.J.B. Conversion processes in anaerobic digestion. Water Science Technology, pp. 127-167. 1983.

JAIN, J. P. Comprehensive objective biology. Ed 2^a. New Dheli: Golden Bells, 2004.

JÚNIOR, J. M.; MAFRA, M. A. Curso de Controladores Lógicos Programáveis. Rio de Janeiro. [Apostila do Curso de Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual do Rio de Janeiro].

KIM H.W., HAN S.K. & SHIN HS. The optimization of food waste addition as a co-substrate in anaerobic digestion of sewage sludge. Waste Management Research, pp. 515-526. 2003.

LIEBETRAU, J.; FRIEHE, J.; WEILAND, P.; SCHREIBER, A. Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2010.

US EPA. Case Study Primer for Participant Discussion: Biodigesters and Biogas. May 14, 2012. Disponível em: http://www.epa.gov/agstar/documents/biogas_primer.pdf; acessado em: 21/03/14.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Data sheet*: PIC16F877A, 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers, 2003.

MILLER, G. Tyller; *Environmental Science*, United States of America: Thomson Learning, Inc, 2006.

MOÇO, E. A. S. Projeto de uma unidade produtora de biogás. Dissertação de Mestrado do Instituto Politécnico de Tomar da Escola Superior de Tecnologia de Tomar. Portugal, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão a Alternativa Energética. São Paulo: Editora Nobel. 93p, 1986.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar, São José dos Campos : INPE, 2006.

RALPH, M.; DONG, G. J. Environmental Microbiology. 2nd ed. New Jersey: A JOHN WILEY & SONS, INC, 2010.

RAMAGE, J; SCURLOCK, J. Biomass. In: BOYLE, G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. New York: Oxford University Press, 1996.

RENEWABLE Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) *Renewables 2011- Global Status Report*. REN21, 2011.

RUTZ D., JANSSEN R., EPP C., HELM P., GRMEK M., AGRINZ G., PRASSL H., SIOULAS K., DZENE I., IVANOV I., DIMITROVA D., GEORGIEV K., KULISIC B., FINSTERWALDER T., KÖTTNER M., VOLK S., KOLEV N., GARVANSKA S., OFITERU A., ADAMESCU M., BODESCU F., AL SEADI T. The Biogas Market in Southern and Eastern Europe: Promoting Biogas by Non-technical Activities. - Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition; Valencia, Spain; 2008.

SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução**. Agropecuária, Porto Alegre, 1983

TAVARE, W. M.; QUEIROZ FILHO, A. P. Energias renováveis : riqueza sustentável ao alcance da sociedade. Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Data sheet: MAX 232, dual driver/receiver*, 2004.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *Data sheet: LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*, 2013.

TWIDELL, J.; WEIR, A. Renewable energy resources. 2nd ed. British Library, 2006.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGA, G. Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente. Campina Grande: Epgraf, 1994.

WEILAND, P. Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland, Gölzower Fachgespräche, volume 15: Energetische Nutzung von Biogas:

Stand der Technik und Optimierungspotenzial, pp. 8 – 27, Weimar, 2000.

WEISS, W.; MAUTHNER, F. *Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2009*. Austria: IEA Solar Heating & Cooling Programme, 2011.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. The biogas handbook Science: production and applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

YU H.Q. & FANG H.H.P. Acidogenesis of dairy wastewater at various pH levels. Water Science and Technology, pp. 201-206. 2002.

ZEIKUS J.G. Microbial populations on digesters. In: Anaerobic digestion. D.A. Stafford, B.I. Wheatley and D.E. Hughes (Eds). Applied Science Publishers, London, England, pp. 61-89. 1980.