

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

CONTRIBUIÇÃO PARA UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS DE
BIOGÁS

José de Souza

Tese para obtenção do Título de Doutor
em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

CONTRIBUIÇÃO PARA UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS DE
BIOGÁS

JOSÉ DE SOUZA

Mestre em Engenharia – Tecnólogo em Automação Industrial

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2015

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. - Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini, UERGS

Prof. Dr. Alexandre Beluco – UFRGS

Prof. Dr. Nei Marçal, UERGS

Profº. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta tese a todos os que de alguma forma
contribuíram para a realização desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer por toda ajuda nesta tese.

Aos meus colegas do PPGE3M que compartilharam seus projetos, ideias e aos demais parceiros de pesquisa e publicações.

Às instituições empregadoras, FETLSVC – Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha e FACCAT - Faculdades de Taquara.

Ao pesquisador Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini por todo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1.0 INTRODUÇÃO.....	18
2.0. ESTUDO E ANÁLISE PARA DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS DE BIOGÁS	22
<u>2.1 O biogás como fonte de energia renovável</u>	23
2.1.1 Ácidos orgânicos	28
2.1.2. Importância do pH na digestão anaeróbia	29
2.1.3. Composição do biogás.....	29
2.1.4. Hidrogênio H ₂	30
2.1.5. Dióxido de carbono CO ₂	30
2.1.6. Ácido Sulfídrico H ₂ S	30
2.1.7. Amônia NH ₃	31
2.1.8. Metano CH ₄	32
2.1.9. Biofertilizante	32
2.1.10. Matéria Prima - Substrato.....	33
<u>2.2. Tecnologias para geração de biogás</u>	35
2.2.1. Teor de matéria seca dos substratos de fermentação	35
2.2.2. Tipos de alimentação dos biorreatores	36
2.2.3. Número de fases e estágios do processo de biodigestão	36
2.2.4. Etapas do processo de biodigestão	37
2.2.4.1. Etapa 1 – Mistura e fragmentação do substrato.....	38
2.2.4.2. Etapa 2 – Geração do biogás	39
2.2.4.3. Etapa 3 – Armazenamento e deposição de biofertilizantes	42
2.2.4.4. Etapa 4 – Armazenamento, purificação e utilização do biogás.....	43
<u>2.3. Biorreatores para plantas de biogás</u>	45
2.3.1. Tipos de biorreatores	45
2.3.2. Estrutura de biorreatores.....	48
<u>2.4. Materiais para biorreatores</u>	53
<u>2.5. Plantas de biogás</u>	53
2.5.1 Dimensionamento de biorreatores	55
<u>2.6. Softwares computacionais aplicados aos projetos mecânicos tridimensionais</u>	57
2.6.1. <i>Software</i> de modelagem tridimensional Autodesk Inventor Professional	58
3.0. CONTRIBUIÇÃO PARA DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS DE BIOGÁS	60
<u>3.1. Desenvolvimento de método para projeto e dimensionamento de plantas de biogás</u> ...	60

3.1.1	Passo 1 – Levantamento de dados do local de instalação da planta de biogás.....	61
3.1.2	Passo 2 – Planejamento da planta de biogás.....	61
3.1.3	Passo 3 – Dimensionamento da armazenagem do substrato e do volume dos tanques biorreatores.....	65
3.1.4	Passo 4 – Escolha de tecnologias e materiais para a planta de biogás	66
3.1.5	Passo 5 – Modelagem mecânica computacional em CAD 3D	71
3.1.6	Passo 6 – Simulação dos biorreatores com programas computacionais.....	72
4.0.	PROJETO, SIMULAÇÃO E RESULTADOS	74
4.1.	Aplicação do método para projeto e dimensionamento de plantas de biogás	74
4.1.1	Aplicação do PASSO 1 – Levantamento de dados do local de instalação da planta	74
4.1.2.	Aplicação do PASSO 2 – Planejamento da planta de biogás.....	75
4.1.3.	Aplicação do PASSO 3 – Dimensionamento da armazenagem do substrato e do volume do tanque biorreator.....	77
4.1.4.	Aplicação do PASSO 4 – Escolha de tecnologias e materiais para a planta de biogás.....	81
4.1.5.	Aplicação do PASSO 5 – Modelagem em CAD 3D do biorreator	85
4.1.5.1.	Tamanho da chapa para o tanque biorreator.....	85
4.1.5.2.	Fixação das chapas	86
4.1.5.3.	Montagem das chapas em anéis.....	87
4.1.5.4.	Sequência de montagem do biorreator e tanque para biofertilizante.....	88
4.1.5.5.	Montagem da Planta de biogás	89
4.1.6.	Aplicação do PASSO 6 – Simulação do biorreator com FEMAP NASTRAN.....	92
4.1.6.1.	Definição dos materiais para fabricação dos tanques biorreatores.....	92
4.2.6.2.	Simulação computacional do tanque biorreator	92
5.0.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	100
6.0.	CONCLUSÃO.....	104
7.0	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	106
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXO I – TANQUE BIORREATOR.....	117
	ANEXO II – GASÔMETRO DE BIOGÁS	118
	ANEXO III – MATERIAIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	119
	ANEXO IV – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS (CAE)	124
	ANEXO V – MISTURA E AGITAÇÃO DE BIORREADORES	132
	ANEXO VI – QUEIMADORES PARA PLANTAS DE BIOGÁS	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama apresentando a estrutura de desenvolvimento da pesquisa.	21
Figura 2.2 – Esquema de produção e utilização do metano a partir da biomassa.	25
Figura 2.3 – Esquema de integração de uma planta de biogás com meios produtivos e de consumo (SOUZA <i>et al.</i> , 2010).....	25
Figura 2.4 – Bactéria <i>archaea</i> (arqueia) responsável pela quebra do composto orgânico e formação do metano (PIEROBON, 2007).....	26
Figura 2.5 – Fases e grupos microbianos da digestão anaeróbia. Adaptado de (LETINGA <i>et al.</i> , 1996).....	27
Figura 2.6 – Etapas do processo de biodigestão. Fonte (JÄKEL, 2002).....	37
Figura 2.7 – (a) Fragmentador de substrato; (b) Transportador de rosca. (BAIER, 2013).	39
Figura 2.8 – Armazenagem de biofertilizante líquidos.	42
Figura 2.9 – Biorreatores de lona de PVC para tratamento de dejetos de suínos Disponível em (http://www.sansuy.com).	43
Figura 2.10 – Gasômetro para armazenagem de biogás (SCHULTE, 2013).	43
Figura 2.11 – Gasômetros integrados aos biorreatores (SCHULTE, 2013).....	44
Figura 2.12 – Biorreatores anaeróbios cilíndricos (Disponível em http://farmatic.com/en)....	45
Figura 2.13 – Biorreator de mistura completa com agitador e demais tecnologias. STEEL TEC FARM 2014. Disponível em www.steeltecheide.de).....	46
Figura 2.14 – Biorreator fluxo em pistão ou pistonado horizontal (SCHMIDT, 1998).....	46
Figura 2.15 – Biorreator de batelada do tipo garagem com detalhes do sistema (SCHULTE, 2013).....	47
Figura 2.16 – Biorreatores anaeróbios construídos em chapas de aço. (Disponível em www.weltec-biopower.de).	48
Figura 2.17 – Biorreatores anaeróbios em planta de biogás em Arneburg na Alemanha. (Disponível em www.weltec-biopower.de).....	49
Figura 2.18 – Biorreator e detalhe. Construído em chapas de aço galvanizadas. (Disponível em http://www.iit.ie).	49

Figura 2.19 – Figura em corte de biorreator de lona (BALASUBRAMANIAM <i>et al.</i> , 2008).	50
Figura 2.20 – Biorreator em planta de biogás (SOUZA, 2010).	51
Figura 2.21 – Modelagem de biorreator em chapas de aço inox (BORBA, 2013).	52
Figura 2.22 – Estação de tratamento e geração de energia (SOUZA <i>et al.</i> , 2012).	53
Figura 3.23 – Diagrama do planejamento de uma planta de biogás (Adaptado de GÖRISCH; HELM, 2006).	60
Figura 3.24 – Esquema do tipo de carregamento de substrato em fluxo contínuo.	62
Figura 3.25 – Esquema do tipo de carregamento combinado do substrato.	63
Figura 3.26 – Biorreator com aquecimento na parede e piso (SOUZA, 2010).	70
Figura 3.27 – Diagrama do planejamento de uma planta de biogás (SCHIEVANO <i>et al.</i> , 2011).	70
Figura 3.28 – Passos para projeto e dimensionamento de plantas de biogás.	73
Figura 4.29 – Localização do município de São Francisco de Paula-RS.	74
Figura 4.30 – Substrato originário de lavouras de milho transformado em silagem.	75
Figura 4.31 – Fluxo da Planta de biogás.	77
Figura 4.32 – Alimentação do substrato.	78
Figura 4.33 – Posicionamento do carregamento do substrato.	78
Figura 4.34 – Tanque armazenamento do biofertilizante.	79
Figura 4.35 – Tanque biorreator com cobertura para armazenamento do biogás.	80
Figura 4.36 – Gasômetros da planta de biogás.	81
Figura 4.37 – Sentido de fluxo da planta de biogás.	81
Figura 4.38 – Hierarquia dos níveis de automação da planta.	82
Figura 4.39 – Dispositivos atuadores e sensores.	82
Figura 4.40 – Malha de controle das moto bombas.	83
Figura 4.41 – Malha de controle de temperatura do biorreator.	84
Figura 4.42 – Modelo de chapa curvada em aço para formação dos anéis.	86
Figura 4.43 – Chapa transpassada.	86
Figura 4.44 – Detalhe com exemplo da junção da chapa.	86
Figura 4.45 – Anel formados pela união das chapas.	87
Figura 4.46 – Tanque biorreator formado pelos anéis.	87
Figura 4.47 – Sequência de fabricação da chapa.	88
Figura 4.48 – Detalhe do posicionamento do primeiro anel.	88
Figura 4.49 – Fixação do anel, parede na base para apoio.	88

Figura 4.50 – Concretagem da base.....	89
Figura 4.51 – Planta baixa com a disposição dos tanques, gasômetros filtro e queimador.....	89
Figura 4.52 – Disposição em linha dos tanques e biorreatores na planta de biogás.....	90
Figura 4.53 – Instalação de linhas de biorreatores e tanques no projeto proposto para a planta de biogás.....	90
Figura 4.54 – Gasômetros projetados da planta de biodigestão.	91
Figura 4.55 – Queimador da planta de biodigestão.	91
Figura 4.56 – Planta de biodigestão em modelagem 3D.	92
Figura 4.57 – Divisão em anéis do tanque biorreator.....	93
Figura 4.58 – Malha de elementos para simulação de um dos anéis.....	94
Figura 4.59 – Detalhe da malha de elementos sem distorção utilizados para a simulação.	94
Figura 4.60 – Simulação com chapas de 8 mm.	95
Figura 4.61 – Simulação com chapas de 4 mm.	95
Figura 4.62 – Primeira simulação de tensão com chapas de espessura variadas.....	96
Figura 4.63 – Destaque da distribuição da tensão no primeiro anel.....	96
Figura 4.64 – Segunda simulação de tensão com chapas de espessura variadas.....	97
Figura 4.65 – Distribuição da tensão no primeiro anel com espessura de 3 mm.	97
Figura 4.66 – Simulação de tensão de chapas de aço A – 36.....	98
Figura 9.67 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico AISI 316L.(SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).	119
Figura 9.68 – Estrutura tipo placa. Do autor.	129
Figura 9.69 – Estrutura tipo casca. Do autor.	130
Figura 9.70 – Misturadores. a) Naval; b) Turbina; c) Palhetas d) Aletas inclinadas. (SOUZA <i>et al.</i> , 2012).....	133
Figura 9.71 – Misturador tipo vertical de hélices. (Disponível em www.doda.com).	133
Figura 9.72 – Misturador vertical AMS de duas pás (SOUZA <i>et al.</i> , 2012).....	134
Figura 9.73 – Misturador de eixo longo (SOUZA, 2010).	135
Figura 9.74 – Misturador horizontal (POSTEL <i>et al.</i> , 2008).	136
Figura 9.75 – Misturador de recirculação de biogás (POSTEL <i>et al.</i> , 2008).	137
Figura 9.76 – Queimador de biogás. Disponível em www.hofstetter-uwat.com	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites máximos de concentração de ácidos para modelos de biodigestão.....	29
Tabela 2.2 – Propriedades dos três principais constituintes do biogás.....	30
Tabela 2.3 – Informações sobre ácido sulfídrico H ₂ S.	31
Tabela 2.4 – Classificação das técnicas de geração de biogás conforme diferentes critérios ..	35
Tabela 2.5 – Aspectos importantes do armazenamento do substrato para biodigestão.....	38
Tabela 2.6 – Produção de biogás específica e teor de metano de biomassa úmida.....	41
Tabela 2.7 – Rendimento de biogás e metano da silagem de gramíneas e silagem de milho ..	41
Tabela 2.8 – Aspectos característicos de gasômetros para plantas de biogás.	44
Tabela 3.9 – Planejamento do projeto da planta.....	54
Tabela 3.10 – Estudo de viabilidade.....	55
Tabela 3.11 – Seleção da tecnologia para geração de biogás.....	67
Tabela 3.12 – Características de biorreatores com mistura completa.	67
Tabela 3.13 – Características de biorreatores com técnica do fluxo pistonado.....	68
Tabela 3.14 – Seleção da tecnologia para geração de biogás.	69
Tabela 3.15 – Parâmetros operacionais de sistemas de aquecimento integrados.....	69
Tabela 3.16 – Dados do substrato de silagem de milho analisado.	76
Tabela 3.17 – Recebimento do substrato.....	76
Tabela 3.18 – Rendimento de biogás e metano para a silagem de milho analisada.....	80
Tabela 9.19 – Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos.....	120
Tabela 9.20 – Composição do Aço Duplex AISI 318 (Uns S 31803) (BORBA, 2013).	122
Tabela 9.21 – Composição do Aço Austenítico AISI 316 L (UNS S 31603).	122
Tabela 9.22 – Composição do Aço Carbono ASTM A-36.....	123
Tabela 9.23 – Parâmetros operacionais de misturadores de hélice com motor submersível.	134
Tabela 9.24 – Valores característicos e parâmetros operacionais de queimadores.	138

LISTA DE ABREVIATURAS

ACMS (*Automated Component Modus Synthesis*) – Módulo de Síntese Automático

AMS – Agitadores de Motor Submergível

AISI – American Iron and Steel Institute

ASME – (*American Society of Mechanical Engineers*)

CAD – Projeto Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)

CAE – Engenharia Assistida por Computador (*Computer Aided Engineering*)

CAM – Manufatura Assistida por Computador (*Computer Aided Manufacturing*)

CHP – Unidade de Energia e Calor Combinados (*Combined Heat and Power*)

GEE – Gás de Efeito Estufa

GMV – Gás Metano Veicular

CAPP – Projeto de Processo Assistido por Computador (*Computer Aided Planning Process*)

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

DA – Digestão Anaeróbia

DLG – *Deutsche Landwirtschaft Gesellschaft* – Sociedade Alemã de Agricultura

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EE – Extrato Etéreo

ENN – Extratos Não Nitrogenados

MM – Matéria Mineral

MEF – Método de Elementos Finitos

MOS – Matéria Orgânica Seca

NO_x – Número de Oxidação

NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio

ODM – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

ONG – Organização Não Governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

PB – Proteína Bruta

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PVC – Cloreto de Polivinila

RGE – Rio Grande Energia

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RFP – Reator de Fluxo Pistonado

UV – Radiação Ultravioleta

VM – Manufatura Virtual

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{CH_4} – Produção de metano (CH_4)	$[m^3/kg]$
c – Concentração da matéria orgânica	$[%]$
COV – Carga orgânica volumétrica	$[kg/m^3/d]$
ENN – Extrato não nitrogenado	$[kg]$
FB – Fibra bruta	$[g]$
f – Fator de dissociação	$[-]$
GD – Gordura digestível	$[kg]$
pKS - Constante de acidez	$[-]$
m – Quantidade introduzida de substrato por dia	$[kg/d]$
MS – Matéria seca	$[kg]$
MM – Matéria mineral	$[kg]$
MOS – Matéria Orgânica Seca	$[%]$
n – Coeficiente de segurança	$[-]$
PB – Proteína bruta	$[g]$
PD – Proteína digestível	$[g]$
P_{CH_4} – Produtividade de metano	$[m^3]$
ppm – Partes por milhão	$[-]$
pH – Potencial hidrogeniônico	$[-]$
R_{max} – Tensão máxima	$[MPa]$
TRH – Tempo de Retenção Hidráulica	$[dia]$
V_R – Volume do biorreator	$[m^3]$
V_B – Volume do substrato introduzido por dia	$[m^3/d]$

Símbolos gregos

ε – Deformação relativa	$[%]$
η_{MOS} – Taxa de degradação	$[%]$
σ – Tensão normal	$[MPa]$
σ_e – Tensão de escoamento	$[MPa]$

$\tau_{\max}$ – Máxima tensão cisalhante	[MPa]
σ_{eq} – Tensão equivalente	[MPa]

RESUMO

Apresenta-se na tese proposta uma contribuição ao método aplicado no projeto de plantas de biogás composto de seis passos. Inicia-se com o levantamento de dados do local de instalação da planta de biogás, o planejamento, dimensionamento da planta de biogás e a escolha de tecnologias. Por fim segue a modelagem mecânica computacional em CAD e por último a simulação dos tanques biorreatores com programas computacionais. A metodologia desenvolvida foi testada no projeto de uma planta de biogás para biodigestão de silagem de milho (35000 m^3 ao ano) no município de São Francisco de Paula-RS. O biorreator foi dimensionado com volume de 2100 m^3 e um volume de biogás gerado foi estimado em 18219 m^3 por dia. As simulações mecânicas computacionais foram executadas para a escolha da espessura das chapas a serem utilizadas nos tanques biorreatores. Foram dimensionados os biorreatores da planta e simulados em três materiais metálicos distintos, o aço duplex AISI 318, o aço austenítico AISI 316L e o aço carbono laminado ASTM A36. A melhor chapa verificada para o caso foi a do aço AISI 318 utilizando-se chapas de 1,5 a 3,0 mm de espessura. A diminuição da espessura reduz em 29% em massa o material empregado na fabricação dos tanques biorreatores em comparação com o uso de espessuras de chapas 3 mm em todo o tanque. Já para o aço AISI 316 L e ASTM A-36 diminui-se em 34% em massa do material a ser empregado na fabricação dos tanques biorreatores caso sejam utilizadas diferentes espessuras.

Palavras-chave: Plantas de biogás, Dimensionamento de plantas de biogás, Projeto de plantas de biogás.

ABSTRACT

This thesis presents a contribution to the method for the biogas plant project and consists of six steps. Start with the location of data collection biogas plant installation, planning, biogas plant design and the choice of technologies. Finally follows the computational mechanical modeling in CAD and simulation of bioreactor tanks with computer programs. The methodology was tested in a design of a biogas plant for digestion of corn silage (35,000 m³ per year) in São Francisco de Paula-RS. The bioreactor was sized with a volume of 2100 m³ for a volume of 18,219 m³ of biogas per day. The mechanical computer simulations were performed to select the thickness of the sheets to be used in the bioreactor tank. The bioreactor plant and were scaled simulated in three different metallic materials, the duplex steel AISI 318, AISI 316L austenitic steel and rolled carbon steel ASTM A36. The plate most suitable for the manufacturing was the AISI 318 steel with thickness of 1.5 to 3.0 mm. With the simulation we obtained a decrease of plate thickness. This generated a mass reduction of 29% of the material used in manufacturing the tank bioreactors compared to using a 3 mm plate thickness throughout the tank. For steel AISI 316L and ASTM A-36 we subtract 34% by weight of the material to be used in manufacturing the tank bioreactors where different thicknesses are used as computer simulation.

Keywords: Biogas plants, Design of biogas plants, Biogas plants Project.

1.0 INTRODUÇÃO

A tese apresentada apresenta contribuições no desenvolvimento de um método para o projeto e dimensionamento de plantas de biogás, atende o objetivo do programa de pós-graduação em Materiais e Processos para Energias Renováveis, que é a de pesquisar e desenvolver materiais e/ou processos empregados na geração de energias renováveis. A proposta ainda está alinhada com a tendência nacional e internacional de pesquisa, desenvolvimento e inovação em projetos na área de energias renováveis.

O elevado custo de uma planta de geração de biogás, na maioria dos casos, inviabiliza sua construção para a experimentação e validação do modelo a ser utilizado em escala real. Por esta razão é necessária dispor de ferramenta metodológica para o projeto e dimensionamento da planta de biogás.

O projeto e o dimensionamento de plantas de biogás na maioria dos casos são feitos de modo empírico baseado no volume disponível de substrato ou fixando o tamanho dos tanques biorreatores de forma estimada. Empresas internacionais da área mantêm em seu domínio um conhecimento baseado em suas experiências e esse conhecimento é utilizado em projetos de plantas de biogás.

A inexistência de uma metodologia para projeto e dimensionamento de plantas é um fator que restringe o desenvolvimento e a pesquisa na área de geração de biogás. Devido a isso a tese proposta apresenta contribuições para uma metodologia em projeto e dimensionamento de plantas de biogás. A metodologia proposta está dividida em seis passos e visa à facilitação do projeto e dimensionamento de plantas de biogás. O método foi aplicado em um projeto para geração de biogás com biomassa silagem de milho resultando numa configuração dedicada para este caso.

A construção de plantas de biodigestão depende de uma serie de aspectos como fatores climáticos, manutenção de biorreatores, recursos tecnológicos disponíveis, diversidade da biomassa do local de instalação de planta, materiais utilizados em biorreatores, entre outros. O projeto e o dimensionamento da produção do biogás e do seu tratamento são processos dinâmicos e adaptativos a cada situação e local (SOUZA *et al.*, 2012).

A modelagem e simulação com softwares CAD 3D de partes mecânicas é um meio de dimensionar e modelar peças, partes e conjuntos para facilitar a fabricação e montagem de plantas de biogás, mas, além disso, permite analisar uma série de aspectos envolvidos na montagem e fabricação das plantas de biogás. Algumas ferramentas computacionais fornecem soluções para o planejamento e concepção de instalações complexas, linhas de montagem e locais de trabalho (CHABLAT *et al.*, 2011).

A criação dos modelos em CAD 3D visa facilitar o projeto de plantas de biogás e a fabricação de biorreatores. A construção e a simulação do funcionamento com ferramentas mecânicas computacionais podem facilitar os projetos de tais plantas desde que adaptadas e implementadas de forma correta.

O sucesso de projetos de geração de biogás está diretamente ligado ao projeto e dimensionamento de plantas para biodigestão. A dificuldade de reproduzir todos os aspectos reais e aplicados ao sistema diminui drasticamente as chances de sucesso na produção. O mau dimensionamento dos biorreatores, a falta de recirculação do substrato, a falta do controle de temperatura e mistura do substrato pode interromper o fluxo de geração de biogás devido à sensibilidade microbiológica do processo. O controle de carregamento de substrato, da mistura, da descarga do biofertilizante e a divisão do processo de quebra do composto orgânico auxilia no desenvolvimento da fermentação do substrato. Uma das razões que levaram plantas de biogás apresentar ineficiência é o inadequado dimensionamento das plantas de biogás, como o carregamento de biorreatores, agitação de substrato e controle de temperatura dos tanques biorreatores (CUNÍ, 2011).

Considerando-se toda a mobilização nacional e internacional pela busca de fontes renováveis e alternativas de energia, bem como a reutilização de resíduos, toda pesquisa por conhecimentos relacionados ao tema é fundamental. A demanda energética nacional vem acenando junto com o crescimento industrial do país pelo aproveitamento de resíduos. Por outro lado, com o incremento do poder aquisitivo de classes sociais tendem há um acréscimo no consumo energético nas próximas décadas.

A preocupação com uma produção mais limpa e ambientalmente responsável, a diminuição e até a eliminação da produção de resíduos orgânicos vem promovendo o debate sobre alternativas no tratamento e sua reutilização.

A implantação de biorreatores anaeróbios na recuperação de esgotos e resíduos urbanos, tratamento de resíduos industriais, entre outros casos justificam a necessidade de ampla pesquisa e desenvolvimento nesta área. Não só a transformação da biomassa como também a utilização em larga escala do biogás gerado é importante para o desenvolvimento de tecnologias nas próximas décadas.

Com adequado projeto e dimensionamento de biorreatores obtêm-se uma maior quantidade e qualidade no biogás, em comparação com tanques biodigestores convencionais (NAZIR, 1991). Todos estes aspectos atribuem ao estudo do dimensionamento de plantas de biodigestão um respaldo e uma importância que se dá na contribuição para com o desenvolvimento desta tese.

Esta tese tem como objetivo investigar e aplicar conhecimento de pesquisas internacionais na criação de uma metodologia para o projeto e o dimensionamento de plantas de biogás. Os aspectos que foram explorados são:

- Armazenamento e gestão do substrato (Silagem de milho);
- Tipo de biodigestão, número de fases e estágios;
- Tipos de tanque biorreator apropriado (Horizontal, Vertical ou Tubular);
- Dimensionamento dos biorreatores (Volume interno e espessura de parede);
- Materiais para os biorreatores (Análise de tipos diferentes de chapas de aço);
- Dimensionamento do tanque de biofertilizante (Espaço para armazenar o material digerido que precisa ser estabilizado);
- Dimensionamento do gasômetro (Vaso para armazenagem do biogás gerado);
- Modelagem mecânica computacional em CAD 3D de tanques biorreatores;
- Simulação dos biorreatores para dimensionamento e escolha dos materiais.

Esta tese compõe-se de oito capítulos iniciando com uma breve introdução expondo o escopo geral da pesquisa. Sua fundamentação no capítulo 2 se dá através de uma revisão de artigos internacionais, dissertações e teses. O capítulo 3 traz os materiais e métodos. No capítulo 4 o projeto a simulação e os resultados. A discussão e análise da aplicação da metodologia no capítulo 5. A conclusão está relacionada no capítulo 6. Por último foram

colocadas sugestões de trabalhos futuros no capítulo 7 e referências no capítulo 8. Na figura 1.1 podem ser vistos os seis passos da metodologia desenvolvida nesta tese.

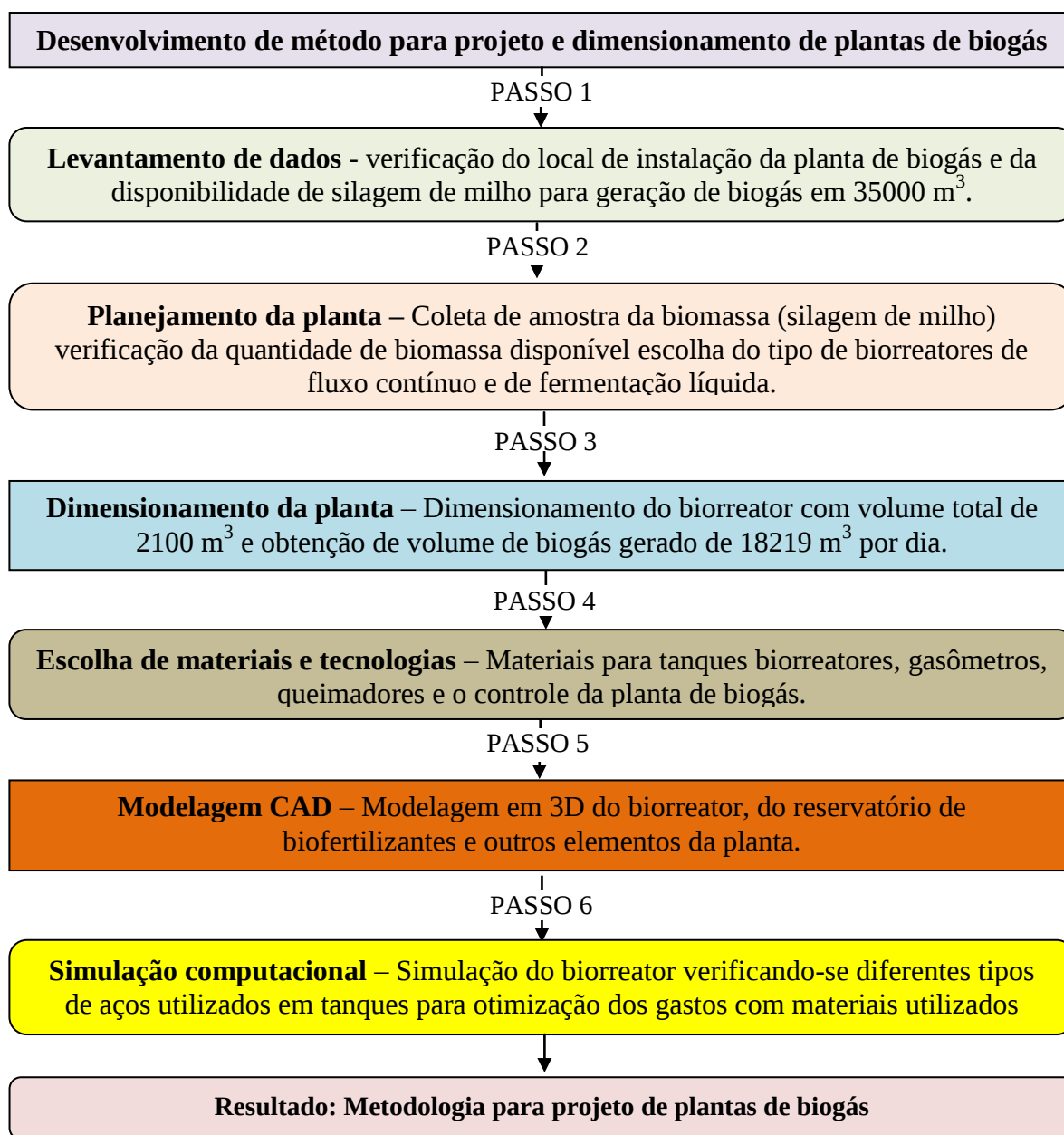


Figura 1.1 – Diagrama apresentando a estrutura de desenvolvimento da pesquisa.

2.0. ESTUDO E ANÁLISE PARA DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS DE BIOGÁS

As fontes de energias alternativas podem compor uma forma para combinar diferentes fontes de energia em sistemas de geração híbridas (BELUCO; SOUZA; KRINZINGER; 2013). O biogás é uma dessas energias renováveis cada vez mais importantes e pode ser uma forma de geração de energia que compensa outras fontes quando estão com baixa geração de energia formando um sistema híbrido. Estudos confirmaram as expectativas que os sistemas híbridos atendem melhor as demandas energéticas quando do uso de sistemas complementares (BELUCO; SOUZA; KRINZINGER; 20123).

A necessidade de aumentar a utilização da biomassa e resíduos como uma fonte de energia limpa com um aproveitamento eficiente justifica o tema deste trabalho uma vez que o Brasil tornou-se em 2009 o segundo maior país produtor de alimentos do mundo (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIO E DO ABASTECIMENTO, 2010). Possui o maior rebanho bovino e o segundo em suínos. É o maior produtor mundial de açúcar e suco de laranja. É previsto para 2014 que se torne o maior produtor mundial de soja, ultrapassando os tradicionais ‘cinco grandes’ produtores de grãos – EUA, Austrália, Canadá, Argentina e União Europeia. Em 2020, a previsão é de que as exportações agrícolas cheguem a US\$ 200 bilhões anuais. Em 2025, o Brasil pretende ser o maior produtor de alimentos disparado do mundo (FINANCIAL TIME, 2013). Acompanha essa produção a geração de grande quantidade de substratos oriundos de descartes do manejo e colheita, da industrialização, dos resíduos de animais como estrume e restos alimentares.

O biogás produzido pelos biorreatores anaeróbios pode ser produzido nas mais diversas regiões, em diferentes climas, com a utilização de diferentes substratos, de forma descentralizada (SOUZA, 2010).

A geração de biogás está sendo empregadas em muitas comunidades rurais no mundo com o objetivo de aproveitar fontes energéticas alternativas e diminuir a poluição animal e aquela oriunda da exploração agrícola. A Alemanha conta em torno de 5000 plantas de

geração de biogás, contribuindo na geração de 6% da energia elétrica utilizada neste país (DREGER, 2011).

A utilização de tecnologia de conversão da biomassa em biogás com os chamados processos bacterianos anaeróbicos é aplicada na transformação de resíduos orgânicos em energia. O biogás é um combustível gasoso composto por metano (60 a 70%) e que pode ser usado para queima direta, na geração de eletricidade, no uso como combustível automotivo e outras aplicações como a climatização (PIEROBON, 2007).

A América Latina demanda tecnologias de biogás para tratamento de esgoto municipal bruto. Tanques biorreatores têm sido instalados para o tratamento destes resíduos. A quantidade de biogás produzido na América Latina é estimada em 217 milhões de m³ por ano (NI; NAVEAU; NYNS, 2011).

A tecnologia para geração de biogás requer não apenas esforços tecnológicos, mas também apoio dos governos nacionais e organizações não governamentais (ONG) a fim de promover condições favoráveis para a exploração dessa energia (NI; NAVEAU; NYNS, 2011).

2.1 O biogás como fonte de energia renovável

O biogás é mistura gasosa que é obtida com a decomposição dos resíduos em biorreatores controlados (PICK, DIETERICH, HEINTSCHEL, 2012).

O biogás representa uma fonte de energia cada vez mais comum devido ao simples sistema de geração e facilidade de emprego direto como a queima. Pode ser produzido em áreas rurais com vasta produção de biomassa bem como em áreas urbanas com grande quantidade de biomassa produzida através da parcela orgânica dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos). Em países em vias de desenvolvimento ocorre um incremento na construção de biorreatores de biogás.

Todo material orgânico representa uma fonte em potencial e importante de combustível porque mesmo sendo resíduo poluidor pode ser transformado em energia limpa e renovável (BONFANTE, 2010).

O biogás está se tornando uma fonte cada vez mais importante de energia limpa para as zonas rurais e urbanas dos países em desenvolvimento, como pode ser observado pelo aumento da construção de plantas de biogás (OLUGASA; ODESOLA; OYEWOLA, 2014).

A produção de biogás surgiu rapidamente na Alemanha e em outros países com a expectativa de reduzir substancialmente gases de efeito estufa gerados pela ação do homem. No entanto, o gás de efeito estufa (GEE), devido à produção de energia ou vazamento de biogás pode contrariar o efeito de mitigação (MEYER-AURICH *et al.*, 2012).

A transformação para um sistema de geração de eletricidade baseada em fontes renováveis é caracterizado por uma crescente necessidade de energia de equilíbrio, ou seja, uma fonte capaz de compensar variações fornecimento de energia de outras fontes flutuantes, como a solar ou eólica. A biomassa, mais precisamente a geração de energia a partir do biogás, tem o potencial de gerar eletricidade com demanda variável. A produção de biogás orientada pela demanda é vital para compensar variações de outras fontes e isso pode ser obtido através da armazenagem do substrato (HAHN *et al.*, 2014).

Um grande desafio nos países em desenvolvimento, sobre tudo em efluentes domésticos, é diminuir o custo de tratamento dos mesmos. Em geral, a análise econômica, a simplicidade do projeto e do desempenho de plantas na geração de biogás revela que a tecnologia de biorreatores pode ser de interesse particular para o tratamento de esgoto (MENDOZA *et al.*, 2009).

Uma alternativa tecnológica diz respeito à utilização da biomassa para geração de energia, por meio da geração de biogás e fertilizantes com nível baixo de contaminação quando comparado com a eliminação inadequada de resíduos (KONRAD *et al.*, 2014).

Foi apresentada uma avaliação do potencial de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, como um instrumento para lidar com dois dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) da Organização das Nações Unidas (ONU). O ODM 1 tem como meta a erradicação da pobreza e da fome e o ODM 7 refere-se a garantir a sustentabilidade do meio ambiente. O objetivo principal da avaliação foi de demonstrar aos tomadores de decisão que a geração de biogás com resíduos sólidos pode ser um aliado para combater a miséria, a fome e a redução das emissões de CO₂ (LINO; ISMAIL; 2013).

O biogás é uma fonte de energia potencialmente importante e que pode ser produzido com diversos tipos de biomassa em unidades industriais em todo o mundo. Existe um potencial inexplorado em operações agrícolas, onde os resíduos animais são muitas vezes descartados sem aproveitamento e conversão em energia (AVCIOGLU; TURKER, 2013).

Para entendimento da conversão da biomassa em biogás foi utilizado um esquema demonstrativo de geração e utilização do metano (CH₄) conforme figura 2.2.

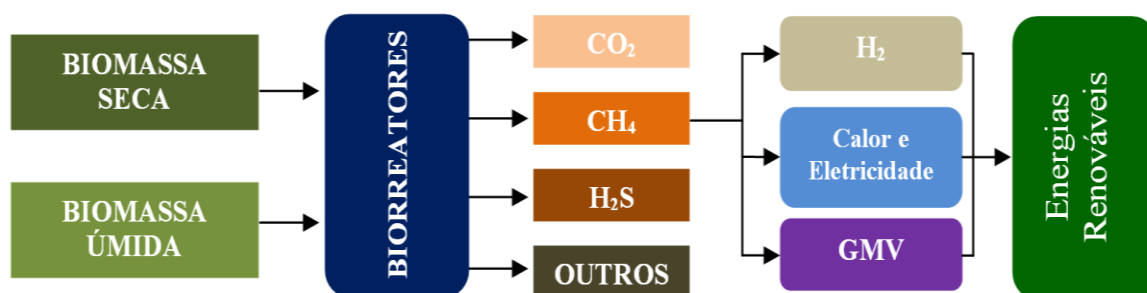


Figura 2.2 – Esquema de produção e utilização do metano a partir da biomassa. (CO₂ – Dióxido de carbono, CH₄ – Metano, H₂S – Ácido sulfídrico, H₂ – Hidrogênio, GMV – Gás Metano Veicular) (SOUZA, 2010).

A biodigestão pode ser empregada na conversão de quase todos os tipos de biomassa. Embora a biomassa seca, figura 2.3(b) geralmente oferece maior dificuldade de degradação, mesmo assim pode ser utilizada em misturas com biomassa úmida figura 2.3(a) (VATTAMPARAMBIL, 2012).

Projetos de plantas de biodigestão podem ser implantados nas mais diversas regiões, de forma descentralizada (SOUZA, 2010). Isso incentiva a produção energética local nas regiões de maior produção de biomassa, portanto, em regiões que demandam maiores recursos energéticos. Nestes casos, o combustível biogás está isento de custos com transporte aumentando a eficiência energética. Na figura 2.3 pode ser visto um esquema de integração de uma planta de biogás com meios produtivos e de consumo (SOUZA *et al.*, 2010).

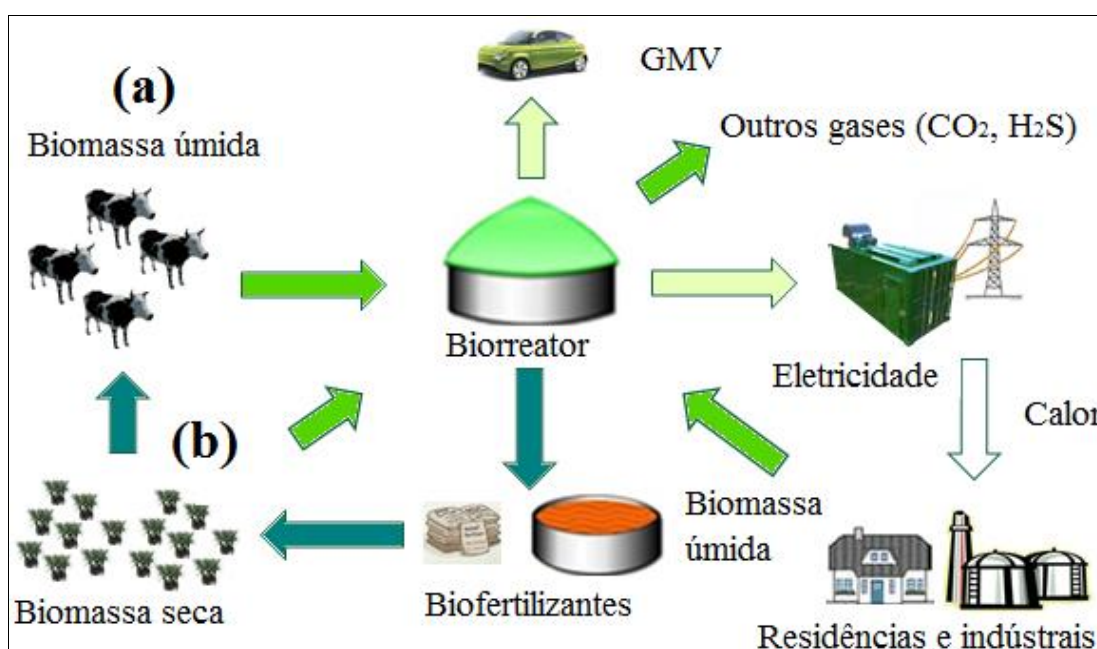


Figura 2.3 – Esquema de integração de uma planta de biogás com meios produtivos e de consumo (SOUZA *et al.*, 2010).

A necessidade de aumentar a versatilidade e utilização do biogás, de viabilizar o aproveitamento eficiente deste potencial produtivo, de diminuir custos de geração e aperfeiçoar processos exigem o emprego de ferramentas computacionais para o projeto e dimensionamento de plantas de biogás. O projeto e o dimensionamento da conversão, tratamento e produção do biogás são processos dinâmicos e adaptativos à situação local de produção de biogás (NKEMKA, 2012).

O biogás e as tecnologias relacionadas não só podem fornecer um combustível, mas também são importantes para a ampla utilização de recursos de biomassa e para o desenvolvimento da agricultura, da silvicultura e da pecuária. Evoluindo a economia agrícola, protegendo o meio ambiente ecológico, realizando a reciclagem agrícola, bem como melhorando as condições sanitárias, em áreas rurais (TARBAGHIA, 1993).

Na produção do biogás podem ser utilizados os mais diversos materiais orgânicos como resíduos da agricultura e agroindústria, podas, capins, folhas, etc. Desde os mais diversos compostos até os excrementos e fezes de animais, como também de esgotos. O desenvolvimento das bactérias tem como resultado a quebra do composto orgânico que é transformado em biogás e biofertilizante livre de bactérias nocivas e zoonoses (MURARO, 2006). Um dos principais agentes responsáveis pela quebra do composto orgânico e formação do metano é a bactéria *archea* ou arqueia que pode ser visto na figura 2.4.



Figura 2.4 – Bactéria *archea* (arqueia) responsável pela quebra do composto orgânico e formação do metano (PIEROBON, 2007).

O processo de formação do biogás ocorre em diferentes fases: a fermentação inicial ou hidrólise, seguida pela acidogênese¹, acetogênese² e finalmente pela metanização onde ocorre a formação da maior parte do metano (CONNAUGHTON *et al.*, 2006). Se o processo de degradação for conduzido de forma controlada, por meio dos biorreatores, onde são oferecidas as condições ambientais adequadas para desenvolvimento da cultura microbiana, o processo será acelerado e o volume de gás produzido será maximizado. As diferentes rotas metabólicas do processo de decomposição da matéria orgânica para a produção de metano estão ilustradas na figura 2.5.

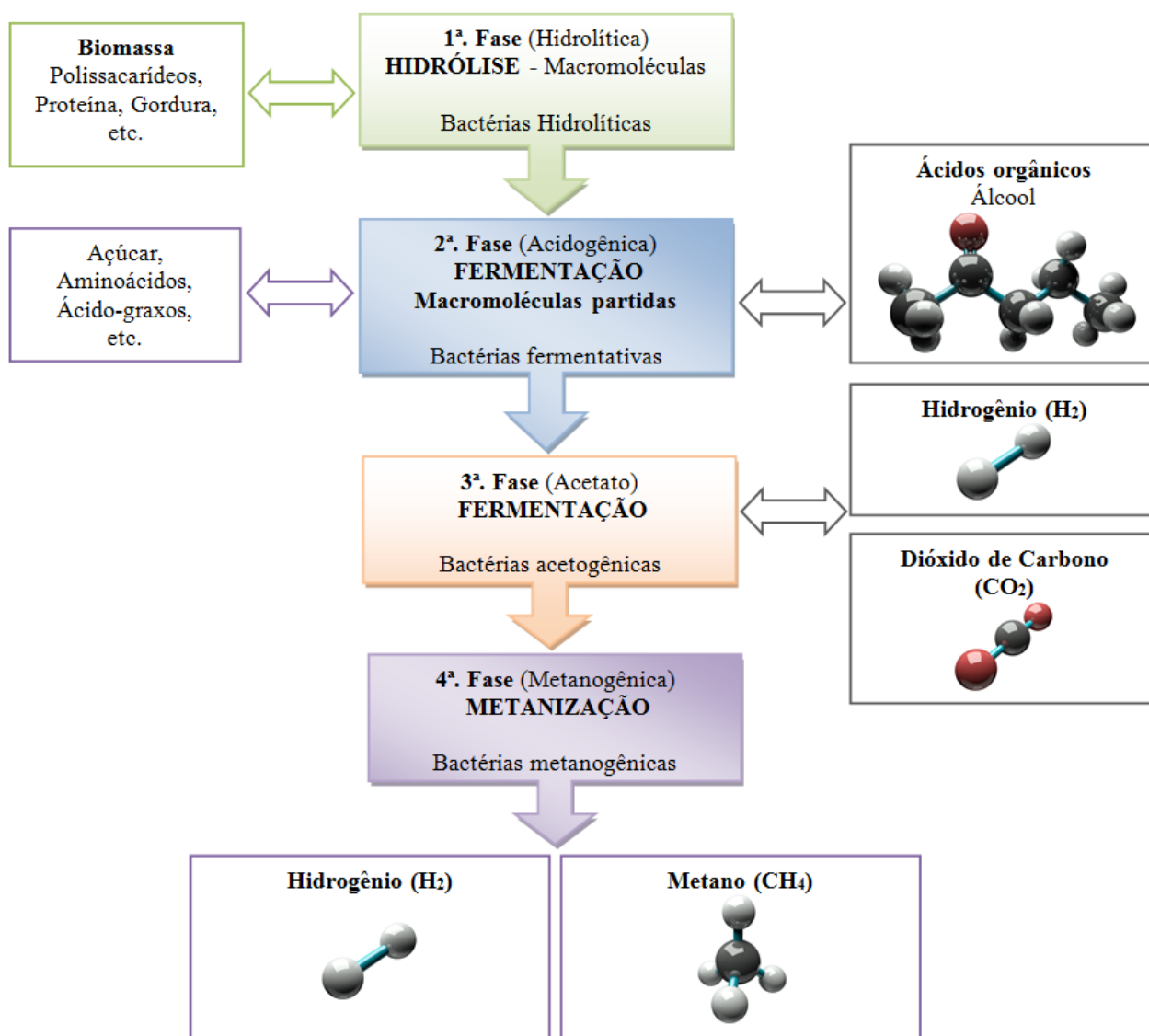


Figura 2.5 – Fases e grupos microbianos da digestão anaeróbia. Adaptado de (LETINGA *et al.*, 1996).

¹ Quebra em moléculas menores ocorrendo formação de ácidos graxos voláteis (ex. acético, propiônico, butírico, valérico) e produção de amônia, dióxido de carbono e H₂S como subprodutos.

² Processo de quebra das moléculas com formação de acetato.

2.1.1 Ácidos orgânicos

Os ácidos orgânicos, conforme visto na figura 2.5, são compostos intermediários gerados na fase de fermentação do substrato. Eles sofrem dissociação em solução aquosa dependendo do valor do pH³ do substrato. A equação 1 mostra o cálculo do Fator de Dissociação (*f*) (TIPPE, 1999).

$$f = \frac{10^{-pKS-pH}}{1 + 10^{-pKS-pH}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde *f* é o fator de dissociação [-], pKS é logaritmo da constante de acidez na base 10, o pH representa o valor do pH.

Em modo normal de operação a velocidade da acidogênese é igual à da conversão, o que mantém constante a concentração no biorreator. Se houver uma formação acentuada de ácidos e/ou a sua decomposição for inibida, os ácidos formados se acumulam e sua concentração aumenta.

Se a taxa de formação dos ácidos aumentar de forma que comprometa a capacidade dos microrganismos de decompor os ácidos em questão, a concentração continua a se elevar. Caso não se intervenha, os ácidos continuam aumentando até atingir o ponto em que a capacidade de fermentação do substrato fica totalmente comprometida e o pH diminui. Isso significa que a degradação dos ácidos fica comprometida pela elevada concentração de ácidos não dissociados (TIPPE, 1999).

Para que o processo de biodigestão se desenvolva de maneira apropriada, portanto é importante é que a concentração de ácidos permaneça constante. Para avaliar o processo em condições dinâmicas, ou seja, com oscilações nas concentrações de ácidos é necessário o uso de sistemas de controle com medição e interferência no processo baseado em modelos (KROISS, 1985).

³ Potencial Hidrogeniônico (Indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução).

A agitação do substrato pode auxiliar na decomposição dos ácidos. Alguns autores descrevem a concentração limite dos ácidos na mistura para diferentes sistemas de biodigestão. A tabela 2.1 aborda limites de concentração para alguns modelos de biorreatores.

Tabela 2.1 – Limites máximos de concentração de ácidos para modelos de biodigestão.

Limite de concentração equivalente de ácido acético (mg. L ⁻¹)	Tipo de biodigestão
30-60 Ácidos não dissociados	Biorreator contínuo de mistura completa, mesofílico;
200 Ácidos não dissociados	Biorreator perfeitamente agitado, termofílico, com biorreator hidrolítico a montante;
100-300 Ácidos totais	Biodigestão de lodo em estado normal de processo;
1.500-2.000 Ácidos totais	Biodigestão de lodo, risco de parada; reduzir alimentação ou adição de substância alcalina.

Fonte: (BISCHOFBERGER *et al.*, 2005).

2.1.2. Importância do pH na digestão anaeróbia

Os processos de digestão anaeróbia são influenciados pelo valor do pH. O valor indicado para o pH para a formação de metano é de 7 e 7,5, isso não significa que não ocorra a formação de gás acima e abaixo dessa faixa. Em sistemas de um estágio (apenas um tanque) o pH se mantém regular devido aos grupos de bactérias constituem um sistema autorregulado. O valor do pH na fase de hidrólise do sistema de dois estágios (dois tanques com separação de fases) é consideravelmente inferior, ficando na maioria dos casos entre 5 e 6,5, faixa essa ideal para as bactérias fermentativas acidogênicas (BISCHOFBERGER *et al.*, 2005).

O valor do pH é um fator importante para degradação e dissociação de importantes produtos metabólicos como a amônia, ácidos orgânicos e ácidos sulfídricos (H₂S). A capacidade de tamponamento⁴ das moléculas pode vir a regular e estabilizar o valor do pH. Se, no entanto o pH sofrer variações drásticas e se deslocar da faixa ideal, isso é geralmente um indicativo de que existem problemas que exigem medidas de correção com um sistema automatizado de dosagem para regulação do valor de pH (BISCHOFBERGER *et al.*, 2005).

2.1.3. Composição do biogás

O biogás depende do substrato de que é gerado, isso lhe confere características diferenciadas, a principal delas é a quantidade de metano produzido. Esse gás pode ser

⁴ Capacidade de um ácido é uma molécula liberar íons de hidrogênio, resultando em alta concentração desses íons em uma solução aquosa. As bases são moléculas capazes de se combinarem com esses íons e diminuir sua concentração (POWERS; HOWLEY, 2009).

utilizado como combustível e na maioria das vezes é o objetivo principal da produção do biogás. Podem ser verificadas na tabela 2.2 as informações sobre os três principais constituintes da mistura de gases, o biogás (FIGUEIREDO, 2007).

Tabela 2.2 – Propriedades dos três principais constituintes do biogás.

Propriedades	Metano (CH ₄)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Gás Sulfídrico (H ₂ S)
Massa Molecular [g]	16,04	44,01	34,08
Massa Específico [g]	0,555	1,52	1,189
Volume Específico [cm ³ /g]	1473,3	543,1	699,2
Poder Calorífico [kcal/kg]	13,26	0	4,633

Fonte: (FIGUEIREDO, 2007).

2.1.4. Hidrogênio H₂

O hidrogênio (H₂), conforme visto na figura 2.5, é um importante gás e composto intermediário na formação de metano, formado principalmente nas fases de acidogênese e na acetogênese antes de ser transformado em metano. A concentração do hidrogênio no biogás é bastante baixa, abaixo de 2% e por vezes nem é considerada na composição do biogás (LIMA, 2011). A medição, controle, captação até mesmo o estímulo da geração de hidrogênio em biorreatores é um fator que carece de maior investigação científica. Quando da produção a partir de resíduos orgânicos é chamado de Bio-Hidrogênio (BioH₂).

2.1.5. Dióxido de carbono CO₂

O dióxido de carbono visto na figura 2.5, é formado na fase de hidrólise, acidogênese e também no período de formação de metano. Ele se dissolve na água, fator explorado para sua remoção do biogás nos chamados processos de lavagem de biogás. A diminuição da taxa metano/dióxido de carbono no biogás pode estar relacionada com um aumento da acidogênese em relação à metanogênese.

2.1.6. Ácido Sulfídrico H₂S

O ácido sulfídrico (H₂S), também conhecido por sulfeto de hidrogênio, está presente em quase todos os combustíveis, sendo altamente tóxico, corrosivo e poluente. Este é um gás incolor, mais pesado do que o ar, com odor desagradável de ovos podres. Sua toxicidade pode levar a pessoa à morte se em contato direto prolongado. Além de ser encontrado no biogás,

está presente no petróleo cru, gás natural, gases vulcânicos, mananciais de águas termais, degradação de matéria orgânica por bactéria, dejetos animais e humanos. Na tabela 2.3 podem ser verificadas as propriedades do mesmo.

Tabela 2.3 – Informações sobre ácido sulfídrico H_2S .

Propriedades	Ácido Sulfídrico (H_2S)
Massa molecular [g]	34082
Aparência	Gás incolor
Densidade [g/L]	1.363
Ponto de fusão	-82,30°C (190,85K)
Ponto de ebulição	-60,28°C (212,87K)

Fonte: (Adaptado de RUTZ; RAINER, 2008).

Os processos de remoção de H_2S conhecidos comercialmente estão baseados nas seguintes tecnologias segundo (MAINIER; ROCHA, 2010):

- Absorção e regeneração com diversos tipos de aminas⁵ e soluções alcalinas;
- Oxidação com agentes oxidantes como oxigênio, cloro, hipoclorito, ozônio, peróxido de hidrogênio;
- Oxidação seletiva com catalisadores a base de vanádio e outros metais;
- Absorção e regeneração em óxidos de ferro, manganês, etc.

Outro aspecto negativo é que as bactérias metanogênicas, responsáveis pela geração de metano, são afetadas por concentrações de ácido sulfídrico superiores a 20000 ppm, o que raramente ocorre em plantas de geração de biogás agrícolas. O ácido sulfídrico é medido com sensores eletroquímicos.

2.1.7. Amônia NH_3

A concentração de amônia deve ser controlada para evitar uma redução da atividade de biodigestão da biomassa. Em concentrações elevadas o gás inibe o processo de biodigestão, isso é muito comum quando de processos de biodigestão anaeróbia de resíduos de animais. Dependendo do substrato de alimentação do biorreator são observados que a amônia pode ser encontrada no biogás em 450 ppm. Se este biogás foi utilizado em motores a gás, poderá elevar as emissões de NO_x ⁶ (STRIK; DOMNANOVICH; HOLUBAR, 2005).

⁵ As aminas são uma classe de compostos químicos orgânicos nitrogenados derivados do amoníaco (NH_3) e que resultam da substituição parcial ou total dos hidrogênios da molécula por grupos hidrocarbônicos (ELLER *et al.*, 2005).

⁶ Os (NO_x) são emitidos a partir de combustão a altas temperaturas. É um forte oxidante que reage no ar para formar o corrosivo ácido nítrico, bem como a nitratos orgânicos tóxicos.

A amônia presente no biogás usado poderá diminuir o tempo de vida útil das células de combustível. Assim, se o biogás for usado para produzir eletricidade através da queima, a concentração da amônia em biogás deve ser monitorada e controlada. É importante controlar a geração de amônia na digestão anaeróbia, contudo a interferência para controle da geração da amônia gera efeitos nocivos à atividade biodigestão anaeróbia (STRIK; DOMNANOVICH; HOLUBAR, 2005).

2.1.8. Metano CH₄

O metano (CH₄) visto na figura 2.5, é a parcela combustível mais valiosa, comercialmente, na mistura gasosa ou biogás. A formação do combustível é um bom indicativo de estabilidade da fase metanogênica. Nesta etapa dois grupos de bactérias atuam sobre os produtos gerados nas etapas anteriores. As arqueias metanogênicas acetoclásticas⁷ são responsáveis pela produção de aproximadamente 70% de metano do processo, tendo como fonte de energia os ácidos acéticos para produzir metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂) a partir dos seus metabolismos e as bactérias arqueias metanogênicas hidrogenotróficas⁸ produzem cerca de 30% do metano do processo, usam hidrogênio como fonte de energia e gás carbônico (CO₂) como receptor de elétrons, resultando maior liberação de energia e formando metano a partir dessa reação (FEDERIZZI, 2008).

2.1.9. Biofertilizante

O composto resultante no processo de geração de biogás é chamado de biofertilizante. O material orgânico é decomposto com separação dos elementos, carbono, hidrogênio oxigênio sob a forma de metano, dióxido de carbono e outros gases. Quase todos os outros elementos permanecem no composto digerido. O valor nutricional dos biofertilizantes varia com o tipo de resíduos orgânicos que são utilizados para gerá-los. O biofertilizante, dependendo da análise do solo e da cultura a ser cultivada, pode ser suficiente para atender a exigências do crescimento normal da planta (ARNOTT, 2002).

O biofertilizante sólido pode ser considerado uma espécie de húmus (matéria orgânica digerida) com grande concentração de nutrientes para plantas. Tem uma proporção de carbono

⁷ Bactérias que produzem metano a partir de ácido acético (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

⁸ Bactérias que produzem metano a partir do hidrogênio (FEDERIZZI, 2008).

a nitrogênio em torno de 13 para 1, considerado excelente para adubação. Isto significa que o composto pode ser utilizado diretamente no solo como adubo. O composto não vai competir com as culturas e organismos de decomposição no solo para o nitrogênio disponível (GIULIANO *et al.*, 2013).

Como adubo orgânico, o biofertilizante sólido desempenha um papel importante na nutrição de plantas e conservação do solo. Melhora a condição física do solo, a textura, a capacidade de retenção da umidade e arejamento. Aumenta a capacidade de tamponamento do pH do solo, se combina com compostos inorgânicos o que evita a sua perda por lixiviação e os libera para ser usado pelas plantas. Além disso, estimula o crescimento de micro-organismos, retarda a fixação irreversível de nutrientes, e ajuda evitar a erosão do solo.

O biofertilizante na forma líquida contém quantidades menos concentradas de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), que o biofertilizante sólido, mas considerando o fato de que uma grande quantidade de água é necessária para a irrigação esses nutrientes podem acumular-se e tornam-se valiosos para a fertilização.

O biofertilizante líquido promove o crescimento de grandes quantidades de algas fixadoras de nitrogênio onde quer que ele seja aplicado, isso aumenta o teor de nitrogênio o que é considerado um fator positivo na adubação. Em adição aos principais nutrientes de plantas além de NPK os biofertilizantes possuem minerais como cálcio, enxofre, magnésio e os microminerais essenciais como cobre, zinco, manganês, e outros (ARNOTT, 2002).

O processo de geração de biogás pode produzir o biofertilizante livre de parasitas e patógenos (organismos causadores de doenças). A qualidade do biofertilizante está diretamente ligada ao tempo de retenção hidráulica (TRH). Períodos de TRH superiores a 60 dias tem gerado biofertilizantes com alta qualidade quando do uso de substratos considerados críticos como os de origem animal. Para resíduos de origem vegetal como silagem de milho esse período pode ser encurtado para 25 a 30 dias (GOLKOWSKA; GREGER, 2013).

2.1.10. Matéria Prima - Substrato

Os resíduos orgânicos podem ser divididos em dois grupos: resíduos vegetais, ricos em carbono, e resíduos de animais, dejetos, ricos em nitrogênio. Os resíduos ricos em carbono contêm uma grande quantidade de celulose de carbono, que promove a geração de biogás e os

resíduos ricos em nitrogênio fornecem nutrientes que facilitam o crescimento e reprodução de bactérias anaeróbias (BISCHOFF, 2009).

Os dejetos de suínos em função de suas características químicas tem um alto potencial de geração de biogás produzindo 250 m³/t de MOS (Matéria Orgânica Seca). Geralmente os dejetos suínos se apresentam líquidos apresentam um alto teor de água, oriunda de perdas nos bebedouros e entrada de água da chuva. Para obter um esterco de melhor qualidade é necessário que o produtor procure reduzir ao máximo o desperdício de água nos seus sistemas de produção e evite a entrada da água da chuva nos sistemas de coleta e armazenamento dos dejetos. Dependendo do sistema de criação adotado, o esterco de suínos pode ser armazenado na forma líquida ou sólida. Para os dejetos de bovinos a produção de biogás é semelhante ao de suínos em volume. A silagem⁹, biomassa vegetal de milho picado, é o tipo de substrato mais utilizado em plantas de biogás na Alemanha. Isso acontece devido a sua fácil e alta produção na lavoura e boa degradação em ambiente anaeróbio (WEILAND, 2007).

A produção da silagem de milho é condicionada pelo local de cultivo e pelas condições ambientais, podendo variar entre 35 e 65 toneladas por hectare em colheita na Europa. No Brasil existe ainda a possibilidade duas colheitas anuais, em outubro e março. A cultura do milho não exige cuidado intensivo e se adapta na maioria dos lugares. Na colheita, o pé inteiro de milho é picado e armazenado em espaços para posterior carregamento nos tanques. O teor de matéria seca não pode ser inferior a 28% nem exceder 36% (WEILAND, 2007).

Silagens com teor de matéria seca superior a 36% têm um elevado teor de lignina e, portanto, menor degradabilidade. Após o depósito a silagem, componentes da planta picados são compactados e fechados com uma lona. Após um período de ensilagem de doze semanas, o substrato está pronto para ser utilizado na planta de biogás e deve ser observado um TRH entre 21 e 30 dias que aperfeiçoa a produção de biogás e garante um biofertilizante conforme normas alemãs (GOLKOWSKA; GREGER, 2013).

Além desses dois tipos tem-se os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) muito utilizados para geração de biogás com objetivo de sanear e gerar energia na Europa. No Brasil são coletadas 228.413 toneladas diárias de RSU (IBGE, 2002). Nesse período a população

⁹ Silagem é um método de conservação de forragem baseado na fermentação láctica da matéria vegetal durante a qual são produzidos ácido láctico e outros ácidos orgânicos. A matéria orgânica utilizada é em geral proveniente da colheita de plantações comerciais, usualmente leguminosas ou gramíneas, as quais são cortadas em pequenos fragmentos, os quais são armazenados em silos verticais ou trincheiras revestidas com plástico.

brasileira era de aproximadamente 170 milhões de habitantes (IBGE, 2000), a estimativa de geração per capita de RSU no Brasil estaria em torno de 1,345 kg.hab/dia. Para a conversão do RSU é utilizada a fermentação a seco em biorreatores de garagem, sistema batelada (BAIER, 2013).

2.2. Tecnologias para geração de biogás

Em plantas de biogás um aspecto relevante é a integração entre as tecnologias empregadas. Significa dizer que os componentes como biorreatores, controle de carga, mistura, acionamento e outros garantem maior funcionalidade do processo de geração de biogás. Equipamentos integrados de fornecedores únicos pressupõem testes de desempenho e avaliações do funcionamento do sistema. A aquisição de plantas inteiras implica na responsabilidade no início de operação do equipamento para o fabricante do mesmo (HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004).

A geração de biogás pode ser realizada por meio de diferentes tecnologias. As técnicas empregadas dependem de critérios que são estabelecidos pelo tipo de biodigestão a ser empregada. A tabela 2.4 apresenta uma classificação de algumas formas de geração de biogás empregadas na Alemanha.

Tabela 2.4 – Classificação das técnicas de geração de biogás conforme diferentes critérios

Critério	Tipo
Teor de matéria seca dos substratos	- biodigestão úmida; - biodigestão seca;
Tipo de alimentação	- descontínua; - semicontínua; - contínua;
Nº de fases do processo	- uma fase; - duas fases;
Temperatura do processo	- psicrofílico; - mesofílico; - termofílico.

Fonte: (Adaptado de HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004).

2.2.1. Teor de matéria seca dos substratos de fermentação

A forma como se apresentam os substratos depende do seu teor de matéria seca, isso foi considerado na classificação em dois diferentes tipos de biodigestão a de matéria seca e a

de matéria úmida conforme tabela 2.4. A biodigestão úmida é realizada com materiais que podem ser transferidos por bombeamento de um ambiente para outro o que exige certa umidade do material. Já na fermentação a seco o substrato é depositado de forma estática sem mistura ou transferência de ambientes, é apenas amontoado (Norma Alemã de Energias Renováveis (EEG), 2004). A maioria das plantas de biogás agrícolas na Alemanha adota o sistema de biodigestão úmida e se utiliza dos biorreatores circulares para a geração de biogás, pois esse modelo facilita sua manutenção (HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004).

Para o caso dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) utiliza-se na Europa o tipo de biodigestão seca, pois esse tipo facilita a manipulação de resíduos através de tratores de carga e descarga (BAIER, 2013).

2.2.2. Tipos de alimentação dos biorreatores

O tipo de alimentação, conforme tabela 2.4 da planta de biogás é a forma de como o substrato *in natura* é disponibilizado aos microrganismos. O tipo utilizado impacta diretamente na geração do biogás. Os tipos de carregamento são modo contínuo, semicontínuo e descontínuo ou em batelada. Nos tipos de carga contínua e semicontínua, faz-se a diferenciação entre a técnica de fluxo contínuo e a técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento. Diferente da alimentação contínua, na alimentação semicontínua uma carga de substrato não fermentado é introduzida no biorreator no mínimo uma vez a cada dia de trabalho (HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004).

2.2.3. Número de fases e estágios do processo de biodigestão

Os processos convencionais de biodigestão se dividem em duas fases, o de hidrólise e a fase de metanização. Quando a biodigestão é processada em um único tanque é denominado sistema monofásico. Quando as fases de hidrólise e metanização são realizadas em tanques diferentes, o sistema é denominado bifásico. Quanto ao estágio é usado para descrever o tanque do processo, independentemente da fase biológica. Assim, uma configuração composta, por exemplo, de tanque de carga, biorreator e reservatório de pós-digestão, é monofásica, mas tem três estágios. O reservatório de carga aberto não representa uma fase em

si. Já o reservatório de alimentação fechado é considerado uma fase (fase de hidrólise). Tanto o biorreator e o pós-digestor pertencem à fase de metanização. Em plantas de biogás que utilizam substratos oriundos da agricultura é indicado utilizar principalmente a variante de uma de duas fases, sendo a maioria do tipo bifásica (SCHULZ; EDER, 2006).

2.2.4. Etapas do processo de biodigestão

O sistema de funcionamento de uma planta de biogás pode ser dividido em quatro etapas de processamento:

1. Gestão dos resíduos ou substrato (Recebimento, armazenamento, tratamento, transporte e carregamento);
2. Geração de biogás em biorreatores (TRH, Mistura, Controle de temperatura, Monitoramento e aceleração microbiana);
3. Preparação, armazenagem e deposição de biofertilizantes;
4. Armazenamento, purificação e utilização do biogás.

As etapas do processo de biodigestão são ilustradas na figura 2.6.

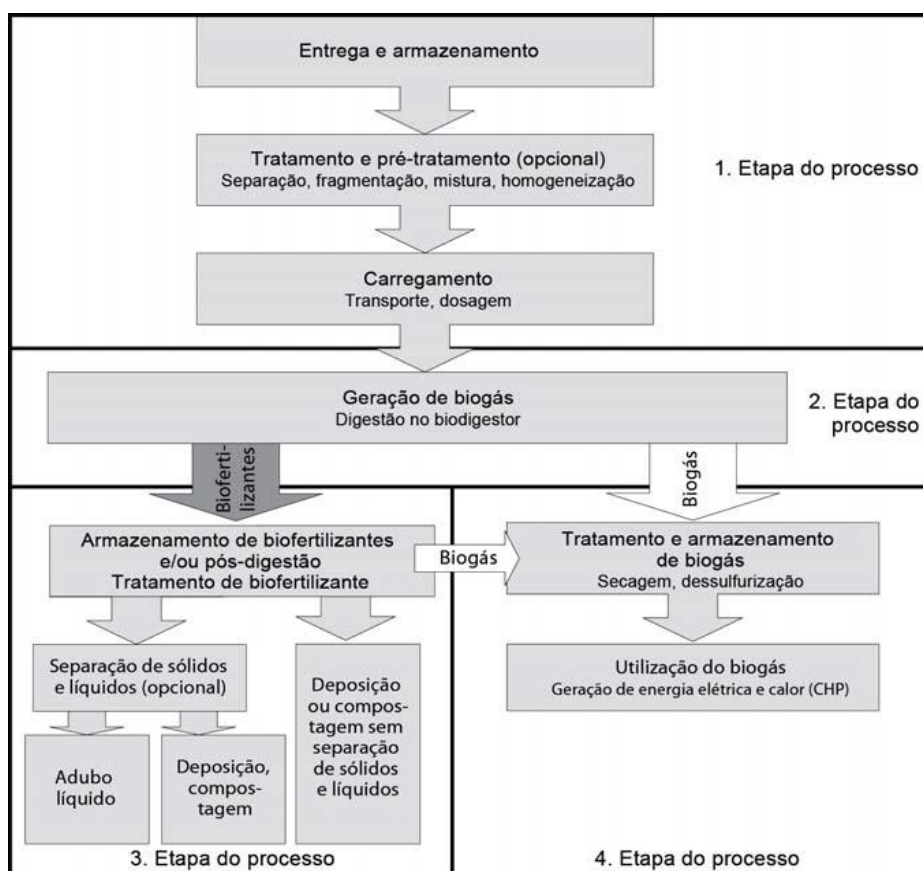


Figura 2.6 – Etapas do processo de biodigestão. Fonte (JÄKEL, 2002).

As quatro etapas do processo de biodigestão possuem interdependência, pois as mesmas dependem de uma sequência iniciada com o recebimento do substrato. A escolha da tecnologia e equipamentos a serem empregados depende principalmente do substrato a ser utilizado para geração de biogás (JÄKEL, 2002).

A quantidade de substrato é decisiva para projeto e dimensionamento de quase todos os equipamentos, biorreatores e reservatórios. A caracterização dos substratos (teor de matéria seca, estrutura, origem, etc.) é imprescindível para a escolha da tecnologia que será utilizada no projeto. Dependendo da composição do substrato, pode ser necessário separar, misturar com matéria seca, triturar ou misturar com adição de água para permitir seu bombeamento em sistemas contínuos. Outro aspecto relevante é a higienização e até mesmo a esterilização em casos de tratamento de resíduos de RSU contaminados (JÄKEL, 2002).

2.2.4.1. Etapa 1 – Mistura e fragmentação do substrato

Conforme HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG (2004) é essencial manter uma quantidade necessária de substrato para alimentar a planta de biogás por no mínimo dois dias. Na tabela 2.5 podem ser observados aspectos importantes a serem considerados no armazenamento do substrato.

Tabela 2.5 – Aspectos importantes do armazenamento do substrato para biodigestão.

Dimensionamento	• considerar volume de substrato, capacidade da planta de biogás, compensação da irregularidade das entregas, contratos de fornecimento de substratos externos, possíveis quedas operacionais;
Cuidados especiais	• evitar processos de decomposição que possam diminuir a produção de gás; • evitar a mistura de substratos inócuos com substratos contaminados; • adotar medidas construtivas para reduzir os odores; • evitar vazamentos no solo e nas águas;
Formatos construtivos	• depósitos para substratos sólidos de uso comum na agricultura, como silos trincheira, verticais, estufas recobertas por lona de PVC, silagem em bolsas de plástico, áreas de armazenamento abertas ou com telhado (p. ex. armazéns de esterco) e fossas/covas; • depósitos para substratos líquidos de uso comum na agricultura, tais como fossas e tanques de carga.

Fonte: (Adaptado de HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004).

A redução do substrato, ou fragmentação aumenta sua superfície o que auxilia o processo de biodigestão. Na figura 2.7 podem ser vistos tecnologias para fragmentação e transporte do substrato em plantas de biogás.



Figura 2.7 – (a) Fragmentador de substrato; (b) Transportador de rosca. (BAIER, 2013).

2.2.4.2. Etapa 2 – Geração do biogás

O volume de biogás ou metano gerado é indicado em metro cúbico (m^3). Conforme visto na figura 2.6 a etapa 2 do processo é responsável pela geração do biogás. Os tipos de biodigestão já foram discutidos no tópico 2.2 Tecnologias para produção de biogás.

Para cálculo de desempenho da planta de biogás, dimensionamento de gasômetros, sistemas de queima e conversão biogás/eletricidade é necessário calcular a produtividade de metano (P_{CH_4}) do biorreator. A produtividade de metano no biorreator (P_{CH_4}) pode ser definida pelo quociente entre a produção diária de metano (V_{CH_4}) e o volume do biorreator (V_R), indicando portanto a sua eficiência (PREIBLER, 2009).

A equação 2 mostra o cálculo da produtividade de metano.

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_R} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

P_{CH_4} – Produtividade de metano [-];

V_{CH_4} – Volume de metano gerado por dia [m^3];

V_R – Volume do tanque biorreator [m^3].

A produção de metano (A_{CH_4}) expressa a produção de biogás em relação à quantidade de substrato introduzido no biorreator. O rendimento pode se referir tanto à produção de biogás ($A_{Biogás}$) quanto à produção de metano (A_{CH_4}). É determinado pelo quociente entre o volume de biogás produzido e a quantidade de matéria orgânica introduzida, sendo expressa em (m^3). O valor do rendimento reflete a eficiência da produção de biogás e metano a partir do substrato utilizado. A equação 3 demonstra o cálculo de rendimento.

$$A_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{mMOS} = [m^3 / kg] \quad \text{Equação (3)}$$

Onde A_{CH_4} representa a produção de metano [m^3/kg] o V_{CH_4} representa o volume de metano gerado [m^3] e o mMOS é a matéria orgânica seca introduzida diariamente no biorreator [kg].

A taxa de degradação pode ser determinada com análise da Matéria Orgânica Seca (MOS) ou na Demanda Química de Oxigênio (DQO). Em virtude dos processos analíticos predominantes na prática, recomenda-se a determinação da taxa de degradação com base na MOS (BISCHOFF, 2009).

A produção de biogás a partir dos mais diversos substratos pode ser estimada pelo coeficiente de digestão, uma vez que existem paralelos entre os processos de decomposição em uma planta de biogás e a biodigestão de animais ruminantes (KLOSS, 1986). Os coeficientes das biomassas dedicadas podem ser vistos na tabela 2.6 e foram obtidas da DLG (*Deutsche Landwirtschaft Gesellschaft* – Sociedade Alemã de Agricultura).

Através da DLG podem ser obtidos valores dos teores de matéria mineral (MM), fibra bruta (FB), extrato etéreo (EE), proteína bruta (PB) e extratos não nitrogenados (ENN) com base na matéria seca (MS). A soma das frações de FB e ENN equivale ao conteúdo de carboidratos. A produção de biogás de diferentes grupos de substâncias pode ser vista na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Produção de biogás específica e teor de metano de biomassa úmida.

Grupos de substâncias	Produção de biogás [L/kg MOS]	Teor de metano [% em volume]
Proteína digestível (PD)	700	71
Gordura digestível (GD)	1.250	68
Carboidratos digestíveis (FB + ENN)	790	50

Fonte: (Adaptado de BASERGA, 1998).

Cada um dos grupos se caracteriza por uma produção de biogás específica e um teor de metano próprio, que resultam das diferentes frações relativas de carbono conforme a tabela 2.6 (BASERGA, 1998).

Um exemplo de grupos de substâncias com diferentes rendimentos de biogás e metano para gramíneas pode ser vista na tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Rendimento de biogás e metano da silagem de gramíneas e silagem de milho

	Produção de biogás [l/kg MOS]	Teor de metano [% em volume]
Proteína digestível (PD)	48,6	34,5
Gordura digestível (GD)	34,5	34,5
Carboidratos digestíveis (FB + ENN)	436,6	218,3
Total (por kg MOS)	517,1	274,5

Fonte: (Do autor utilizando o modelo de BASERGA, 1998 – Tabela 2.6).

A partir destes dados é possível verificar os rendimentos de metano e biogás, no entanto os dados podem variar consideravelmente e segundo o autor não existe método que, do ponto de vista estatístico, seja totalmente confiável a ponto de permitir o cálculo exato do rendimento de biogás e metano. O método, no entanto, permite comparar substratos entre si e fornecer dados iniciais para projetos de dimensionamento.

O rendimento de biogás que se pode ser atingido depende de outros fatores como o tempo de retenção hidráulica (TRH) dos substratos nos biorreatores, o teor de matéria seca, a concentração de ácidos graxos e eventuais substâncias inibidoras.

2.2.4.3. Etapa 3 – Armazenamento e deposição de biofertilizantes

Conforme figura 2.6 a etapa 3 do processo é responsável pela armazenagem, preparação e deposição de biofertilizantes. A gestão de biofertilizantes se dá em dois casos, para os biofertilizantes líquidos e para os biofertilizantes sólidos. Para os líquidos o armazenamento pode se dar em lagoas, tanques e reservatórios cilíndricos ou retangulares (fundos ou rasos). Geralmente são usados tanques circulares verticais de concreto e aço inoxidável/ aço com cobertura cerâmica. Os reservatórios podem ser dotados de um agitador para homogeneizar os biofertilizantes antes da retirada. Os tanques de armazenamento podem ser equipados com uma cobertura polimérica. Essa cobertura pode ser impermeável a gases. A vantagem da utilização da cobertura é a redução das emissões de odores e perdas de nutrientes durante a armazenagem. Coberturas impermeáveis a gás, como os tetos de lona oferecem, inclusive, a possibilidade de usar o potencial restante de produção de gás proporcionado pelos biofertilizantes e podem ser também utilizadas como gasômetro.

Na figura 2.8 podem ser vistos tanques para armazenagem de biofertilizante líquido. Na figura 2.8 (a) tem-se uma cobertura permeável a gás, 2.8 (b) e 2.8 (c) tanques com função apenas de armazenagem do biofertilizante, em chapas metálicas e concreto respectivamente (SCHULTE, 2013).



Figura 2.8 – Armazenagem de biofertilizante líquidos.

Além destas tecnologias no Brasil ainda são muito utilizadas lagoas de estabilização e armazenamento, são tanques cavados no solo e recobertos ou não com lona, tendo em geral forma retangular. A maioria dessas lagoas são abertas em sua parte superior, sendo a minoria coberta com lona para a redução de emissões. Na figura 2.9 pode ser visto uma dessas lagoas de armazenagem e estabilização de biofertilizante líquido.



Figura 2.9 – Biorreatores de lona de PVC para tratamento de dejetos de suínos Disponível em (<http://www.sansuy.com>).

2.2.4.4. Etapa 4 – Armazenamento, purificação e utilização do biogás

Conforme figura 2.6 a etapa 3 do processo é responsável pela armazenamento, purificação e utilização do biogás. A geração de biogás apresenta oscilações, aumento e diminuição no volume gerado. Devido a isso e de um **consumo** constante é necessário que o biogás seja armazenado em locais adequados.

Os gasômetros precisam ser impermeáveis a gases, resistentes à pressão, raios UV, temperatura, intempéries e à ação das substâncias em contato. Por razões de segurança, os gasômetros devem estar equipados com mecanismos de segurança contra pressão positivas e negativas, visando evitar que a pressão interna se altere para níveis não admissíveis. Na figura 2.10 pode ser visto gasômetro para armazenagem de biogás.



Figura 2.10 – Gasômetro para armazenagem de biogás (SCHULTE, 2013).

Os gasômetros podem ser de baixa, média e alta pressão. O mais comum é a variante de baixa pressão com faixa de pressão de 0,5 a 30 mBar. Os gasômetros de baixa pressão são compostos de lonas impermeáveis que devem atender aos requisitos de segurança. Gasômetros de lona de PVC flexível são utilizados como cúpulas sobre os biorreatores (integrados) ou como depósitos de gás instalados externamente (POSTEL *et al.*, 2008). Na figura 2.11 podem ser vistos gasômetros integrados aos biorreatores para biogás.



Figura 2.11 – Gasômetros integrados aos biorreatores (SCHULTE, 2013).

As cúpulas flexíveis são usadas quando o próprio biorreator inicia a geração do biogás, este permanecendo na parte superior do biorreator concentrando-se devido a sua menor densidade. O reservatório de biofertilizantes também pode ser utilizado com a função de gasômetro. A lona é fixada na borda superior do reservatório de forma a garantir a impermeabilidade a gases. No reservatório, é montada uma armação de suporte sobre a qual a lona se apoia quando o gasômetro se encontra vazio. A lona se infla conforme o nível de enchimento do gasômetro (JÄKEL, 2008). Alguns aspectos característicos de gasômetros são abordados na tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Aspectos característicos de gasômetros para plantas de biogás.

Dimensionamento	• Gasômetros para grandes volumes de até 2.000 m³; • Pressão: 0,5-30 mBar (Baixa pressão); • Permeabilidade da lona: aceitável entre 0,1 – 0,5% de perda de biogás por dia; • Materiais: PVC (não muito duráveis), borracha butílica, polietileno e polipropileno;
Vantagens	• Armazenamento de grandes volumes de biogás; • A concentração de metano no biogás pode ser medida no gasômetro do biodigestor;
Desvantagens	• Exigem, possivelmente, espaço maior na planta de biogás; • Conforme o caso pode exigir uma edificação adicional;
Particularidades	• O uso de pesos sobre a lona flexível permite aumentar a pressão; • Quando instalados em edifícios, é necessário assegurar a boa ventilação do local para evitar misturas de gás explosivas;
Formas construtivas	• Balão de PVC fixo e separado; • Balão de PVC abrigado em edifício separado ou tanque; • Balão de PVC em teto intermediário acima do biorreator; • Armazém com lona de membrana dupla.

Fonte: (Adaptado de JÄKEL, 2008).

2.3. Biorreatores para plantas de biogás

2.3.1. Tipos de biorreatores

Os biorreatores anaeróbios mais comuns usados em larga escala são construídos de metal, chapas de aço, concreto e lona plástica geralmente PEAD (Polietileno de Alta Densidade). O modelo de biorreator depende do processo de fermentação adotado. Na figura 2.12 pode ser observado um modelo cilíndrico em chapa de aço em posição vertical da empresa FARMATIC no Japão.



Figura 2.12 – Biorreatores anaeróbios cilíndricos (Disponível em <http://farmatic.com/en>).

As plantas de biogás, principalmente os modelos contínuos com biorreatores cilíndricos otimizados na Europa e EUA se utilizam de mistura completa em posição vertical. Na Alemanha, em 2009, esse modelo totalizava cerca de 90% do total das plantas de biogás (OECHSNER; LEMMER, 2009). Estes biorreatores são dotados de reservatório com fundo rígido de concreto e paredes de aço, concreto armado ou ainda materiais especiais como polímeros rígidos, PEAD (Polietileno de alta densidade). Pode ser parcial ou totalmente enterrado ou ser posicionado completamente sobre o solo. Na figura 2.13 pode-se observar o aspecto construtivo deste modelo (STEEL TEC FARM 2014).

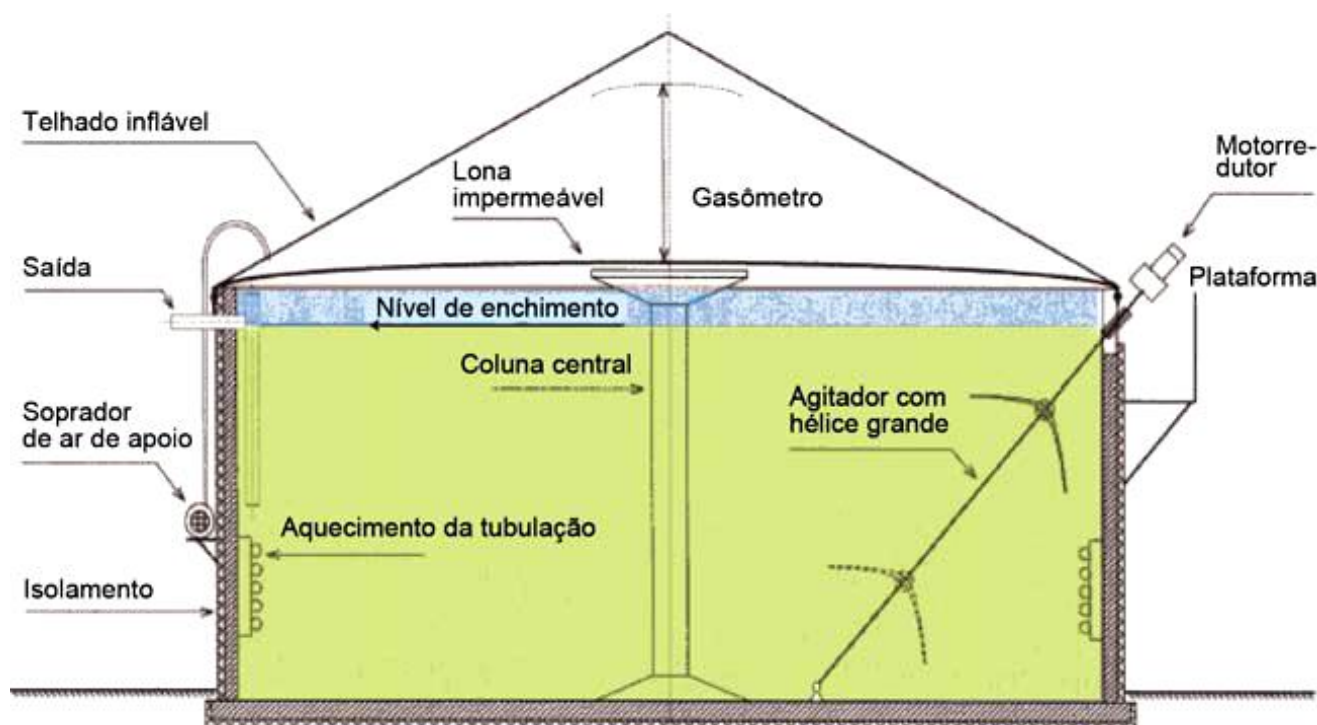


Figura 2.13 – Biorreator de mistura completa com agitador e demais tecnologias. STEEL TEC FARM 2014. Disponível em www.steeltecheide.de)

Biorreatores horizontais como os de fluxo em pistão ou pistonado RFP¹⁰ são utilizados em locais de clima frio e com biodigestão a seco ou úmida. Na figura 2.14 pode ser visto um modelo de Reator Fluxo em Pistonado (RFP).



Figura 2.14 – Biorreator fluxo em pistão ou pistonado horizontal (SCHMIDT, 1998).

¹⁰ O modelo de biorreator de fluxo em pistão ou reator de fluxo pistonado (RFP) também é usado para descrever reações químicas em sistemas de fluxo contínuo, sendo usado para prever o comportamento de reatores químicos, de modo que as variáveis principais do reator, tais como as dimensões do reator, possam ser estimadas. RFPs são também algumas vezes chamados reatores tubulares contínuos (RTC) (SCHMIDT, 1998).

Os biorreatores horizontais podem ainda ser conectados em paralelo, visando maiores produções de biogás ou biofertilizante.

No processamento em batelada, os biorreatores são carregados com substrato e fechados hermeticamente. Os microrganismos do inoculo misturado ao substrato fresco aquecem o substrato na primeira fase, na qual é adicionado ar ao biorreator. Isso provoca a liberação de calor associada ao processo de compostagem. Depois de atingida a temperatura ideal, o fornecimento de ar é desligado. Após o consumo do oxigênio aplicado, entram em atividade os microrganismos que, como na digestão úmida, começam a converter a biomassa em biogás. O biogás é capturado na tubulação coletora de gás e transferido para o local de geração de energia (SCHULZ; EDER, 2006).

Na figura 2.15 pode ser visto o sistema de biorreação em batelada do tipo garagem com detalhes do sistema.

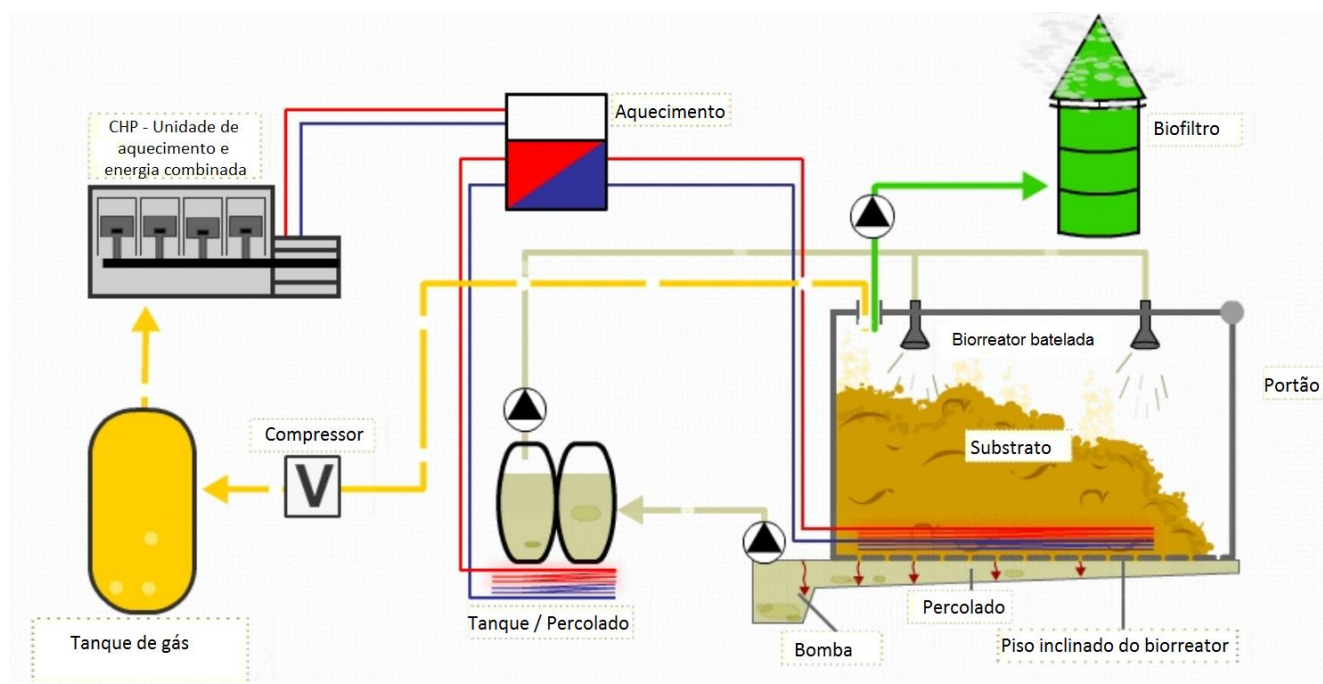


Figura 2.15 – Biorreator de batelada do tipo garagem com detalhes do sistema (SCHULTE, 2013).

O processamento do substrato no modelo batelada se destina a plantas de biogás do tipo container e a biorreatores de garagem. Biorreatores de garagem em concreto armado têm ampla aplicação na fermentação de RSU e outros substratos que podem ser despejados com máquinas carregadeiras (GOLKOWSKA; GREGER, 2013).

Esse tipo de biorreator pode ser conectado em série com 2 a 8 unidades. Com essa configuração é possível atingir uma produção semicontínua de gás alternando-se o carregamento e a descarga intercalada. Os biorreatores são conectados a um reservatório de percolado, o qual coleta o líquido drenado dos biorreatores e o pulveriza por meio de bomba sobre o material em fermentação no biorreator a fim de inoculá-lo conforme figura 2.15. Os odores são recuperados através de um filtro biológico, o biofiltro. O gás é captado e pressurizado para queima em CHP (*Combined Heat and Power*) unidade de energia e calor combinados.

2.3.2. Estrutura de biorreatores

Os biorreatores podem ser construídos em chapas com superfícies cobertas com uma camada cerâmica conhecida por *GLASS-FUSED-TO-STEEL*. A técnica de revestimento, *GLASS-FUSED-TO-STEEL*, consiste na aplicação da camada vítrea nas duas faces, interna e externa, da chapa de aço. É um material altamente resistente a corrosão, especialmente contra a biocorrosão causada pelas bactérias sulfato redutoras. Na figura 2.16 pode ser visto um exemplo de biodigestores com estrutura em chapas com cobertura cerâmica (www.weltec-biopower.de).



Figura 2.16 – Biorreatores anaeróbios construídos em chapas de aço. (Disponível em www.weltec-biopower.de).

Na figura 2.17 pode ser visto uma planta com capacidade para produzir cerca de seis milhões de metros cúbicos de biometano por ano.



Figura 2.17 – Biorreatores anaeróbios em planta de biogás em Arneburg na Alemanha. (Disponível em www.weltec-biopower.de).

O biogás é produzido na planta de Arneburg, com quatro biorreatores pra fermentação e seis unidades de biorreatores para armazenagem de substrato. A planta iniciou sua operação em dezembro de 2012. A quantidade de biometano produzido pela refinaria de Arneburg é suficiente para fornecer calor e energia necessária por cerca de 5000 residências ou 4200 carros com uma quilometragem de cerca de 18000 quilômetros por ano (WELTEC BIOPOWER, 2012). Na figura 2.18 pode ser visto parte de biorreator em chapas de aço galvanizado.



Figura 2.18 – Biorreator e detalhe. Construído em chapas de aço galvanizadas. (Disponível em <http://www.iit.ie>).

O biorreator da figura 2.18 (a) é fabricado em aço galvanizado e unido com parafusos seccionais, conforme detalhe figura 2.18 (b). Os tanques são facilmente transportáveis para o lugar onde são montados, ocupam áreas de armazenagem mínimos no local antes de serem montados.

A construção de cada biorreator cilíndricos em chapas de aço passam pelas seguintes etapas:

- Nivelamento do solo;
- Instalação de concreto fundação, *ringbeam*¹¹.
- Construção do anel de topo do tanque;
- Instalação de telhado de tanque, se necessário;
- A construção de cada um dos painéis de anel subsequente do tanque;
- Montagem de conexões de tanque e auxiliares, ou seja, tubulações, aberturas de inspeção de segurança de acesso, conexões de flange;
- Instalação de piso e vedação.

Biorreatores de lona são muito usados no tratamento de dejetos de criadores de suínos, pois tem uma estrutura simples, conforme figura 2.19.

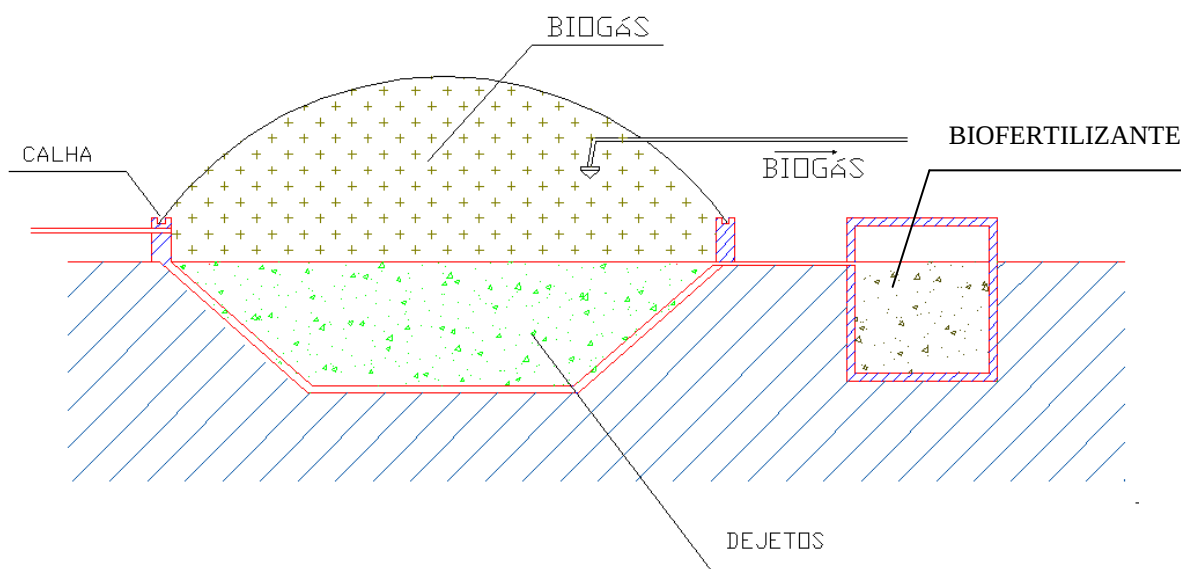


Figura 2.19 – Figura em corte de biorreator de lona (BALASUBRAMANIYAM *et al.*, 2008).

¹¹ *Ringbeam* é um método de construção onde são usados anéis com apoio horizontal na construção que une as paredes para maior resistência. Geralmente é feita de madeira ou concreto endurecido e colocados ao longo dos topos das paredes, e proporciona resistência à tração, em especial nas juntas entre paredes.

Os biorreatores de lona possuem uma estrutura de custo mais acessível, devido ao processo de montagem ser mais simples. A montagem geralmente feita por termofusão¹², onde as partes são sobrepostas e aquecidas unindo o material. Os modelos de plantas de tecnologia avançada possuem agitação e aquecimento da matéria orgânica. Estes biorreatores podem ser construídos com dois ou mais tanques biorreatores ligados separando as fases de hidrólise das fases finais do processo de metanogênese e estabilização. Um exemplo pode ser visualizado na figura 2.20.

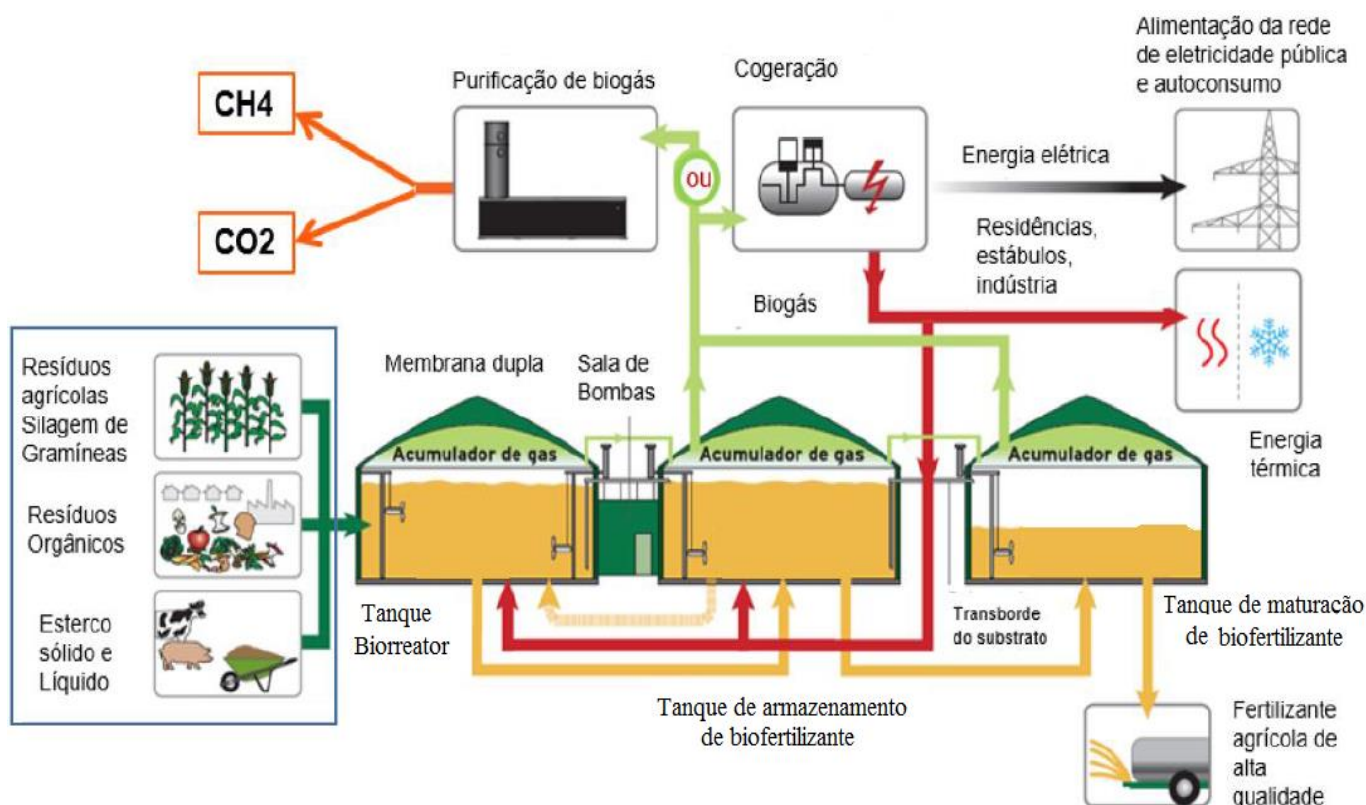


Figura 2.20 – Biorreator em planta de biogás (SOUZA, 2010).

Em todos os modelos a parte principal compõe-se do tanque, o biorreator. Este é responsável pela degradação do substrato. Estes tanques são dimensionados em função da carga orgânica, ou seja, da quantidade de material orgânico que se pretende tratar. Assim sendo, o tamanho ou capacidade do biodigestor depende da quantidade *versus* Tempo de Retenção Hidráulica – TRH. O TRH é o período que o substrato permanece armazenado no biorreator, neste período deve ficar encerrado sem a presença de oxigênio até ser digerido pelas bactérias metanogênicas, já visto na figura 2.4 (ENSINAS, 2003).

¹² Sistema de emenda por aquecimento por resistência das pontas da lona. Proporciona emendas com resistência de rompimento e estanqueidade igual ou superior ao do material.

Do ponto de vista econômico, as plantas de biodigestão necessitam de biorreatores fáceis de fabricar, montar e manter sua manutenção. Biorreatores de chapas metálicas em aço inox, AISI 316 e 316L, são utilizadas para estes tipos avançados com múltiplas tubulações, entradas e saídas, misturadores, aquecedores, etc. Chapas metálicas apresentam boas propriedades mecânicas como ductilidade e tenacidade, isto permite numerosas operações de conformação à frio o que facilita na fabricação dos biorreatores. É importante destacar o uso do aço inox austenítico devido sua resistência à oxidação, tais como corrosão uniforme, corrosão por pites, corrosão intragranular, corrosão “risco de faca”, corrosão sob tensão, corrosão em frestas e erosão-cavitação, os quais podem ocorrer simultânea e frequentemente de maneira combinada. Com estas características, as chapas de aço inox, como a AISI 316 são utilizadas para aplicação em sistemas de biodigestão, onde devido à fermentação anaeróbia há ocorrência de formação de ácidos e a evolução de colônias bacteriológicas. Na figura 2.21 podemos ver um pequeno biorreator de bancada projetado em chapas de aço AISI 316L.



Figura 2.21 – Modelagem de biorreator em chapas de aço inox (BORBA, 2013).

Os biorreatores em ligas de aço inox possuem vantagens por oferecerem boa resistência contra agentes corrosivos. A estrutura possui condições apropriadas para a instalação de agitadores ou misturadores, divisórias, mecanismos de aquecimento e controle

de temperatura. O formato rígido e fixo é propício para revestimentos térmicos e protetores. Esse sistema possui aspectos favoráveis para a instalação de válvulas para o controle da entrada e saída do substrato e biogás (IGLESIAS *et al.*, 1999).

2.4. Materiais para biorreatores

A maior parte dos biorreatores são construídos em aço devido a durabilidade desse material. Os principais tipos destes materiais ferrosos que podem ser divididos quanto a sua microestrutura em cinco grupos: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação. Os aços utilizados nas simulações desta tese são os do grupo austeníticos.

2.5. Plantas de biogás

Plantas de geração de biogás também podem ser usadas como estações de tratamento e triagem de resíduos. A separação da parcela inorgânica dos resíduos é necessária para a degradação posterior em biorreatores. A utilização do biogás depende do tratamento e do acondicionamento do mesmo. A figura 2.22 mostra uma estação de tratamento e geração de biogás.

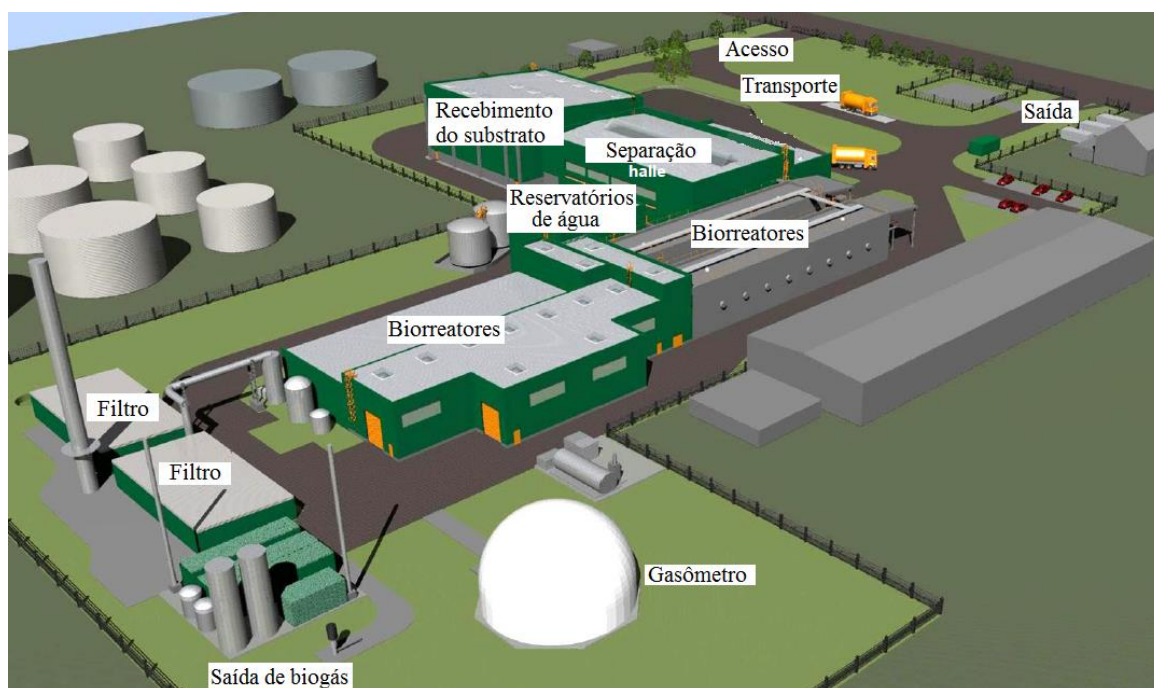


Figura 2.22 – Estação de tratamento e geração de energia (SOUZA *et al.*, 2012).

A energia proveniente da planta de biogás pode ser utilizada em equipamentos que empregam combustíveis fósseis, pois esses equipamentos são facilmente readaptados para o biogás, além disso, esse combustível representa um imenso potencial e uma alternativa como combustível veicular com funcionamento idêntico ao GNV (KAPDI *et al.*, 2005).

Observou-se que a utilização dos equipamentos para fontes renováveis de energia, principalmente biogás, ainda é "insipiente e inexpressiva", ocasionando certa "descrença" quanto às potencialidades do uso dessas energias, em grande medida, por falta de um conhecimento mais profundo do assunto por parte dos usuários. De um modo geral e, com raríssimas exceções, a grande maioria das empresas de pequeno e médio porte, vista sob os aspectos tecnológico, comercial e institucional, vai muito mal no Brasil. Isto porque falta apoio tecnológico para a melhoria e desenvolvimento de novos produtos, o mercado consumidor é instável e está mal informado sobre o uso e a relação custo/benefício dessas tecnologias e, praticamente, não há apoio institucional (BONANNI, 1991).

As plantas de biogás precisam de ferramentas fáceis e práticas para dimensionar, montar e controlar este processo. Logo que, em muitos casos, a biomassa representa custos consideráveis, as plantas de biogás em grande escala devem ser o mais eficiente possível, tanto pelo rendimento de biogás, redução da mistura orgânica e produção de biofertilizantes (SCHIEVANO *et al.*, 2011). A construção de plantas de biogás necessita de otimização das dimensões, volume e a relação entre o comprimento e a largura dos tanques. A influência da pressão de biogás deve ser considerada. A definição do modelo depende de uma grande variedade de situações (MARTÍ-HERRERO; CIPRIANO, 2012).

O planejamento da planta de biogás deve ocorrer de forma a reduzir dificuldades e problemas na construção e operação. A tabela 3.9 traz alguns aspectos a serem observados.

Tabela 3.9 – Planejamento do projeto da planta.

Verificar a disponibilidade de Matéria prima em longo prazo	• Quais substratos estarão disponíveis em longo prazo? • Há possibilidades de incrementos a médio/longo prazo? • Que impacto isso terá sobre planta (do ponto de vista da biologia/substrato, processos, energético)?
Análise de fornecedores	• Quais opções construtivas, materiais, equipamentos são oferecidos no mercado?
Verificar a possibilidade de aproveitamento de calor	• É possível utilizar o calor na propriedade, empresa ou vender? • Que quantidades de calor podem ser fornecidas mensalmente?
Determinação do orçamento disponível	• Quais são os recursos disponíveis? É necessária captação externa? • Qual é a estimativa de retorno da planta?

Adaptado de (LEITFADEN BIOENERGIE - PLANUNG, BETRIEB UND WIRTSCHAFTLICHKEIT VON BIOENERGIEANLAGEN, 2009).

Depois do planejamento/esboço inicial do projeto, que contém a primeira avaliação qualitativa do projeto, o estudo de viabilidade compreende uma avaliação quantitativa do projeto almejado e suas possíveis formas de realização. Os critérios do estudo de viabilidade para um projeto de uma planta de biogás são demonstrados na tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Estudo de viabilidade.

Contratação de profissionais com experiência em projetos de plantas de biogás	• Profissionais técnicos e fabricantes deverão estar envolvidos em todas as etapas do projeto;
Contato com consultores em biogás	• Consultores experientes na construção e operação de plantas de biogás são imprescindíveis para o projeto;
Estipulação dos modos e procedimentos de dimensionamento e construção da planta	• Definição das características do local, terreno e localização; • Análise para escoamento de gás, biofertilizante e energia elétrica; • Configuração e tecnologia mais adequada para a planta; • Definição da gestão do projeto e execução; • Modelo de operação da planta, por empresa ou cooperativa; • Contratação e/ou capacitação de obra especializada; • Prever margens para variações na execução do projeto.

Os critérios foram apresentados em seis etapas chamadas de passos para compor uma sequência de metodologia para construção de plantas de biogás. Foram definidos um mínimo de seis passos que devem ser verificados para construção de plantas de biogás. A divisão ocorreu considerando-se as principais etapas para o projeto da planta de biogás.

2.5.1 Dimensionamento de biorreatores

A definição das dimensões dos biorreatores de uma planta biodigestor nem sempre busca obter o rendimento máximo de gás ou a decomposição completa da matéria orgânica presente no substrato. A decomposição total da matéria orgânica exige tempos muito longos de TRH do substrato no biorreator, o que é possível apenas com tanques de alta capacidade, uma vez que algumas substâncias se decompõem apenas depois de muito tempo, ou nem se decompõem. Portanto, é importante obter-se uma capacidade adequada de decomposição com um custo aceitável. Nesse sentido, um importante parâmetro operacional é a carga orgânica volumétrica (COV) conforme equação 4, que indica quantos quilos de matéria orgânica seca (MOS) devem ser carregados no biorreator por unidade de tempo (KALTSCHMITT; HARTMANN; HOFBAUER, 2009).

$$COV = \frac{V_B \cdot c}{V_R \cdot 100} [kg/m^3/d] \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

COV – Carga orgânica volumétrica [kg/d];

V_B – Quantidade introduzida de substrato por dia [kg];

c – Concentração da matéria orgânica [-];

V_R – Volume do biorreator [m^3].

O valor da Carga Orgânica Volumétrica (COV) pode ser obtido para cada estágio do sistema de biodigestão (reservatório impermeável a gases, isolado e com controle de temperatura), para toda a planta de biogás (total dos volumes de trabalho de todos os estágios) e incluindo ou não a recirculação de substrato (KALTSCHMITT; HARTMANN; HOFBAUER, 2009).

Outro parâmetro importante para o dimensionamento dos biorreatores e o reservatório é o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), que representa o tempo médio em dias (d) que um substrato permanece no biodigestor até a sua saída. Para obtê-lo, divide-se o Volume do Biorreator (V_R) pelo Volume de Substrato Introduzido Diariamente (V_B), conforme equação 5 (KLOSS, 1986).

$$TRH = \frac{V_R}{V_B} [d] \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

TRH: Tempo de Retenção Hidráulica [d];

V_R : Volume do biorreator [m^3];

V_B : Volume do substrato introduzido por dia [m^3/d].

2.6. Softwares computacionais aplicados aos projetos mecânicos tridimensionais

A modelagem tridimensional (ou 3D) é o processo de desenvolvimento de uma representação matemática de qualquer superfície tridimensional de um objeto (seja inanimado ou vivo), através de software especializado. O produto é chamado de modelo tridimensional. É basicamente a criação de formas, objetos, personagens, cenários. Para elaboração são utilizadas ferramentas computacionais avançadas e direcionadas para este tipo de tarefa. A modelagem em três dimensões conta com uma enorme variedade de ferramentas genéricas, permitindo uma comunicação mais fácil entre dois programas diferentes e usuários iguais, são as mais conhecidas: técnica por polígonos, técnica por vértices e técnica por bordas. Todas elas são realizadas através da criação de uma malha de segmentos que dão forma ao objeto.

Com uma grande quantidade de aplicações as ferramentas e tecnologias para estudos na área da simulação como softwares computacionais podem simular eventos relacionados com movimento, estudos específicos que envolvem alto custo de fabricação, estruturas químicas, mecânicas entre outras. Na mecânica a simulação dos dispositivos móveis e da sua manipulação facilita a visualização da aparência, interferências, posicionamento, etc. Esta avaliação reduz custos, além de fácil utilização (GUERRA, 2012).

Atualmente no mercado competitivo as ferramentas de softwares desempenham um papel importante no desenvolvimento de novos produtos e processos. O CAD (Projeto Auxiliado por Computador) integrado com ferramentas de simulação, os *plug-ins* pequenos programas ou extensão que se encaixam no programa principal para adicionar mais funções e recursos. São soluções de software e sistemas industriais para o projeto e dimensionamento de processos e produtos (HOUSHMAND; VALILAI, 2010).

A área de pesquisa "Produção Virtual" pertence ao uso da tecnologia da informação e simulação computacional para modelar processos do mundo real de fabricação com a finalidade de analisar e compreendê-los. Como as tecnologias de automação, tais como CAD/CAM substancialmente vem reduzido o tempo necessário para produtos de *design*, a Manufatura Virtual (VM) terá um efeito semelhante nas graças de fabricação de fase para a modelagem, simulação e otimização do produto e dos processos envolvidos em sua fabricação (DÉPINCÉ; NOËL; WOELK, 2004).

As características do projeto de construção de plantas de produção representadas pelo departamento de design são: desenhos correspondentes; normas; grande número de pequenos

projetos para diferentes partes; variedade de tipos de desenhos de um único projeto; grande arquivo de folhas. Os modelos e métodos de desenvolvimento do sistema de CAD de ambientes complexos uniformizam e criam uma concepção amigável, com a configuração de um perfil de operações, uso das partes gerais do projeto, com uma série de problemas orientados, subsistemas são descritos em um exemplo de um CAD (MIGUNOV, 2004).

A tecnologia modular de desenvolvimento de expansões orientadas CAD pode ser aplicada em tarefas como a de projetar produtos e peças a partir de uma exigência física ambiental. O modelo de sistema dos desenhos de proteção contra exigências atmosféricas é desenvolvido, incluindo a representação paramétrica estruturada (propriedades dos objetos e sua interdependência, configurações gerais e configurações padrão) e operações com ele, que de forma eficiente automatiza o projeto de partes mecânicas (MIGUNOV; KAFIYATULLOV; SAFIN, 2004).

O desenvolvimento da indústria de tecnologia da informação aplicada às áreas de integração de diferentes sistemas tais como CAD, CAM, CAE e outros vem crescendo nos últimos anos. Os sistemas CAD (*Computer Aided Design*) sistemas automatizados de manufatura CAM (*Computer Aided Manufacturing*) o planejamento de processo de fabricação CAPP (*Computer Aided Planning Process*) podem preencher uma lacuna entre o design e a fabricação (TODIĆ *et al.*, 2012).

2.6.1. Software de modelagem tridimensional Autodesk Inventor Professional

O programa computacional de modelagem *Autodesk Inventor Professional* pode ser utilizado para projetar, visualizar e simular um projeto mecânico, suas partes e suas montagens. O programa computacional contém as principais funções necessárias para um projeto mecânico 3D, além de outros recursos para a criação e desenvolvimento de projetos para fabricação de peças, projeto de sistemas como tubulações, válvulas e equipamentos. Uma ferramenta disponível é a otimização e a validação digital do desempenho, simulação, de um projeto, minimizando a necessidade de testar o projeto com protótipos físicos. Com o programa computacional podem ser verificados o número mínimo de elementos de fixação necessários, espessura mínima de material, volume otimizado de tanques, etc.

Através do programa computacional *Autodesk Inventor Professional* podem ser analisadas tensões com simulações de conjuntos mecânicos, movimentos ou sistemas estáticos

que auxiliam a verificação de como o projeto funcionará em condições reais. O *Autodesk Inventor Professional* também auxilia projetos de moldes de injeção de peças plásticas, tubulações, encanamento e cabeamento elétricos.

O *Autodesk Inventor Professional* é um programa de CAD que oferece a possibilidade de desenvolvimento de projetos mecânicos 3D, simulação de produtos (Resistência mecânica, estrutura mínima necessária, homogeneização ou mistura de fluidos), entre outras possibilidades.

Em plantas de biogás podem ser simulados tanques para otimização de espessura mínima de chapas entre outros aspectos como tubulações.

3.0. CONTRIBUIÇÃO PARA DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS DE BIOGÁS

3.1. Desenvolvimento de método para projeto e dimensionamento de plantas de biogás

Para o desenvolvimento da metodologia a ser empregada no projeto e dimensionamento de plantas de biogás foi necessária a definição de um conjunto de critérios que permite estabelecer um padrão de procedimento para ser aplicado em projetos de plantas de biogás. Tendo como a base a literatura internacional tais critérios foram escolhidos em função de características, necessidades e conjunturas regionais.

Para o desenvolvimento da metodologia os critérios foram divididos em passos, que abordam informações e dados que auxiliam na definição da proposta. Projetos de plantas de biogás são extensos e compostos de várias fases. Necessita de um estudo de viabilidade técnica, planejamento do formato, capacidade e tamanho da planta. Durante a realização do projeto seu projetista deve fazer o planejamento de todas as fases da de forma a garantir o sucesso do empreendimento.

Após o projeto da planta de biogás ter sido decidido inicia-se com o planejamento através de um levantamento de dados para o esboço do projeto. Estes dados servirão como base para estudar a viabilidade técnica específica do local, avaliar a possibilidade inicial de financiamento. É importante a análise do sistema completo desde a disponibilidade e qualidade do substrato, planejamento da planta e a geração de biogás. Para o estabelecimento desta análise é importante, que as três áreas mostradas na figura 3.23 sejam consideradas.

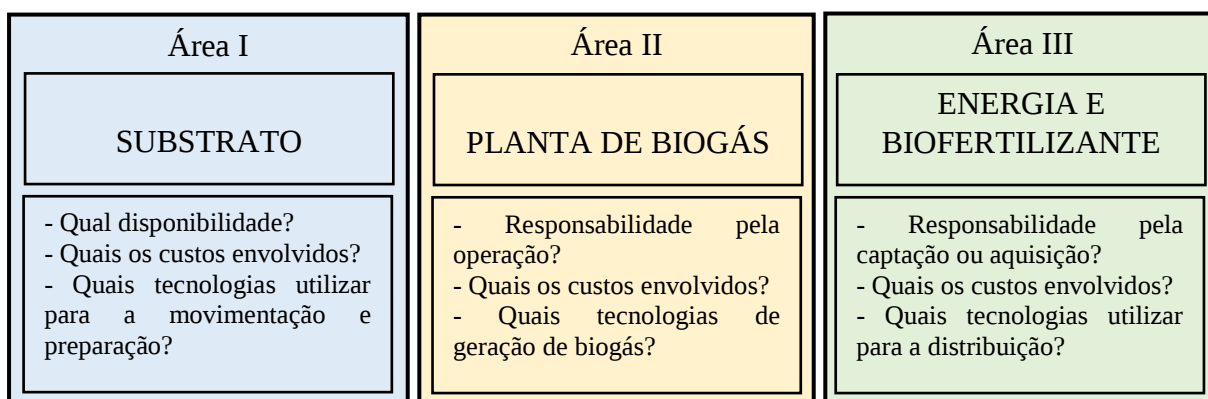


Figura 3.23 – Diagrama do planejamento de uma planta de biogás (Adaptado de GÖRISCH; HELM, 2006).

3.1.1 Passo 1 – Levantamento de dados do local de instalação da planta de biogás

O levantamento de dados é o primeiro passo e constituirá a base para o projeto com todas as informações necessárias para o planejamento da planta. Nesse passo deverá ser feito o reconhecimento da região e do possível local de instalação da planta de biogás.

Inicia-se com a verificação do local de instalação da planta de biogás e do levantamento de dados sobre este espaço. A averiguação da região e do possível local de instalação são dados que podem auxiliar no planejamento do abastecimento de matéria-prima, substrato, utilização da energia gerada e destinação do biofertilizante produzido. A verificação das vias e estradas de acesso, suas condições, pedágios, características, tipo de trânsito, são importantes para definição de custo de geração de energia e de manutenção da planta de biogás. Identificar possíveis compradores de energia elétrica, biogás, metano ou biometano também são fatores que auxiliam na análise da viabilidade econômica do projeto da planta de biogás. Averiguação da oferta e abastecimento de substrato e possibilidades de diversificação do substrato, substituição emergencial por outro substrato, são dados importantes para garantir a operação da planta de biogás.

Outro aspecto que deve ser averiguado é o clima na região, a variações de temperatura, índice pluviométrico nos últimos anos através de relatórios das estações de climatologia, verificação da incidência de ventos, além de temporais e outros eventos climáticos característicos da região.

A disponibilidade de recursos tecnológicos (materiais de consumo e equipamentos) no local também é importante a ser avaliada, uma vez que isso impacta na operação da planta. Verificação da existência de qualificação de mão de obra, recursos humanos para construção e manutenção da planta de biogás. A disponibilidade de energia elétrica para construção e operação da planta, padrão elétrico e a legislação ambiental.

3.1.2 Passo 2 – Planejamento da planta de biogás

No passo planejamento da planta de biogás, a partir de todos os dados levantados no passo anterior, pode ser iniciado o planejamento do projeto de planta de biogás. Este passo permite obter noções de custo importantes para busca de financiamento e viabilidade econômica da planta. Um aspecto verificado é o tipo do substrato ou matéria prima

disponível. Os substratos são classificados quanto ao seu teor de matéria seca e isso divide em dois os tipos de biodigestão: a de matéria seca e a de matéria úmida. Como a literatura científica, até o momento, não classifica um limite de teor de umidade entre matéria seca e úmida utiliza-se um critério da Norma Alemã de Energias Renováveis (EEG), de 2004 que cita que na entrada do tanque biorreator o substrato deve apresentar um teor de matéria seca de no máxima 30% (base em massa) para ser considerada biodigestão úmida. Para a biodigestão úmida o substrato pode ser transferido por bombeamento de um ambiente para outro. Para a fermentação a seco o substrato é depositado de forma estática sem mistura ou transferência de ambientes, é apenas amontoado (HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004).

Outro aspecto no passo do planejamento é o carregamento do substrato nos tanques biorreatores da planta de biogás, forma como o substrato *in natura* é disponibilizado aos microrganismos. O tipo utilizado impactará diretamente na geração do biogás. Os tipos de carregamento são modo contínuo, semicontínuo e descontínuo ou em batelada. Nos tipos de carga contínua e semicontínua, faz-se a diferenciação entre a técnica de fluxo contínuo e a técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento. Diferente da alimentação contínua, na alimentação semicontínua uma carga de substrato não fermentado é introduzida no biorreator no mínimo uma vez a cada dia de trabalho.

O tipo de carregamento contínuo em biorreatores utiliza um sistema de carregamento constante por bombeamento, sistema de fusos ou desnível entre o ponto de armazenagem do substrato e a entrada dos biorreatores. Uma característica deste sistema é que a mesma quantidade ou volume de substrato carregado é transferido de um tanque para outro até a saída. O volume transferido é constante. Um exemplo pode ser visto na figura 3.24.

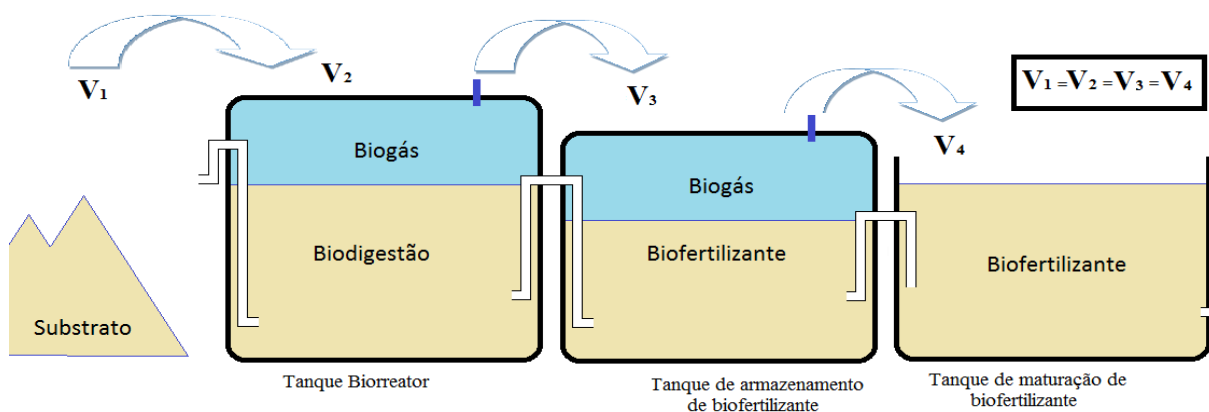


Figura 3.24 – Esquema do tipo de carregamento de substrato em fluxo contínuo.

Nesse tipo de carregamento os biorreatores estão sempre carregados em sua capacidade máxima, sendo esvaziados apenas para reparos e manutenção. O tipo de carga de fluxo contínuo se caracteriza por uma produção de gás uniforme e uma utilização eficiente do espaço do biorreator. Porém pode acontecer de parte do substrato recém-introduzido seja retirada do biorreator sem ser digerido. Esse tipo de problema é amenizado na utilização de mais de um biorreator na divisão de fases. Outro aspecto negativo deste modelo é que o reservatório de biofertilizante permanece aberto e com isso mantém emissão de gás metano, ainda que em pequenas quantidades.

Outro tipo de carregamento é o combinado, fluxo contínuo e armazenamento. Plantas de biogás que funcionam com a técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento utilizam também o reservatório de biofertilizantes. O biogás ainda gerado no reservatório de biofertilizante também pode ser coletado e aproveitado. Desta forma o reservatório de biofertilizantes funciona como um reservatório de gás também. Anterior a esse reservatório é instalado um biorreator de fluxo contínuo. Deste sistema de fluxo contínuo podem ser transferidas quantidades variáveis para atender uma grande demanda por substrato fermentado para fins acelerar o processo. Neste caso o volume transferido não é constante. Na figura 3.25 pode ser visto esse tipo de carregamento (WEILAND; RIEGER, 2001).

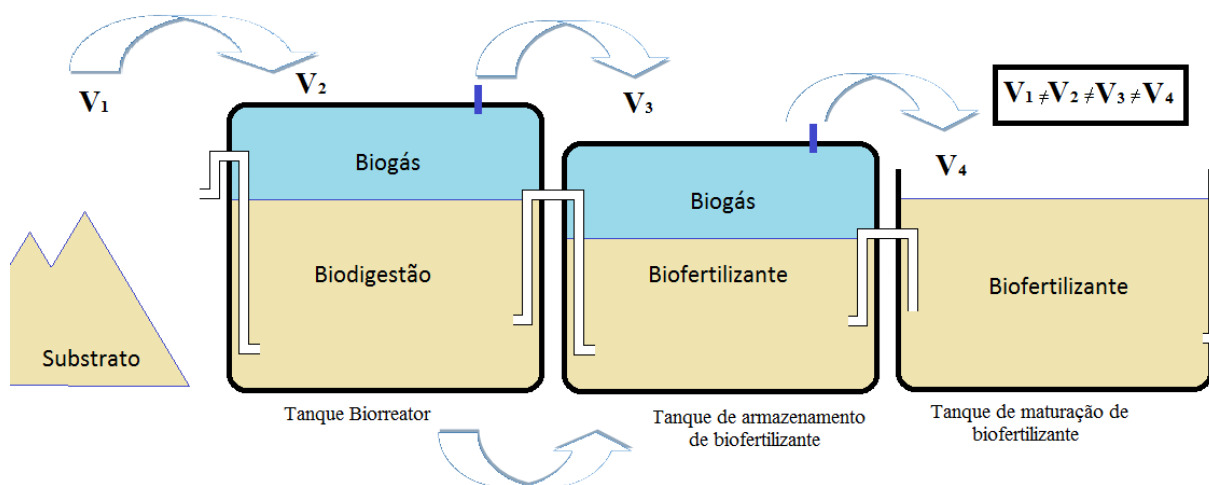


Figura 3.25 – Esquema do tipo de carregamento combinado do substrato.

Esse tipo de carregamento elimina o problema do substrato recém-introduzido ser eliminado sem ser biodigerido. Também soluciona a emissão de gás metano no reservatório de biofertilizante. No tipo de carregamento em batelada, enche-se completamente o biorreator com substrato *in natura*, fechando-o hermeticamente em seguida. O substrato permanece no biorreator até o fim do Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) planejado, sem que haja retirada

ou adição de mais substrato. Ao fim do tempo de retenção, o biorreator é descarregado e carregado com substrato *in natura*, e uma parte do material decomposto pode permanecer no reservatório a fim de inocular a carga seguinte. Para o rápido enchimento e esvaziamento do reservatório de batelada, são necessários também reservatórios de armazenamento e depósito. A taxa de produção de gás no processamento intermitente varia ao longo do tempo. Esse tipo de carregamento não permite produção de biogás com volume constante o que pode ser equilibrado pelo enchimento de vários biorreatores com intervalos de tempo entre si (sistema de compensação) (WEILAND; RIEGER, 2001). Isso permite a geração de gás com pequenas variações, mas com maior regularidade. O carregamento em batelada com biorreator simples é conhecido por biorreator de garagem (fermentação a seco) (SCHULTE, 2013).

Um aspecto relevante e que influencia no rendimento da geração de biogás é a escolha da divisão do processo de biodigestão em duas fases hidrólise e metanização (SCHULZ; EDER, 2006). Para o sistema monofásico as duas fases se dão em um único tanque biorreator e no sistema bifásico com hidrólise e metanização em tanques biorreatores diferentes. A divisão por estágios na biodigestão ocorre para cada tanque biorreator ou de maturação do biofertilizante. Para o tanque o biorreator principal e segundo tanque biorreator tem-se um sistema bifásico. Para plantas de biogás que utilizam substratos oriundos da agricultura é indicado utilizar principalmente a variante de duas fases, sendo a maioria do tipo bifásico (SCHULZ; EDER, 2006).

Outro aspecto que deve ser verificado neste passo é a disponibilidade de substrato, como será a entrega, frequência, quantidade, o transporte e quais garantias de qualidade são oferecidas, entre outros. Pode-se utilizar métodos de teste rápido para a inspeção do substrato recebido. Isso garante o controle de qualidade da matéria prima o que aumenta a confiabilidade do funcionamento do sistema.

Verificação de custos, como se dará a aquisição do substrato, pagamento, permuta ou ainda recebimento pelo tratamento, usual em contratos com prefeituras para utilização de RSU. O recebimento é importante principalmente se o substrato é originário de fontes externas. O não recebimento regular do substrato pode comprometer o funcionamento e consequentemente o planejamento da geração de biogás e o fornecimento energético pondo em risco contratos estipulados.

É essencial manter uma quantidade necessária de substrato para alimentar a planta de biogás por no mínimo dois dias HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND

NUTZUNG (2004). O armazenamento, embora indesejado por ocupar grandes espaços, infiltrar água da chuva quando descoberto, exalar odores, entre outros aspectos, pode ser necessário caso o recebimento seja externo. Com isso garante-se o carregamento regular e contínuo de substrato.

Para escoamento do biofertilizante é necessário considerar sua comercialização, demanda, estabelecer se será comercializado seco ou líquido. Necessidade de atingir padrões de composição ou degradabilidade ou observância de normas.

Outro aspecto relevante e que interfere no processo de geração de biogás é o carregamento de substrato, fragmentação e mistura. Caso o substrato não esteja preparado para o seu uso pode ser necessário separar e remover materiais estranhos e melhorar a composição do substrato. Materiais como pequenas pedras, britas, cascalhos podem prejudicar o processo. Podem ser utilizados separadores, peneiras, etc. Também podem ser retirados materiais estranhos de forma manual ou durante o carregamento dos biorreatores. Para os sistemas tipo fermentação à seco não se tem problemas maiores com materiais estranhos no substrato, pois o carregamento do substrato é realizado por máquinas carregadeiras e o substrato não é transportado por fusos e bombas.

Já a redução do substrato, ou fragmentação aumenta sua superfície o que auxilia o processo de biodigestão e, conseqüentemente a produção de metano. Sendo a geração de metano um produto da interação entre o grau de fragmentação e o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) nos biorreatores.

Existem diversas tecnologias para fragmentar sólidos, como picadores, moinhos, esmagadores, eixos e transportadores helicoidais dotados de dispositivos de corte e dilaceramento. Pode se utilizar eixos com palhetas e roscas de transporte com facas em unidades combinadas de dosagem e alimentação.

3.1.3 Passo 3 – Dimensionamento da armazenagem do substrato e do volume dos tanques biorreatores

Para o passo dimensionamento da planta de biogás e escolha deverá ser definido o volume, disposição e posicionamento dos elementos de carregamento, geração, tratamento e

utilização de gás e biofertilizante da planta. Nesta etapa são definidas todas as informações para a modelagem dos biorreatores e demais equipamentos.

A verificação dos valores de produção de biogás e metano vai facilitar o dimensionamento da Planta de biogás e conhecer o potencial de geração de energia. A produtividade e rendimento de metano deve pode ser calculada para verificação de desempenho da planta de biogás, dimensionamento de biorreatores (volume) gasômetros, entre outros (PREIßLER, 2009). A produção de biogás é expressa pela quantidade de biogás em relação ao volume do biorreator. Pode ser definida pelo quociente entre a produção diária de biogás e o volume do biorreator, indicando portanto a sua eficiência.

Para o cálculo da geração de biogás entende-se adequado para a metodologia é importante utilizar a forma apresentada no tópico 2.2.4.2. Etapa 2 – Geração do biogás. A quantidade de biogás que pode ser produzida em uma planta de biogás depende principalmente da composição do substrato utilizado (VDI, 2006). É indicado se realizar um teste de biodigestão com a mistura de substrato utilizada. Também é possível estimar o rendimento de biogás com base na soma das produções dos substratos introduzidos a partir de tabelas de referência que foram construídas para cálculos e de geração de biogás.

Nesta etapa também é estabelecido o modelo do processo de biodigestão, fluxo, movimentação, Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), modo de armazenamento, quantidade de fornecimento de energia e biofertilizante. Também deverá ser escolhida toda a malha de controle para o projeto de automação da planta.

3.1.4 Passo 4 – Escolha de tecnologias e materiais para a planta de biogás

Para o quarto passo, a partir dos dados levantados anteriormente será possível avaliar quais serão as tecnologias necessárias e disponíveis para o projeto. Portanto, para os três níveis, gerenciamento de substrato, biodigestão e geração de biogás e por último a utilização da energia e o biofertilizante.

O tipo e disponibilidade da matéria-prima determina o tipo de equipamento adotado na planta de biogás. De acordo com a disponibilidade a seleção da tecnologia em um projeto de biogás é baseada principalmente nos substratos disponíveis, infraestrutura existente e a

viabilidade do financiamento. Na tabela 3.11 é apresentada uma listagem para a seleção da tecnologia para geração de biogás.

Tabela 3.11 – Seleção da tecnologia para geração de biogás.

Seleção do processo de biodigestão	• A planta deverá operar com biodigestão úmida, a seco ou uma combinação de ambas? • Com que estágios de processo e em quais temperaturas deverá operar a planta?
Seleção dos componentes da planta	• Que componentes deverão ser utilizados? • Equipamentos de recepção, preparo e carregamento; • Arquitetura do biodigestor com componentes instalados e equipamentos de agitação; • Tipo de gasômetro; • Tipo de armazenamento da biomassa fermentada; • Utilização do biogás.

Na biodigestão do substrato podem ser utilizados os processos de mistura completa, fluxo pistonado com biorreatores horizontais ou tubulares e os processos especiais como o batelada, geralmente empregado com substrato seco. Boa parte das plantas de biogás na Europa e EUA se utiliza da mistura completa em biorreatores cilíndricos em posição vertical. Na Alemanha, em 2009, esse modelo totalizava cerca de 90% do total das plantas de biogás (OECHSNER E LEMMER, 2009). Estes biorreatores são dotados de reservatório com fundo rígido de concreto e paredes de aço, concreto armado ou ainda materiais especiais como polímeros rígidos, PEAD (Polietileno de alta densidade). Na tabela 3.12 foram analisados alguns aspectos de biorreatores com mistura completa.

Tabela 3.12 – Características de biorreatores com mistura completa.

Dimensionamento e material	• Estes biorreatores permitem dimensões para capacidades de até 6.000 m³; • Biorreatores normalmente fabricados em aço ou concreto;
Aplicações	• Biorreator utilizado para tipos de substrato com baixo ou médio teor de matéria seca; • Equipamentos de transporte e agitação devem ser adaptados ao substrato; • Possibilidade de recirculação em caso de digestão única de biomassa dedicada; • Biorreatores adequados para alimentação contínua, semicontínua e descontínua;
Vantagens	• Biorreatores com arquitetura de baixo custo quando volumes superiores a 300 m³; • Permite operação variável entre regime de fluxo contínuo ou regime combinado de fluxo contínuo e armazenamento; • Conforme o tipo dos equipamentos, sua manutenção pode ser realizada sem exigir o esvaziamento do biorreator;
Desvantagens	• Não é possível afirmar com certeza o TRH; • Possibilidade de formação de sobrenadante e de sedimentos;
Formas construtivas	• Os reservatórios são cilíndricos enterrados verticalmente ou acima do solo; • Os equipamentos de agitação devem ter potência elevada, pode-se utilizar recirculação através da injeção do biogás; • Agitadores com motor submersível no interior do biorreator, agitador axial em tubo guia vertical, recirculação hidráulica com bombas externas, recirculação por injeção de biogás em tubo guia vertical.

Fonte: (Adaptado de SCHULZ; EDER, 2006).

O modelo de Reator de Fluxo em Pistão ou Reator de Fluxo Pistonado (RFP) é usado para sistemas de fluxo contínuo também chamados Reatores Tubulares Contínuos (RTCs). O substrato é misturado na direção radial. O modelo RFP é aplicado na biodigestão de materiais pastosos, como lamas de esgoto. Na tabela 3.13 foram analisados alguns aspectos dos biorreatores RFP.

Tabela 3.13 – Características de biorreatores com técnica do fluxo pistonado.

Dimensionamento e material	• Biorreatores horizontais até 800 m³, biorreatores verticais até aprox. 2.500 m³; • Material: de aço ou aço inoxidável, também concreto armado;
Aplicações	• Biodigestão úmida e seca, biorreatores devem ser adaptados ao substrato; • Alimentação semicontínua e contínua;
Vantagens	• Construção compacta e de baixo custo em plantas pequenas; • Separação dos estágios de digestão no fluxo pistonado; • Sobrenadantes e camadas de sedimentação evitados em função da arquitetura; • TRH geralmente menor que no modelo contínuo; • Arquitetura compacta permite perda de calor reduzida e aquecimento eficiente; • Biodigestão úmida: podem ser utilizados agitadores potentes, confiáveis e que proporcionam economia de energia;
Desvantagens	• Espaço necessário para os biorreatores; • Não há inoculação do material fresco, ou ela deve ser realizada pela recirculação de biofertilizantes; • Trabalhos de manutenção exigem o esvaziamento completo do biorreator;
Formas construtivas	• Biorreator de fluxo pistonado com seção transversal circular ou retangular; • Biorreatores podem ser fabricados na horizontal ou na vertical; • Podem ser operados com ou sem agitadores.

Já o processamento do substrato no modelo batelada em plantas de biogás são chamados de biorreatores do tipo container e a biorreatores de garagem garantem a utilização de grande quantidade de substrato. Biorreatores de batelada podem ser aplicados em RSU e outros substratos de matéria seca que podem ser carregados com máquinas do tipo carregadeiras diretamente nos biorreatores.

Além do modelo deve ser avaliada a necessidade da escolha dos materiais a serem empregados nos biorreatores, tubulações, gasômetros, tanques e outros recipientes ligados ao processo considerando-se a sua disponibilidade no mercado e a viabilidade econômica para sua aquisição.

A importação de tecnologias, quando necessária, deverá ser avaliada considerando-se aspectos já levantados e o fator de conhecimento técnico local, manutenção, custo e adaptação tecnológica. Esses aspectos determinarão a opção ou não pela importação de equipamentos, em caso negativo será necessário a verificação de recursos tecnológicos nacionais disponíveis. O tipo e disponibilidade da matéria-prima determina o tipo de equipamento adotado na planta de biogás. De acordo com a disponibilidade a seleção da tecnologia em um projeto de biogás

é baseada principalmente nos substratos disponíveis, infraestrutura existente e a viabilidade do financiamento. Na tabela 3.14 é apresentada uma listagem para a seleção da tecnologia para geração de biogás.

Tabela 3.14 – Seleção da tecnologia para geração de biogás.

Seleção do processo de biodigestão	• A planta deverá operar com biodigestão úmida, a seco ou uma combinação de ambas? • Com que estágios de processo e em quais temperaturas deverá operar a planta?
Seleção dos componentes da planta	• Que componentes deverão ser utilizados? • Equipamentos de recepção, preparo e carregamento; • Arquitetura do biodigestor com componentes instalados e equipamentos de agitação; • Tipo de gasômetro; • Tipo de armazenamento da biomassa fermentada; • Utilização do biogás.

Para o projeto da planta é indicado o controle de temperatura do biorreator. A temperatura do processo interfere diretamente no processo de biodigestão. O dimensionamento do aquecimento depende do tipo de biorreator, material empregado, clima, modelo entre outros aspectos. Na tabela 3.15 estão dispostos alguns aspectos a serem observados para um bom aquecimento.

Tabela 3.15 – Parâmetros operacionais de sistemas de aquecimento integrados.

Tipos de aquecedores	• Aquecedores de parede podem ser usados em biorreatores de estrutura rígida como os de metal e de concreto; • Aquecedor de piso: todos os biorreatores verticais; • Aquecedor interior: todos os tipos de biorreatores; • Aquecedores combinados com agitadores;
Formas construtivas	• Aquecedores instalados em parede (em digestores de aço, é possível também a instalação na parede exterior); • Aquecedores localizados em frente à parede; • Aquecedor integrado a agitadores ou neles combinado.
Vantagens	• Aquecedores localizados nos biorreatores e combinados com agitadores se caracterizam por boa transferência de calor; • Aquecedores de piso e parede não ocasionam sedimentação; • Aquecedores integrados a agitadores são capazes de aquecer uma grande quantidade de material;
Desvantagens	• A formação de camadas de sedimentos pode reduzir drasticamente a eficácia de aquecedores de piso; • Aquecedores no biorreator podem ocasionar sedimentos e, portanto, devem ser instalados com uma distância da parede;
Particularidades	• A tubulação de aquecimento deve ser purgada, o que se consegue pela circulação de baixo para cima; • Canalizações de calor no concreto causam tensões térmicas; • Conforme o tamanho do biorreator, devem ser instalados em dois ou mais circuitos; • O equipamento de aquecimento não pode obstruir outros equipamentos como agitadores; • Sistemas de aquecimento na parede ou no piso são inadequados para a operação termofílica.

Fonte: (Adaptado de GERS-GRAPPERHAUS, 2002).

Na figura 3.26 pode-se observado um biorreator com aquecimento na parede.



Figura 3.26 – Biorreator com aquecimento na parede e piso (SOUZA, 2010).

As plantas de biogás necessitam de ferramentas fáceis e práticas para monitorar e avaliar a sua eficiência do processo biológico. Em muitos casos o substrato, apresente custos consideráveis em grandes plantas de biogás, portanto os processos devem aproximar-se, tanto quanto possível, do rendimento máximo potencial da mistura orgânica em biorreatores (SCHIEVANO *et al.*, 2011). Na figura 3.27 tem-se um descritivo básico do sistema de controle para plantas de biogás.



Figura 3.27 – Diagrama do planejamento de uma planta de biogás (SCHIEVANO *et al.*, 2011).

O sistema de supervisão (item do sistema de controle figura 3.27) possui apresentação gráfica do processo: visualização do biorreator, vazão de entrada e saída, temperatura, pressão, mistura, pH, indicação de aquecimento e resfriamento, permitindo ao operador uma visualização de todo processo de biodigestão da planta de biogás, funcionando como a função e supervisão do processo. O controlador lógico programável (item do sistema de controle figura 3.27) é responsável por receber informações dos sensores de temperatura, nível, pressão e composição do biogás para acionar, motores agitadores, moto bombas de carregamento, fechamento de válvulas, entre outros a partir de uma programação. Para que o processo de biodigestão ocorra em condições ótimas, a temperatura no interior dos biorreatores deve ser constante. É importante que a temperatura seja mantida com as menores oscilações possíveis no sistema de biodigestão. Essa oscilação deve ser reduzida no que se refere ao longo do tempo quanto à distribuição da temperatura em diferentes áreas do biorreator (JÄKEL, 2002). No caso de a temperatura sofrer oscilações drásticas ou se situar acima ou abaixo de determinados valores, pode ocorrer a inibição do processo de fermentação ou até mesmo o comprometimento total do processo. Vários fatores podem causar oscilações de temperatura (JÄKEL, 2002):

- Carregamento de substrato *in natura*;
- Formação de camadas ou zonas de temperatura em função do isolamento térmico insuficiente ou mau dimensionamento do sistema de aquecimento e misturador insuficiente;
- Sistema de aquecimento ineficiente;
- Interferência de temperaturas extremas no verão ou inverno.

A utilização de pré-aquecimento do substrato antes da introdução no biorreator é indicada para regiões frias evitando-se o choque térmico com o substrato dentro do biorreator. Isso evita a oscilação de temperatura do substrato ao ser introduzido.

3.1.5 Passo 5 – Modelagem mecânica computacional em CAD 3D

Para o quinto passo são modelados os biorreatores, parte principal da planta de biogás, principalmente, em softwares mecânicos de CAD 3D. A partir de todos os dados definidos na

etapa anterior, o dimensionamento, pode se construir a planta virtual para firmar modelos, tecnologias e o processo de biodigestão dimensionado.

A modelagem da planta de biogás servirá para viabilizar a fabricação dos tanques biorreatores e o planejamento de montagem da planta de biogás. A planta de biogás uma vez modelada em três dimensões facilita o ajuste, mudança de medidas, criação de detalhes e modificações no projeto. O software de CAD usado na modelagem é fundamental para o desenvolvimento de novos produtos e processos. Possui ferramentas aplicadas aos sistemas industriais para o projeto e dimensionamento de processos e produtos (HOUSHMAND; VALILAI, 2010).

Projetos com grande número de partes (acima de mil) e com grande variedade de tipos de desenhos são facilitados com as ferramentas CAD. Os programas de CAD uniformizam e criam uma concepção amigável, com a configuração de um perfil de operações, uso das partes gerais do projeto, entre outras facilidades. Plantas de biogás são compostas por muitas partes o que dificulta o projeto e o dimensionamento. Os programas de CAD reduzem esse problema facilitando a tarefa (MIGUNOV, 2004).

3.1.6 Passo 6 – Simulação dos biorreatores com programas computacionais

Com a conclusão do passo 5 é indicado que se utilize das ferramentas computacionais especiais para testar, verificar e conferir virtualmente o processo da planta. A simulação deverá ser utilizada para a definição dos materiais empregados, estrutura necessária, configuração e otimização do processo. A partir desta etapa poderá ser necessário retomar os passos 3, 4 e 5 para modificações. Isso auxiliará na diminuição de erros, custos e otimização da produção da planta. Esta última etapa é crucial para garantir o sucesso da planta de biogás.

O passo de simulação representa a aplicação das ferramentas e tecnologias para estudos na área da representação computacional de eventos reais que permitem a previsão de erros no funcionamento do projeto, em eventos relacionados com movimento, estudos específicos que envolvem alto custo de fabricação, estruturas químicas, mecânicas entre outras. Na mecânica a simulação dos dispositivos móveis e da sua manipulação facilita a visualização da aparência, interferências, posicionamento, etc. Esta avaliação reduz custos e facilita ajustes, além de fácil utilização (GUERRA, 2012). Na figura 3.28 foram estabelecidos os passos para o projeto e dimensionamento de plantas de biogás.

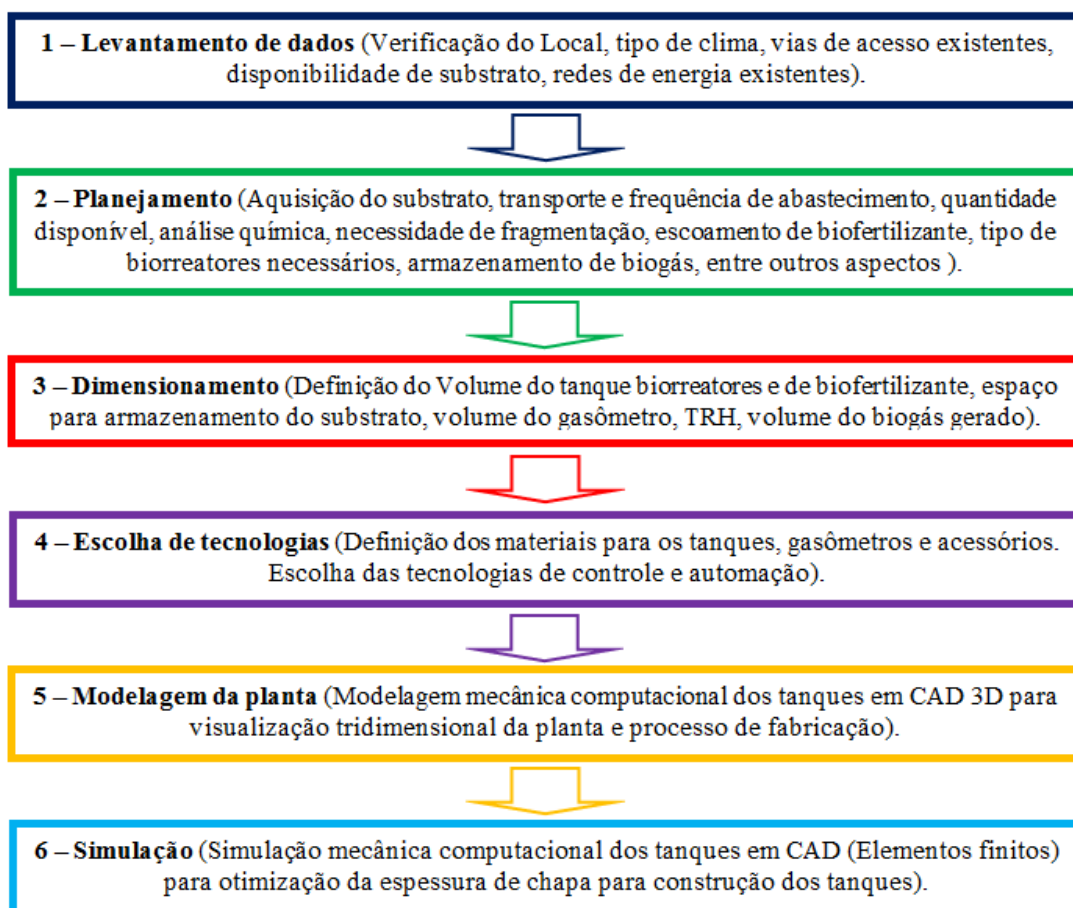


Figura 3.28 – Passos para projeto e dimensionamento de plantas de biogás.

4.0. PROJETO, SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A metodologia de dimensionamento proposta no capítulo anterior é testada pela simulação de um planta de biogás. O projeto completo da planta para geração de energia é desenvolvido, aplicando-se cada um dos passos que compõem a sequencia metodológica proposta.

4.1. Aplicação do método para projeto e dimensionamento de plantas de biogás

Para aplicação da metodologia estabelecida foi dimensionada uma planta de biogás iniciando-se com a aplicação do primeiro passo da metodologia apresentada na figura 3.28 levantamento de dados do local e região do empreendimento.

4.1.1 Aplicação do PASSO 1 – Levantamento de dados do local de instalação da planta

A planta de biogás foi definida como um modelo comercial e se aplica na maioria das regiões agrícolas produtoras de cereais e vegetais. A planta se utilizará de silagem de milho para geração de biogás. A região e município para implantação da planta pode ser visto na figura 4.29.

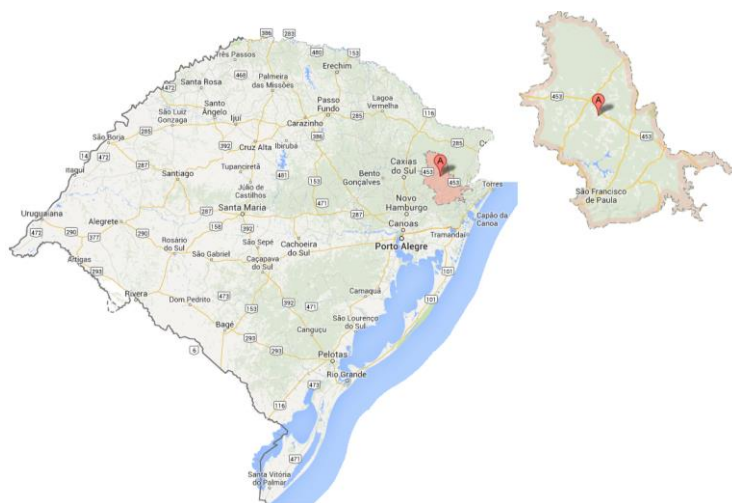


Figura 4.29 – Localização do município de São Francisco de Paula-RS.

O acesso ao município se dá seguindo-se pela RS20 da região metropolitana sentido nordeste da serra gaúcha e o local da planta está situada a 115 km da capital Porto Alegre/RS.

A região é produtora de alimentos sendo essencialmente agrária com diversificação de lavouras e criação de animais. A possibilidade da obtenção de outros tipos de biomassa para biodigestão é imensa.

A região é abastecida pela concessionária Rio Grande Energia (RGE) da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). A empresa possui parceria com produtores de energia no estado e é potencial compradora de energia elétrica gerada através de recursos renováveis. Também fornece na região energia a baixa e média tensão.

A região está localizada na serra gaúcha e apresenta temperaturas mínimas de -5°C no inverno. Isso representa uma atenção especial com o aquecimento dos biorreatores nesta estação. A região ainda pode apresentar breves ocorrências de neve em pequenas quantidades durante o inverno. A infraestrutura apresenta comércio de ferragens, madeira e outros itens como equipamentos e máquinas agrícolas.

4.1.2. Aplicação do PASSO 2 – Planejamento da planta de biogás

O substrato é composto de 100% de silagem de milho picada em picadores integrados em colheitadeiras na lavoura. Na figura 4.30 pode ser observado amostra do substrato que deverá ser analisada para o dimensionamento da planta de biogás.



Figura 4.30 – Substrato originário de lavouras de milho transformado em silagem.

Para a biodigestão úmida, o substrato deve apresentar um teor de matéria seca de até 36% (em massa) (WEILAND, 2007). Para o substrato analisado obteve-se em torno de 30% o que satisfaz a orientação observada. Na tabela 3.16 tem-se a análise do substrato de silagem de milho.

Tabela 3.16 – Dados do substrato de silagem de milho analisado.

Substrato	Silagem a verde	Silagem compactada
MS – Matéria Seca [kg/m ³]	727,9	591,7
MOS – Matéria Orgânica Seca [%]	98,0	95,2
pH – Potencial hidrogeniônico [-]	5,7	3,9
Teor da matéria seca [%]	30,6	28,9
Densidade matéria orgânica [g/cm ³]	1	-

Para o substrato disponível a tecnologia mais adequada conforme literatura internacional (HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG, 2004) deve-se adotar o modelo de biodigestão úmida, já que a silagem é composta de 30% de matéria seca. Isto determina que a adoção dos tanques biorreatores com carregamento modo descontínuo. Na fragmentação do substrato são utilizados picadores integrados a colheitadeiras sendo que o substrato já será recebido triturado na planta. Não é necessária a utilização de separadores uma vez que a silagem é recebida livre de detritos, materiais plásticos e outros materiais inorgânicos.

A estratégia para recebimento do substrato se dará em dois momentos conforme regras contratuais estabelecidas. A safra principal se dará até o primeiro dia útil de setembro quando serão recebidas 20000 m³ de substrato. O segundo recebimento de 15000 m³ deve ser efetuado até primeiro dia útil do mês de março. Na tabela 3.17 com o planejamento do recebimento e utilização do substrato.

Tabela 3.17 – Recebimento do substrato.

Recebimentos do Substrato (silagem de milho)		
Setembro	20000 m ³	Silagem de milho picada
Março	15000 m ³	Silagem de milho picada

Foi estabelecido a execução de testes laboratoriais, no recebimento do substrato, matéria mineral, proteínas, gorduras e fibras em amostras para determinação dos índices de matéria seca e composição para garantia de confiabilidade do sistema.

A comercialização do biofertilizante pode ser cogitada na própria região devido à alta variedade de produção e propriedades existentes. Fato que pode pesar favoravelmente a demanda de biofertilizante líquido. No entanto a boa localização da planta de biogás, como a proximidade de regiões agrárias poderá facilitar a demandar por biofertilizante.

4.1.3. Aplicação do PASSO 3 – Dimensionamento da armazenagem do substrato e do volume do tanque biorreator

A definição do fluxo do substrato, a partir dos dados levantados no item 3.1.2 foi definido em modelo contínuo bifásico devido ao sistema de digestão compor-se de biomassa úmida. O fluxo do funcionamento está demonstrado na figura 4.31.

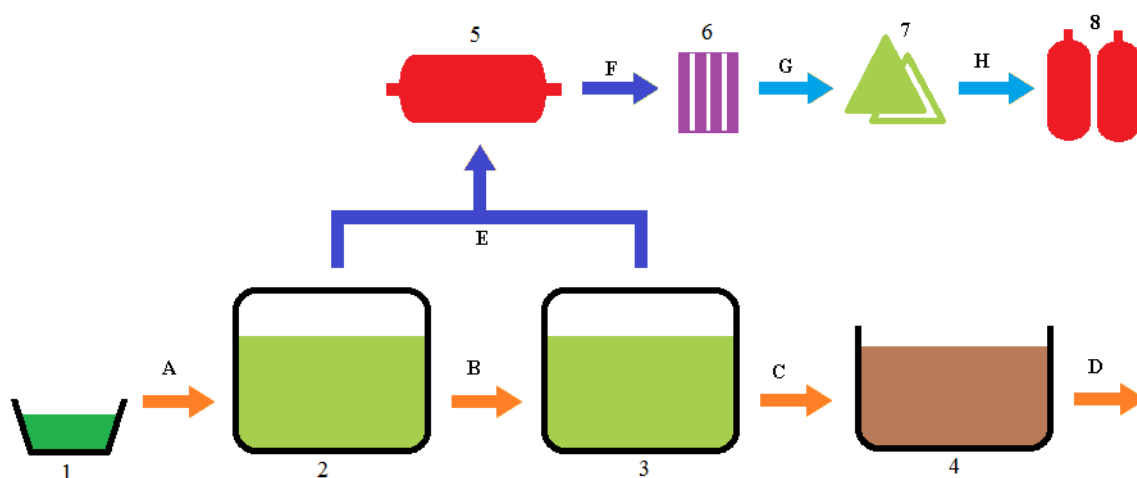


Figura 4.31 – Fluxo da Planta de biogás.

1 – Sistema de carregamento do substrato; 2 – Tanque Biorreator; 3 – Tanque de armazenamento de biofertilizante com captação de biogás; 4 – Tanque de maturação do biofertilizante; 5 – Gasômetro de biogás; 6 – Filtros de biogás; 7 – Compressor de biometano; 8 – Cilindros de biometano; A – Substrato in natura; B – Substrato digerido; C – Biofertilizante; D – Biofertilizante maturado; E e F – Biogás; G – Biometano; H – Biometano comprimido.

O carregamento do substrato do espaço de armazenagem do substrato para os picadores através de carregadeira. Na figura 4.32 pode ser visto o esquema de posicionamento da alimentação do substrato.

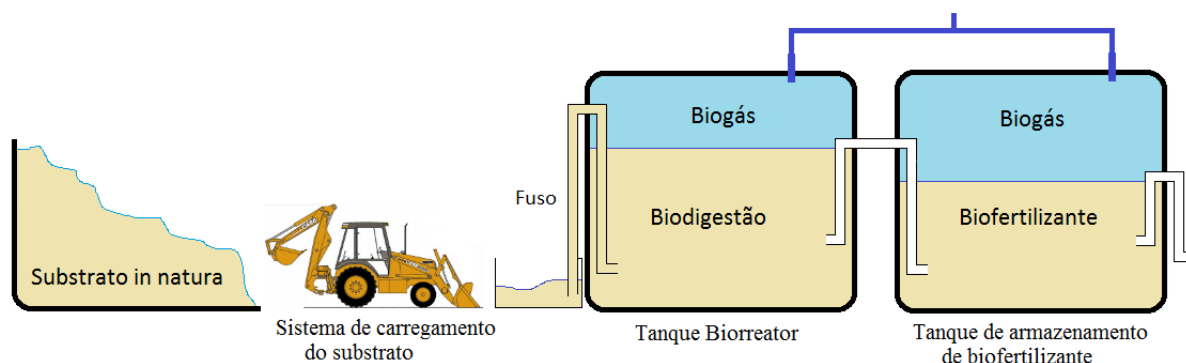


Figura 4.32 – Alimentação do substrato.

Para viabilizar a utilização do gasômetro integrado ao reservatório do biofertilizante optou-se pela utilização do sistema é denominado bifásico com dois estágios. A configuração ideal então é a composta de biorreator e reservatório de pós-digestão conforme figura 4.32.

Para o armazenamento do substrato é necessário um espaço subdividido para o armazenamento e garantir a utilização do substrato durante o ano. O piso deve ser impermeabilizado com cobertura de lona plástica o que impedirá a infiltração de água da chuva. O espaço para armazenamento foi dimensionado para um volume de 35000 m^3 de substrato (volume da silagem a ser recebido) conforme figura 4.33.

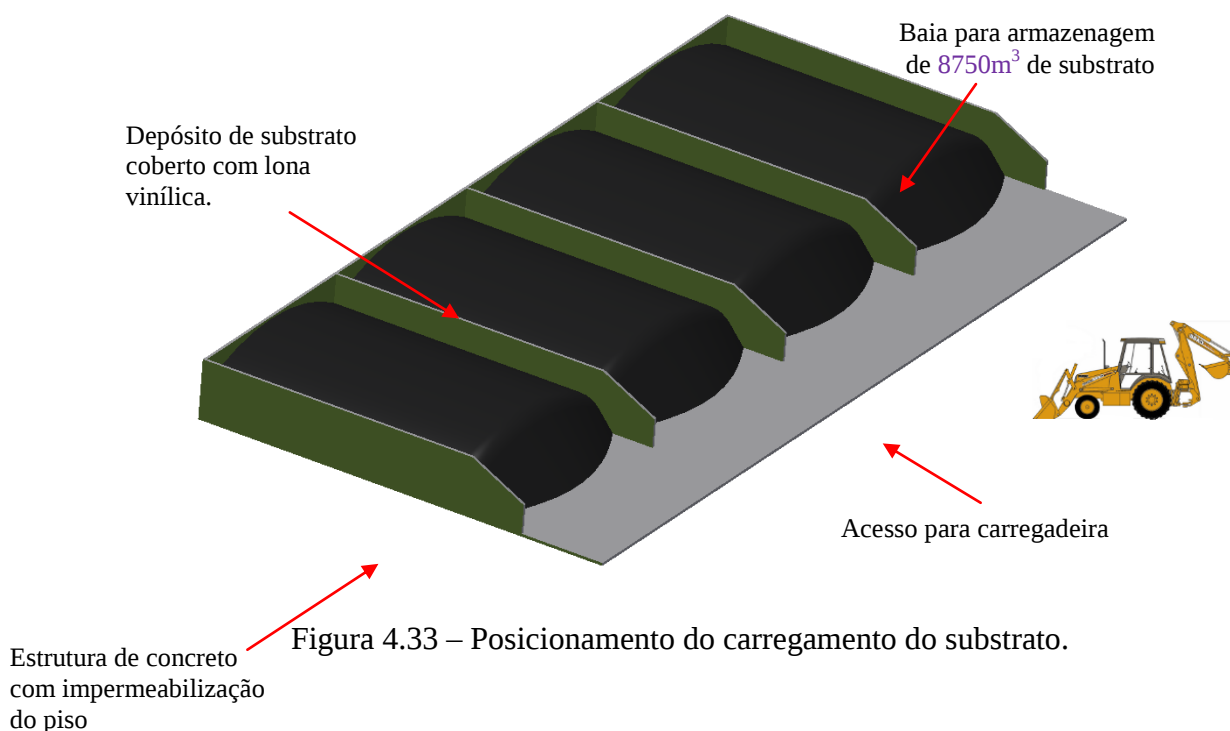


Figura 4.33 – Posicionamento do carregamento do substrato.

Para dimensionamento dos biorreatores foi considerado um TRH de 21 dias e com isso calculou-se a dimensão útil do biorreator da planta de biogás. Considerou-se uma carga diária

de (V_B) 95,9 m³ para o volume total de 350000 m³ de silagem de milho conforme tabela 3.19 de substrato disponível anualmente. O cálculo do Volume do Biorreator (V_R) está apresentado na equação 6.

$$V_R = TRH \times V_B$$

$$V_R = 21d \times 95,9 \text{ m}^3 = 2014 \text{ m}^3$$

Equação (6)

Verificou-se que para o substrato será necessário um volume em torno de 2014 m³, é importante destacar que os biorreatores devem apresentar um espaço superior em cada um dos tanques para viabilizar espaço para concentração e captação do biogás. Este espaço foi dimensionado de 4 a 10% do volume do substrato do biorreator, no total o biorreator ficou com aproximadamente 2100 m³. Para cálculo da Carga Orgânica Volumétrica (COV) que é importante para a indicação de quantos quilos de Matéria Orgânica Seca (MOS) serão carregados no biorreator por m³ de volume de trabalho, por dia (d) conforme equação 7.

$$COV = \frac{V_B \cdot c}{V_R / 10} [kg] \rightarrow COV = \frac{95,9 \text{ kg/d} \cdot 30}{2014 / 10} \rightarrow COV = 14,2 \text{ kg/d}$$

Equação (7)

Assim têm-se uma carga diária de Carga Orgânica Volumétrica (COV) de 14,2 kg/d. Devido ao dimensionamento de dois estágios têm-se então dois tanques com tamanho igual 2.100 m³. Para o armazenamento do biofertilizante, com base no modelo adotado de dois estágios. Para o armazenamento é necessário espaço com piso impermeabilizado com cobertura de lona plástica o que impedirá a infiltração de água da chuva. Na figura 4.34 pode ser visto o tanque para armazenamento do biofertilizante.

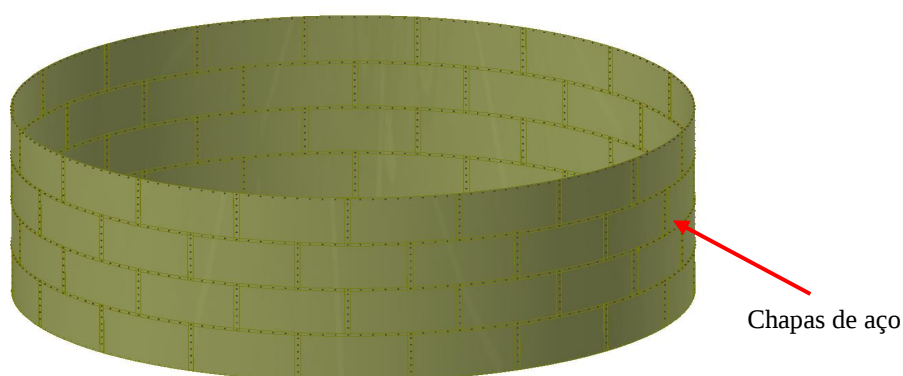


Figura 4.34 – Tanque armazenamento do biofertilizante.

Para armazenagem do biogás foi considerado a integração do gasômetro com a parte superior do biorreator e do tanque de biofertilizante. Na figura 4.35 pode ser visto o detalhe da cobertura para armazenamento do biogás.

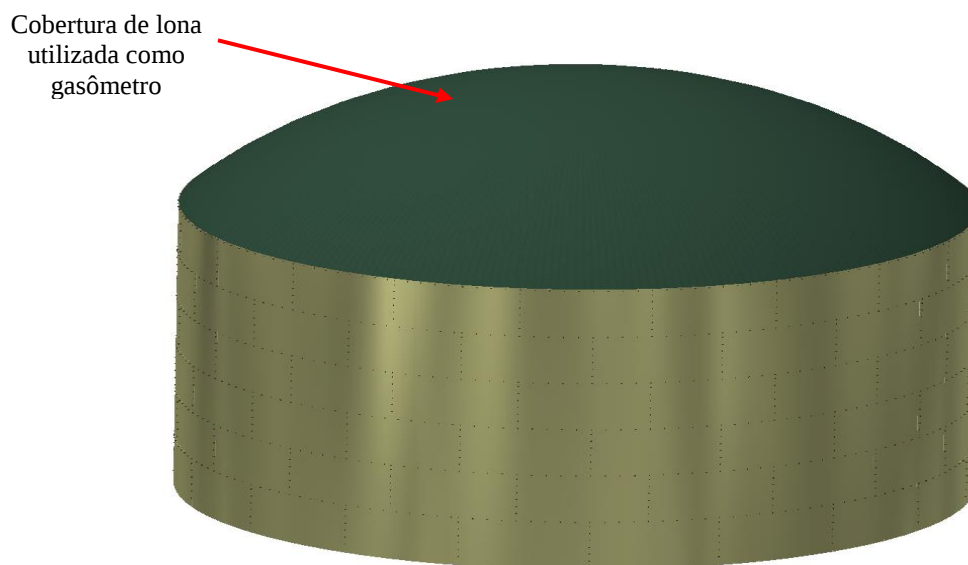


Figura 4.35 – Tanque biorreator com cobertura para armazenamento do biogás.

Além disso, dimensionaram-se dois reservatórios para armazenagem de biogás que no para armazenar um volume de biogás dois dias úteis. Para isso foi necessário calcular o volume presumido de biogás gerado a partir da silagem de milho conforme modelo de cálculo abordado.

Para o cálculo de geração do biogás foi necessária análise do substrato, no caso amostra da silagem de milho, feita pelo laboratório de análises ambientais da Universidade Feevale e foram fornecidos dados conforme a tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Rendimento de biogás e metano para a silagem de milho analisada

	Produção de biogás [l/kg MOS]	Quantidade de metano [l/kg MOS]
Proteína digestível (PD)	61,8	43,87
Gordura digestível (EE)	31,1	21,14
Carboidratos digestíveis (FB + ENN)	598,82	299,41
Total (por kg MOS)	691,72	365,00

Cada kg de substrato rende 190,28 litros de biogás com um teor de metano de aproximadamente 52%. Com um carregamento de 95,9 m³ diariamente têm-se uma produção diária de 18247 m³ de biogás/dia. Para reter o volume de produção diária de biogás seriam necessários dois gasômetros para armazenagem de biogás com 9000 m³ cada. Na figura 4.36 podem ser vistos os tanque para armazenamento do biogás.



Figura 4.36 – Gasômetros da planta de biogás.

4.1.4. Aplicação do PASSO 4 – Escolha de tecnologias e materiais para a planta de biogás

O sistema é um processo contínuo, onde o substrato é carregado no biorreator inicial, passa para um segundo tanque de biofertilizante e é descartado em um tanque aberto. O fluxo da planta é garantido pelos motores que pode ser vistos na figura 4.37.

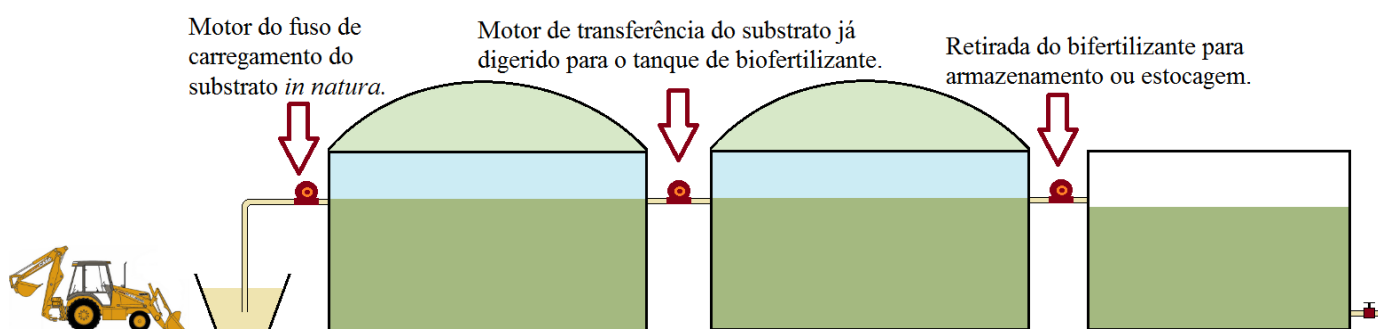


Figura 4.37 – Sentido de fluxo da planta de biogás.

Para controlar planta de biogás pode-se usar um Controlador Lógico Programável (CLP) com três saídas digitais, cinco analógicas e onze entradas analógicas. Este controlador pode ser um controlador simples já que não há a necessidade de protocolo de comunicação. Porém se torna necessário a instalação de um sistema de supervisão para monitorar as

variáveis. Na figura 4.38 pode ser vista a hierarquia de níveis de automação dimensionada para o projeto.



Figura 4.38 – Hierarquia dos níveis de automação da planta.

A planta de biogás conta com controle de pressão, vazão, nível e temperatura e pH. Possui sistema de misturadores - agitadores, leitura de composição do biogás e bombeamento do substrato. Na figura 4.39 pode ser visto a disposição dos dispositivos para controle da planta já mostrados na figura 4.38.

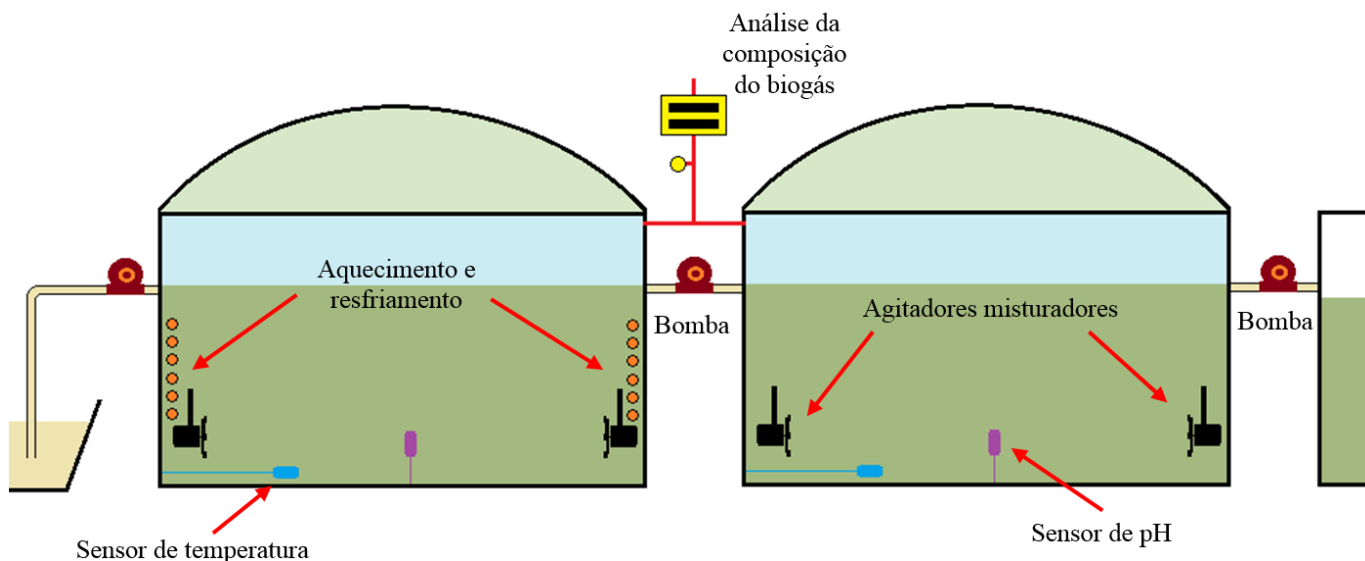


Figura 4.39 – Dispositivos atuadores e sensores.

Os agitadores, que são utilizados para manter o produto uniforme, estão situados em todos os tanques da planta, são saídas digitais que são acionadas quando há nível mínimo nos tanques, biorreator, biofertilizante e armazenagem. O nível destes tanques é indicado por

sensores de nível, entradas analógicas que verificam nível destes tanques continuamente. O programa executado pelo controlador lógico programável verifica o nível constantemente e aciona o agitador conforme a necessidade, ou seja, quando o nível está acima do nível.

A bomba de carregamento de substrato tem como finalidade alimentar o biorreator, nível controlado pelos sensores redundantes. Seu fluxo é constante não necessitando de inversor de frequência no sentido de controlar a vazão. Para esta bomba entrar em funcionamento há alguns pré-requisitos inseridos no programa como: ter substrato para envio e necessário também o tanque seguinte, biorreator, estar no nível de trabalho. Após estas condições estarem ativas, o operador aperta a partida da planta e a bomba deverá funcionar em um tempo pré-programado, digitado no sistema de supervisão. Após este tempo a bomba para novamente até reiniciar outro ciclo. Para segurança da planta o programa prevê um intertravamento para a bomba não funcionar caso o nível do biorreator estiver no máximo.

A bomba de alimentação do tanque biofertilizante é acionada sempre que este tanque estiver com nível aceitável de trabalho, nível controlado por dois sensores redundantes, acionando entradas analógicas do controlador que por sua vez atuam na malha de controle, acionando saída analógicas de 0 a 10 Volts ou 4 a 20 mA para o inversor de frequência da referida bomba, modulando a vazão conforme o nível do tanque biorreator para manter o fluxo do processo constante. O programa também contempla um intertravamento no sentido de proteger a planta caso este tanque esteja no nível máximo, impedindo assim o transbordamento. Na figura 4.40 pode ser visto a malha de controle.

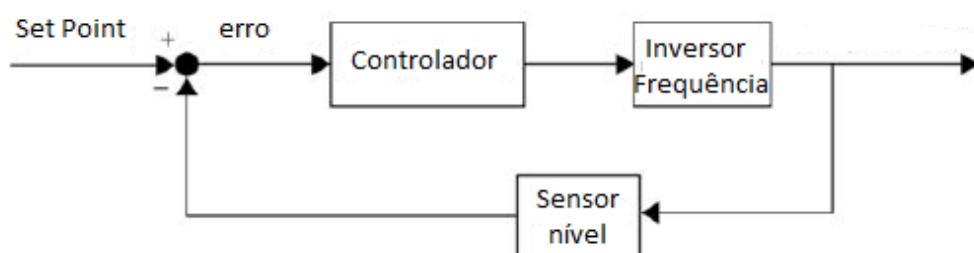


Figura 4.40 – Malha de controle das moto bombas.

A bomba de transferência de biofertilizante para o tanque de armazenagem funciona conforme como a bomba anterior, onde o nível deste tanque deve estar no nível de trabalho, monitorado pelos sensores redundantes que atuam como entradas analógicas funcionando de 0

a 10 Volts ou 4 a 20 mA no Controlador Lógico Programável, que através da lógica do programa envia um sinal analógico para o inversor de frequência monitorando a vazão conforme a necessidade do processo.

O controle de temperatura do biorreator inicial é feito por um sensor de temperatura. Esse sensor que tem por finalidade enviar um sinal analógico para o controlador. Se a temperatura deste tanque estiver abaixo do range de trabalho a lógica de programação envia um sinal digital para ligar a resistência, caso esteja acima da temperatura, o CLP envia um sinal digital para abrir uma solenoide, liberando assim água fria para o processo. Esse método é definido controle *Split-Range* é uma montagem particular que utiliza no mínimo dois elementos finais de controle com o objetivo de manter a variável final constante.

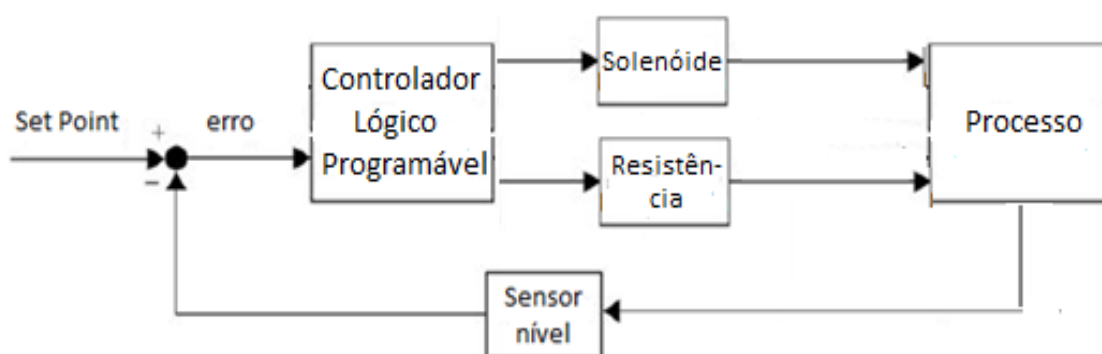


Figura 4.41 – Malha de controle de temperatura do biorreator.

Os manômetros do biorreator na saída do biorreator e do tanque biofertilizante são instalados para verificar a pressão do biogás na saída da planta, enviando assim um sinal analógico para o controlador coletar esses dados e armazenar em um banco de dados. Disponibilizando, se necessário, no sistema de supervisão históricos e gráficos de tendências ao longo do tempo em uma tela de supervisão para o operador. Também para coleta de dados são disponibilizados os valores de vazão do sensor de vazão F1 e o analisador de gás AG, já que são entradas analógicas de 0 a 10Volts ou 4 a 20 mA e servem para monitorar essas variáveis do processo. O peagâmetro com entrada analógica do controlador tem como função analisar o pH no biorreator inicial.

O sistema de supervisão foi desenvolvido no software *Factory Talk View*. Este software é um pacote integrado para desenvolvimento e operação de aplicação de interface homem-máquina (IHM) em um computador. Foi desenvolvido para processos automatizados ou monitoração da máquina e controle supervisório. Nesse pacote de sistema de supervisão há

um ambiente de desenvolvimento contendo as ferramentas necessárias para criar a aplicação da interface homem-máquina (IHM), incluindo telas gráficas, tendências, relatório de alarme e animação em tempo real, o mais próximo do real da planta. Depois do projeto finalizado o programador criará um arquivo *runtime* que executa a aplicação. As aplicações de *runtime* também podem ser executadas em um microcomputador situado próximo a planta.

Esse trabalho realizado também utilizou aquisição de dados para coleta de informação com fins de armazenamento para análise, com a finalidade de controlar e monitorar o processo, para posterior controle operacional. Dados estes de vazão de produto, vazão de gás e níveis nos tanques. Para coleta desses dados da planta foi utilizada uma ferramenta chamada *data logging*, do software de supervisão, que armazena os valores de *tags* dessas variáveis, que foi configurado para ser armazenado como um conjunto de arquivos em um banco de dados ODBC do *Windows*.

4.1.5. Aplicação do PASSO 5 – Modelagem em CAD 3D do biorreator

O modelamento dos biorreatores pode ser realizado através de um software CAD com ferramenta para simulação de projetos, como o *Autodesk Inventor professional*, a partir de todos os dados definidos no passo dimensionamento. A modelagem servirá para viabilizar a simulação e o planejamento para fabricação dos e de construção. A modelagem dos biorreatores visa facilitar a fabricação e a montagem do principal recipiente, que mantém o substrato a ser digerido em plantas de biogás. Os tanques biorreatores demandam atenção especial devido ao alto investimento que representam.

4.1.5.1. Tamanho da chapa para o tanque biorreator

Para a fabricação de biorreatores de médio porte uma das possibilidades adotadas é a de preparação de pequenas chapas. Essas placas possuem curvatura em função do diâmetro dos biorreatores. Como estabelecido o volume do biorreator 2.100 m³ determina o diâmetro e a divisão do número de placas. O modelo da placa dimensionada para construção dos tanques biorreatores é o mostrado na figura 4.42.

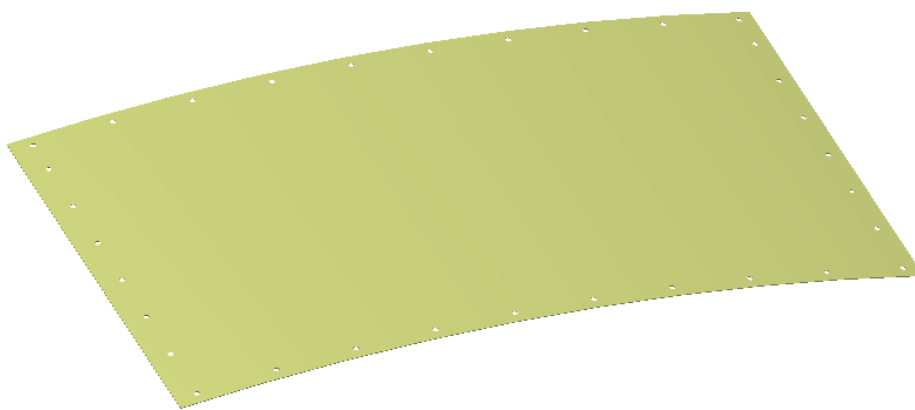


Figura 4.42 – Modelo de chapa curvada em aço para formação dos anéis.

4.1.5.2. Fixação das chapas

Para a fixação das chapas utiliza-se o transpasse conforme figura 4.43.

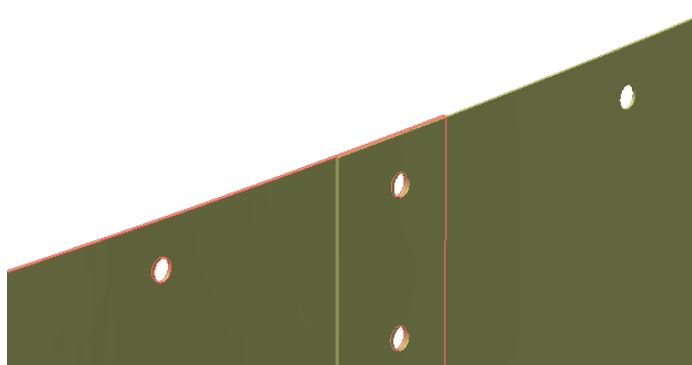


Figura 4.43 – Chapa transpassada.

Um detalhe da junção das chapas pode ser visto na figura 4.44.

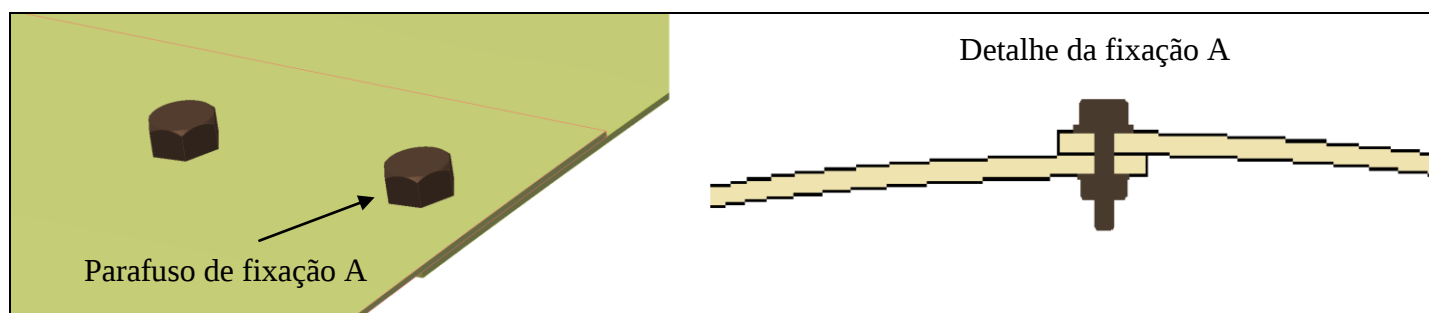


Figura 4.44 – Detalhe com exemplo da fixação da junção da chapa metálica.

4.1.5.3. Montagem das chapas em anéis

Para a montagem dos biorreatores formam-se anéis com as chapas. Essas chapas possuem uma medida de transpasse conforme a figura 4.45.

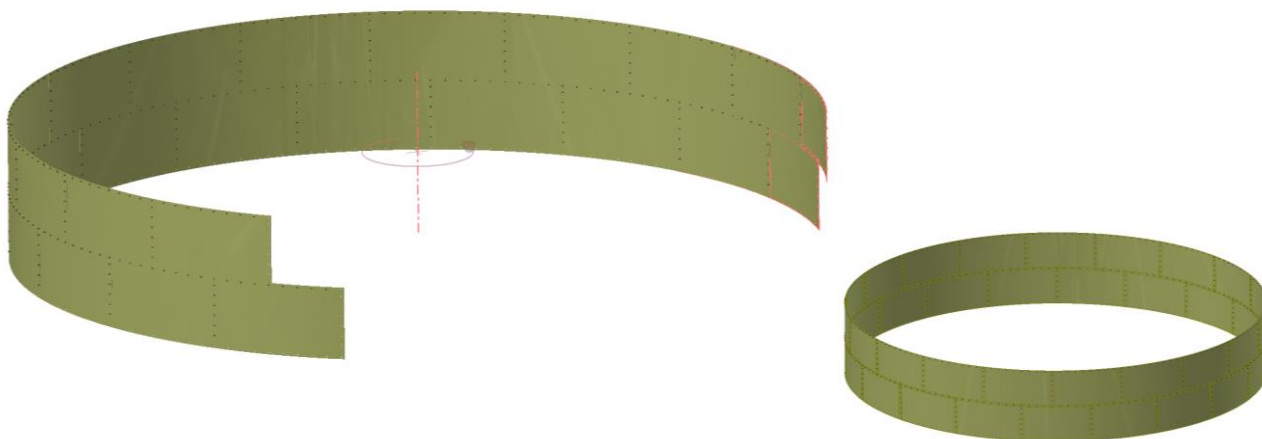


Figura 4.45 – Anel formado pela união das chapas.

A altura dos biorreatores depende do volume e é formada com a adição de anéis em placas aparafusadas conforme pode ser visto na figura 4.46.

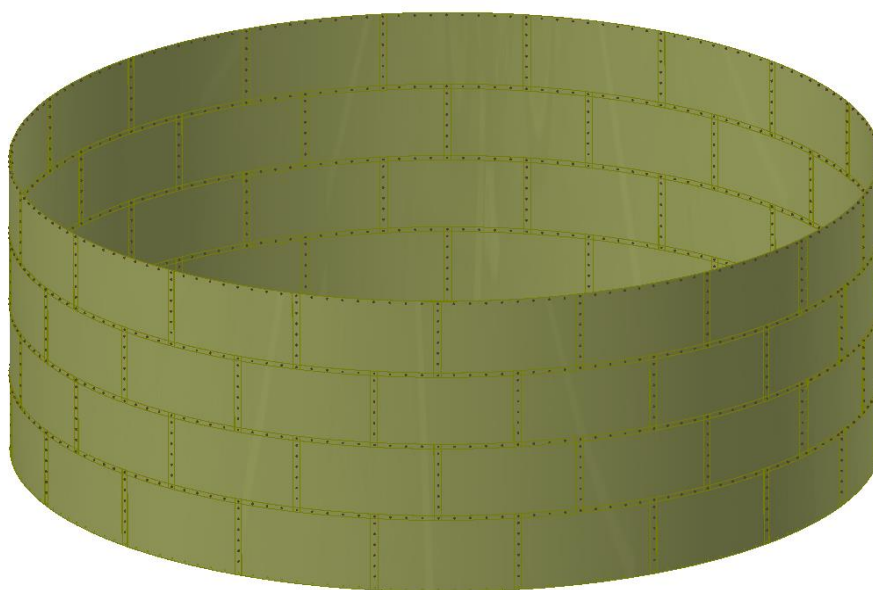


Figura 4.46 – Tanque biorreator formado pelos anéis.

A fabricação das peças foi definida em três operações principais, corte do comprimento da chapa, furação para fixação e conformação para composição do diâmetro do tanque. Processos 1, 2 e 3 conforme figura 4.47.

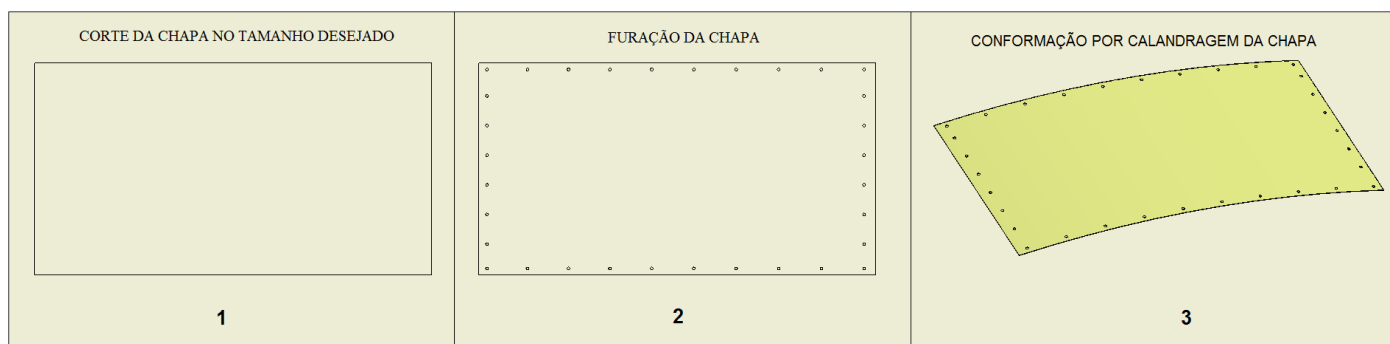


Figura 4.47 – Sequência de fabricação da chapa.

4.1.5.4. Sequência de montagem do biorreator e tanque para biofertilizante

Para a montagem dos biorreatores devem ser respeitados alguns aspectos da fundação. Deverá ser considerado a fixação da base da parede será concretada conforme figura 4.48, 4.49 e 4.50.



Figura 4.48 – Detalhe do posicionamento do primeiro anel.



Figura 4.49 – Fixação do anel, parede na base para apoio.



Figura 4.50 – Concretagem da base.

4.1.5.5. Montagem da Planta de biogás

A planta baixa definida para o tratamento de 35000 m³ de silagem de milho por ano está disposta na figura 4.51.

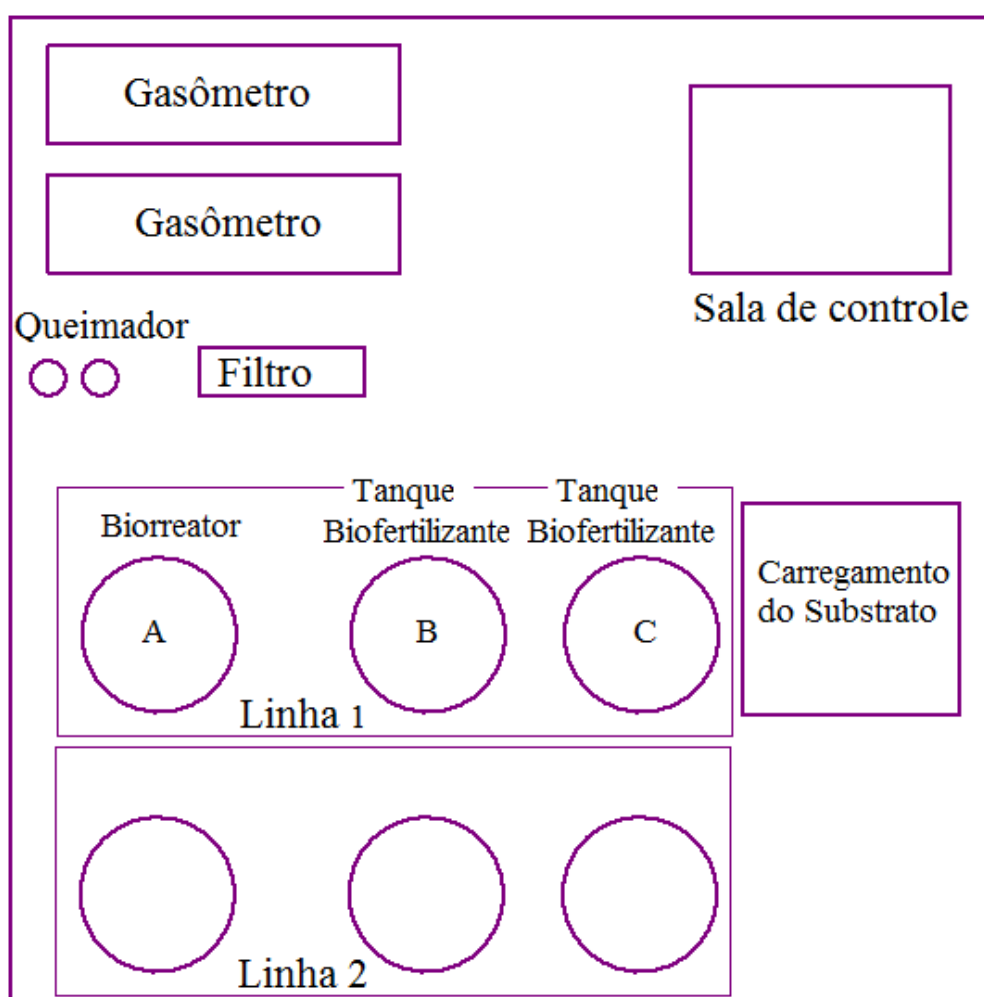


Figura 4.51 – Planta baixa com a disposição dos tanques, gasômetros filtro e queimador.

A planta compõe-se de duas linhas onde em cada uma destas têm-se um biorreator principal que recebe o substrato um biorreator secundário chamado de tanque de armazenamento de biofertilizante e um tanque para maturação do biofertilizante. A sequência se dá em linha conforme pode ser visto na figura 4.52.



Figura 4.52 – Disposição em linha dos tanques e biorreatores na planta de biogás.

A planta pode ser ampliada em linhas paralelas de biorreatores e tanques que alternam e compensam a produção de biogás. Na figura 4.53 pode ser visto a disposição das duas linhas.

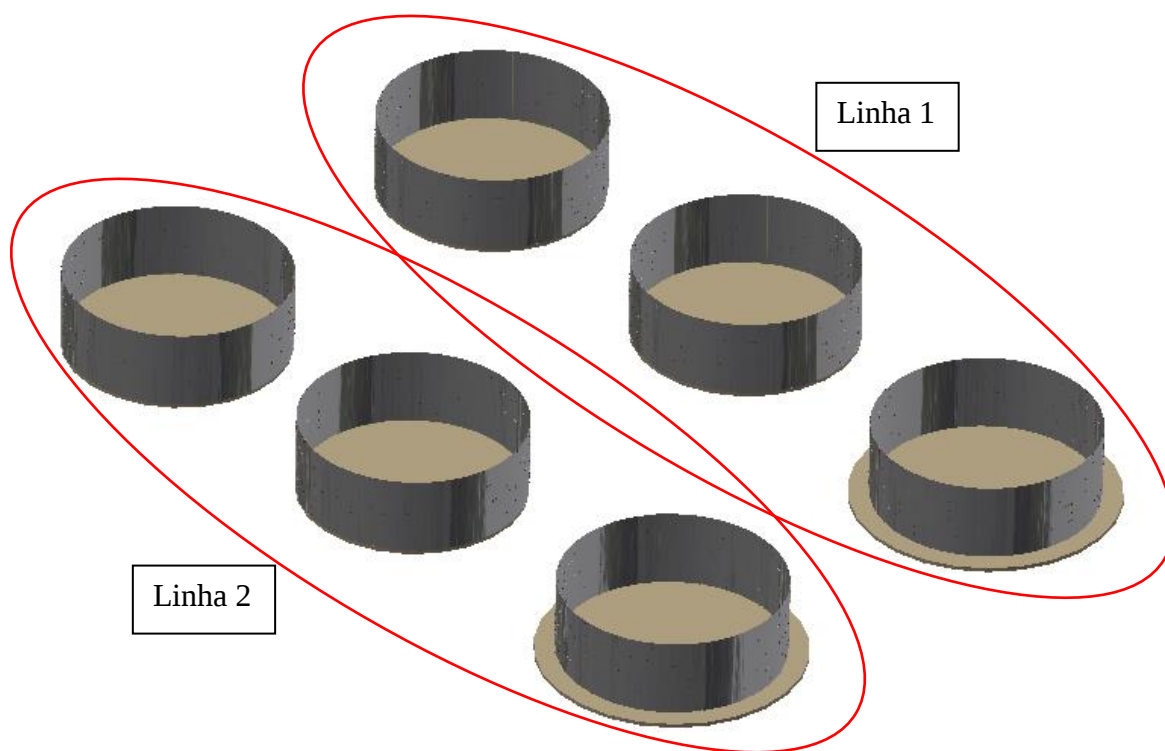


Figura 4.53 – Instalação de linhas de biorreatores e tanques no projeto proposto para a planta de biogás.

Os gasômetros, tanques reservatórios, são responsáveis pelo armazenamento do biogás. Também tem a função de garantir o abastecimento na geração da energia quando da

interrupção da produção nas linhas. Na figura 4.54 o gasômetro podem ser visto. No Anexo II está o projeto detalhado.

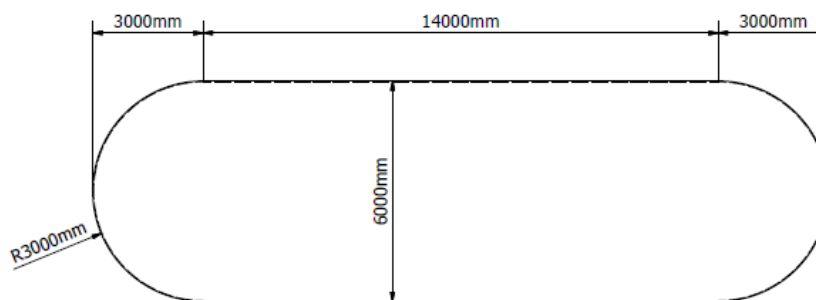


Figura 4.54 – Gasômetros projetados da planta de biodigestão.

Os queimadores são responsáveis pela queima do biogás quando da necessidade do desligamento dos geradores e da capacidade máxima dos gasômetros ter sido atingida. Garante que na geração do gás este não seja jogado na atmosfera. Na figura 4.55 pode ser visto modelo do queimador a ser utilizado.



Figura 4.55 – Queimador da planta de biodigestão.

A figura 4.56 mostra o projeto da planta de biodigestão com a distribuição dos principais componentes: linhas de biorreatores, queimadores, gasômetros, geradores e controle.

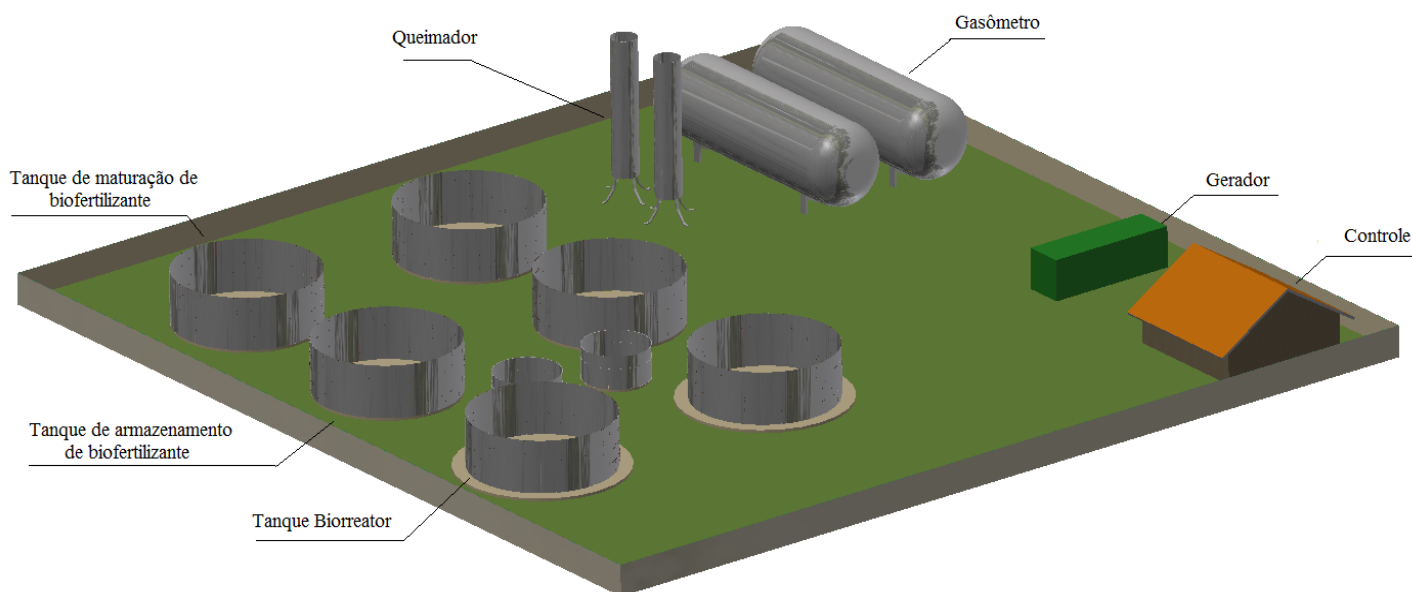


Figura 4.56 – Planta de biodigestão em modelagem 3D.

4.1.6. Aplicação do PASSO 6 – Simulação do biorreator com FEMAP NASTRAN

4.1.6.1. Definição dos materiais para fabricação dos tanques biorreatores

Para simulação computacional com software FEMAP NASTRAN 10.0.2 da empresa SIEMENS de tanque biorreator com volume já dimensionado foram escolhidos três materiais metálicos de liga distintos. Aço duplex AISI 318, trata-se de um material ainda novo no mercado nacional, o aço austenítico AISI 316L, inoxidável, muito utilizado na fabricação de tanques para materiais corrosivos e o aço carbono laminado ASTM A36.

Os primeiros aços foram escolhidos porque já foram testados em ambiente biocorrosivo e já se possui amplos detalhes do comportamento do mesmo na fabricação de biorreatores. Por último, o aço carbono foi escolhido, pois também é alvo de pesquisa para utilização em biorreatores com vitrificação das chapas.

4.2.6.2. Simulação computacional do tanque biorreator

Primeiro foi executada a simulação do biorreator para visualização do comportamento do material 316L. O tamanho do biorreator dimensionado foi de tamanho médio com 2.100

m³. Com diâmetro de 22000 mm, altura total do costado é de 6000 mm, a altura de coluna de água é de 5600 mm. O coeficiente de segurança será determinado pela Teoria da Tensão Normal Máxima, também conhecida como Teoria de Rankine, a mesma utilizada pela Norma ASME VIII Divisão 1.

4.2.6.2.1. Resultados para aço inox duplex AISI 318

Considerando as propriedades de tensão de escoamento do aço inox duplex AISI 318 515 MPa e o limite de resistência à tração é de 710 MPa.

Na simulação com o software, para o cálculo da pressão devido à coluna de água, foi utilizada a densidade da água para 1000 kg/m³ que estabelece a pressão interna no tanque biorretor que varia em função da altura.

Na figura 4.57 foram estipuladas 5 divisões para simulação do biorreator que representam os anéis para execução da primeira análise de tensões.

Na etapa de otimização dimensional, os quatro primeiros anéis têm uma espessura e que serão as variáveis de projeto. Assim, teremos quatro anéis que representam quatro propriedades de espessura. O anel superior, de número 5, não entra no processo de otimização porque não foi considerada coluna de líquido neste anel. As divisões que aparecem no tanque, abaixo, representam os anéis na primeira análise de tensões. No ANEXO I pode ser visto o desenho com detalhes.

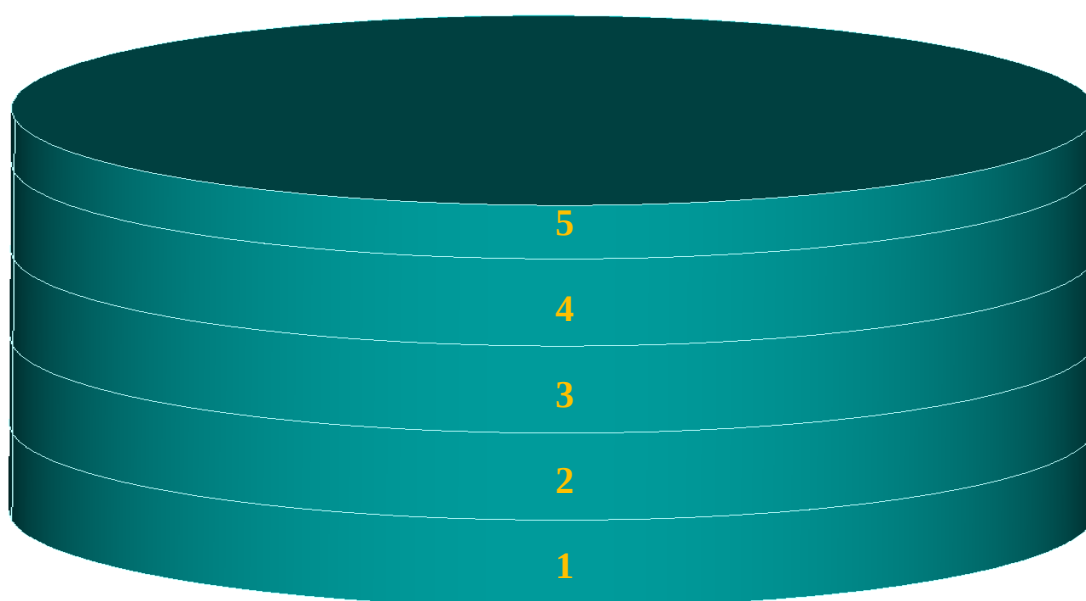


Figura 4.57 – Divisão em anéis do tanque biorreator.

Foi adotada uma malha de elementos de casca isoparamétrica de 4 nós conforme figura 4.58 isoparamétrica (elementos isoparamétricos são assim chamados porque as funções de interpolação da geometria do elemento e as funções do campo de deslocamentos são as mesmas) de 4 nós, portanto, de formulação linear. A primeira análise foi estática, e elementos com espessura de 8 mm como estimativa inicial, para verificar os níveis de tensão.

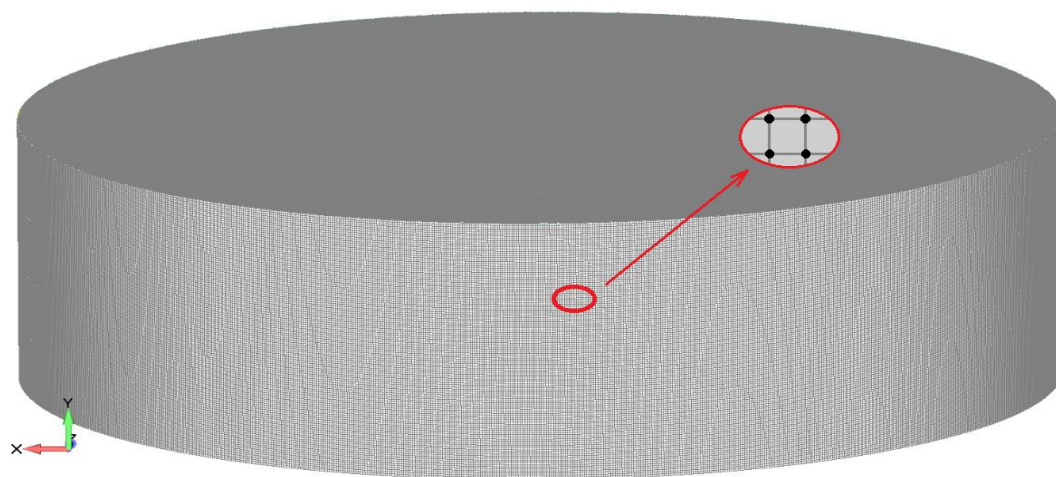


Figura 4.58 – Malha de elementos para simulação de um dos anéis.

Na malha de elementos finitos é apresentada na figura 4.58 foram utilizados 465.708 elementos e 465.133 nós. O critério para determinar o número de elementos, foi o tamanho do elemento a ser utilizado e, neste caso, os elementos de casca tem a forma de quadriláteros de aproximadamente 50 mm de cada lado. Com elementos tão pequenos, quando comparados às dimensões do tanque, têm-se uma boa discretização da geometria e os resultados da análise de tensões são mais precisos. A figura 4.59 mostra um detalhe da malha de excelente qualidade, pois não existem elementos distorcidos.

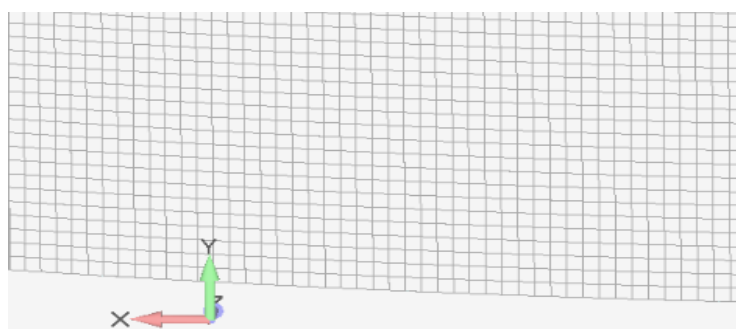


Figura 4.59 – Detalhe da malha de elementos sem distorção utilizados para a simulação.

Para a simulação a pressão interna no tanque foi estabelecida pela coluna d'água sendo considerada a tensão equivalente conforme o ANEXO IV - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS item 3.4. Na primeira simulação de

tensão utilizaram-se chapas de 8 mm ao longo de todo o costado do tanque. Na figura 4.60 pode ser visto o resultado da simulação.

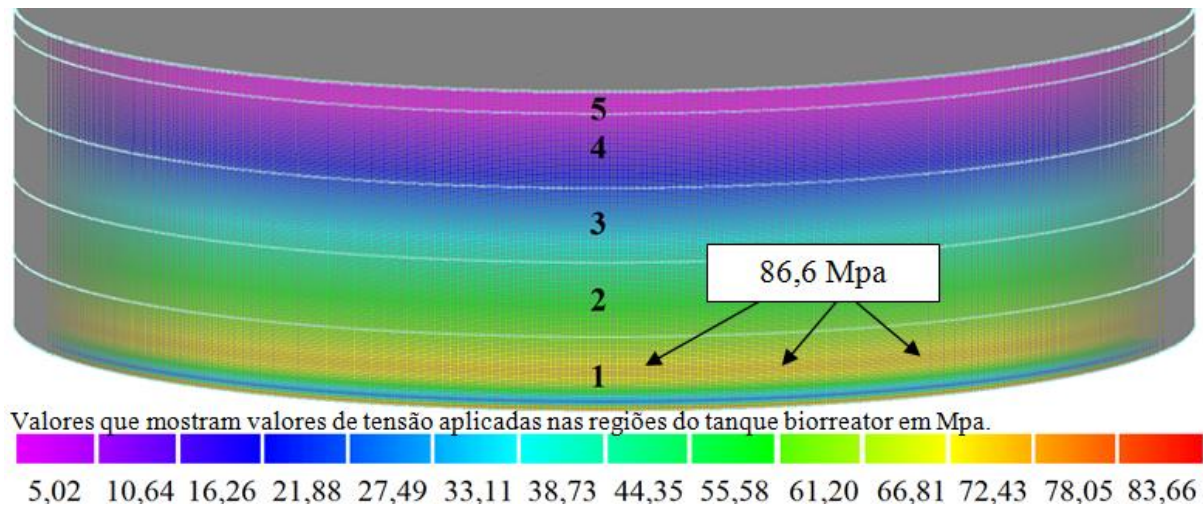


Figura 4.60 – Simulação com chapas de 8 mm.

A tensão máxima no biorreator é de 83,66 MPa foi simulada em alguns pontos da chapa número 1 portanto, com esta espessura de chapa, o coeficiente de segurança (n) foi calculado pela equação 8, de acordo com o código ASME Seção VIII – Divisão I.

$$n = \frac{\text{tensão_escoamento_material}}{\text{tensão_máxima_no_biorreator}} = \frac{515\text{MPa}}{83,66\text{MPa}} = 6,15 \quad \text{Equação (8)}$$

O coeficiente de segurança é maior do que o recomendado pela norma, portanto, pode-se optar por reduzir a espessura das chapas à metade, portanto, uma nova análise será feita, e os elementos terão espessura de 4,00 mm. O resultado da nova simulação está na figura 4.61.

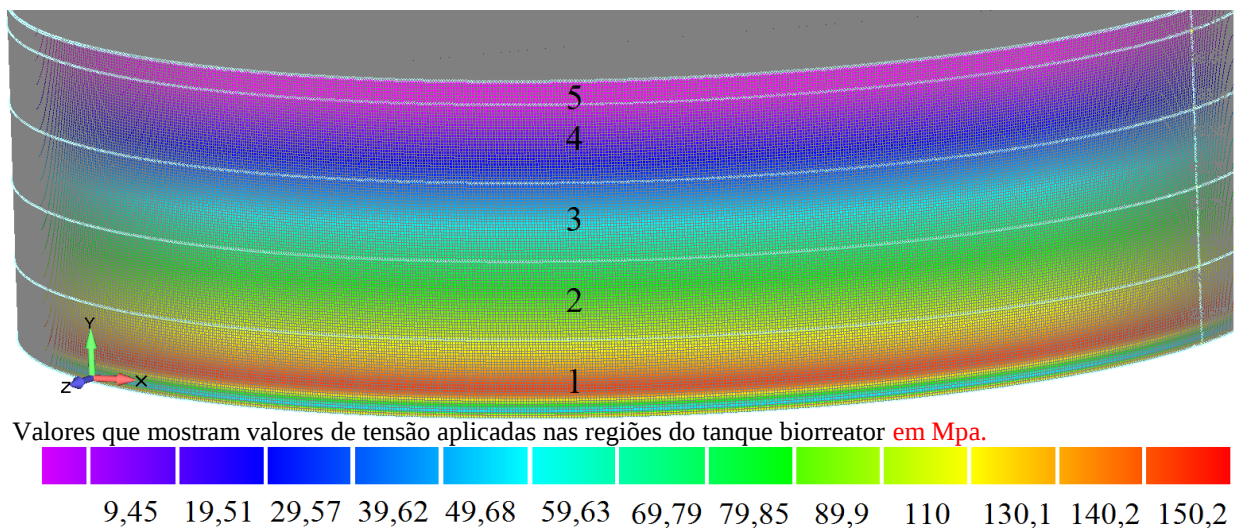
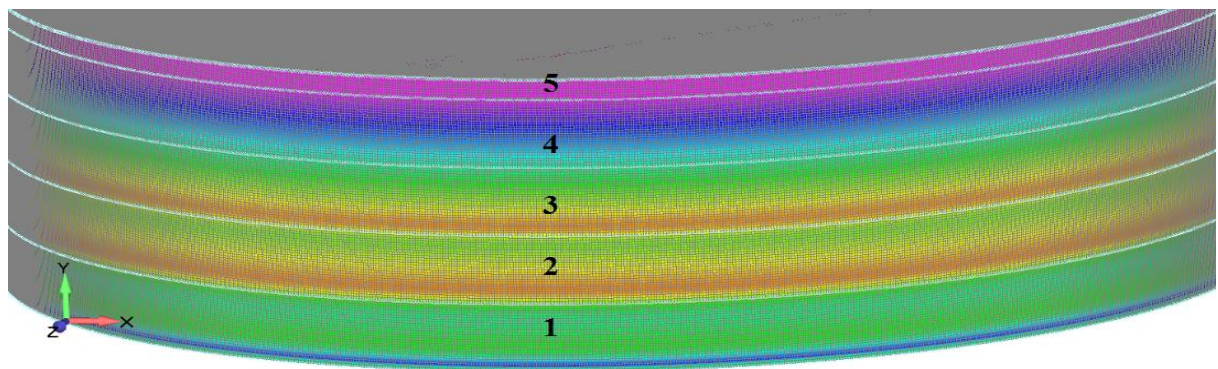


Figura 4.61 – Simulação com chapas de 4 mm.

Os novos resultados mostram que a tensão máxima no biorreator é de 150,2 MPa e, portanto, com a espessura de chapa com 4 mm, o coeficiente de segurança é de:

$$n = \frac{\text{tensão}_{\text{escoamento}_{\text{material}}}}{\text{tensão}_{\text{máxima}_{\text{no}_{\text{biorreator}}}}} = \frac{515\text{MPa}}{150,2\text{MPa}} = 3,42 \quad \text{Equação (9)}$$

Desta forma, se admitiu um valor de coeficiente de segurança de 2,00 e o maior valor de tensão admissível para o tanque deve ser de 250 MPa, aproximadamente, e foi utilizado um método de otimização estrutural. Para otimização de gastos com materiais em chapa optou-se pela seguinte variação de espessuras: anel 1: 4,00 mm, anel 2: 2,00 mm, anel 3: 1,33 mm, anel 4: 1,33 mm. Na figura 4.62 pode ser visto o resultado desta simulação.



Valores que mostram valores de tensão aplicadas nas regiões do tanque biorreator em Mpa.

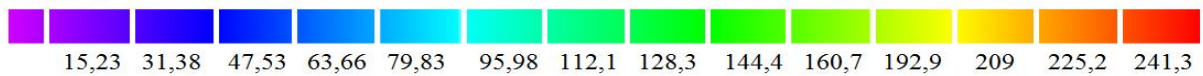
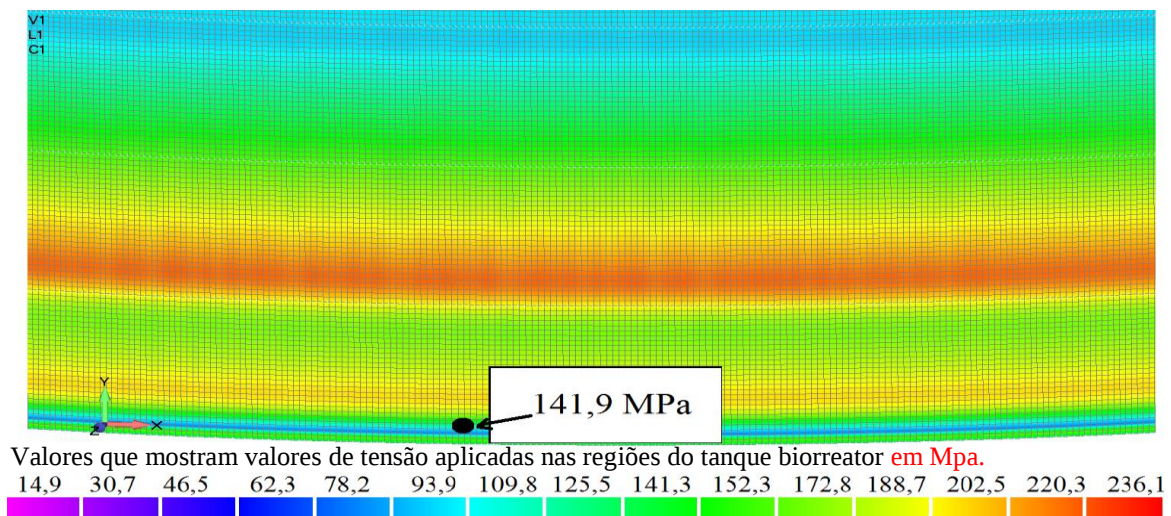


Figura 4.62 – Primeira simulação de tensão com chapas de espessura variadas.

Observando-se a figura 4.62, percebe que as tensões no primeiro anel são inferiores a 141,9 Mpa. De forma ampliada pode-se verificar este resultado na figura 4.63.



Valores que mostram valores de tensão aplicadas nas regiões do tanque biorreator em Mpa.

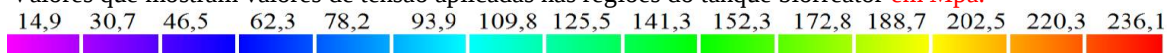
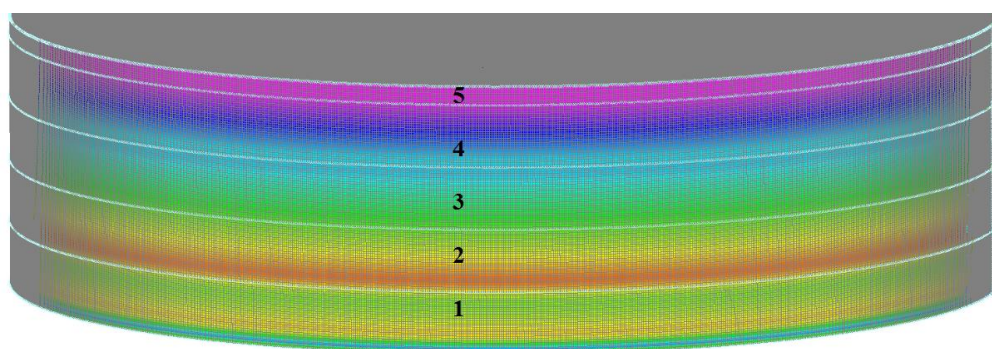


Figura 4.63 – Destaque da distribuição da tensão no primeiro anel.

O valor de tensão máxima, encontrado no primeiro anel, é de aproximadamente 141,91 MPa. Portanto, o critério de otimização forneceu uma espessura de 4,00 mm e que pode ser reduzida, pois é 110 MPa inferior a tensão admissível para o aço duplex. No segundo anel, a tensão encontrada é de 241, 3 Mpa. Foi efetuada uma análise estática com a seguinte proposição de espessuras: Anel 1: 3,00 mm; Anel 2: 2,00 mm; Anel 3: 2,00 mm; Anel 4: 1,50 mm. O resultado dessa nova simulação pode ser visto na figura 4.64.



Valores que mostram valores de tensão aplicadas nas regiões do tanque biorreator em Mpa.

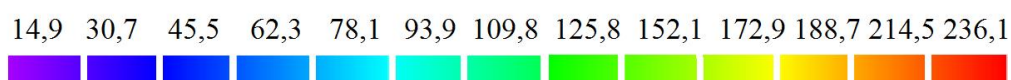


Figura 4.64 – Segunda simulação de tensão com chapas de espessura variadas.

Para estas espessuras, conforme o resultado da análise de tensões apresentada na figura 4.64 onde se pode ver, qualitativamente que as chapas que compõem o primeiro anel estão mais tensionadas – em relação ao resultado de otimização, porém, a partir deste resultado a espessura está 1,00 mm menor e, com isso, se terá proporcional redução na utilização do material. Quantitativamente, é apresentada a figura 4.65 e se verifica a tensão de 193,29 MPa em um nó da malha, no primeiro anel do tanque, com 3,00 mm de espessura.

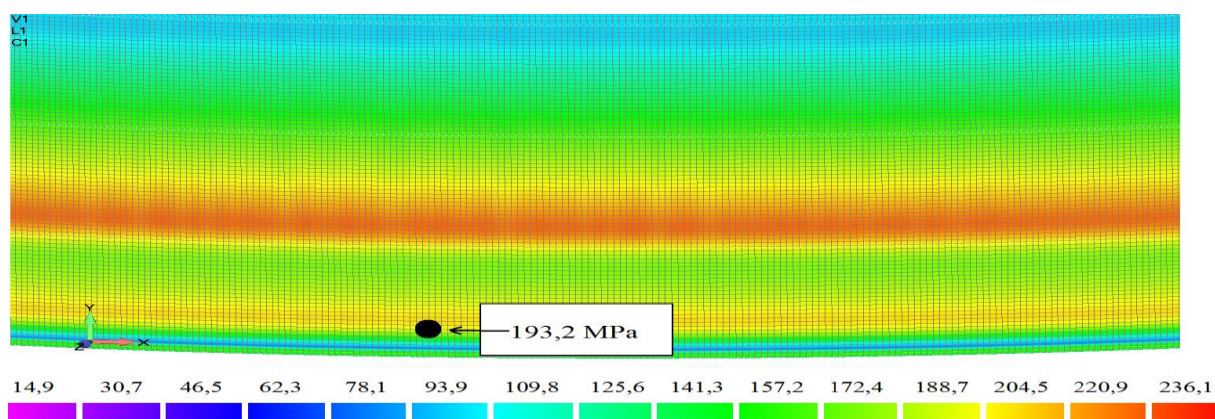


Figura 4.65 – Distribuição da tensão no primeiro anel com espessura de 3 mm.

Como a maior tensão encontrada é no segundo anel, e seu valor de 236,1 MPa é lido na escala à direita, e portanto, dentro do valor da tensão admissível.

4.2.6.2.2 Resultados para o aço ASTM A 36 e para o aço Inox 316 L

Considerando as propriedades do aço A-36 tem-se tensão de escoamento 250 Mpa e de resistência à máxima tração 350 Mpa. O módulo de elasticidade é de 199.94 Mpa e o coeficiente de Poisson 0,28.

Para o aço inox 316L tem-se tensão de escoamento 240 Mpa e de resistência à máxima tração 320 Mpa. O módulo de elasticidade é de 193053 MPa e o coeficiente de Poisson 0,28. Considerando-se que estes valores estão muito próximos ao do aço ASTM A-36.

A análise estática, para todas as chapas com 8,00 mm de espessura forneceram praticamente os mesmos valores de tensão, para o aço inox e o aço ao carbono com diferença inferior a 1%. Portanto, os resultados de tem uma variação inferior a 1%, se fossem feitas análises com cada um dos materiais.

Com um coeficiente de segurança acima de 4 optou-se por reduzir a espessura das chapas à metade, portanto, uma análise foi feita, e as chapas tiveram espessura de 4,00 mm.

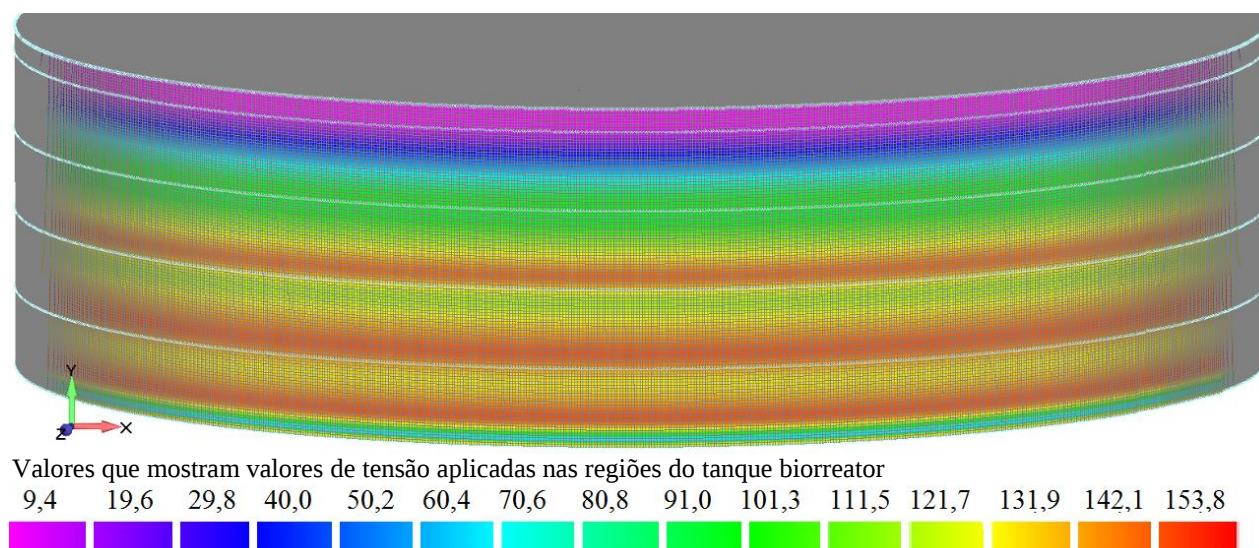


Figura 4.66 – Simulação de tensão de chapas de aço A – 36.

Os resultados mostram que a tensão no tanque é de aproximadamente 152,3MPa, e portanto, com esta espessura de chapa, o coeficiente de segurança seria de aproximadamente 1,64 conforme equação 10.

$$n = \frac{\text{tensão}_{\text{escoamento}_{\text{material}}}}{\text{tensão}_{\text{máxima}_{\text{no}_{\text{biorreator}}}}} = \frac{250\text{MPa}}{152,3\text{MPa}} = 1,64 \quad \text{Equação (10)}$$

Não é mais necessário utilizar o método de otimização para determinar as espessuras das chapas, então, para o aço A – 36, ao primeiro anel foi proposta uma chapa de 3 mm de espessura, e para os outros quatro anéis, foi proposta uma espessura de 2,00 mm. Para o aço duplex, pode-se usar todas as chapas com 2,00 mm de espessura. Para o aço 316 L e o A- 36 deve-se usar os anéis com 4,00 mm de espessura, e os demais anéis com 2,00 mm de espessura.

Anel 1: 4,00 mm;

Anel 2: 3,00 mm;

Anel 3: 2,00 mm;

Anel 4: 1,50 mm.

Anel 5: 1,50 mm.

5.0. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A metodologia proposta pode ser aplicada em qualquer município que produza resíduos de biomassa para geração de energia elétrica. O município de São Francisco de Paula foi selecionado para aplicação da metodologia num projeto de planta de biogás devido á oportunidade de biomassa existente no local.

Os dados levantados sobre o local de instalação da planta de biogás para geração de energia elétrica, influenciaram na decisão sobre a tecnologia para o carregamento e o tipo de processo de biodigestão, baseado no teor de matéria seca. A modificação desses parâmetros teria como consequência a alteração do formato e do tipo de planta de biogás.

O formato dos biorreatores foi determinado a partir do tipo de biodigestão. A biomassa disponível na região tem sua origem na atividade agrícola. O substrato é composto de 100 % de silagem de milho. Nesse caso, a fragmentação do substrato é desnecessária, porque é feita por picadores integrados às colheitadeiras. O substrato é recebido triturado. Na região, existe disponibilidade de outros tipos de substratos que necessitam de fragmentação. Esses substratos não foram considerados na realização do projeto, mas constituem-se numa opção que tem como vantagem a ampliação da disponibilidade de resíduos, mas que necessitam do uso de um sistema fragmentador.

A estratégia para recebimento do substrato serviu para planejar a gestão de recebimento, eu tem pouca influência no dimensionamento do biorreator, mas que é fundamental para a determinação do espaço de armazenamento. O modelo de biodigestão úmida, forneceu condições para definir fluxo de funcionamento contínuo bifásico e o carregamento contínuo. O fluxo por sua vez possibilitou todo o esboço de projeto da automação da planta.

A integração do gasômetro no biorreator cilíndrico é uma forma de capturar o biogás no reservatório de biofertilizante, mas não uma exigência. Portanto essa foi uma opção dos projetistas que utilizaram o sistema bifásico com dois estágios.

Na região são registradas temperaturas, relativamente baixas, quando comparadas à outras regiões do estado. Por essa razão, a integração de um sistema de aquecimento é indispensável e o mesmo foi inserido no controle e automação da planta. Além do aquecimento integra-se no controle do biorreator a mistura de substrato, agitação, com movimentação variável e regulável. Recirculação com bombas entre tanques biorreatores, controle de pH e composição do biogás. O estabelecimento do TRH em 21 dias produz um biofertilizante com características específicas. Como, no Brasil, ainda não foi desenvolvida uma legislação para o biofertilizante, não foi adotado um TRH maior, já que o mesmo não necessita de certificação. O tipo de tecnologia para o controle foi optado pela nacional local, já que existem empresas fornecedoras na região metropolitana e a região é consideravelmente próxima, em torno de 120 km.

A simulação computacional com software FEMAP Nastran 10.0.2 dos tanques já dimensionados foram necessários para escolha de material a ser utilizado nos biorreatores. O aço duplex AISI 318 possui boas propriedades mecânicas, um material ainda novo no mercado nacional e importante seria importante analisar um material de ponta disponível. O aço austenítico AISI 316L e aço carbono laminado ASTM A-36 foram empregados na fabricação de um tanque biorreator em dissertação no LdTM pelo Mestre em Engenharia Antônio Pereira Borba em “*Estudo de materiais metálicos para a fabricação de biorreatores anaeróbios*” (BORBA, A. P, 2012)

A simulação do biorreator dimensionado de tamanho com 2.100 m³ foi devido ao valor obtido no dimensionamento. O coeficiente de segurança observado foi determinado pela Teoria da Tensão Normal Máxima, também conhecida como Teoria de Rankine, a mesma utilizada pela Norma ASME VIII Divisão 1.

Considerando-se valores comerciais de largura de chapas, dividiu-se o costado em anéis o que facilitou a definição de espessuras variáveis diferentemente da utilização de uma chapa com espessura constante. Isso facilitou a otimização dos anéis com diferentes espessuras o que impacta diretamente na redução de custos. A repetição de simulações com diferentes espessuras de chapas considerando o coeficiente de segurança mínimo foi baseado

em método heurístico de ajuste e repetições. Os resultados diferenciados se dão em função das diferentes propriedades dos materiais.

De acordo com o levantamento de dados verifica-se que a melhor configuração é a que utiliza um gasômetro integrado ao reservatório do biofertilizante e com divisão da biodigestão em dois tanques, o sistema denominado bifásico com dois estágios. Conforme estudo a configuração ideal para este tipo de situação é a composta de biorreator e reservatório de pós-digestão.

Devidos ao tipo de biomassa, silagem de milho, ser produzida em duas colheitas anuais, foi necessário projetor um espaço subdividido para o armazenamento do substrato e garantir a utilização do mesmo durante o ano.

No cálculo do volume dos biorreatores foi adotado um TRH de 21 dias para cada tanque e com esse dado para o volume total de 35000 m^3 de silagem de milho conforme de substrato disponível anualmente obteve-se uma carga diária de $95,9 \text{ m}^3$. Conforme calculado no tópico do dimensionamento 4.1.3 têm-se uma produção diária de 18219 m^3 de biogás/dia. Com este valor dimensionou-se o volume dos gasômetros que é de duas vezes o valor da produção diária, conforme já visto. Para os tanques biorreatores obteve-se um valor médio com 2.100 m^3 . Com diâmetro de 22.000 mm , altura total do costado é de 6.000 mm .

O resultado da simulação mostra que se obteve diferentes espessuras para os diferentes materiais para o modelo de tanque biorreator dimensionado. Dimensionado através de análise estática obteve-se uma otimização com a seguinte proposição de espessuras:

Anel 1: $3,00 \text{ mm}$;

Anel 2: $2,00 \text{ mm}$;

Anel 3: $2,00 \text{ mm}$;

Anel 4: $1,50 \text{ mm}$;

Anel 5: $1,50 \text{ mm}$.

Para estas espessuras, conforme o resultado da análise de tensões já apresentadas no tópico 4.2.6.2.1 Resultados para aço inox duplex AISI 318 pode ser visto qualitativamente que as chapas que compõem o primeiro anel estão mais tensionadas – em relação ao resultado de otimização, porém, a partir deste resultado a espessura está $1,00 \text{ mm}$ menor e, com isso, se

terá proporciona redução na utilização do material. Já os resultados para os demais aços abordados no tópico 4.2.6.2.2 Resultados para o aço A – 36 e para o aço Inox 316 L foram muito próximos para estes dois materiais. A análise estática, para o aço A – 36, ao primeiro anel foi proposta uma chapa de 3 mm de espessura, e para os outros quatro anéis, foi proposta uma espessura de 2,00 mm. Para o aço duplex, pode-se usar todas as chapas com 2,00 mm de espessura. Para o aço 316 L e o A- 36 deve-se usar os anéis com 4,00 mm de espessura, e os demais anéis com 2,00 mm de espessura. Os dois materiais apresentam valores tensão de escoamento muito próximos.

Anel 1: 4,00 mm;

Anel 2: 3,00 mm;

Anel 3: 2,00 mm;

Anel 4: 1,50 mm;

Anel 5: 1,50 mm.

6.0. CONCLUSÃO

Desenvolve-se uma metodologia de dimensionamento para utilização em projetos de plantas de biogás com a finalidade de avaliar de modo quantitativo os aspectos técnicos desse tipo de empreendimento. A metodologia foi desenvolvida considerando-se a divisão em seis passos: i) Levantamento de dados do local de instalação da planta de biogás; ii) Planejamento da planta de biogás; iii) Dimensionamento da planta de biogás; iv) Escolha de tecnologias; v) Modelagem mecânica computacional em CAD e vi) Simulação dos biorreatores com programas computacionais.

Para validação da metodologia proposta foi aplicada em um projeto para biodigestão de silagem de milho no município de São Francisco de Paula/RS. Demonstrou-se a aplicação do método com dados do local de construção da planta de biogás e composição da biomassa. A análise resultou a escolha do modelo de biodigestão tipo contínua, sistema bifásico com dois estágios e adoção de tanque biorreator para biofertilizante líquido. Considerando também o recebimento anual do substrato que é em Setembro (20000 m^3) e Março (15000 m^3) dimensionou-se o espaço de armazenagem do substrato com 35000 m^3 e dividido em quatro espaços. Para o carregamento do substrato foi escolhida máquina retroescavadeira (equipamento já existente na propriedade com operador treinado).

Também se calculou o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e verificou-se que a planta necessita de 21 dias de permanência do substrato no biorreator. A partir do volume anual do substrato recebido obteve-se uma carga diária de $95,9 \text{ m}^3$ e considerando o TRH dimensionou-se o biorreator com volume total de 2100 m^3 . Com isso, obteve-se um volume de biogás gerado de 18219 m^3 por dia com uma concentração de metano (CH_4) de 52%. Verificando o percentual de metano obtém-se um volume de 9473 m^3 de metano. A partir dos

dados de geração de metano pode ser verificado que com o volume obtido pode ser alimentado uma frota de 430 cilindros de gás para veículos que utilizam GNV de 22 m³ cada.

Foram executadas simulações mecânicas computacionais para a escolha da espessura mínima das chapas a serem utilizadas nos tanques biorreatores em três diferentes aços. A melhor chapa verificada para o caso foi a do aço AISI 318 utilizando-se chapas de 1,5 a 3 mm de espessura. Isso diminui em 29% em massa o material empregado na fabricação dos tanques biorreatores em comparação com o uso de espessuras de chapas 3 mm em todo o tanque. Já para o aço AISI 316 L e ASTM A-36 diminui-se em 34% em massa do material a ser empregado na fabricação dos tanques biorreatores caso sejam utilizadas diferentes espessuras. Na simulação verificou-se a possibilidade de utilização de chapas com menores espessuras na parte superior do costado do tanque do biorreator e do tanque de biofertilizante, o que impacta na diminuição de custos de projeto.

7.0 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da pesquisa desenvolvida neste trabalho verificaram-se temas na área de geração de biogás como os relacionados a seguir e que podem ser selecionados para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um programa computacional de fácil operação e baseado neste trabalho para facilitar a aplicação do método proposto de dimensionamento e projetos de plantas de biogás. Com interface amigável e de fácil operação tal programa computacional poderá auxiliar na aplicação da metodologia proposta;
- O elevado custo de uma planta de geração de biogás, na maioria dos casos inviabiliza sua construção para a experimentação e validação do modelo utilizado. O desenvolvimento e fabricação de uma mini planta móvel de geração de biogás, controlada e otimizada é uma necessidade para experimentar a biodigestão de diferentes substratos e obtenção de resultados práticos.
- Pesquisa e desenvolvimento de filtros para biogás. Conforme foi visto no item 2.1.3 o biogás é composto por uma mistura gasosa e quando se deseja apenas a parcela combustível (CH_4) é necessária a filtragem dos gases não combustíveis (CO_2 , NH_3 , SH_4 , e outros). Embora existam pesquisas relacionadas e equipamentos no mercado internacional acredita-se que é possível filtrar esses gases para que possam ser utilizados como é o caso do dióxido de (CO_2). Este gás é largamente empregado na indústria alimentícia, bebidas gaseificadas, empresas de tratamento térmico e controle de atmosfera de fornos industriais. A pesquisa no sentido de viabilizar a sua recuperação a partir do biogás, para uso do CO_2 com finalidade industrial é uma possibilidade existente de projeto;
- Conforme item 2.2.4.4 a planta de biogás necessita de gasômetros que tem a função de armazenar o biogás para facilitar seu uso, são também chamados de balão e na maioria

dos casos são em PVC (Tabela adaptada de JÄKEL, 2008 aborda essa questão). Não foram encontradas pesquisas relevantes na área de materiais, fabricação e projeto destes gasômetros para o biogás. Entende-se por isso, que o estudo de gasômetros para armazenagem de biogás seja uma possibilidade de projeto na área. O mesmo vale para os cilindros de utilização de biogás. Geralmente se utilizam cilindros de outros gases como o próprio GNV para envase do biogás. Com a produção em larga escala o biogás, o mercado de gás de cozinha e o seu uso industrial podem ser explorados desde que se tenham cilindros leves e resistentes específicos para o biogás;

- Outro item que chama atenção é o grande volume de RSU disponível com fração de resíduos orgânicos. Na figura 2.15 está o modelo de biorreator mais empregado para RSU. Foi visto que esse modelo de biodigestão não é muito empregado devido à fatores que tornam o processo ineficiente, portanto ainda necessário estudar-se tecnologias de biodigestão e melhorias neste processo o que demandam pesquisas acadêmicas e tecnológicas;
- Um tema muito importante relacionado com a biodigestão é a agitação e mistura no substrato. Alguns autores abordam a influência ANEXO V (POSTEL, 2008), (STALIN; PRABHU, 2007), (SHULTE, 2013). No entanto pouco ou quase nada é encontrado sobre materiais e modelos de misturadores, otimização de agitação, eficiência do processo, entre outros itens. Convém lembrar que estes itens estão imersos em um ambiente corrosivo o que acelera o desgaste e reduz a vida útil. Assim entende-se que o tema possibilita o desenvolvimento de um trabalho.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*. Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division1, New York, 2004.

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*. Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, New York, 2007.

AQUINO, S. F; CHERNICHARO, C. A. L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle**. Engenharia Sanitária Ambiental Vol.10 n° 2. Rio de Janeiro Abril/Junho 2005.

ARNOTT, M. *The biogas/biofertilizer business handbook*. Third Edition. ICE/ Peace Corps 1111 20th Street N.W. Washington, DC 20526 USA, 2002.

AVCIOGLU, A. O.; TURKER, U. *Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 16 issue p. 1557-156. 13 April, 2013.

BAIER, H. *How a Mechanical-Biological Treating (MBT) properly works*. 1º Congresso Técnico Brasil Alemanha – Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos. Jundiaí 16 e 17 dezembro de 2013. Disponível em <http://congressobrasilalemanha.jundiai.sp.gov.br/download/>

BALASUBRAMANIAM, U; ZISENGWE L. S; MERIGGI, N; BUYSMAN E. *Biogas production in climates with long cold winters*. 68 pg. Wageningen University. Netherlands, May 2008.

BASERGA, U.: *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*. FAT- Berichte n° 512, 1998.

BELUCO, A; SOUZA, P. K; KRINZINGER, A. *A method to evaluate the effect of complementarity in time between hydro and solar energy on the performance of hybrid hydro PV generating plants*. Renewable Energy, v. 45, p. 24-30, 2012.

BELUCO, A; SOUZA, P. K; KRINZINGER, A. *Influence of Different Degrees of Complementarity of Solar and Hydro Energy Availability on the Performance of Hybrid Hydro PV Generating Plants*. Energy and Power Engineering, v. 05, p. 332-342, 2013.

BISCHOFF, M. *Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie Spurenelementen in Biogasanlagen*. VDI Berichte, nº 2057; "Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft"; VDI Verlag, pp. 111 – 123, Düsseldorf, 2009.

BISCHOFBERGER, W.; BÖHNKE, B.; SEYFRIED, C. F.; DICHTL, N.; ROSENWINKEL, K. H. *Anaerobtechnik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. Nova Iorque, 2005.

BONFANTE, T. M. *Análise da viabilidade econômica de projetos que visam à instalação de biodigestores para o tratamento de resíduos da suinocultura sob as óticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da geração de energia*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade – USP – Ribeirão Preto – SP, Brasil, 2010.

BONANNI, F. S. *Avaliação da indústria de equipamentos para aproveitamento de fontes renováveis de energia*. Revista Produção Online, vol.1, n.2 pp. 113-119. 1991.

BORBA, A. P. *Estudo e comparação de diferentes materiais metálicos para a fabricação de biorreatores anaeróbios*. Dissertação de Mestrado PPGE3M – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre – RS, Brasil, 2013.

BORBA, A. P; SOUZA, J; SCHAEFFER, L; CARDOSO, M. L. *Uso de diferentes ligas metálicas para construção de reatores anaeróbios, um estudo de caso*. 1ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis. Porto Alegre/RS, 2011.

BOSTAN, I; DULGHERU, V; SOCHIREANU, A. *CAE development of Precessional Drives using Autodesk Inventor Platform*. Fiabilitate si Durabilitate Editura “Academica Brâncuși”, Târgu Jiu, 2010. Disponível em www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2010-01/21_Ion%20Bostan.pdf

BUNDESVERBAND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BERUFGSGENOSSENSCHAFTEN (Hrgb.); Technische Information 4 – Sicherheitsregeln für Biogasanlagen; Kassel; 10/2008.

CALIXTO, A. K. *Análise e Otimização de Cascas de Materiais Compostos Laminados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

CHABLAT, D; BENNIS, F; HOESSLER, B; GUILBERT, M. *Haptic devices and objects, robots and mannequin simulation in a CAD-CAM software: eM-Virtual Desktop*. CoRR abs/1104.0834: Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes – France 2011.

COELHO, M. A. A.; SILVA, G; SCHAEFFER, L. *Análise do processo Glass-Fused-to-Steel empregado em chapas de aço para a construção de tanques de biodigestão anaeróbia*. Anais CD. 1ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis. UFRGS/LdTM – Porto Alegre – RS, Brasil, 2011.

CONNAUGHTON, S; COLLINS, G; O’FLAHERTY, V. *Psychrophilic and mesophilic anaerobic digestion of brewery effluent: A comparative study*. Microbial Ecology Laboratory, Department of Microbiology and Environmental Change Institute (ECI), National University of Ireland, 2006.

CUNÍ, B. C. **Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino.** Universidad Agraria de La Habana – Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 20, N°. 2, 2011.

DÉPINCÉ, P; NOËL, E; WOELK, P. **The Virtual Manufacturing concept: Scope, Socio-Economic Aspects and Future Trends - Neural-Network-Based Numerical Control for Milling Machine.** Journal of Intelligent and Robotic System, Volume 40, Issue 4, Pages: 343-358. Aug 2004.

DODA COSTRUZIONE MACCHINE AGRICOLE – **Biogas Mixers Catalogue** – Buscoldo, Mantova - Italy 2013. Acesso em 10/02/2013 Disponível em http://www.doda.com/biogas_bg500.htm

DREGER, I. **Experiências com estudos e projetos para usinas de biogás no Brasil (2006-2010) com tecnologia alemã.** German/Brazil Workshop on Biogas – Florianópolis/SC – 2010.

EEG, **Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien** (Erneuerbare Energien Gesetz – EEG), Berlin, 2004.

ELLER, K; HENKES, E; ROSSBACHER, R; HÖKE, H. **Amines, Aliphatic in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.** Wiley-VCH, Weinheim, 2005.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de Biogás no aterro sanitário Delta em Campinas.** Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP – Campinas, 2003.

FALCÃO, C. **Projeto Mecânico Vasos de Pressão e Trocadores de Calor de Casco e Tubos.** Texto registrado sob o número 65030 no Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura, 2002.

FARMATIC – **Biogas plants for organic waste.** Disponível em <http://farmatic.com/en>. Acessado em 24 de Julho de 2013.

FEDERIZZI, M. **Potencialidade do uso de resíduos lignocelulósicos da bananicultura como substrato de fermentação do processo de metanização.** Dissertação de Mestrado. Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE. Joinville 2008.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização do Biogás de Aterro Sanitário Para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás.** Estudo de Caso – Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie – São Paulo – 2007.

LEITFADEN BIOENERGIE - PLANUNG, BETRIEB UND WIRTSCHAFTLICHKEIT VON BIOENERGIEANLAGEN - Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung und Landwirtschaft. FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2009.

GIULIANO, A.; BOLZONELLA, D.; PAVAN, P.; CAVINATO, C.; CECCHI, F. **Co-digestion of livestock effluents, energy crops and agro-waste: Feeding and process optimization in mesophilic and thermophilic conditions.** Bioresource Technology vol. 128 p. 612-618. January 2013.

GOLKOWSKA, K; GREGER, M. **Anaerobic digestion of maize and cellulose under thermophilic and mesophilic conditions** – A comparative study. Biomass and Bioenergy vol. 56 p. 545-554. September 2013.

GÖRISCH, U; HELM M. **Biogasanlagen**; Ulmer Verlag, 2006.

GERS-GRAPPERHAUS, C. **Die richtige Technik für Ihre Biogasanlage, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse**. Top agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2002.

GUERRA, R. L. **Aplicación de la realidad virtual no inmersiva para Ingenieros Agrícolas**. Universidad Agraria de La Habana – Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 21, N°. 1, 2012.

HAHN, H; KRAUTKREMER, B; HARTMANN, K; WACHENDORF, M. **Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 29 p. 383-393. January 2014.

HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND NUTZUNG Institut für Energetik und Umwelt GmbH Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Leipzig, 2004.

HOUSHMAND, M; VALILAI, O. F. **Collaborative Information System Architecture for CAD/CAM in New Product Development**. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010. Vol II – WCECS 2010, San Francisco, USA. October, 2010.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000 IBGE, Rio de Janeiro, 397pp. – 2002.

IGLESIAS, L; CASTRILLOÂ, L; PELAEZ, N; MARANÃ, E., MAISON, O. N; ANDRES, H. S. **Biomethanization of municipal solid waste in a Pilot Plant. Department of Chemical and Environmental Engineering**. Higher School of Industrial Engineering, University of Oviedo, Spain, 1999.

JÄKEL, K.: **Managementunterlage "Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und – verwertung**. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2002.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H.: **Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren**. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nova Iorque, 2ª edição revista e ampliada, 2009.

KAPDI, S. S., VIJAY, V. K., RAJESH, S. K., PRASAD, P. **Biogas Scrubbing, Compression and Storage: perspective and prospectus in Indian context**. Renewable Energy – Science Direct, Renewable Energy – Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology, New Dehli 110016, India – 2005.

KLOSS, R.: **Planung von Biogasanlagen**; Oldenbourg Verlag Munique, Viena, 1986.

KONRAD, O.; SCHMEIER, N. P.; ANATER, A. T.; CASARIL, C.; LUMI, M. **Generation of biogas through anaerobic digestion using swine and bovine manure**. Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais Vol. 12 N°. 3 – 2014.

KROISS, H.: **Anaerobe Abwasserreinigung**. Wiener Mitteilungen vol. 62; Technische Universität Wien, 1985.

LETTINGA, G; HULSHOF POLL, W; ZEEMAN, G. **Biological Wastewater Treatment. Part I: Anaerobic Wastewater treatment**. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, Ed. January 1996.

LIMA, H. Q., **Avaliação dos Modelos Hashimoto e AMS-III D para produção de metano com dejetos de suínos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do ABC. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – Santo André – SP, 2011.

LIMA, T. **Análise de Tensões Atuantes em Junções Bocais/Casco de Vasos de Pressão Cilíndricos Sob Pressão Interna e Sujeitos à Aplicação de Cargas Externas em Bocais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. **Analysis of the potential of municipal solid waste in Brazil**. Environmental Development vol. 4 p. 105-113. October, 2013.

LUCAS JÚNIOR, J; SOUZA, C. F. **Construção e operação de biodigestores**. Viçosa-MG, CTP, 2009.

MAINIER, F. B; ROCHA, A. A. – **H₂S: Novas Rotas de Remoção Química e Recuperação de Enxofre** – Universidade Federal Fluminense – 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás 2010 Niterói, Rio de Janeiro – Brasil, 2010.

MARTÍ-HERRERO, J.; CIPRIANO, J. **Design methodology for low cost tubular digesters**. Bioresource Technology, Vol.108, pp.21-27 Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), Building Energy and Environment Group, Barcelona, Spain. 2012.

MENDOZA, L; CARBALLA, M; SITORUS, B; PIETERS, J; BELGIUM, G; ERSTRAETE, W. **Technical and economic feasibility of gradual concentric chambers reactor for sewage treatment in developing countries**. Electronic Journal of Biotechnology – Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Chile - Vol.12 No.2, April 2009.

MEYER-AURICH, A; SCHATTAUER, A; HELLEBRAND, HANS J; KLAUSS, H; PLÖCHL, M; BERG, W. **Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources**. Renewable Energy vol. 37 p. 277-284 January 2012.

MIGUNOV, V. V. **The Features of the Complex CAD system of Reconstruction of the Industrial Plants**. Computer Science - Computational Engineering, Finance, and Science. The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System I.2.1, J.6 12/2004. Disponível em <http://adsabs.harvard.edu/>

MIGUNOV, V. V; KAFIYATULLOV, R. R; SAFIN I. T. **The modular technology of development of the CAD expansions: protection of the buildings from the lightning**. Computational Engineering, Finance, and Science Dec 2004. Disponível em <http://arxiv.org/abs/cs/0412030>.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIO E DO ABASTECIMENTO. Relatório anual de 2010 – Produção Integrada no Brasil. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/> Acesso em 20/03/2015.

MURARO, W. **Avaliação do funcionamento de motor ice com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz.** Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2006.

NAZIR, M. **Biogas plants construction technology for rural area.** Bioresource technology. Vol. 35, nº3, pp. 283-28, PAKISTAN – 1991.

NI, J. Q; NAVEAU, H; NYNS, E. J. **Biogas: exploitation of a renewable energy in Latin America.** Renewable Energy, Vol.3 (6), pp.763-779 – 1993.

NKEMKA V. N. **Two-Stage Conversion of Land and Marine Biomass for Biogas and Biohydrogen Production.** Doctoral Thesis – Department of Biotechnology. Faculty of Engineering, Lund University – Sweden, 2012.

NASTRAN 7 - **Design Sensitivity and Optimization User's Guide.** Texas, PLM Automation Siemens, 2009.

OECHSNER, H., LEMMER, A. **Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?** pp. 37 – 46, VDI-Berichte 2057, 2009.

OLUGASA, T. T.; ODESOLA, I. F.; OYEWOLA, M. O. **Energy production from biogas: A conceptual review for use in Nigeria.** Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 32 p. 770-776. April 2014.

PAULA, A. N. **Biogás: O Combustível do Futuro.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras / Minas Gerais Pós-Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia – Brasil, 2006.

PICK, D; DIETERICH, M; HEINTSCHEL, S. **Biogas Production Potential from Economically Usable Green Waste.** Sustainability Journal www.mdpi.com/journal/sustainability Fevereiro, 2012.

PIEROBON, L. R. P. **Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário.** Tese de Doutorado – PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, 2007.

POSTEL, J.; JUNG, U.; FISCHER, E.; SCHOLWIN, F.; **Stand der Technik beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen** – Bestandsaufnahme 2008, Umweltbundesamt (Hrsg.); Disponível em http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3873 Acessado em 15/01/2014.

POWERS, S. K; HOWLEY, E. T. **Fisiologia do exercício: teoria e aplicação ao condicionamento e ao desempenho.** Editora Manole: 6ª edição. São Paulo, 2009.

PREIßLER, D. **Die Bedeutung der Spurenelemente bei der Ertragssteigerung und Prozessstabilisierung.** Atas da 18ª Conferência Anual da Fachverband Biogas, Hannover, 2009.

RADE, D. A. **Introdução ao Método de Elementos Finitos**. Manual instrucional didático, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG 2005.

RILEY, W. F; STURGES, L. D; MORRIS, D. H. *Mecânica dos Materiais*. 5. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.

RUTZ, D; RAINER, J. – *BIOGAS HANDBOOK* – Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs – 126 pg – 2008.

SCHIEVANO, A; D'IMPORZANO, G; ORZI, V; ADANI, F. ***On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part II): new approaches in monitoring and evaluating process efficiency***. Bioresource Technology. Università degli Studi di Milano – Milano, Italy. October – 2011.

SCHMIDT, L. D. ***The Engineering of Chemical Reactions***. New York: Oxford University Press, 1998.

SCHULTE, B. ***Experiences with the operation of different digester in Germany***. 1º Congresso Técnico Brasil Alemanha – Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos. Apresentação. Jundiaí 16 e 17 dezembro de 2013. Disponível em <http://congressobrasilalemanha.jundiai.sp.gov.br/download/>

SCHULZ, H.; EDER, B.: ***Biogas-Praxis: Grundlagen – Planung – Anlagenbau - Beispiele***. 2ª edição revista e ampliada, Editora Ökobuch, Staufen bei Freiburg, 2006.

SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis duplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L** – Rev. Esc. Minas v.60 n.1 Ouro Preto: jan./mar. 2007.

SMITH, W. F. ***Structure and properties of engineering alloys***. 2nd Edition, Mc Graw Hill, International Editions, tab. 7 – 8 – pag.324, 1993.

SOUSA, K. A. **Avaliação da biogênese de sulfeto sob diferentes concentrações de bactérias redutoras de nitrato, bactérias redutoras de sulfato e nitrato**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio De Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - Rio de Janeiro – RJ. Outubro de 2009.

SOUZA, J. **Desenvolvimento de tecnologias para compressão de biogás. Dissertação de Mestrado**. PPGE3M – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre – RS, Brasil, 2010.

SOUZA, J; BORBA, A. P; SCHAEFFER, L. **Ferramentas computacionais aplicadas em processos de fabricação de plantas de biodigestão**. Seminário de Pós-graduação Inovamundi – Universidade Feevale– Novo Hamburgo – RS, Brasil, 2012.

SOUZA, J; LAUK, G; PELEGRINI, L; SCHAEFFER, L. **Modelagem e simulação de misturadores para biorreatores**. Anais CD. 2ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis. UFRGS/LdTM – Porto Alegre – RS, Brasil, 2012.

SOUZA, J; SCHAEFFER, L. **Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano**. Revista Liberato (Novo Hamburgo-RS), p.33-38, v. 11, n15, jan./jun. 2010.

STALIN, N; PRABHU, H. J. **Performance evaluation of partial mixing anaerobic digester.** ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences – Asian Research Publishing Network (ARPN). Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Trichy, Tamil Nadu, India (2007).

STEEL TEC FARM GmbH Edelstahlbehälter. Disponível em www.steeltecheide.de

STRIK, D.P.B.T.B; DOMNANOVICH, A. M; HOLUBAR P. **A pH-based control of ammonia in biogas during anaerobic digestion of artificial pig manure and maize silage.** Institute of Applied Microbiology, Department of Biotechnology, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria – December, 2005.

TARBAGHIA, T. **Design of biogas plant to product energy with special application to Benghazi, Libya.** Renewable energy [0960-1481] Vol 3 fasc: 2 pág:207 -209. 1993.

TEBECHERANI, C. T. P. **Artigo Técnico Aços inoxidáveis** (2010). Disponível em <http://www.pipesystem.com.br/ArtigosTecnicos/AcoInox/bodyacoinox.html> Acessado em 20.02.2014.

TIMOSHENKO, S. P. Resistência dos Materiais. 1. Ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1974.

TIPPE, H. **Prozessoptimierung und Entwicklung von Regelungsstrategien für die zweistufige thermophile Methanisierung ligno-zellulosehaltiger Feststoffsuspensionen.** Dissertation an der TU Berlin, Fachbereich 15, Lebensmittelwissenschaften und Biotechnologie. Berlin, 1999.

TODIĆ, V; TEPIĆ, J; MILOŠEVIĆ, M; LUKIĆ, D; HADŽISTEVIĆ, M. **Design of casting blanks in CAPP system for parts of piston-cylinder assembly of internal combustion engines.** Metalurgija - Journal for Theory and Practice in Metallurgy 51 (2012) 1, 75-78 Zagreb - SERBIA (2012).

TORRES, E. S. **Cinética de Parâmetros Microbiológicos na Formação de Biofilmes.** Dissertação de Mestrado. PROGRAMA EQ-ANP Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural. UFRJ Rio de Janeiro-RJ, 2001.

VATTAMPARAMBIL, S. R. **Anaerobic Microbial Hydrolysis of Agriculture Waste for Biogas Production.** International Conference on Emerging Frontiers in Technology for Rural Area (EFITRA) Proceedings published in International Journal of Computer Applications – 2012.

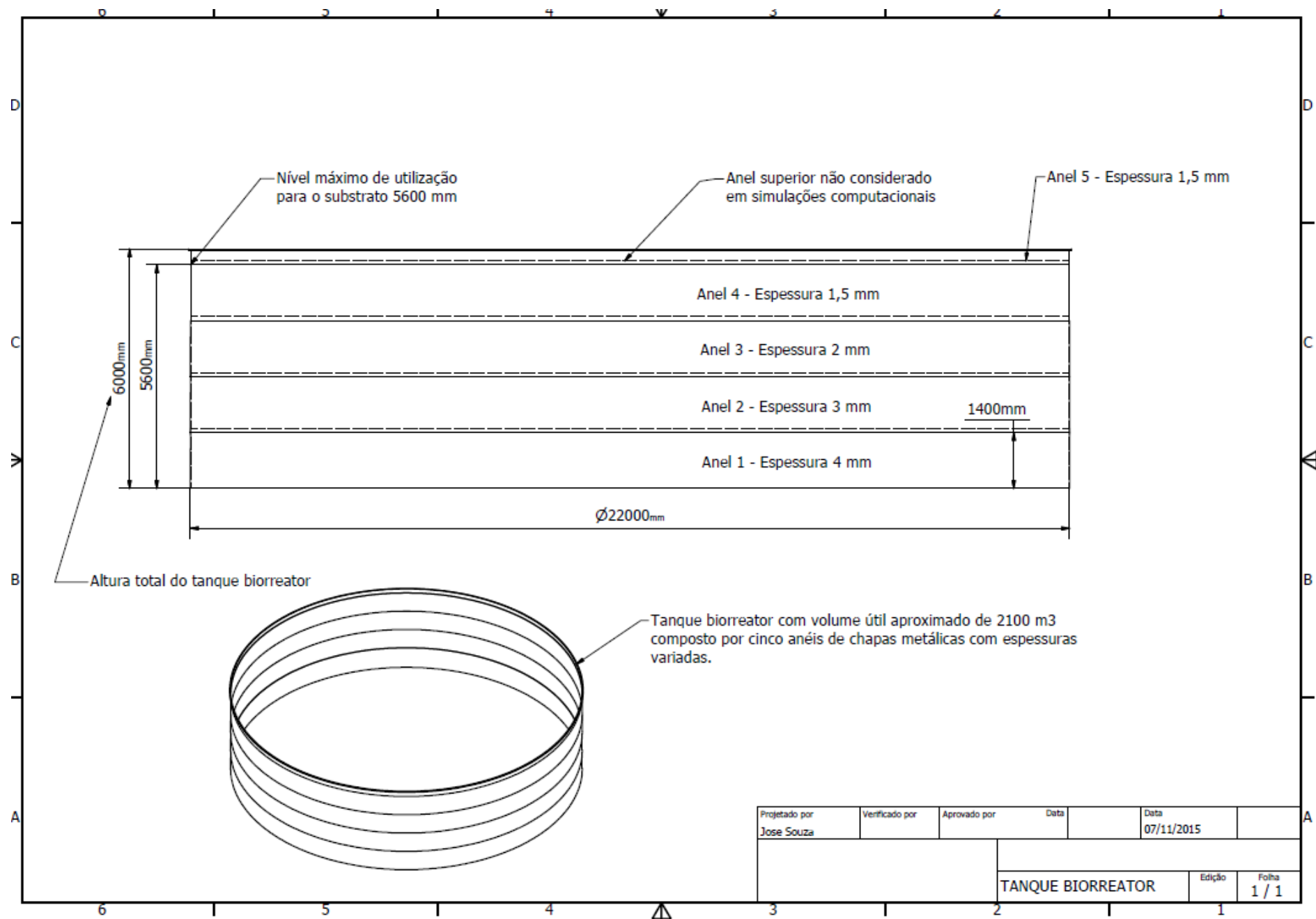
VDI-Richtlinie 4630: **Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche.** VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006.

WEILAND, P.; RIEGER, C. **Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich.** (FNR-FKZ: 00NR179); 3. Zwischenbericht; Institut für Technologie und Systemtechnik/Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft(FAL); Braunschweig; 2001.

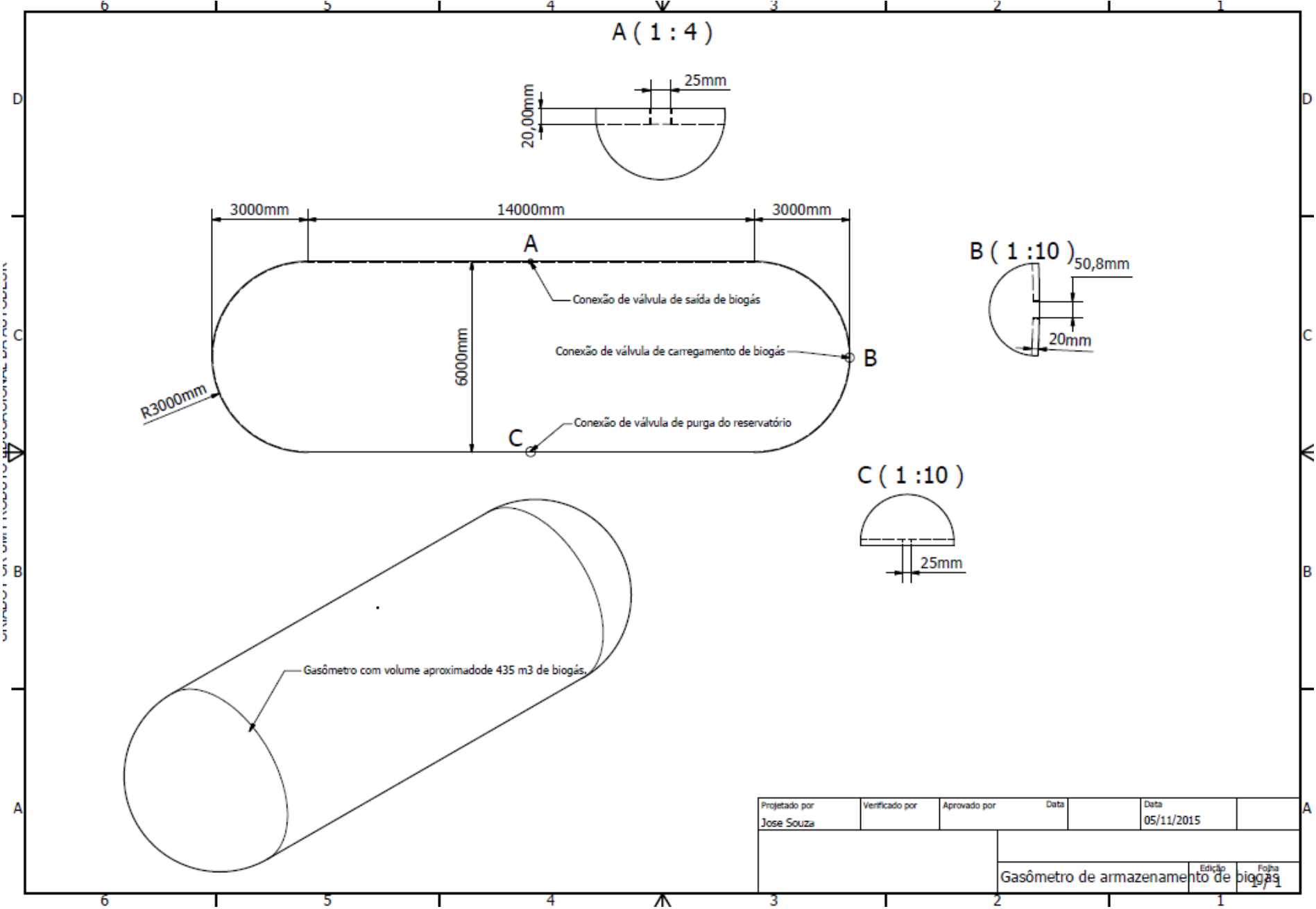
WEILAND, P. **Bundesweite Evaluierung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen;** 16°. Symposium Bioenergie-Festbrennstoffe, Biokraftstoffe, Biogas; Bad Staffelstein pp. 236-241, 2007.

WELTEC BIOPOWER *Commences Biogas Plant Construction in Arneburg*. Producer and distributor of complete biogas plants made of stainless steel, has started the construction of a biogas park in Arneburg, Saxony-Anhalt, Germany 2012. Acesso em 28/06/2013 Disponível em <http://www.weltec-biopower.com/>

ANEXO I – TANQUE BIORREATOR



ANEXO II – GASÔMETRO DE BIOGÁS



ANEXO III – MATERIAIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

1. Aços austeníticos

Os aços austeníticos são formados principalmente de ligas de ferro + cromo + níquel que apresentam as seguintes características:

- Alta resistência à corrosão;
- Não são temperáveis, todavia endurecíveis por trabalho a frio;
- Alta durabilidade;
- Não magnéticos, porém após conformações mecânicas podem apresentar leve sensibilidade magnética. Utilizados para aplicações criogênicas e trabalhos em altas e baixas temperaturas, devido à boa resistência à oxidação e ao amolecimento em altas temperaturas;
- No aquecimento acima de 600°C do material são indicados os aços com baixos teores de carbono (304 e 316L) devido a sua resistência a corrosão no contorno de grão;
- São soldáveis por diversos processos;
- Microestrutura típica conforme figura 9.67 .

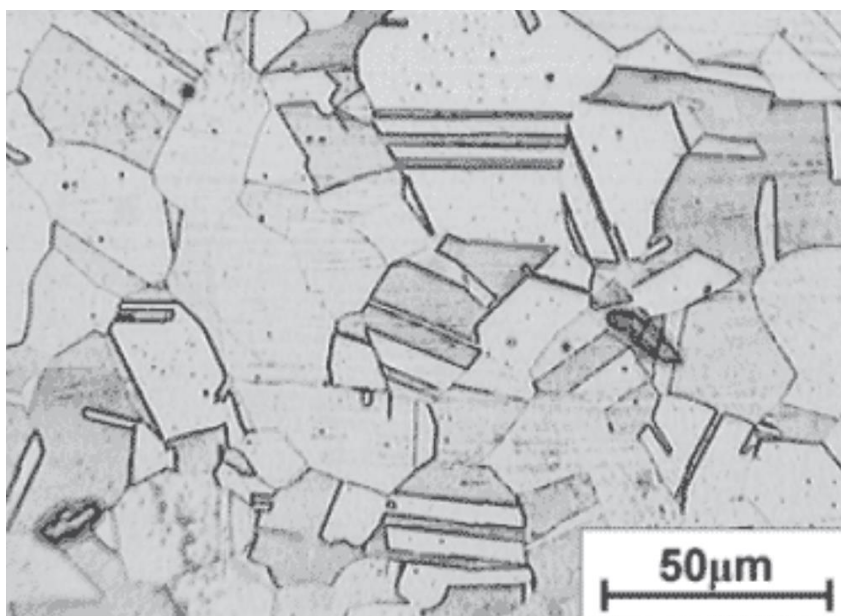


Figura 9.67 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico AISI 316L.(SENATORE; FINZETTO; PEREA, 2007).

Os aços inoxidáveis são ligas metálicas que reúnem alta resistência mecânica e à corrosão e também os custos são acessíveis em comparação aos não ferrosos, por exemplo, sendo que uma liga de níquel pode custar de 20 a 100 vezes mais que os aços inoxidáveis. Podem ser usados para trocadores de calor, tanques de produtos químicos, refinarias, eixos, peças de vasos de pressão, flanges e tubos para as indústrias de petróleo e gás, indústria de papel, peças de compressores e plantas de dessalinização, são indicados para ambientes marinhos ou com gases corrosivos a base de cloretos e/ou sulfurosos (BORBA, 2013).

A resistência à tração dos aços com austenita metastável é superior à dos aços com austenita estável, todavia os valores de tensão de escoamento são semelhantes; tal fato deve-se à alta capacidade de encruamento que apresenta a primeira, quando se transforma em martensita no decurso da solicitação mecânica de tração (SMITH, 1993). As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos variam dentro dos valores a seguir indicados na tabela 9.19.

Tabela 9.19 – Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos.

Propriedades Mecânicas	Símbolos	Unidades	Limites Inferiores (Estável)	Limites Superiores (Metastável)
Tensão de escoamento	$R_{0,2}$	MPa	240	380
Tensão máxima	R_{max}	MPa	500	800
Deformação	ϵ	%	60	45

Fonte: (Adaptado de SMITH, 1993).

1.1. Biocorrosão dos aços

A deterioração dos materiais metálicos pela ação eletroquímica do meio é definida como sendo a corrosão. A corrosão tem sido o fator que mais impacta economicamente nas construções de equipamentos e materiais metálicos diversos. Na decomposição anaeróbia da matéria orgânica, além da amônia e do ácido sulfídrico, a biocorrosão é um problema que contribui para a corrosão das paredes dos biorreatores de fermentação (COELHO; SILVA; SCHAEFFER, 2011).

O ferro, como um metal base, sofre oxidação na presença do ar. Em água estéril sem a presença do oxigênio, o ferro é bastante estável. Contudo, as bactérias sulfato redutoras¹³ corroem o ferro em ambiente anaeróbio. As bactérias sulfato redutoras agem sobre ferro em

¹³ As bactérias redutoras de sulfato (SRB) compreendem vários grupos de bactérias que utilizam o sulfato como agente oxidante, reduzindo-o a sulfeto. A maioria podem também utilizar compostos de enxofre oxidados tais como o sulfito e o tiosulfato ou enxofre elementar (SOUZA, 2009).

meio aquoso. As bactérias retiram os elétrons do ferro de forma direta prejudicando a estrutura (COELHO; SILVA; SCHAEFFER, 2011).

1.2. Aços Carbono

Aço carbono é a composição da liga que confere ao aço o seu nível de resistência mecânica. O carbono é o principal elemento endurecedor em relação ao ferro. Outros elementos, como o manganês, o silício e o fósforo, participam igualmente do ajuste do nível de resistência do aço. A quantidade de carbono define sua classificação: o baixo carbono possui no máximo 0,30% do elemento; o médio carbono apresenta de 0,30 a 0,60% e o alto carbono possui de 0,60 a 1,00% (TORRES, 2001).

O aço baixo carbono possui baixa resistência e dureza e alta tenacidade e ductilidade. É usinável e soldável, além de apresentar baixo custo de produção. Geralmente, este tipo de aço não é tratado termicamente. Aplicações: chapas automobilísticas, perfis estruturais, placas para produção de tubos, construção civil, pontes e latas de folhas de flandres (TORRES, 2001).

1.3. Vitrificação dos aços

O processo consiste em aplicar o material vítreo nas duas faces, interna e externa, do aço, aliando a resistência e flexibilidade do metal com a resistência à corrosão do vidro. Este é um material altamente resistente a corrosão, especialmente contra a biocorrosão causada pelas bactérias sulfato redutoras. Isto torna este material extremamente apropriado para a construção de biorreatores para fermentação anaeróbia de resíduos orgânicos. Sua aplicação inclui, também, armazenamento de água potável, água residual, esgoto municipal, efluentes industriais, resíduos agrícolas, grãos úmidos e silagem. O material permite a construção modular, flexibilidade no design e, se necessário, é possível fazer mudanças devido à necessidade de adaptação de tecnologias no processo (COELHO; SILVA; SCHAEFFER, 2011).

O processo de vitrificação do aço passa por dezesseis estágios. Os passos de aplicação de camadas ricas em níquel, cobalto e a temperatura para queima no forno são relativos às propriedades finais desejadas à superfície da chapa e às resistências químicas e mecânicas da

camada de vidro. Diferentes linhas de fabricação de chapas vitrificadas adotam a temperatura de queima no forno em função do ponto de fusão final do esmalte vítreo, devido aos aditivos especiais misturados na forma de pó (COELHO; SILVA; SCHAEFFER, 2011). O aço Duplex AISI 318 possui a composição conforme ensaios laboratoriais apresentados na tabela 9.20

Tabela 9.20 – Composição do Aço Duplex AISI 318 (Uns S 31803) (BORBA, 2013).

Aço inoxidável	Elemento químico	Teores conforme norma (%)	Teores da amostra (%) APERAM ¹⁴	Teores da amostra (%) Ensaio LAMEF ¹⁵
AISI 318 (UNS S 31803, SAF 2205)	Carbono (C)	<0,03	0,0155	0,0134
	Silício (Si)	-	0,3066	0,306
	Manganês (Mn)	2,00	1,836	1,72
	Fósforo (P)	-	0,0241	0,021
	Enxofre (S)	-	0,0006	0,0024
	Nitrogênio	0,08 a 0,20	0,1527	-
	Cromo (Cr)	21 a 23	22,541	21,61
	Molibdênio (Mo)	2,5 a 3,5	3,0377	2,80
	Oxigênio (O)	-	0,0012	-
	Níquel (Ni)	4,5 a 6,5	5,387	5,52

O aço austenítico AISI 316L possui a composição conforme ensaios laboratoriais apresentados na tabela 9.21 (BORBA, 2013).

Tabela 9.21 – Composição do Aço Austenítico AISI 316 L (UNS S 31603).

Aço inoxidável	Elemento químico	Teor conforme norma (%)	Teor da amostra (%) Ensaio LAMEF
AISI 316 L (UNS S 31603)	Carbono (C)	<0,03	0,0101
	Silício (Si)	<1,00	0,470
	Manganês (Mn)	2,00	1,30
	Fósforo (P)	0,45	0,0302
	Enxofre (S)	0,030	0,0020
	Cromo (Cr)	16 a 18	15,94
	Molibdênio (Mo)	2, 00 a 3,00	1,83
	Níquel (Ni)	10 a 14	9,88

¹⁴ APERAM – Empresa brasileira, Aperam Inox Serviços Brasil Ltda, antiga AcelorMittal.

¹⁵ LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física PPGE3M.

O aço carbono laminado ASTM A-36 possui a composição conforme ensaios laboratoriais apresentados na tabela 9.22.

Tabela 9.22 – Composição do Aço Carbono ASTM A-36.

Aço inoxidável	Elemento químico	Percentuais
ASTM A36 – AISI 1025 – EN-10025	Carbono (C)	0,26 máx.
	Silício (Si)	0,40 máx.
	Manganês (Mn)	...
	Fósforo (P)	0,04 máx.
	Enxofre (S)	0,05 máx.
	Cromo (Cr)	...
	Molibdênio (Mo)	...
	Níquel (Ni)	...

ANEXO IV – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS (CAE)

1. Simulações computacionais por elementos finitos CAE

Para efetuar a simulação computacional para otimização de tanques, tubulações, gasômetros e partes de plantas de biogás é necessário revisar alguns aspectos como conceitos de otimização estrutural, técnicas e tópicos do processo de funcionamento dos métodos de otimização para que se possa determinar a espessura ótima de parede do biorreator ou um tanque de armazenamento de biofertilizante líquido, por exemplo.

2. O código ASME

O código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) tem como objetivo padronizar, associar e consolidar as diversas normas existentes para construção de tanques e vasos de pressão. As primeiras edições do código ASME consideravam coeficientes de segurança altos, isso resultava em pequenas tensões admissíveis para o material e elevadas espessuras de paredes do vaso, consequentemente o resultado era um equipamento com peso e custo elevados. Com a modernização das indústrias o código sofreu também alterações e atualizações.

A norma ASME considera que tensões admissíveis para determinado material são as máximas tensões adotadas para o dimensionamento de um vaso de pressão. Essas tensões devem ser menores que os limites de resistência e elasticidade do material na temperatura de projeto considerada. A relação entre os limites de resistência e de elasticidade e a tensão admissível é o coeficiente de segurança adotado.

A fabricação de tanques como os biorreatores devem observar o código ASME Seção VIII – Divisão 1. Essa divisão é muito utilizada para projeto de vasos de pressão (FALCÃO, 2002). O código aborda, além de regras para dimensionamento da espessura dos vasos, procedimentos para dimensionamento de outros componentes que compõem um tanque, tais como tampos, costados, flanges, bocais e reforços, além de apresentar regras para fabricação. Esse item se adapta perfeitamente para o dimensionamento de biorreatores e tanques para plantas de biogás. Os equipamentos que são projetados segundo esta divisão, estão limitados às pressões internas de no mínimo $1,05 \text{ kgf/cm}^2$ (103 kPa) e no máximo de $210,92 \text{ kgf/cm}^2$ (20685 kPa), e às pressões externas de no máximo $1,05 \text{ kgf/cm}^2$ (103 kPa).

O Código ASME em sua Seção VIII Divisão 1 adota como critério de projeto a Teoria de Rankine, também conhecida como Teoria da Máxima Tensão Normal para determinar as tensões máximas atuantes na estrutura. Estas tensões são denominadas como tensões admissíveis ou intensidade de tensões admissíveis, e estão em função das propriedades mecânicas características do material, tais como, limite de escoamento, ruptura, etc., na temperatura de projeto (LIMA, 2009).

Os cálculos para espessuras das paredes dos vasos devem ser feitos de modo que a tensão de membrana máxima circunferencial devido à pressão interna não ultrapasse os limites estabelecidos na Seção II, do código ASME – parte D, ou seja, para temperaturas abaixo da faixa de fluência, a tensão admissível de tração é o menor dos seguintes valores:

- 1/3,5 da mínima tensão de ruptura na temperatura ambiente;
- 1/3,5 da tensão de ruptura na temperatura de projeto;
- 2/3 da mínima tensão de cisalhamento na temperatura ambiente;
- 2/3 da tensão de cisalhamento na temperatura de projeto.

3. Teorias de resistência contra falha estática

3.1. Teoria da Máxima Tensão Normal ou Teoria de Rankine

A teoria toma a tensão máxima como critério para a resistência e admite que o escoamento do material dúctil se inicie quando a tensão se torna igual ao limite de escoamento no ensaio de tração simples (TIMOSHENKO, 1974). Encontrando as tensões principais, elas são ordenadas de acordo com a equação 11.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad \text{Equação (11)}$$

Para um estado plano de tensão é determinado σ_3 igual a zero. A tensão de tração de maior módulo é considerada como σ_1 (RILEY; STURGES; MORRIS, 2003). Esta teoria determina início do escoamento conforme equação 12.

$$\sigma_1 = \sigma_e \quad \text{Equação (12)}$$

3.2. Teoria da Máxima Tensão Cisalhante ou Teoria de Guest-Tresca

A teoria da máxima tensão cisalhante fornece resultados satisfatórios para materiais dúcteis e estes materiais possuem a característica de apresentarem igualdade de valor absoluto entre as tensões admissíveis de tração e compressão (GROHES, 2006).

Para estes materiais, o limite elástico de cisalhamento, o qual é determinado pelo ensaio de torção (cisalhamento puro), é maior que a metade do limite elástico de tração (τ_f aproximadamente igual a $0,57 \sigma_f$) (RILEY; STURGES; MORRIS, 2003).

Esta teoria prediz a falha estrutural do componente sujeito a uma carga quando a tensão cisalhante máxima em qualquer ponto for do mesmo valor da tensão de escoamento τ_e igual a $\sigma_e/2$, qual é determinada por um ensaio de tração axial do material.

$$\tau_e = \frac{\sigma_e}{2} \quad \text{Equação (13)}$$

Por causa deste fato, a teoria da máxima tensão cisalhante oferece um grau maior de segurança. Para um elemento sujeito a estado de tensões tridimensionais têm-se a situação da equação 14.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{Equação (14)}$$

E a expressão matemática correspondente a teoria da máxima tensão cisalhante é dada pela equação 15.

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{adm}}{2} \geq \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{ou ainda} \quad \sigma_{adm} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Equação (15)}$$

3.3. Teoria da Energia Máxima de Distorção ou Teoria de Von Mises

A teoria da energia máxima de distorção ou teoria de Von Mises admite que parcela da energia de deformação que produz a variação de volume não é capaz de causar a falha estrutural por escoamento (RILEY; STURGES; MORRIS, 2003).

Estabelece para as tensões principais que em qualquer ponto do elemento estrutural a máxima energia de distorção, por unidade de volume, deve ser inferior à energia de distorção que produz colapso do material no ensaio de ruptura por tração simples.

A teoria fornece resultados satisfatórios para materiais dúcteis. Estes materiais possuem a característica de apresentarem igualdade de valor absoluto entre as tensões admissíveis de tração e compressão (GROHES, 2006).

Em um ensaio de tração simples se apresenta que $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ e $\sigma_1 \neq 0$. A representação matemática desta teoria é, conforme equação 16:

$$\sigma_{adm} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad \text{Equação (16)}$$

Em um teste de torção para uma tensão de corte τ_{adm} , sabendo que $\sigma_1 = \tau_{adm}$, $\sigma_2 = 0$ e $\sigma_3 = -\tau_{adm}$ é possível substituir esses valores na representação matemática acima e também adotar o sinal de igualdade, conforme equação 17, para obter:

$$\sigma_{adm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\tau_{adm})^2 + (\tau_{adm})^2 + (2\tau_{adm})^2} \quad \text{ou} \quad \sigma_{adm} = \sqrt{3} \cdot \tau_{adm} \quad \text{Equação (17)}$$

Esta última relação inclusive é válida para as tensões de escoamento e ruptura.

3.4. Tensões Equivalentes

As tensões equivalentes σ_{eq} estão associadas a cada uma das teorias expostas e que são comparadas com as respectivas tensões admissíveis (GROHES, 2006).

Na teoria da máxima tensão normal, tem-se a tensão equivalente de maior valor algébrico positivo que, se existir, corresponderá à tensão σ_1 e a tensão equivalente de menor valor algébrico negativo que, se existir, corresponderá a σ_3 (GROHES, 2006).

Na teoria da máxima tensão cisalhante a tensão equivalente é, conforme a equação 18:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Equação (18)}$$

Para a teoria da energia máxima de distorção corresponde à equação 19.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad \text{Equação (19)}$$

4. Métodos dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica destinada à obtenção de soluções aproximadas de problemas regidos por equações diferenciais (RADE, 2005). Embora o método tenha sido originalmente desenvolvido para a análise estática de sistemas estruturais, ele tem sido utilizado no estudo de uma grande variedade de problemas de engenharia.

Uma das razões para a utilização do MEF se deve ao fato de existir problemas de complexos, onde soluções analíticas tornam-se inviáveis ou até mesmo impossíveis. Assim, deve-se recorrer a técnicas capazes de fornecer soluções numéricas aproximadas com alto grau de confiabilidade.

O MEF é um processo de discretização, o qual transforma um problema infinito-dimensional em um problema finito-dimensional (RADE, 2005).

É atribuído um número finito de incógnitas, dividindo o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões conectadas entre si. Essas regiões são denominadas elementos.

Cada elemento possui certo número de pontos que são responsáveis pela conexão com outros elementos.

Cada ponto é denominado “nó” e o conjunto de elementos conectados entre si é chamado de “malha”.

Após a discretização, o modelo matemático resulta em um número finito de equações diferenciais ordinárias ou de equações algébricas, qual a resolução numérica conduz aos valores das incógnitas nodais.

Determinadas as incógnitas, os valores das variáveis no interior dos elementos são avaliados empregando as funções de interpolação.

A precisão da solução obtida depende, essencialmente, do número de elementos, da qualidade da malha e do tipo de funções empregadas na discretização. Uma vez satisfeitas as condições, admite-se que a solução do problema discretizado convirja à solução exata do problema contínuo. A aproximação aumenta à medida que se aumenta o número de incógnitas nodais (RADE, 2005).

Algumas vantagens do método dos elementos finitos:

- Possibilidade de associar diferentes formas e tamanhos de elementos para discretizar domínios de uma geometria complexa;
- Divisão do contínuo em regiões facilita a modelagem de problemas envolvendo domínios não homogêneos, onde as propriedades físicas variam em função das coordenadas espaciais;
- Capacidade do método ser todo formulado matricialmente facilita sua implementação computacional.

5. Teorias da casca

Por definição, uma placa é uma estrutura tridimensional com a característica de possuir a dimensão transversal, que representa a espessura, muito menor que as outras dimensões laterais da mesma (CALIXTO, 1998).

Casca pode ser tratada como uma estrutura do tipo placa que, no entanto, possui ao menos uma curvatura finita como mostrado na figura 9.68 e 9.69. Esta característica possibilita a aproximação de um problema tridimensional para um bidimensional. O que permite realizar a descrição do comportamento físico da estrutura em função da superfície de referência da placa ou casca.

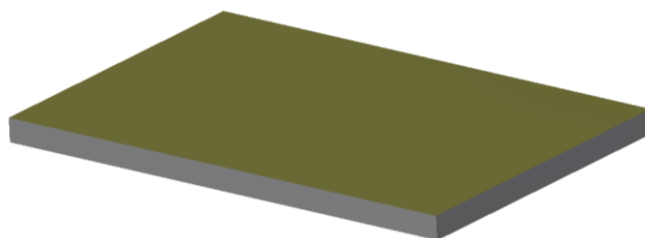


Figura 9.68 – Estrutura tipo placa. Do autor.

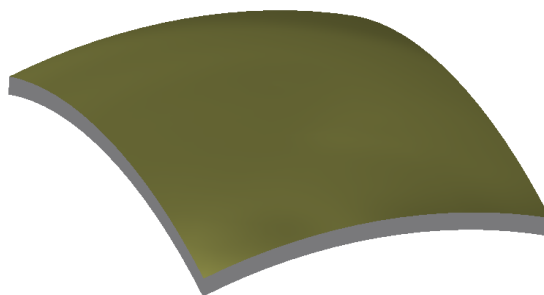


Figura 9.69 – Estrutura tipo casca. Do autor.

6. *Software* de simulação com Femap NX NASTRAN Siemens

NASTRAN é essencialmente uma ferramenta computacional de análise de elementos finitos. Ele não tem uma funcionalidade que permite a construção de um modelo graficamente ou articulada. Toda a entrada e saída para o programa está na forma de ficheiros de texto. No entanto, o *software* é projetado para simplificar a construção de um modelo de elementos finitos e análise dos resultados. Estas ferramentas de *software* incluem a funcionalidade para importar e simplificar a geometria CAD, malha com elementos finitos, e aplicar cargas e restrições.

O *software* NASTRAN possui ferramenta *Rotordynamics* que é ideal para a determinação velocidades críticas, frequências giro, rotor fricção e outras respostas intrínsecas às máquinas rotativas. Além da possibilidade de modelagem usada para modelar máquinas rotativas a ferramenta viabiliza um bom nível de precisão, permitindo a modelagem de forma otimizada NX (*Design Sensitivity and Optimization User's Guide*, 2009).

A ferramenta computacional NASTRAN possibilita analisar também aspectos de perturbação linear como análise modal, frequência direta, frequência modal, transitória modal, análises que seguem modelos não-lineares estáticos ou medidas dinâmicas que exigem a rigidez do elemento e matrizes. Além disso, viabiliza análise de tensão térmica e permite o mapeamento da temperatura em graus de liberdade de transferência de calor e análise termomecânica. As análises térmicas estruturais podem ser realizadas por diferentes grupos de modelos, esse recurso melhora a transferência de dados a partir de análise térmica estrutural (*Design Sensitivity and Optimization User's Guide*, 2009).

Aplicação em análise do comportamento de materiais podem ser executados no *software*. Para a análise não-linear pode ser utilizado o modelo de Johnson-Cook, com uma

relação de tensão-deformação mais complexa e critérios de transformação. O modelo Gurson é utilizado para descrever o fluxo de deformação plástica e está disponível para chapas e elementos sólidos. Já o modo ACMS (*Automated Component Modus Synthesis*) é uma ferramenta alternativa e eficiente para sistemas baseados em modelos modais. ACMS é especialmente útil em para indústria automotiva, análise onde tipicamente um grande número de modos são extraídos.

ANEXO V – MISTURA E AGITAÇÃO DE BIORREATORES

Embora ocorra uma mistura natural em um biorreator anaeróbio devido à formação de bolhas ascendentes de gás e as correntes de convecção térmicas causadas pela adição de calor, estes níveis de mistura não são suficientes para assegurar o desempenho do processo de biodigestão estável (STALIN; PRABHU, 2007). Por isso, é necessário que um sistema de mistura seja instalado para criar um ambiente homogêneo ao longo do biorreator, de modo que o volume do biodigestor pode ser utilizado de forma eficiente. Esta mistura irá diminuir a estratificação da temperatura, reduzir a decantação e controlar a formação de uma camada de escória na superfície. Um nível adequado de homogeneidade favorece o contato entre o substrato bruto e de biomassa ativa, além de distribuir os agentes bacteriológicos durante o processo de biodigestão. Manter o conteúdo do biorreator bem agitado é importante por diversas razões conforme a seguir:

- Mantém a inoculação do substrato fresco por contato com o líquido biologicamente ativo do biorreator;
- Assegura a distribuição uniforme de calor e nutrientes no biorreator;
- Fornece a prevenção e eliminação de camadas de sedimentos e sobrenadante;
- Garante a extração adequada do biogás do substrato.

A introdução de substrato *in natura*, a convecção térmica e a ascensão de bolhas de gás também promovem a mistura do substrato em fermentação, mas em menor escala que a mistura mecanizada ou por bombeamento. A mistura passiva é insuficiente, exigindo o apoio de um processo de mistura ativo.

Os processos de mistura podem ser mecânicos, por equipamentos no biorreator, tais como agitadores hidráulicos, bombas posicionadas externamente, ou não mecânicos como pela circulação de biogás no biorreator. Na Alemanha, em torno de 85% a 90% das plantas de biogás utilizam de dispositivos mecânicos de agitação (SCHULTE, 2013).

Os misturadores ou agitadores mecânicos se classificam em dispositivos de propulsão e de mistura. A sua aplicação está condicionada à viscosidade e ao teor de matéria sólida do meio a ser misturado. É possível se utilizar de uma combinação de ambos os sistemas, cuja operação combinada é capaz de intensificar o efeito da agitação (KALTSCHMITT;

HARTMANN; HOFBAUER, 2009). Na figura 9.70 são apresentados alguns tipos de misturadores de hélices.

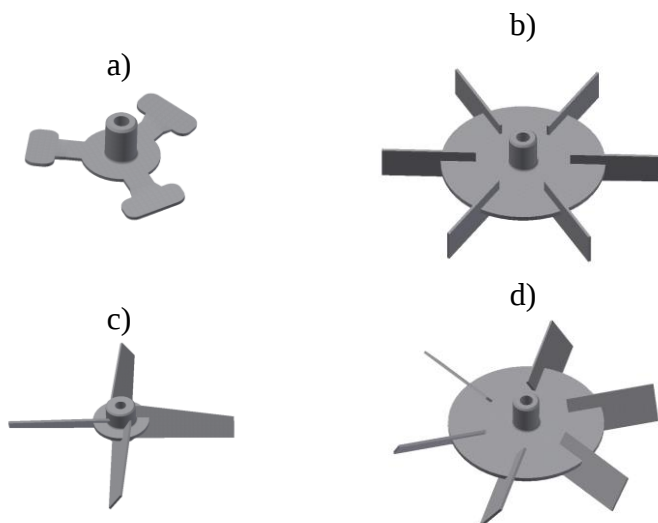


Figura 9.70 – Misturadores. a) Naval; b) Turbina; c) Palhetas d) Aletas inclinadas. (SOUZA *et al.*, 2012).

Os agitadores podem ser utilizados em contínuo ou em intervalos. A utilização de intervalos de agitação deve ser adotada com base nas especificidades da planta de biogás, levando em conta fatores como as características do substrato, as dimensões do reservatório, a propensão à formação de sobrenadante, entre outros. Após a colocação da planta em funcionamento, por questões de segurança procede-se à agitação com mais frequência e mais longa que o normal. Os resultados então obtidos servem para otimizar a duração e frequência dos intervalos e o ajuste dos agitadores (KALTSCHMITT; HARTMANN; HOFBAUER, 2009). A figura 9.71 mostra um exemplo de misturador vertical.



Figura 9.71 – Misturador tipo vertical de hélices. (Disponível em www.doda.com).

Biorreatores operando sob o princípio do biorreator agitado geralmente são dotados de agitadores de motor submersível (AMS). Esse tipo de agitador se classifica em AMS de alta rotação, com hélices de duas ou três pás, e AMS de baixa rotação, com uma grande hélice dotada de duas pás. Operando com o princípio da propulsão, esses agitadores são tracionados por motores elétricos sem engrenagem ou com engrenagem redutora. Sua carcaça é impermeável, em ambiente sob pressão, e revestida por camada anticorrosiva. Com isso, o agitador pode ser mergulhado no substrato e arrefecido por ele. A figura 9.72 mostra um exemplo de misturador vertical AMS de duas pás (SOUZA *et al.*, 2012).

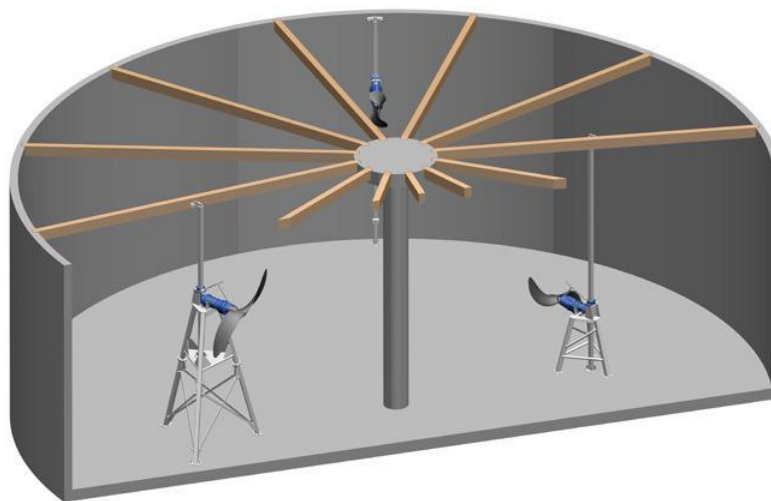


Figura 9.72 – Misturador vertical AMS de duas pás (SOUZA *et al.*, 2012).

Alguns dados sobre agitadores de hélice acionados por motor submersível se encontram na tabela 9.23 (POSTEL *et al.*, 2008).

Tabela 9.23 – Parâmetros operacionais de misturadores de hélice com motor submersível.

Valores característicos	• Em grandes biorreatores podem ser equipados com vários agitadores; • Para alta velocidade possui modo de operação de velocidades (500 a 1.500 RPM) faixa de potência: até 20 kW; • Para baixa velocidade possui modo de operação de velocidades (50 a 120 RPM) faixa de potência: até 20 kW;
Aplicações	• Aplicado em praticamente todos os substratos na digestão úmida, em biorreatores verticais; • Não é adequado para viscosidades extremamente altas;
Vantagens	• O misturador de hélices tipo naval e palhetas gera turbulência, o que proporciona um bom grau de mistura no biodigestor e a eliminação de sobrenadantes e sedimentação; • Em função da boa mobilidade, mistura precisa em todas as áreas do biorreator; • O misturador de hélice grande tipo turbina proporciona ótimo grau de agitação no biorreator; • O misturador de hélice grande embora produza menos turbulência, oferece maior potência de propulsão em comparação com o AMS em alta velocidade de operação;
Desvantagens	• A grande quantidade de peças móveis nos biorreatores em função dos eixos e trilhos-guia

	• A manutenção exige a abertura do biorreator; • Possibilidade de ocorrer sedimentação e flutuação em função do regime intervalado da mistura;
Particularidades	• A utilização de eixos e a tubulação guia pelo teto do biorreator tem de ser impermeável a meios gasosos; • O controle de intervalo, p. ex., por meio de temporizador ou outro mecanismo de controle de processos; • As carcaças dos motores exigem total impermeabilidade a líquidos; alguns modelos de carcaça são dotados de detecção automática de vazamentos; • Possibilidade de partida suave e ajuste da velocidade de rotação por meio de inversores de frequência.
Formas construtivas	• Motores elétricos submersíveis com engrenagem redutora e hélice; • O diâmetro da hélice pode chegar de até aproximadamente 2 m; • O material deve ser resistente à corrosão; aço inoxidável ou aço revestido ou resina epóxi reforçada com fibra de vidro.

Fonte: (Adaptado de POSTEL *et al.*, 2008).

Outra possibilidade de mistura são os agitadores de eixo longo, que operam sob o princípio da propulsão e cujo motor se encontra na extremidade de um eixo de agitação, montado obliquamente no biodigestor. O motor se localiza fora do digestor, com o eixo passando pelo seu teto ou parede, com impermeabilidade a gases. Na figura 9.73 pode ser visto um modelo de eixo.

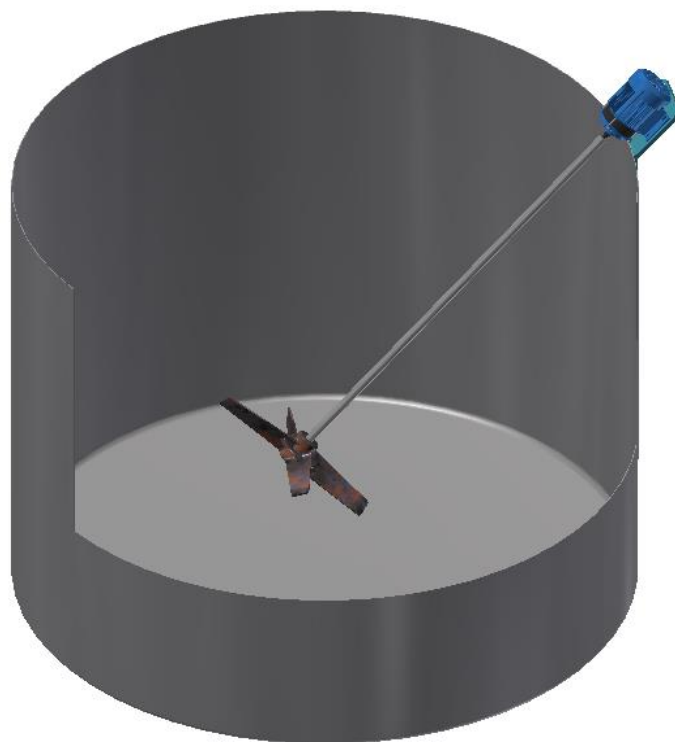


Figura 9.73 – Misturador de eixo longo (SOUZA, 2010).

Outra opção de sistema de agitação mecânica de biorreatores baseado em propulsão são os agitadores axiais. Geralmente são montados no eixo localizado no centro do teto do biorreator. Já os misturadores de carretéis são agitadores de eixo longo e com movimento lento. O efeito de agitação não é atingido pela propulsão e sim pelo amassamento do substrato, sendo especialmente eficiente com substratos ricos em matéria seca. Esses agitadores são muito empregados em biorreatores de fluxo pistonado, a figura 9.74.

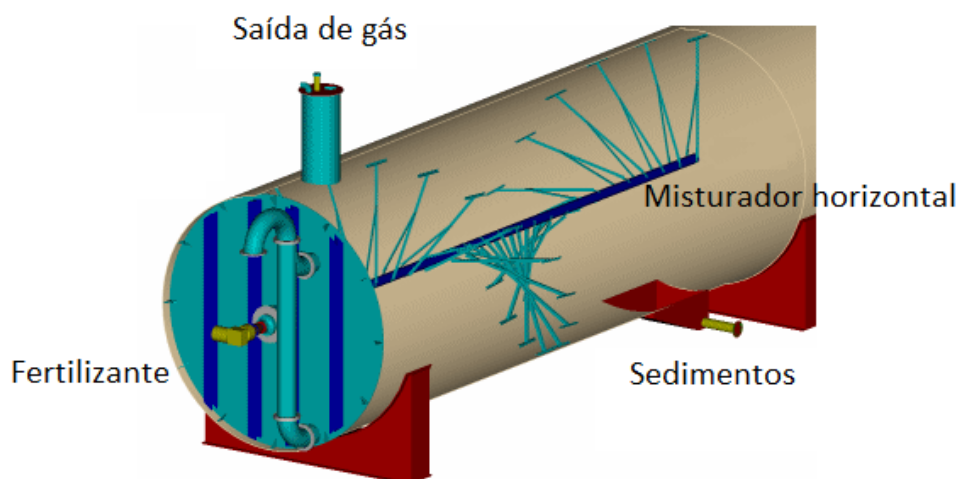


Figura 9.74 – Misturador horizontal (POSTEL *et al.*, 2008).

Em virtude da arquitetura dos biorreatores horizontais, nesse tipo o eixo de agitação é construído horizontalmente, sendo a agitação realizada pelas pás posicionadas no eixo. O fluxo pistonado horizontal é garantido pelo abastecimento posterior do biorreator com substrato. Os eixos e os braços de agitação dos agitadores frequentemente possuem serpentinas de aquecimento integradas com a função de aquecer o substrato. O misturador é colocado em funcionamento várias vezes por dia, por um breve período com baixo número de rotações (POSTEL *et al.*, 2008).

Agitação com circulação de gás do substrato de fermentação tem um papel menos eficiente do que misturadores mecânicos. Neste tipo de agitação o biogás é injetado pelo fundo do biorreator para o seu interior. O biogás é injetado sob pressão em um movimento vertical de baixo para cima, promovendo a mistura do substrato. Esses sistemas têm a vantagem de que as partes mecânicas necessárias para a mistura (bombas e compressores) são localizadas fora do biorreator e, portanto, sofrem menos desgaste. Essas técnicas não são eficientes para a eliminação de sobrenadantes, podendo por essa razão ser utilizadas somente

para substratos de baixa viscosidade com baixa propensão à formação de sobrenadantes, figura 9.75.

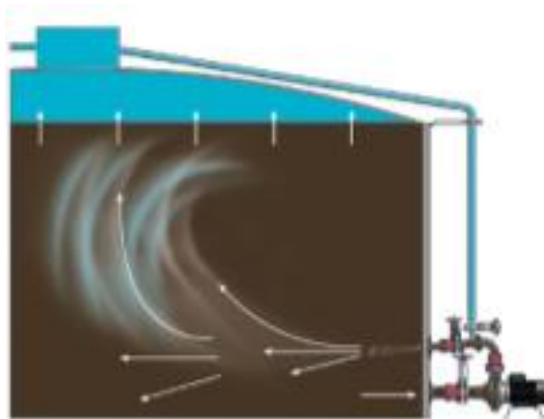


Figura 9.75 – Misturador de recirculação de biogás (POSTEL *et al.*, 2008).

Construções mecânicas como as utilizadas em sistemas para misturadores podem ser projetadas em softwares CAD 3D. Os softwares e simulações das unidades fornecem informações sobre posições, velocidades, acelerações, trajetórias de ponto, as forças e momentos, energias, bem como as forças de contato no contato entre os dentes de engrenagens e outros dados relativos ao sistema (BOSTAN; DULGHERU; SOCHIREANU, 2010).

Muitos exemplos de fracasso de projetos de biodigestão são atribuídos à falta de movimentação e agitação da matéria orgânica (PAULA, 2006). Biorreatores de lona não possuem estrutura adequada para instalação de misturadores, portanto estes possuem produção de metano menor comparados com os biorreatores rígidos que possuam alguma tecnologia para mistura do substrato (LUCAS JÚNIOR, J; SOUZA, 2009). Com a matéria orgânica depositada sem agitação o progresso da quebra do composto orgânico torna-se lento e a implantação de um sistema de mistura é a melhor opção. O emprego da simulação de misturadores contribui na busca das respostas a estas questões.

ANEXO VI – QUEIMADORES PARA PLANTAS DE BIOGÁS

Caso a planta de biogás esteja em funcionamento sem que o biogás possa ser armazenado ou utilizado em função de sua baixa qualidade é necessário queimá-lo para que não seja liberado diretamente para a atmosfera. Caso o gasômetro atinge a sua capacidade máxima de armazenar biogás ou até mesmo esteja em manutenção, o queimador pode ser uma forma segura de destinar o biogás produzido (BUNDESVERBAND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BERUFSGENOSSENSCHAFTEN, 2008).

A instalação de um queimador é a forma correta de eliminação de biogás e geralmente exigido pela legislação ambiental. Informações sobre queimadores de biogás na tabela 9.24.

Tabela 9.24 – Valores característicos e parâmetros operacionais de queimadores.

Vazão de queima de biogás máximo	3.000 m ³ /h
Temperatura de combustão	800 – 1.200 °C
Material	Aço inoxidável (AISI 304 ou AISI 316L)
Aplicação	Plantas de biogás
Particularidades	Possibilitam queima aberta ou enclausurada
Tipo de queima	Corrente de ar natural ou soprador
Formas construtivas	Módulo separado sobre pequena base de concreto com operação manual ou automática
Manutenção	Baixa manutenção

Fonte: (Adaptado de BUNDESVERBAND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BERUFSGENOSSENSCHAFTEN, 2008).

A figura 9.76 mostra a imagem de um queimador em planta de biogás.



Figura 9.76 – Queimador de biogás. Disponível em www.hofstetter-uwat.com.