

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

DESENVOLVIMENTO DE
TECNOLOGIAS PARA COMPRESSÃO DE BIOGÁS

José de Souza

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2010

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

**DESENVOLVIMENTO DE
TECNOLOGIAS PARA COMPRESSÃO DE BIOGÁS**

José de Souza
Tecnólogo em Automação Industrial

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia 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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: **Processos de Fabricação.**

Porto Alegre
2010

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.- Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. João Alifantes – UERGS

Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider – PPGE3M/UFRGS

Suplente:

Prof. Dr. Jean Carlo Salome dos Santos Menezes – UNOESC

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, Julho de 2010

DEDICATÓRIA

Para Cláudia Gisele Masiero.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Lirio Schaeffer, por sua dedicação à pesquisa, sua contribuição à Ciência e com o desenvolvimento deste País. Também pela orientação, apoio e incentivo ao meu trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, pela oportunidade de realização desta pesquisa.

À empresa P&D – Engenharia em Energia e Biotecnologia pela concessão de materiais e dados à publicação e apoio prestado através de seus empreendedores.

Ao colega, amigo e incentivador Giovani Garcia da Silva por tudo aquilo que construímos juntos.

À minha família em especial à minha mãe Helia que sempre me apoiou e em todos os momentos.

RESUMO

O crescimento do potencial energético a partir da biomassa estimula o desenvolvimento e a criação de novas tecnologias neste setor. Neste trabalho realizou-se uma ampla pesquisa da produção, compressão e acondicionamento do biogás. Constatou-se durante essa pesquisa a necessidade da busca por alternativas que possibilitem a utilização eficiente deste biocombustível. Analisou-se a possibilidade da fabricação de um compressor alternativo para biogás que possa ser aplicado em pequenas unidades de produção por meio da modelagem das partes componentes. Primeiro efetuou-se a escolha do material considerando-se as características adequadas para construção do sistema de compressão. Depois disto dimensionou-se a camisa de compressão e a sua modelagem tridimensional com software Inventor 2010 (versão Student), além de válvulas e matrizes para fabricação. Complementarmente foi simulado o funcionamento do compressor (gráfico do deslocamento, velocidade e força com o software FluidSim da Festo Didatic). Por último executou-se o projeto eletropneumático, energização e lista de dispositivos necessários para montagem do compressor. Observou-se que essa tecnologia pode ser aplicada em pequenas plantas de produção de biogás. A comparação com outros sistemas de compressão revelou vantagens como a não haver contaminantes na compressão e acionamento, além da compressão poder se dar em ambiente separado do seu acionamento.

Palavras-chaves: B combustíveis, Biogás, Compressão de Biogás, Armazenagem de Biogás.

ABSTRACT

The growth of the energy potential from the biomass stimulates development and creation of new technologies in this sector. In this work is carried out extensive research in production, compression and biogas bottling. The need to search for alternatives has been evidenced during the research to make possible the efficient use of biofuel. After it analyzed the possibility of manufacturing of an alternative compressor for biogas which can be applied in small production units through the modeling of the contracting parties. At first it was effected the material choice considering the characteristics for the construction of the compression system. After this, was dimensioned a compression jacket, valves and matrices with the Student software Inventor 2010. Moreover the functioning of the compressor was simulated (its graphical of the displacement, speed and force with a FluidSim software from Festo Didatic). Finally was made a pneumatic project and was executed a list of necessary devices for the compressor assembly. It was observed to that this technology can be applied in small plants of production of biogas. The comparison with other systems of compression demonstrates that tis compressor haven't contaminants, beyond the compression to be able to give itself in separate environment of its drive.

Keywords: Biofuels, Biogas, Biogas compressing, Biogas storage.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 BIOMASSA E BIOENERGIA	22
2.2 O BIOGÁS	25
2.3 REATORES ANAERÓBIOS	28
2.4 BIOMETANO	34
2.4.1 Filtragem de CO ₂	35
2.4.2 Filtragem de H ₂ S.....	37
2.5 COMPRESSÃO DE GASES	38
2.5.1 Lei de Pascal.....	38
2.5.2 Compressibilidade	39
2.5.3 Equação de Clapeyron.....	39
2.6 ELETROPNEUMÁTICA APLICADA AO BOOSTER.....	40
2.6.1 Válvulas pneumáticas direcionais	40
2.6.2 Atuadores pneumáticos lineares	44
2.7 BOOSTER	45
2.8 ARMAZENAMENTO: CILINDROS PARA BIOMETANO	48
2.9 COMBUSTÍVEL METANO VEICULAR (GMV)	50
2.10 MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA PARA BIOGÁS	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 ACIONAMENTO ELETROPNEUMÁTICO DO COMPRESSOR	54
3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE COMPRESSÃO	56
3.3 CAMISA DE COMPRESSÃO	59
3.3.1 Escolha do material.....	59
3.3.2 Dimensionamento da camisa de compressão.....	60
3.3.3 Processo de Fabricação da Camisa de compressão	62

3.4 UTILIZAÇÃO DO COMPRESSOR PARA COMPRESSÃO DE BIOMETANO	63
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
5 CONCLUSÕES	69
6 FUTURAS AÇÕES E MELHORIAS A SEREM EMPREENDIDAS.....	71
7 REFERÊNCIAS.....	72
ANEXO I – PROJETO ELETROPNEUMÁTICO DE COMPRESSOR TIPO BOOSTER PARA BIOMETANO.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resíduo de gado leiteiro em Estância Velha – RS.	24
Figura 2 – Esquema de geração de biogás (Adaptado de Connaughton, et al., 2006).	26
Figura 3 – Biodigestor de batelada (Adaptado de Warith, 2001).	29
Figura 4 – Biodigestor contínuo em alvenaria.....	30
Figura 5 – Biodigestor de lona.	31
Figura 6 – Ensaio mecânico em balões de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) 3mm.....	31
Figura 7 – Biodigestores de concreto.	32
Figura 8 – Ilustração de biodigestor em chapas de aço inox.	33
Figura 9 – Estrutura em aço comum para biodigestor de chapas.	34
Figura 10 – Filtro de CO ₂ (Adaptado de Horikawa, et al., 2004).	36
Figura 11 – Transmissão de forças segundo o princípio de Pascal.	38
Figura 12 – Multiplicação da pressão segundo o princípio de Pascal.....	38
Figura 13 – Posição de repouso de uma válvula pneumática 3/2 vias.....	40
Figura 14 – Número de posições de uma válvula.....	41
Figura 15 – Setas de indicação da interligação interna das conexões.....	41
Figura 16 – Válvula pneumática acionada por solenóide.	43
Figura 17 – Cilindro de dupla ação pneumático (Festo Didatic).	45
Figura 18 – Princípio de funcionamento do cilindro de dupla ação (Festo Didatic). ..	45
Figura 19 – Tipos básicos de compressores tipo booster (Gas Booster Catalog).	46
Figura 20 – Esquema de um booster de simples estágio (Souza, et al., 2010).	47
Figura 21 – Conjunto de forjamento de cilindro para biometano (Souza & Schaeffer, 2010).	49
Figura 22 – Compressor para biogás (Souza, et al., 2010).	52
Figura 23 – Circuito eletropneumático do compressor (Software FluidSim da Festo – Versão Demo).	55
Figura 24 – Esquema do movimento do compressor ilustrado para visualização.	56
Figura 25 – Camisa de compressão com válvulas de retenção modelado em software Inventor 2010 versão Student.	57
Figura 26 – Válvula de retenção, detalhe do retentor modelado em software Inventor 2010 versão Student.....	58

Figura 27 – Válvula de retenção, em vista explodida modelada em software Inventor 2010 versão Student.....	58
Figura 28 – Válvula de retenção, com detalhe de fluxo do biogás, modelada em software Inventor 2010 versão Student.	59
Figura 29 – Camisa de compressão modelada em software Inventor 2010 versão Student.	61
Figura 30 – Desenho em CAD da camisa de compressão.....	61
Figura 31 – Matriz Bipartida modelada em software Inventor 2010 versão Student..	62
Figura 32 – Punção da Matriz.....	63
Figura 33 – Planta baixa da estação de compressão para biometano.	65
Figura 34 – Planta de compressão em 3D para biometano.	66
Figura 35 – Esquema de aproveitamento energético do compressor booster.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos constituintes do biogás.....	26
Tabela 2 – Principais propriedades do gás metano.....	27
Tabela 3 – Principais propriedades do gás metano.....	42
Tabela 4 – Características físicas e mecânicas da poliamida PA 6.6.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área (m^2)

atm – Atmosfera de pressão

bar – Pressão equivalente a uma atm

F – Força (N)

K – Grau Kelvin

m – Massa (kg)

P – Pressão (Pa)

p – Fator de compressibilidade

qv – Vazão (L/s)

T – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

V – Volume (m^3)

ρ = Massa específica (Densidade) kg/m^3

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
DIN – Deutsche Interne Normen
FEPAM – Fundação de Proteção ao Meio Ambiente
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia
ISO – International Standard
GNV – Gás Natural Veicular
GMV – Gás Metano Veicular
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
PA – Poliamida
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PSI – *Square per Inch* (Libra por polegada quadrada)
TRH – Tempo de Retenção Hidráulica
TGN – Tufo Giallo Sistema de remoção de CO₂ Napoletano

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país é o conjunto das condições de vida dos seus habitantes, como o bem estar social, o livre acesso a saúde e a escola, trabalho, renda, transporte, segurança e lazer. Todas estas características estão ligadas direta ou indiretamente à produção energética de uma nação. A tecnologia empregada na geração da energia, bem como quantidade e qualidade desempenham papel fundamental no desenvolvimento de um país.

O desenvolvimento sustentável de uma região está diretamente relacionado com o emprego de tecnologias para produção, transporte e utilização dos combustíveis de forma limpa e renovável. A poluição gerada na produção, tratamento ou no uso da energia é um importante aspecto a ser considerado. Os biocombustíveis desempenham importante papel neste objetivo que o País vem buscando atingir, pois apontam para um caminho responsável pela redução da poluição e do aumento da produção de energia de maneira consciente. Estes, produzidos de forma renovável contribuem de forma significativa com a natureza e o meio ambiente, pois os níveis de emissão de gases causadores do efeito estufa são menores, comparados com os combustíveis de origem fóssil (Demirbas, 2008).

Os setores econômicos e energéticos no País e no mundo estão concentrados na busca por tecnologias e avanços em biocombustíveis. Muitos esforços têm sido empregados no meio acadêmico-científico para a geração de conhecimento e de novas tecnologias que promovam formas de energias limpas. O desenvolvimento de tecnologias e equipamentos é imprescindível para a utilização destes recursos renováveis. O não desenvolvimento de recursos tecnológicos para o setor dificulta a geração de energia de maneira eficiente.

Devido ao crescimento de investimentos em fontes alternativas de energias e de políticas públicas na busca da diversificação da matriz energética do País, observa-se a tendência na produção e o crescimento do potencial brasileiro na geração de biogás. A implantação de micro usinas geradoras deste gás vem crescendo anualmente e com elas surge a necessidade de melhores tecnologias e equipamentos, tanto para geração, tratamento, transporte e utilização deste

biocombustível. A utilização do mesmo como combustível veicular e utilização na geração de energia elétrica, entre outros fins, exige um tratamento com equipamentos de purificação e de compressão. Neste sentido se direcionou este trabalho para o desenvolvimento de uma alternativa de compressão para biometano.

Neste trabalho se investigou uma tecnologia de compressão relacionada com o compressor tipo Booster para a compressão do biometano. Este mecanismo aplicado em uma usina de biogás deverá possuir propriedades mecânicas que confirmem resistência à fadiga, à ruptura, ao desgaste e aos esforços físicos sujeitos quando em funcionamento. Assim como a resistência mecânica, esse equipamento deverá possuir resistência química contra a corrosão e não deverá sofrer reação com os substratos agressivos formados durante a produção de biogás (como o ácido sulfídrico). A construção do sistema depende da escolha de material, modelagem do sistema de compressão, verificação dos dispositivos necessários, simulação do seu funcionamento e projeto de acionamento do equipamento. Além disso, é fundamental o esboço ou modelagem tridimensional da tecnologia de fabricação das partes, as matrizes.

Este trabalho tem como objetivo escolher e analisar as características de material adequado para a fabricação de um compressor tipo Booster para compressão de biogás. Com a escolha do material objetiva-se executar o dimensionamento do sistema de compressão (camisa ou jaqueta em Software tridimensional), a modelagem da ferramenta de fabricação, no caso as matrizes. Além disso, o objetivo também compreende desenvolver o acionamento do compressor, seu sistema de compressão (camisa e válvulas), simular com software apropriado. Com a descrição do funcionamento será executado o projeto eletropneumático com a simulação de funcionamento, energização, gráfico de tempo x deslocamento, força e lista de dispositivos necessários para fabricação e montagem. Serão utilizadas as tecnologias de software, Inventor Professional 2010 (Versão Educacional) e FluidSim (Versão Demo da Festo Didatic).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Usinas de biogás compõem uma alternativa que contribui de forma fundamental para o desenvolvimento sustentável de regiões onde há necessidade de tratamento de resíduos e onde existe abundância de biomassa. Dessa forma, esses reatores anaeróbios ajudam na promoção do saneamento, auxiliam na prevenção da poluição e da contaminação dos recursos hídricos e do solo, que são vulneráveis aos dejetos e esgotos não tratados (Andrade, et al., 2003). Esta tecnologia possibilita um adequado tratamento de diversos resíduos orgânicos agrícolas, bem como a utilização energética do gás metano, que se liberado diretamente no meio ambiente contribui, com o aquecimento global (Efeito Estufa) e é 21 vezes mais poluidor de que o gás carbônico (Abreu, et al., 2006). Verifica-se o potencial de utilização deste recurso baseando-se principalmente nos aspectos vistos como, socioeconômicos, energéticos e ambientais.

Dentre as energias chamadas renováveis, a biomassa é uma das opções para se diversificar a matriz energética, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil, permitindo um planejamento de sua utilização conjunta com as fontes convencionais já existentes (Costa, 2006). Segundo Cunha (2002), reatores anaeróbios, podem ser usados para um tratamento do esgoto, questão importante na promoção do desenvolvimento e que está ligado diretamente a questão de aproveitamento de resíduos na conversão de energia.

Pesquisadores, cientistas, professores e estudantes tem se dedicado na busca por melhorias neste setor, uma vez que é um dos setores estratégicos para o desenvolvimento do País. A melhoria e criação de tecnologias e equipamentos são imprescindíveis para a utilização dos recursos limpos e renováveis. O biometano é um dos componentes deste grupo de combustíveis uma vez que é proveniente de matéria orgânica degradada. Além deste aspecto limpo o metano pode ser obtido de matéria orgânica com grande aspecto poluidor como esgotos cloacais e resíduos orgânicos urbanos. A utilização do biometano requer equipamentos e compressores especiais, sem os quais não é possível obter a conversão da energia térmica em mecânica. O ponto crítico de um sistema de compressão de biometano é a

necessidade de outro combustível para ser utilizado no motor do compressor, sendo esta uma questão crucial, pois exige uma tecnologia apropriada (Kapdi, et al., 2004).

O biometano é um biocombustível que pode substituir em parte os combustíveis fósseis, pois tem grande potencial de ser produzido e para tanto é necessário que se desenvolva tecnologias para utilização eficiente deste (Handbook on Biogas Utilization, 1990).

A geração de biogás envolvendo o uso de resíduos orgânicos tem-se tornado uma alternativa para agroindústrias e criadores de suínos. A expansão da atividade suinícola no País e o incremento tecnológico nos sistemas de produção, têm resultado em um aumento na geração de dejetos os quais são, muitas vezes, lançados em rios e mananciais. Devido à adoção de sistemas confinados de produção de suínos, problemas ainda maiores causados pelos dejetos são produzidos devido ao não tratamento destes (Angonese, et al., 2005).

O aumento dos custos pela energia consumida em regiões agrícolas e rurais vem indicando para utilização de fontes e recursos locais (Silva, et al., 2005). O desenvolvimento e a implementação de alternativas tecnológicas com vistas à geração de energia a custos reduzidos para esse segmento podem gerar impactos socioeconômicos positivos. Uma das alternativas tecnológicas mais promissoras diz respeito exatamente ao aproveitamento da biomassa para geração de energia, que propicia uso mais racional dos recursos disponíveis na exploração agrícola, reduz a transferência de renda para grandes concessionárias de energia e diminui a dependência de fontes externas de energia (Esperancini, et al., 2007).

As plantas biodigestoras, também, se apresentam como uma alternativa ao tratamento de resíduos orgânicos em aterros sanitários. Estes somente retêm os resíduos orgânicos urbanos, não geram energia de maneira eficiente e ainda permanecem com essa carga orgânica retida por vários anos (Ensinas, 2003). Nos aterros a emissão de poluentes é bastante grande, os gases poluem a atmosfera e os resíduos resultantes podem contaminar o solo, subsolo, lençol freático e os cursos d'água. Em usinas de biometano, os resíduos são tratados e geram energia de forma controlada em curto período de tempo e de forma otimizada, aplicável no

meio rural há grande produção de material orgânico resultante de dejetos de animais confinados, compondo um grande potencial energético (Lucas, 1987). Ainda segundo o autor outro recurso altamente poluidor é o esgoto cloacal que causa sérios danos ao meio ambiente e que também pode ser utilizado na geração de energia.

As usinas de biogás são estações de tratamento de resíduos e geração de energia, estas ainda hoje são pouco utilizadas no meio rural, pois a produção de biometano (com qualidade próxima do Gás Natural) carece de tecnologias para sistemas de tratamento e acondicionamento deste combustível. Além do aspecto material, as técnicas industriais de fabricação das peças destes equipamentos para usinas, utilizando ligas metálicas, aumentam o custo de produção, pois demandam muita energia e um número elevado de etapas até o seu acabamento. Um aspecto social a ser considerado é o fato de que a acessibilidade aos recursos energéticos eleva a qualidade de vida dos cidadãos que estão inseridos nesses locais com grande potencial energético (Sorum, et al., 2000).

Com tecnologia nacional estes consumidores poderiam usufruir desse biocombustível de maneira facilitada. A descentralização da produção energética traz benefícios à população distanciada dos grandes centros. A produção desta energia pelos próprios consumidores, como associações, cooperativas, etc, lhes confere maior liberdade e autonomia de gerenciar seus recursos energéticos considerando as características da região tendo em vista suas necessidades e demandas. A projeção dos recursos necessários a implementação de tecnologias e manutenção deve ser efetuada pelos próprios associados, o que reduz custos da energia gerada beneficiando assim o núcleo de consumidores locais (Zhang, et al., 2003).

Resíduos orgânicos urbanos, esgotos, etc., poluem o meio ambiente caso não sejam tratados e esse fato desempenha um papel fundamental no processo de sustentabilidade e de desenvolvimento do País. Uma vez não tratados, causam sérios prejuízos à sociedade, pois disseminam doenças, poluem o ar, solo e os recursos hídricos. Por outro lado essas fontes poluidoras podem ser utilizadas como fonte de energia em estações de tratamento e geração de energia renovável

(Iglesias, et al., 1999). Considerando-se a geração de energia aliado ao tratamento destes resíduos soma-se dois fatores importantes, a energia gerada e o grande volume de resíduos que foram tratados, evitando-se assim a poluição. Um terceiro produto a ser mencionado é o substrato resultante do processo de biodigestão, o biofertilizante. Com uma biodigestão controlada obtém-se um excelente biofertilizante agrícola que pode contribuir com a produção de alimentos, considerando-se o grande volume produzido, sendo esse controle é o tempo de degradação adequada para cada tipo de biomassa (Lucas, 1987).

O principal subproduto destas usinas de tratamento e geração de energia é o próprio biogás. Este é obtido pela decomposição de materiais orgânicos por bactérias anaeróbicas que se desenvolvem em diferentes estágios dentro de câmaras fechadas, conhecidos por reatores anaeróbios. Das bactérias presentes desenvolvem-se o grupo das metanogênicas que tem como função a quebra do composto orgânico e produção de metano e dióxido de carbono. O metano é o principal componente da fração gasosa e que é o gás combustível desejado no processo. O biogás é composto por metano, dióxido de carbono, nitrogênio, gás sulfídrico e amônia (Gaspar, 2003). Estes elementos diferem na quantidade dependendo do substrato do qual é obtido o gás. Esta variação é devido a uma série de condições na geração e no substrato utilizado. Verifica-se, portanto a necessidade de tecnologias para separação do metano do restante da composição bem como o seu acondicionamento para utilização (Wellinger & Lindeberg, 1999).

O biogás uma vez filtrado é denominado de biometano, um biocombustível que pode ser usado na geração de energia elétrica, aquecimento em estufas, fornos, fogões e em veículos automotores já convertidos para GNV (Gás Natural Veicular). O biometano com uma composição de 95% de metano compõe-se de um excelente combustível veicular (Alves, 2000). Ainda segundo o autor, a emissão de poluentes na queima do biometano é menor comparado com os combustíveis fósseis, além disso, tem a grande vantagem ambiental, pois a produção do mesmo tem origem do tratamento de resíduos poluidores. A produção de biometano tende a crescer no país com a implantação de reatores anaeróbicos e com a produção de biogás. Com isso aumenta a necessidade de equipamentos para produção, tratamento e

transporte do biometano, o que acarreta a importação de tecnologias relacionadas (Silva, et al., 2005).

A importação dessas tecnologias tem dificultado a implantação de projetos de geração de energia com a utilização deste biocombustível, devido aos custos dos equipamentos e dos impostos sobre a importação. Isso reduz a possibilidade de implantação e diminui a competitividade desse combustível prejudicando esse tipo de iniciativa. Para utilização do biometano como combustível veicular é necessário comprimir e carregá-lo em cilindros especiais (Ilyas, 2006). Esse excelente biocombustível pode ser usado para geração de energia elétrica, mecânica e térmica, no entanto necessita ser transportado e a pressão mantida em níveis estáveis (Kapdi, et al., 2005). Para tanto poderão ser utilizados equipamentos de compressão e manutenção da pressão.

O transporte e uso dos biocombustíveis gasosos como biogás estão condicionados à compressão devido ao grande volume ocupado a pressão atmosférica. É economicamente inviável transportar e estocar este gás em cilindros e gasômetros sem comprimi-lo a médias ou altas pressões. Equipamentos para compressão são caros e não existem muitas alternativas no mercado mundial. Outro fator decisivo é a utilização deste biocombustível em motores, ou sistemas de geração de energia elétrica, pois precisa ser comprimido para poder ser utilizado de maneira eficiente (Rutz & Rainer, 2007). A utilização deste combustível tornar-se-á imprescindível para o desenvolvimento sustentável devido à grande produção de resíduos, esgotos e também porque se substitui outra fonte não renovável e poluidora. Contudo, isso só será possível se tivermos tecnologia para produzir, tratar, transportar e utilizar esse gás. Produtores têm improvisado tecnologias para compressão que são inapropriadas devido à característica corrosiva deste gás. Os altos custos de equipamentos importados tornam inviáveis economicamente muitos projetos de usinas e estações de tratamento e geração de energia renovável. Equipamentos especiais para compressão são caros e não existem muitas alternativas. A maioria dos equipamentos não é eficiente, pois não são construídos para a compressão específica de biometano, mas geralmente para outros gases como gás carbônico, nitrogênio, oxigênio, etc. Em muitos casos existem adaptações que comprometem o bom rendimento do sistema de conversão da energia. O

desenvolvimento e a implementação de alternativas tecnológicas com vistas à geração de energia a custos reduzidos para esse segmento podem gerar impactos socioeconômicos positivos uma vez que não restringe o biometano ao local onde é produzido (Silva et al., 2005).

Das tecnologias de compressão existentes o compressor tipo Booster é indicado para compressão de biometano, devido a sua mobilidade, facilidade de instalação e utilização (Trivelin & Bendassolli, 2006). Este equipamento mantém a pressão estabilizada para o fornecimento do gás em grupos geradores, micro turbinas e possibilita o transporte. Isso se dá por meio do deslocamento de massa tanto para vasos de pressão em grandes distâncias ou quando do envase em cilindros apropriados. O biometano condicionado pode ser utilizado em motores de combustão a ciclo Otto ou diesel adaptados, queima em caldeiras, junkers, fogões industriais, motores, turbinas, etc (Vijay, et al., 2006).

O Booster facilita a universalização da utilização do biometano não restringindo o uso deste biocombustível ao local onde é produzido. Sendo a compressão necessária para a sua utilização e tendo-se produção deste em grande volume é imprescindível que se utilize parte do combustível para comprimir o mesmo. Para tanto podem ser utilizados motores a biogás que possam ser instalados em sistemas de baixa pressão e acoplados aos compressores (Castelló, et al., 2002). Dessa forma, pode-se utilizar uma pequena parte do combustível produzido o que torna esse sistema inovador e tem um enorme diferencial.

A utilização em veículos automotores também depende da compressão do metano para ser armazenado em cilindros, sem estes não existe a possibilidade de ser utilizado em veículos automotores. Assim como esta, a maioria das aplicações onde é possível a utilização deste gás é necessário comprimi-lo a baixas, médias e altas pressões que podem ir de 50 a 300bar (Shlosser, et al., 2004).

2.1 BIOMASSA E BIOENERGIA

A biomassa é um recurso energético flexível, diversificado, abundante em nosso país e no mundo. Com este recurso podemos gerar energia nos mais diversos

locais e regiões, mesmo nas mais carentes de fontes energéticas. Pode-se converter essa fonte em combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos, utilizando-se de tecnologias de conversão conhecidas. Assim sendo, essa fonte pode ser considerada como portador universal de energia renovável que pode ser usada num vasto campo de aplicações no setor da energia. A biomassa pode ser utilizada em uma gama de aplicações desde o aquecimento, transformação de combustíveis gasosos, adubo e outras aplicações (Silva, et al., 2008).

A variedade de utilizações possíveis da biomassa, as vantagens de um armazenamento seguro e inofensivo, e a possibilidade de integrar fornecedores locais de combustíveis, nomeadamente empresas agrícolas e florestais, oferecem um vasto campo de aplicações sustentáveis. Usar a biomassa como um combustível renovável pode contribuir com a redução da poluição, emissão de gases do efeito estufa, e poderá ajudar para a minimização das alterações climáticas e de outros problemas ambientais. Quando se usa a energia armazenada na biomassa, ocorre a emissão de gases que provocam o efeito estufa, tal como o dióxido de carbono. Contudo, a quantidade liberada é a mesma que foi consumida durante o processo da fotossíntese, ou seja, as fontes de biomassa são consideradas neutras, relativamente aos danos climáticos, derivados do efeito estufa (Petersson, et al., 2007).

Em contraste com o uso direto da energia solar ou eólica, a biomassa como portadora de energia renovável está sempre disponível. Geralmente, depois do tratamento da biomassa, esta é convertida em três grandes formas de energia: eletricidade, calor, e combustível. Esta flexibilidade permite à biomassa estar em concorrência direta com a energia produzida por fontes fósseis (Bioenergia Handbook, 2004).

A utilização de biomassa é a forma mais antiga de fornecer energia à humanidade. Contudo, as fontes modernas de bioenergia, tais como os briquetes, peletes ou estilhas de madeira, troncos de madeira, gás proveniente da madeira, biogás e óleo vegetal ou biodiesel, oferecem um elevado potencial para utilização de energias inovadoras. Estes combustíveis naturais podem ser usados em aplicações

estacionárias, para fornecimento de calor e energia a habitações, edifícios públicos, na agricultura e na indústria (Scholtz & Ellerbrock, 2002).

A biomassa oferece um potencial considerável no suporte de um desenvolvimento estrutural sustentável e no reforço das áreas rurais. Por isso, as fontes de bioenergia apresentam vantagens a longo prazo para o desenvolvimento rural, mas também na produção agrícola de alimentos. Segundo Gaspar (2003) nas áreas rurais do planeta, cresce a produção de biomassa a cada ano devido ao aumento da produção de resíduos não aproveitados, como a palha da colheita, a planta que contém o grão, os resíduos animais devido ao aumento do rebanho, restos alimentares, poda, desbastes, etc. Verifica-se que em propriedades rurais do Rio Grande do Sul existem casos de grande produção de resíduos sem aproveitamento energético. Pode ser visto na figura 1 um exemplo de produção de resíduos de gado leiteiro.



Figura 1 – Resíduo de gado leiteiro em Estância Velha – RS.

Infelizmente, este vasto potencial não pode ser usado diretamente para energia, visto que está espalhado por toda a parte. Apenas uma parte deste potencial está disponível para utilização imediata. A fração do potencial técnico da biomassa viável economicamente depende das respectivas condições de mercado. Assim, o valor econômico local do gás e do petróleo, bem como os instrumentos políticos de suporte (subsídios, receitas etc.), complementa as vantagens ambientais e sociais da bioenergia. Além disso, a reciclagem dos resíduos urbanos, bem como o tratamento dos esgotos e resíduos urbanos contribuem nesta diretiva e complementam as vantagens da utilização da biomassa. No entanto, com o aumento dos preços para as fontes de energia fóssil, o potencial técnico para projetos de bioenergia aumenta também (Demirer & Chen, 2007).

A biomassa já contribui significativamente para o fornecimento de energia sustentável, num determinado número de países europeus. Na União Européia, mais de 2200 Pentajoules de energia por ano, armazenados na forma de biomassa, estão a ser produzidos. Destes, cerca de 1700 Pentajoule são usados diretamente para gerar calor, enquanto que os restantes 500 Pentajoule são usados para gerar eletricidade (Bioenergia Handbook, 2004).

2.2 O BIOGÁS

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).

O processo de formação do biogás ocorre em três diferentes estágios: a fermentação inicial ou hidrólise, seguida pela acetogênese¹ e finalmente pela metanização onde ocorre a formação da maior parte do metano (Connaughton, et al., 2006). O esquema de geração pode ser visto na figura 2.

¹ Processo de quebra das moléculas com formação de acetato

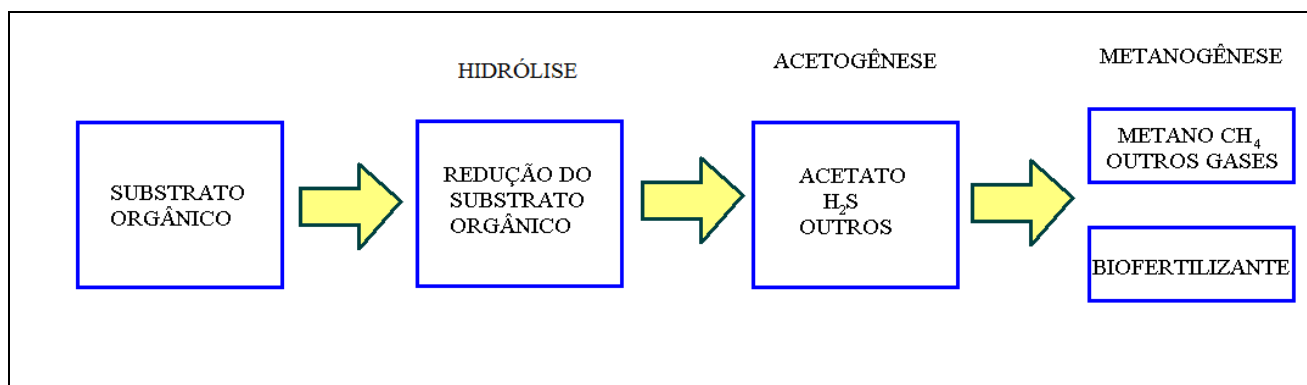


Figura 2 – Esquema de geração de biogás (Adaptado de Connaughton, et al., 2006).

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 utilizado como combustível e na maioria das vezes é o objetivo principal da produção do biogás. Conforme Figueiredo (2007), podemos verificar na tabela 1 as informações sobre os principais constituintes desta mistura de gases, o biogás.

Tabela 1 – Propriedades dos principais constituintes do biogás – Adaptado de Figueiredo, 2007.

Propriedades	Metano (CH ₄)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Gás Sulfídrico (H ₂ S)
Massa Molecular	16,04	44,01	34,08
Massa Específico	0,555	1,52	1,189
Volume Específico	1473,3cm ³ /g	543,1cm ³ /g	699,2cm ³ /g
Capacidade Calorífica a 1 ATM	0,775kcal/kg	0,298kcal/kg	0,372kcal/kg
Relação CP/CV	1,307	1,303	1,320
Poder Calorífico	13,26kcal/kg	0kcal/kg	4,633kcal/kg
Limite de Inflamabilidade	5-15% por volume	Nenhum	4-46% por volume

O metano (que é proveniente de toda e qualquer matéria orgânica degradada) uma vez gerado e liberado na atmosfera acaba oxidando. Essa oxidação troposférica produz grande quantidade de Dióxido de Carbono (CO₂) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂) gases nocivos ao meio ambiente e à saúde. Os mesmos são responsáveis por diversas reações (Baird, 2002). Ainda conforme o autor o metano

pode causar o aumento de sintomas em doenças respiratórias e alterar os mecanismos de defesa de patógenos

O metano é um gás incolor, inflamável, não tóxico, com um odor semelhante ao do óleo. É o primeiro membro da série dos hidrocarbonetos parafínicos. As principais propriedades físicas deste gás são dadas na Tabela 2. O metano é considerado um combustível "limpo" por não apresentar impurezas e resíduos da sua combustão. Outro ponto favorável para a sua utilização é o fato de não ser corrosivo nem produzir depósitos de carbonos nas câmaras de combustão. A mistura ar-combustível é perfeita com qualquer temperatura e a sua combustão é mantida por mais tempo do que os demais combustíveis, o que se transforma em benefícios para a vida útil do motor (Leite, et al., 2003).

Tabela 2 – Principais propriedades do gás Metano (Gama Gases - http://www.gamagases.com.br/propriedades_metano.htm)

Propriedades Físicas do Metano	
Calor latente de fusão a -182,5°C.	58,42 kJ/kg.
Constante dielétrica, gás a 101,325 kPa a 0°C.	1,000944.
Constante dielétrica, líquido a 101,325 kPa a -173 °C.	1,7.
Densidade absoluta, gás a 101,325 kPa a 0°C.	0,7174 kg/m ³
Densidade crítica.	0,1625 kg/dm ³
Densidade relativa, gás a 101,325 kPa a 0 °C (ar=1).	0,555.
Densidade, líquido a pressão de saturação -161,5 °C.	0,4241 kg/L
Fator crítico de compressibilidade.	0,288
Fórmula.	CH ₄
Limite de inflamabilidade no ar.	5,0 a 15,4% (por volume).
Momento dipolar, gás.	0 C x m.
Massa Molecular.	16,0425
Ponto de ebulição a 101,325 kPa.	111,66 K; -161,5°C; -258,7°F
Pressão crítica.	4640 kPa; 46,4 bar; 673,1 PSI; 45,8 atm
Pressão no ponto triplo.	11,69 kPa; 116,9 mmHg.
Razão do calor específico, gás a 101,325 kPa.	1,305
Solubilidade em água a 101,325 kPa (pressão parcial do metano)a 20°C.	0,03308 cm ³ /1 cm ³ de água
Temperatura crítica.	191,05 K; -82,1 °C; -115,8 °F
Temperatura de autoignição.	810 K; 537°C; 999°F

O gás metano é um combustível que se adapta bem à substituição dos combustíveis tradicionais para motores que funcionam através da ignição por centelhamento, sejam motores de quatro tempos (ciclo Otto) ou motores de dois tempos. Qualquer processamento desta substância seja compressão, expansão, evaporação, variação de temperatura, liquefação ou transporte exigirá um tratamento termodinâmico como qualquer outro gás (Avellar, et al, 2008).

O metano pode ser usado como propulsor de veículos com motores de dois ou quatro tempos que possuem ignição por compressão, movidos a óleo diesel, quer na forma combinada, que utiliza tanto o diesel quanto o gás, ou substituindo o antigo motor movido a diesel por outro movido apenas a gás. Neste último caso, a conversão do veículo é mais complexa e mais cara, principalmente se houver a necessidade de substituição do motor original ou realização de serviços de retífica. (Demirbas, 2004).

Diversas vantagens são advindas do uso do metano em veículos automotores, pode ser usado perfeitamente em motores bicomustíveis, principalmente os que funcionam com álcool e GNV, pelas taxas de compressão compatíveis. Gera o menor volume de gases poluentes ao meio ambiente se comparado à gasolina, diesel e ao álcool. Proporciona maior durabilidade ao motor e menos desgastes, quando corretamente instalado. Limpeza da injeção: por ser um combustível mais limpo, o gás não deixa acumular resíduos nos bicos injetores. Aumenta o intervalo de troca de óleo, já que não há contaminação do lubrificante, o prazo de troca pode aumentar 1000 ou 2000km. Por ser mais leve que o ar, o gás metano, em caso de vazamento, se dissipa na atmosfera, reduzindo o risco de explosões e incêndios (MacLean & Lave, 2003).

2.3 REATORES ANAERÓBIOS

Os tipos de câmaras biodigestoras mais comuns usadas em larga escala são: batelada, contínuo e semicontínuos. No chamado batelada o substrato permanece encerrado e o biodigestor é aberto para a retirada da matéria digerida no final do

processo de fermentação. Esse período em que o substrato permanece fechado é chamado de TRH (Tempo de Retenção Hidráulica). Este tipo de câmara é utilizado com tipos de substratos secos, como palhas, resíduos resultantes de colheitas, podas, casca de arroz, etc. É indicado quando a quantidade de biomassa é muito grande, quando pode ser carregada com máquinas carregadeiras o que agiliza o carregamento e o descarregamento das câmaras otimizando o processo (Andrade, et al., 2003). Esse modelo facilita a selagem, ou seja, o fechamento do substrato evitando a entrada de ar ou mesmo o escape de gases no carregamento ou descarregamento, fato que pode ocorrer em outros modelos contínuos ou semicontínuos. Na figura 3 pode ser visto uma câmara fechada que representa um biodigestor de batelada.

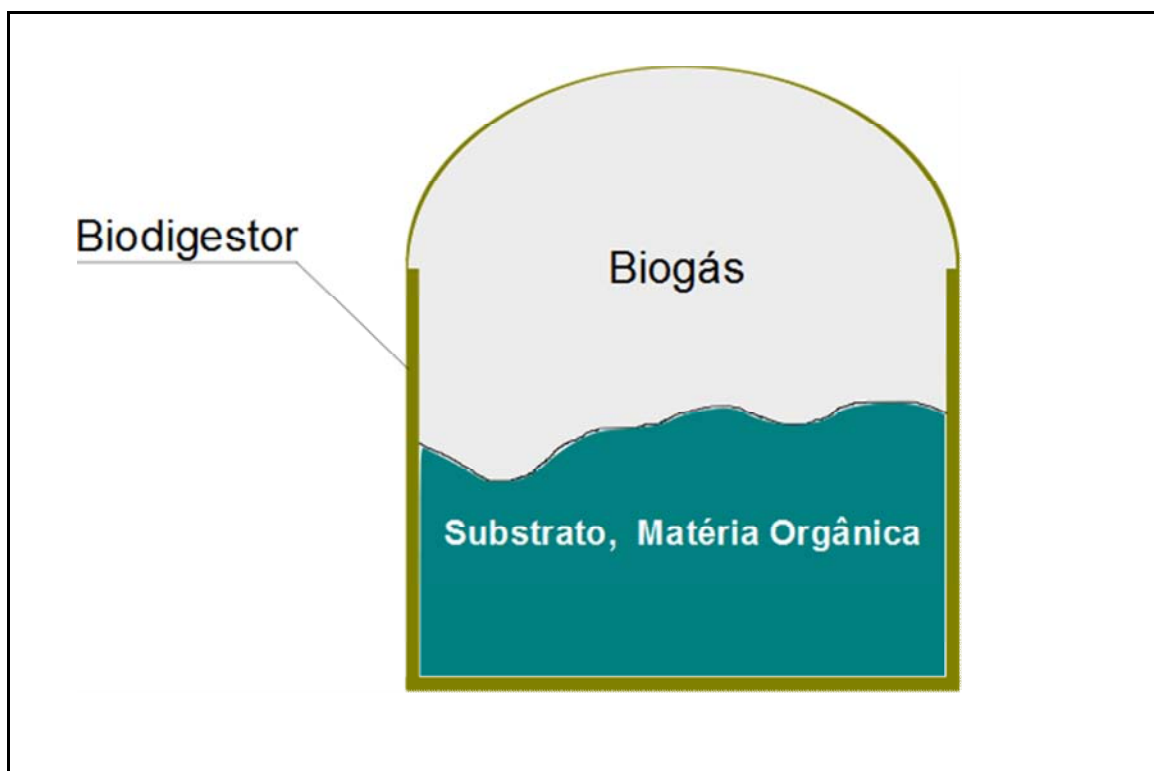


Figura 3 – Biodigestor de batelada (Adaptado de Warith, 2001).

Os chamados biodigestores contínuos e semicontínuos são carregados e descarregados simultaneamente, tem entrada e saída constante do substrato na câmara principal. Podem ser abastecidos através de um desnível entre a entrada e a saída, ou ainda através de fusos transportadores, mecanismos, engrenagens, bombas que sugam o substrato de um tanque para dentro dos reatores ou ainda

manualmente. Essa característica confere a propriedade a este sistema de haver uma produção ininterrupta de biogás e de não possuírem a necessidade de serem abertos para retirada da matéria orgânica digerida. Na figura 4 vemos um modelo de biodigestor contínuo (Toledo & Lucas, 1996).

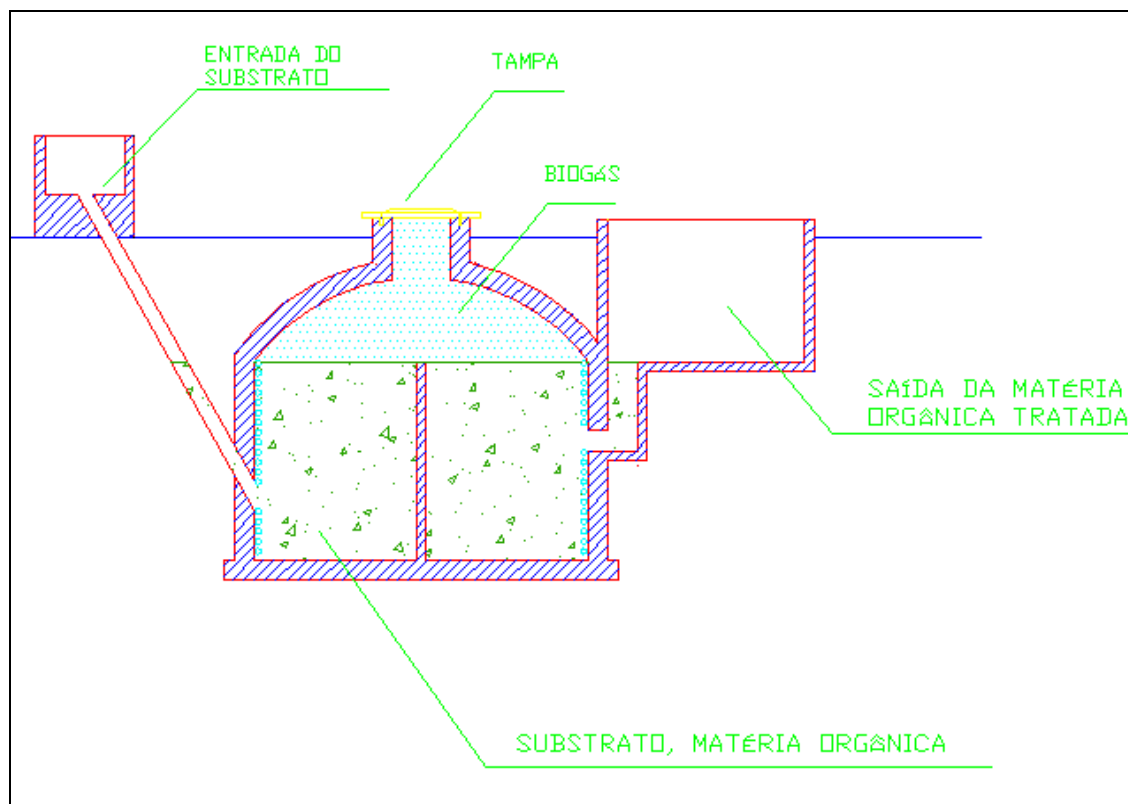


Figura 4 – Biodigestor contínuo em alvenaria.

Ainda segundo Toledo & Lucas (1996), dos outros tipos de biodigestores existentes, dos mais variados tipos e materiais, destacam-se os de lona, ou geomembrana, que são muito usados no tratamento de dejetos de suínos, pois tem uma estrutura simples, conforme projetado com fins ilustrativos na figura 5.

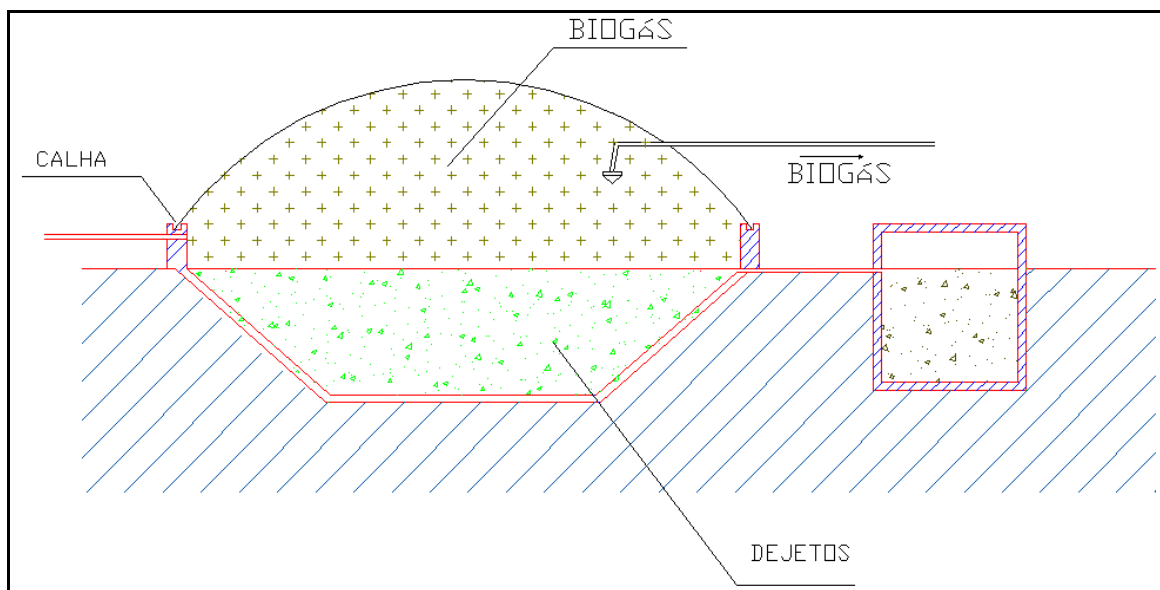


Figura 5 – Biodigestor de lona.

Os biodigestores de geomembrana não suportam grandes pressões internas, geralmente entre 1 a 2bar de pressão. Pode ser visto um balão para biogás antes e depois do ensaio de resistência na figura 6.



Figura 6 – Ensaio mecânico em balões de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) 3mm
a – ensaio de resistência mecânica;
b – ruptura causada por pressão de 2,103bar.

Modelos de biodigestores de PEAD não são indicados para locais de clima frio, devido à interferência da temperatura na biodigestão, não sendo possível neste modelo controlar essa variação. Existem ainda modelos tecnológicos com agitação e aquecimento da matéria orgânica. Estas Usinas de biodigestão são geralmente construídas em blocos com duas câmaras ligadas conforme pode ser visto na figura

7, onde os processos de hidrólise e metanização ocorrem separadamente. São controladas com o monitoramento das variáveis que interferem na biodigestão, como temperatura, pressão, pH, desenvolvimento bacteriológico, qualidade do gás, etc. Esses dados são adquiridos com sensores que fazem a leitura e os atuadores que atuam no sistema, controlando essas variáveis da melhor maneira otimizando o processo (Seadi, et al., 2008).

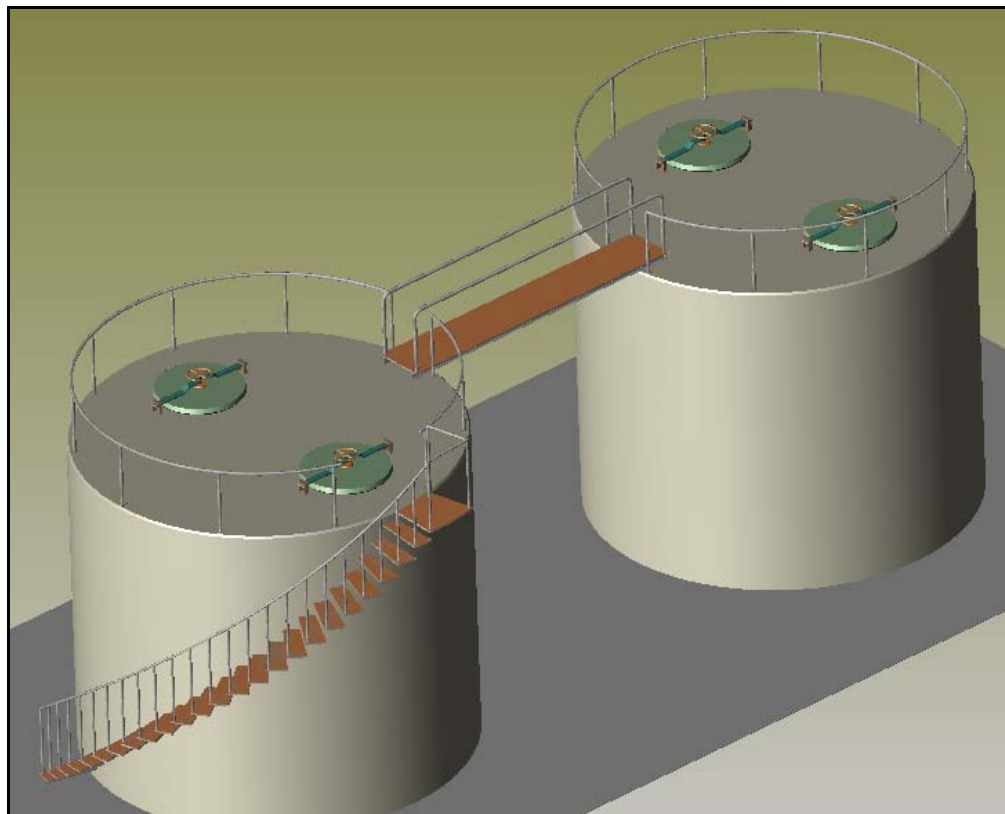


Figura 7 – Biodigestores de concreto.

As chapas metálicas são usadas na produção de tanques por apresentarem boa ductilidade e tenacidade, isto permite numerosas operações de conformação. Devemos destacar as resistências e oxidação do aço inox austenítico; tais como corrosão uniforme, (general corrosion) corrosão por pites (pitting corrosion), corrosão intragranular, corrosão “risco de faca” (“knife-line corrosion”), corrosão sob tensão (“stress corrosion”), corrosão em frestas (“crevice corrosion”) e erosão-cavitação, os quais podem ocorrer simultânea e frequentemente de maneira combinada. Aços especiais apresentam boas resistências a corrosão química, sendo utilizados em equipamentos da indústria química, indústria do papel e celulose, etc. As chapas de

Aço Inox AISI 316 são indicadas como a melhor liga para aplicação em sistemas de biodigestão, onde devido à fermentação anaeróbica há ocorrência de formação de ácidos e a evolução de colônias bacteriológicas (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2007). Um exemplo deste tipo de câmara biodigestora é representada na figura 8.



Figura 8 – Ilustração de biodigestor em chapas de aço inox.

A câmara compõe-se de chapas em aço inox e uma estrutura em aço conforme figura 10 que protege e assegura uma pressão maior para o biodigestor. A estrutura em aço está dimensionada para suportar uma maior pressão interna de maneira que possa receber então a camada interna em chapas de aço inox. Estas partes são montadas utilizando-se o processo de soldagem. Uma vez unidas a estrutura tem a disposição cilíndrica conforme pode ser vista na figura 9.



Figura 9 – Estrutura em aço comum para biodigestor de chapas.

Conforme Amon, et al., (2006), os biodigestores em 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. As principais desvantagens deste sistema é o alto custo do material. É recomendável para o tratamento de resíduos dos mais diversos tipos, quando se necessita um tratamento eficiente dos resíduos e se deseja maior volume possível de metano.

2.4 BIOMETANO

Como já foi visto o biogás produzido através da digestão anaeróbica compõe-se de uma mistura de gases. Em seu estado inicial além do gás metano possui dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_4), vapor d'água e

traços de metais pesados. Estes componentes reduzem o desempenho, prejudicam a queima causando corrosão e desgaste das partes internas de motores e sistemas de queima de biogás aumentando assim a manutenção das partes em contato com o biogás. Este tem uma composição entre 45% a 70% de gás metano, de maneira que em seu estado inicial possui apenas reduzido potencial energético comparado com seu estado final quando filtrado. Em sua forma inicial não é indicado ser utilizado diretamente em motores veiculares. A filtragem é uma preparação do biogás que pode dobrar sua capacidade energética, reduz o volume e transforma o biogás em biometano (Redondo, et al., 2008). O último é um bom combustível automotor com propriedades idênticas ao gás natural sendo que um veículo que utiliza o gás natural pode utilizar biometano sem que seja necessário efetuar modificações mecânicas (Demirbas, 2004).

A composição do biogás depende da biomassa, região e condições onde é produzido. O sistema de tratamento depende do nível dos materiais contaminantes e tecnologias que serão utilizadas. A função dos filtros é remover essas partículas que prejudicam o sistema da queima em motores e turbinas. Os filtros baseiam-se em princípios da condensação, absorção, adsorção, lavagem, etc, dependendo do tipo do filtro e das partículas filtradas (Park, et al., 2004).

O biometano é um biocombustível que pode substituir em parte os combustíveis fósseis, pois tem grande potencial de ser produzido e para tanto é necessário que se desenvolva tecnologias para utilização eficiente deste (Handbook on Biogas Utilization, 1990). No entanto sua utilização requer equipamentos e compressores especiais, sem os quais não é possível obter a conversão da energia térmica em mecânica. O ponto crítico de um sistema de compressão de biometano é a necessidade de outro combustível para ser utilizado no motor do compressor. Outra questão importante é a compressão, pois exige uma tecnologia apropriada. (Kapdi et al, 2004).

2.4.1 Filtragem de CO₂

A remoção do dióxido de carbono ou de qualquer outro gás por absorção é uma operação unitária, na qual um componente de uma mistura é dissolvido num

líquido. A operação pode envolver reações químicas ou ser essencialmente física. Dentre os métodos químicos estão: absorção em carbonato de potássio, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio, TGN (Tufo Giallo Sistema de remoção de CO₂ Napoletano), entre outros (Magalhães, et al., 2004).

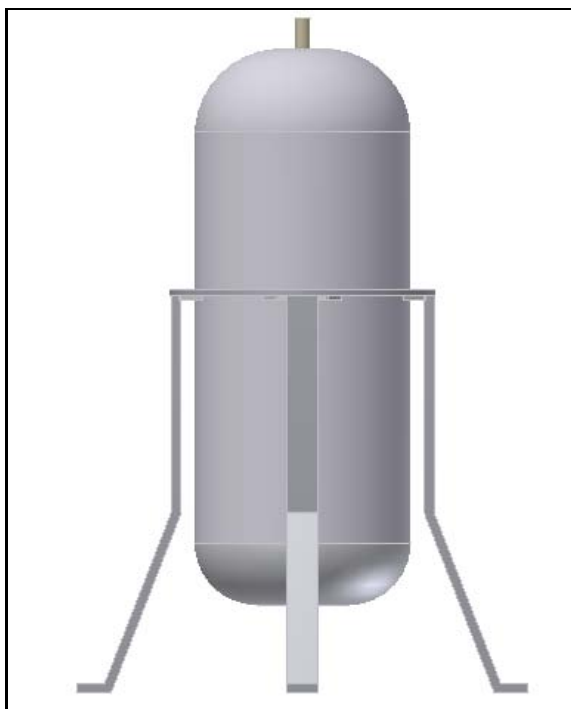


Figura 10 – Filtro de CO₂ (Adaptado de Horikawa, et al., 2004).

Dentre os métodos físicos destacam-se: os crivos moleculares, a separação por membranas e em colunas absorção, sendo que os métodos físicos são os mais conhecidos e utilizados, devido à fácil regeneração dos componentes utilizados para absorção, diferentemente dos métodos químicos (Horikawa, et al., 2004). Um exemplo de filtro TGN pode ser visto na figura 10. As colunas recheadas muito utilizadas nos processos de separação de gases por absorção são colocadas de forma a forçar a passagem do gás. É um dispositivo relativamente simples, essas colunas consistem em um casco cilíndrico, uma placa perfurada para suporte do recheio e distribuição do solvente. O funcionamento da coluna geralmente é contracorrente, ou seja, o soluto (gás) entra na parte inferior da coluna, enquanto o solvente entra na parte superior, estabelecendo um contato líquido/gás numa direção contracorrente. O recheio é o principal componente da coluna recheada, cuja função é promover uma maior superfície de contato entre o líquido e o gás,

aumentando a taxa de absorção do sistema. Existem diversos tipos de recheios, os quais apresentam um fator importante no custo de construção da coluna, sendo que as colunas com diâmetros acima de 60 cm são inviáveis quando recheadas. Os recheios são colocados nas colunas ao acaso ou ordenados, sendo constituídos de materiais como: cerâmicas, carbono, aço e polietileno (Horikawa, 2001).

No processo de purificação do Biogás, o interessante é retirar o CO_2 até que a porcentagem de metano fique próxima a do gás natural, para que possa ser utilizado nos mesmos usos finais. Conforme Portaria 128, de 28 de agosto de 2001 da ANP (Agência Nacional do Petróleo), a porcentagem mínima de metano no gás natural deve ser de 68% e CO_2 máximo de 18% para a região Norte, enquanto para as demais regiões a porcentagem mínima de metano deve ser de 86% e máxima de CO_2 de 5%. Essa diferença de concentração de metano para as regiões é devido ao fato de que o gás natural da região Norte não se destina à veículos, caso a destinação seja veicular, as porcentagens devem seguir as demais regiões.

Existem diversos solventes que podem ser utilizados. Em se tratando de solubilidade, o polietileno glicol vem sendo bastante utilizado, devido à alta solubilidade do CO_2 e do H_2S . Quando o fator a ser analisado é o custo do solvente em processos de remoção de CO_2 , a água consiste num dos melhores produtos. O CO_2 e o H_2S são solúveis em água e esta pode ser encontrada abundantemente, possuindo um custo bastante reduzido (Magalhães, et al., 2004).

2.4.2 Filtragem de H_2S

Sendo o biogás um ótimo combustível devido a grande quantidade de metano o torna passível de ser utilizado em muitos casos, por outro lado a queima do biogás sem a filtragem do ácido sulfídrico pode causar sérios danos ao meio ambiente. Na queima do biogás sem remoção do ácido sulfídrico ocorre a formação do SO_2 , dióxido de enxofre, causador da chuva ácida. A maioria dos biodigestores produz um biogás que contem entre 0,3 a 3% de ácido sulfídrico que pode ser eliminado por um filtro composto de óxido de ferro. Em processos de filtragem do ácido sulfídrico a grande vantagem é a transformação deste em apenas enxofre que pode ser reutilizado (O'Brien, 1991).

2.5 COMPRESSÃO DE GASES

2.5.1 Lei de Pascal

Conforme Giles, et al. (1996), o funcionamento da transmissão de energia através da compressão de fluidos está compreendido pelo enunciado do princípio de Pascal: “A pressão (P), exercida em um fluido confinado em forma estática atua em todos os sentidos e direções, com a mesma intensidade, exercendo forças iguais (F), em áreas iguais (A)”. Onde $P=F/A$

Aplicando-se esta fórmula para o caso de um cilindro pneumático pode-se verificar a transmissão de forças, conforme exemplo ilustrado na figura 11.

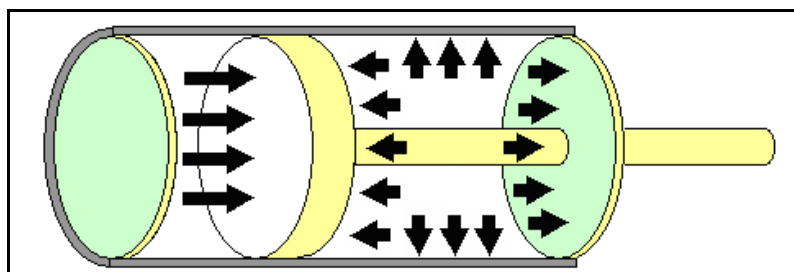


Figura 11 – Transmissão de forças segundo o princípio de Pascal.

Para o caso de duas câmaras igualarem-se as duas equações pelo princípio de Pascal, podendo-se estender para efetuar-se a transmissão da força e multiplicação da pressão (Bonacorso & Noll, 2007). Essa relação das duas câmaras pode ser vista na figura 12.

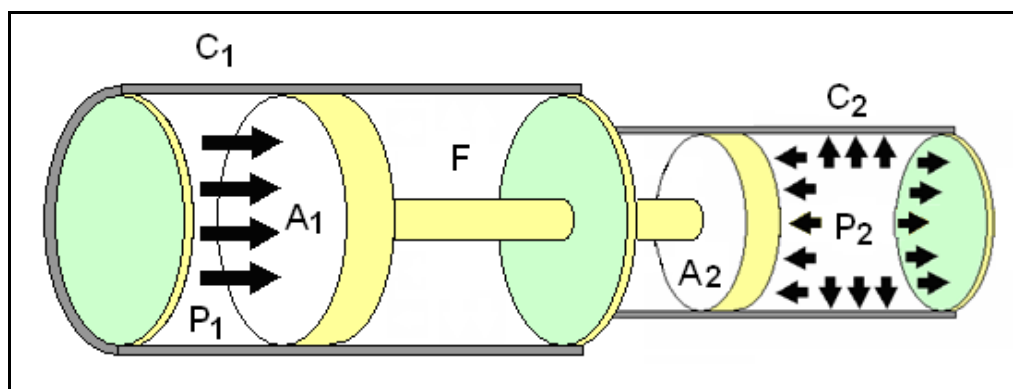


Figura 12 – Multiplicação da pressão segundo o princípio de Pascal.

Com base neste princípio verifica-se que o circuito manterá a força resultante da pressão na câmara C_1 , a transmissão da força (F) para uma área menor faz com que ocorra a multiplicação da pressão:

$$F = P_1 \times A_1 = P_2 \times A_2 \quad (1)$$

Com isso pode-se concluir que na redução da área do êmbolo da câmara C_1 para a câmara C_2 pela metade obtêm-se a duplicação da Pressão em C_2 .

2.5.2 Compressibilidade

O efeito de compressibilidade ocorre quando há uma redução do volume ocupado por um fluido, e corresponde a variação da massa específica (ρ) com a pressão e temperatura. A massa específica é dada pela relação entre a massa do fluido (m) e o volume (V) que ele ocupa como pode ser visto na equação 3;

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Através do deslocamento do embolo do cilindro com uma velocidade v obtêm-se uma redução do volume em um determinado intervalo de tempo Δt que corresponde a uma vazão qv_2 conforme visto na equação 4;

$$qv_2 = A_2 V_2 = \frac{dV_2}{dt} \quad (3)$$

2.5.3 Equação de Clapeyron

A Equação de Émile Clapeyron determina que a relação constante entre pressão (P), volume (V) e temperatura (T) é proporcional ao número de moléculas do gás (Sampaio & Calçada, 2001). A equação de Clapeyron ficou sendo:

$$\frac{P \cdot V}{T} = R \cdot n \quad (4)$$

Onde (n) é o número de mols de moléculas e (R) é uma constante, mesmo valor para todos os gases, conhecido como constante universal dos gases ideais.

2.6 ELETROPNEUMÁTICA APLICADA AO BOOSTER

2.6.1 Válvulas pneumáticas direcionais

Para efetuar-se uma manobra com os atuadores pneumáticos ou para desenvolverem suas ações produtivas, precisa-se alimentá-los ou descarregá-los convenientemente, no instante em que desejarmos, ou de conformidade com o sistema programado. Portanto, de acordo com seu tipo, as válvulas servem para orientar os fluxos de ar, impor bloqueios, controlar suas intensidades de vazão ou pressão. As válvulas de controle direcional têm por função orientar a direção que o fluxo de ar deve seguir, a fim de realizar um trabalho proposto. Na figura 13 pode-se visualizar a simbologia de uma válvula 3/2 vias (Harry, 1998).

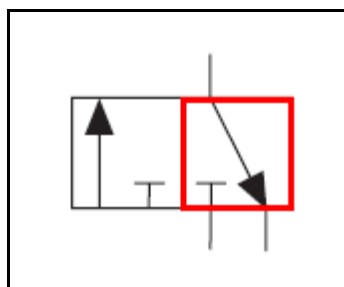


Figura 13 – Posição de repouso de uma válvula pneumática 3/2 vias.

Ainda conforme Harry (1998), o número de posições indica a quantidade de manobras distintas que uma válvula direcional pode executar ou permanecer sob a ação de seu acionamento. Nestas condições, a torneira, que é uma válvula, tem duas posições: ora permite passagem de água, ora não permite.

As válvulas direcionais são sempre representadas por um retângulo. Este é dividido em quadrados conforme se pode verificar na figura 14.

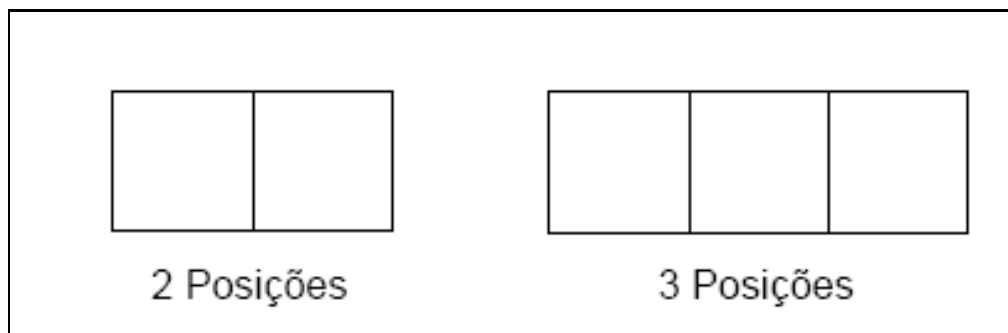


Figura 14 – Número de posições de uma válvula.

O número de quadrados representados na simbologia é igual ao número de posições da válvula, representando a quantidade de movimentos que executa através de acionamentos. O número de vias é o número de conexões de trabalho que a válvula possui. São consideradas como vias a conexão de entrada de pressão, conexões de utilização e as de escape. Nos quadros representativos das posições, encontram-se símbolos distintos: As setas indicam a interligação interna das conexões, mas não necessariamente o sentido de fluxo (Fialho, 2002). Podemos ver na figura 15 um exemplo de aplicação de representação.

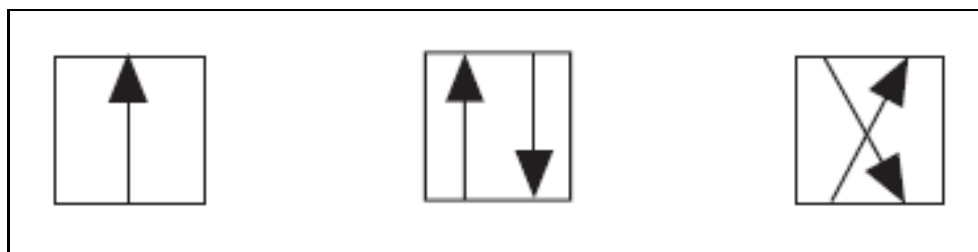


Figura 15 – Setas de indicação da interligação interna das conexões.

A identificação dos orifícios é identificada literalmente. Isso se deve principalmente às normas DIN (Deutsche Interne Normen). Segundo a norma DIN 24.300, Blatt 3, Seite 2, Nr. 0.4. de março de 1966, a identificação dos orifícios é a seguinte: Linha de trabalho (utilização): **A, B, C** Conexão de pressão (alimentação): **P** Escape ao exterior do ar comprimido utilizado pelos equipamentos pneumáticos (escape, exaustão): **R,S,T** Drenagem de líquido: **L** Linha para transmissão da energia de comando (linhas de pilotagem): **X,Y, Z** Resumidamente, têm-se na tabela a identificação dos orifícios de uma válvula direcional.

Tabela 3 – Identificação dos orifícios de uma válvula.

Orifício Norma DIN 24300				Norma ISO 1219		
PRESSÃO	P			1		
UTILIZAÇÃO	A	B	C	2	4	6
ESCAPE	R	S	T	3	5	10
PILOTAGEM	X	Y	Z	10	12	14

As válvulas exigem um agente externo ou interno que desloque suas partes internas de uma posição para outra, ou seja, que altere as direções do fluxo efetue os bloqueios e liberação de escapes. Os elementos responsáveis por tais alterações são os acionamentos, que podem ser classificados em Comando Direto e Comando Indireto (Fialho, 2002).

O Comando Direto é definido quando a força de acionamento atua diretamente sobre qualquer mecanismo que cause a inversão da válvula. O comando indireto é definido quando a força de acionamento atua sobre qualquer dispositivo intermediário, o qual libera o comando principal que, por sua vez, é responsável pela inversão da válvula. Estes acionamentos são, também, chamados de combinados, servo, etc, (Bonacorso & Noll, 2007).

Os tipos de acionamentos são diversificados e podem ser musculares, mecânicos, pneumáticos, elétricos e combinados. Estes elementos são representados por símbolos normalizados e são escolhidos conforme a necessidade da aplicação da válvula direcional. A operação das válvulas efetuada por meio de sinais elétricos é determinada por meio de chaves fim de curso, pressostatos, temporizadores, etc. São de grande utilização onde a rapidez dos sinais de comando é o fator importante, quando os circuitos são complicados e as distâncias são longas entre o local emissor e o receptor. As solenóides responsáveis pela energização das válvulas são representadas pela letra Y (Fialho, 2006). Uma aplicação da solenóide em uma válvula pneumática pode ser vista na figura 16.

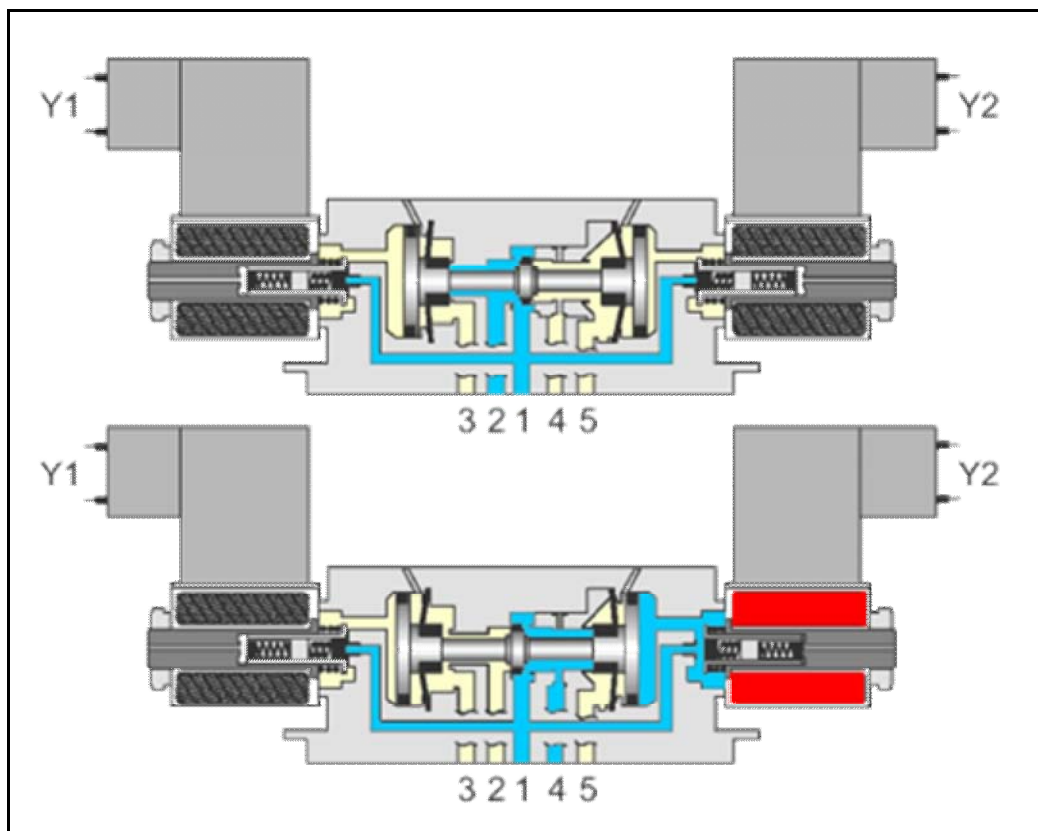


Figura 16 – Válvula pneumática acionada por solenóide.

Embora as válvulas de grande porte possam ser acionadas diretamente por solenóide, a tendência é fazer válvulas de pequeno porte, acionadas por solenóide e que servem de pré-comando (válvulas piloto), pois emitem ar comprimido para acionamento de válvulas maiores (válvulas principais). As válvulas possuem um enrolamento que circunda uma capa de material magnético, contendo em seu interior um induzido, confeccionado de um material especial, para evitar magnetismo remanescente. Este conjunto (capa + induzido) é roscado a uma haste (corpo), constituindo a válvula. O induzido possui vedações de material sintético em ambas as extremidades, no caso da válvula de 3 vias, e em uma extremidade, quando de 2 vias. É mantido contra uma sede pela ação de uma mola. Sendo a válvula fechada a pressão de alimentação fica retida pelo induzido no orifício de entrada e tende a deslocá-lo. Por este motivo, há uma relação entre o tamanho do orifício interno de passagem e a pressão de alimentação (Bonacorso & Noll, 2007).

2.6.2 Atuadores pneumáticos lineares

São constituídos de componentes que convertem a energia pneumática em movimento linear ou angular. São representados pelos cilindros pneumáticos e hidráulicos. Dependendo da natureza dos movimentos, velocidade, força e curso, haverá um atuador mais adequado para a função. Os cilindros se diferenciam entre si por detalhes construtivos, em função de suas características de funcionamento e utilização. Basicamente, existem dois tipos de cilindros, os de simples efeito ou simples ação e os de duplo efeito ou dupla ação, com e sem amortecimento.

O cilindro de duplo efeito ou dupla ação é quando um cilindro pneumático utiliza ar comprimido para produzir trabalho em ambos os sentidos de movimento (avanço e retorno), sendo o tipo mais comum de utilização. Sua característica principal, pela definição, é o fato de se poder utilizar tanto o avanço quanto o retorno para desenvolvimento de trabalho. Existe, porém, uma diferença quanto ao esforço desenvolvido: as áreas efetivas de atuação da pressão são diferentes; a área da câmara traseira é maior que a da câmara dianteira, pois nesta há que se levar em conta o diâmetro da haste que impede a ação do ar sobre toda a área. O ar comprimido é admitido e liberado alternadamente por dois orifícios existentes nos cabeçotes, um no traseiro e outro no dianteiro que, agindo sobre o êmbolo, provoca os movimentos de avanço e retorno. Quando uma câmara está admitindo ar a outra está em comunicação com a atmosfera. Esta operação é mantida até o momento de inversão da válvula de comando; alternando a admissão do ar nas câmaras, o pistão se desloca em sentido contrário. Pode-se observar o cilindro de dupla ação e o seu princípio de funcionamento na figura 17 e 18 respectivamente (Fialho, 2006).

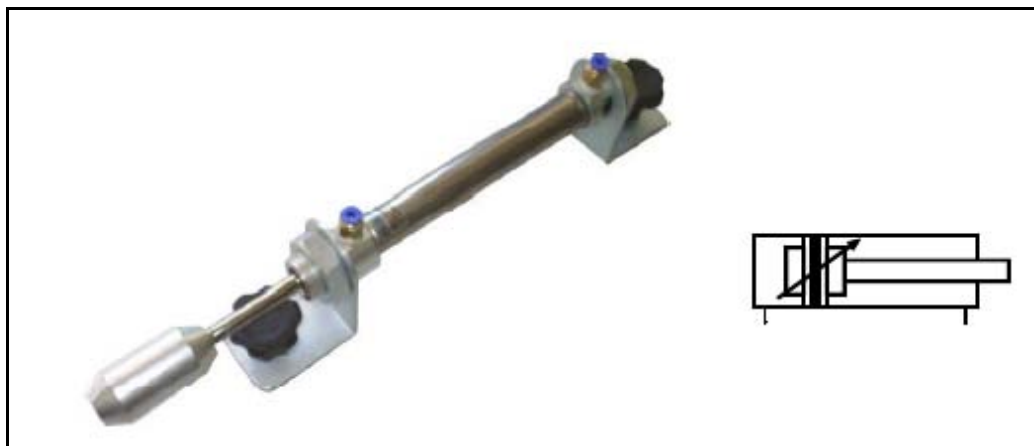


Figura 17 – Cilindro de dupla ação pneumático (Festo Didatic).

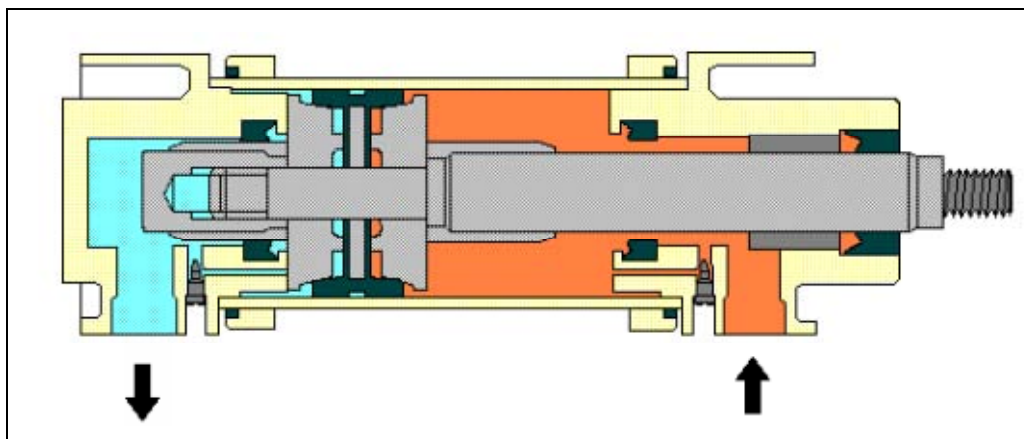


Figura 18 – Princípio de funcionamento do cilindro de dupla ação (Festo Didatic).

2.7 BOOSTER

Booster é uma bomba compressora que tem a função de amplificar a pressão de um determinado gás. São acionados pneumáticamente, através da relação de Pascal área do êmbolo e força exercida pelo pistão transformam a pressão pneumática em pressão hidráulica. Alguns fabricantes dessas bombas constroem variados tamanhos de acordo com pressão e vazão, modelos com pressões para faixas entre 50 e 1.000bar, bombas maiores, podendo atender pressões até 2000bar ou mais em casos especiais. Acionadas por ar comprimido, nitrogênio ou manualmente. Existem vários tipos de Booster, de simples ou dupla ação, de simples ou duplo estágio (GAS BOOSTER CATALOG, 2006). Na figura 19 alguns

exemplos de tipos básicos de Booster fabricados pela empresa Haskel Energy Systems, Ltd-UK.

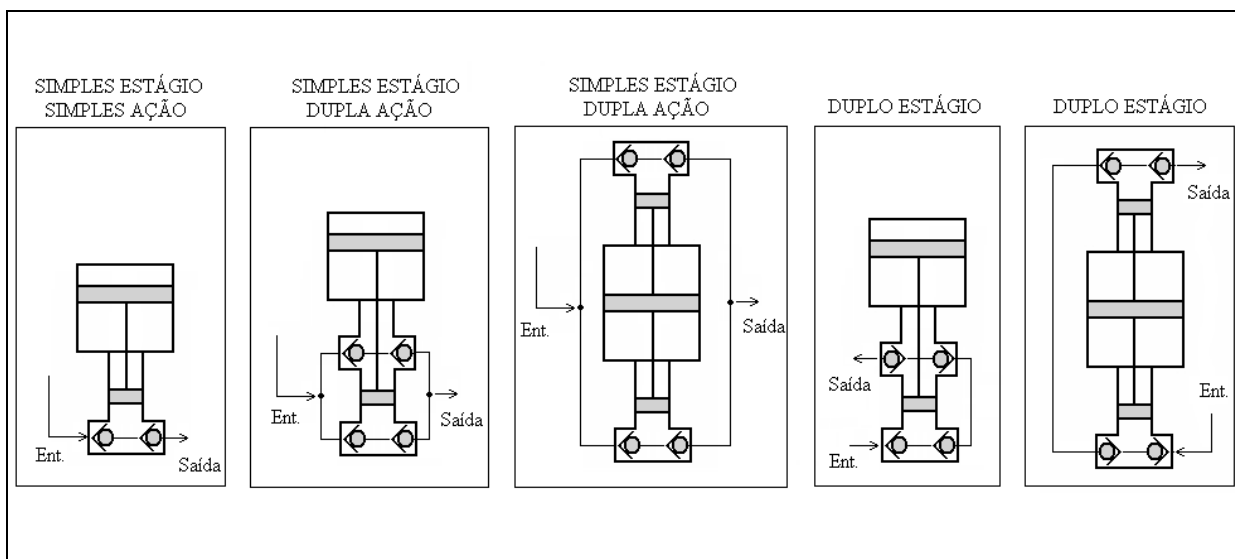


Figura 19 – Tipos básicos de compressores tipo booster (Gas Booster Catalog).

Esses equipamentos não necessitam de combustão, operam sem qualquer aquecimento, chama ou risco de faísca, não requerem lubrificação contínua, mantêm a pressão sem qualquer consumo extra de energia, tem fácil controle de subida de pressão, fácil aplicação com controles automáticos. Os Booster para gases consistem numa larga área de ar motor, acoplado diretamente por uma haste, conectando a área do gás, que é menor.

A seção de ar motor incluiu um carretel de ciclagem e uma válvula piloto que garantem uma ação recíproca enquanto houver suprimento de ar comprimido. Pode-se ver isso no esquema da figura 20. Selos dinâmicos fazem a vedação entre a seção de ar motor e a câmara de compressão de gás. O resfriamento é feito através da canalização da exaustão do ar motor, que é gelado, com uma jaqueta em volta da camisa do gás (Souza, et al., 2010).

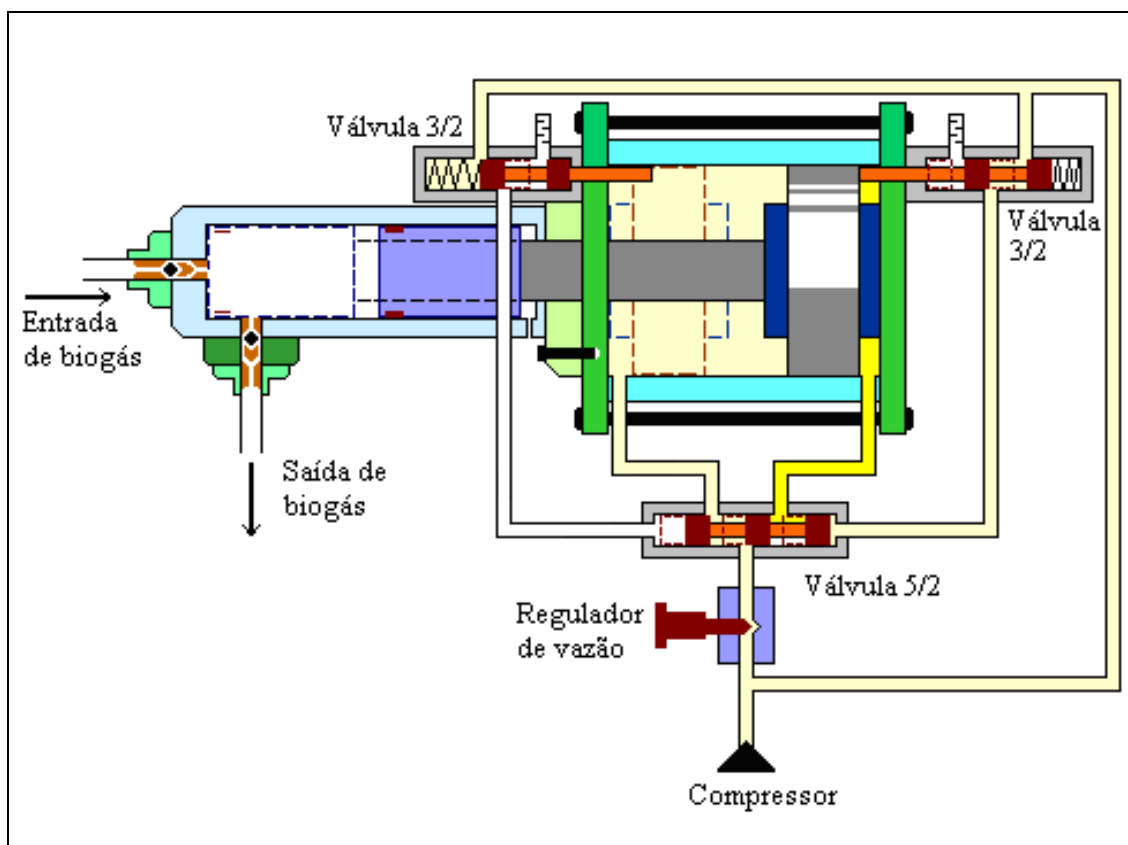


Figura 20 – Esquema de um booster de simples estágio (Souza, et al., 2010).

O pistão opera em uma camisa de alta pressão. Cada lado da camisa necessita de uma válvula de retenção que permite a passagem em um só sentido. Observam-se as duas válvulas de retenção na entrada e outra na saída do biogás. A temperatura ambiente do ar normalmente é o que se necessita para determinar as vedações do ar motor ou de outros componentes estáticos. Conforme manual da empresa Haskel Energy Systems, as seções de ar motor operaram confiavelmente numa temperatura de -4 °C a +65 °C e baixas temperaturas normalmente têm pequeno efeito na operação das peças e vedações padrões. O calor da compressão do gás atinge temperaturas aceitáveis. Média máxima aceita é 115° C. Acionados a ar comprimido o Booster não requerem eletricidade direta e nem lubrificação contínua o que evita a poluição do biogás e também há a separação entre ar e seção de gás (Souza, et al., 2010).

Controle de pressão e armazenagem são requisitos para utilização eficiente do biometano. A armazenagem, também, depende da compressão, uma vez que o volume do biogás assim como outros gases à pressão atmosférica torna dispendiosa

e dificulta o seu transporte, ou seja, praticamente não há armazenagem sem compressão. O biogás é obtido em plantas biodigestoras com uma pressão variável dependendo da condição e do tipo de planta, a produção em si do biogás, portanto não garante uma pressão estável (Dan Hu, et al.,1998).

2.8 ARMAZENAMENTO: CILINDROS PARA BIOMETANO

Com o crescimento da produção de biogás as tecnologias para a geração deste tendem a melhorar, provocando a necessidade de construção de cilindros especiais para o acondicionamento do mesmo. Não é recomendável que se utilize cilindros fabricados para GNV (Gás Natural Veicular) para o biometano. Este último tem poder corrosivo que dependerá da composição do gás e que pode ser composto por uma grande quantidade de agentes corrosivos dependendo da região ou da utilização do gás. Portanto, é necessária a construção de cilindros especiais, respeitando as normas de composição, fabricação, aspecto e identificação dos mesmos. É reprovável a utilização de recipientes de outros gases para o biometano ou biogás. Além disso, medidas deverão ser tomadas visando a regulamentação através de uma norma específica para utilização, manuseio e transporte do biometano. A tecnologia a ser empregada na produção de tais cilindros não difere muito da utilizada na fabricação dos cilindros para GNV e outros gases. Empresas que fabricam estes modelos podem sem grandes investimentos adicionais remodelar suas linhas para fabricação destes. A demanda por este tipo de recipiente tende a acompanhar o crescimento da construção de plantas biodigestoras nas áreas rurais e urbanas (Souza & Schaeffer, 2010).

Os cilindros de armazenamento de gases devem ser resistentes para suportar a pressão exigida, porém o mais leve possível, para não comprometer em demasia a capacidade de carga do veículo na combustão ou no transporte do mesmo. Por isso um cilindro de alta pressão para biometano pode ser fabricado a partir de um tubo de aço-liga cromo-molibdênio, sem costura e de espessura de parede entre 8 e 10 mm como pode ser atestado na NBR 12791:2006. Conforme a norma citada o tubo deverá passar por um processo de repuxamento e conformação das extremidades (base de um lado e gargalo do outro). Uma ilustração de forjamento pode ser visto na figura 21.

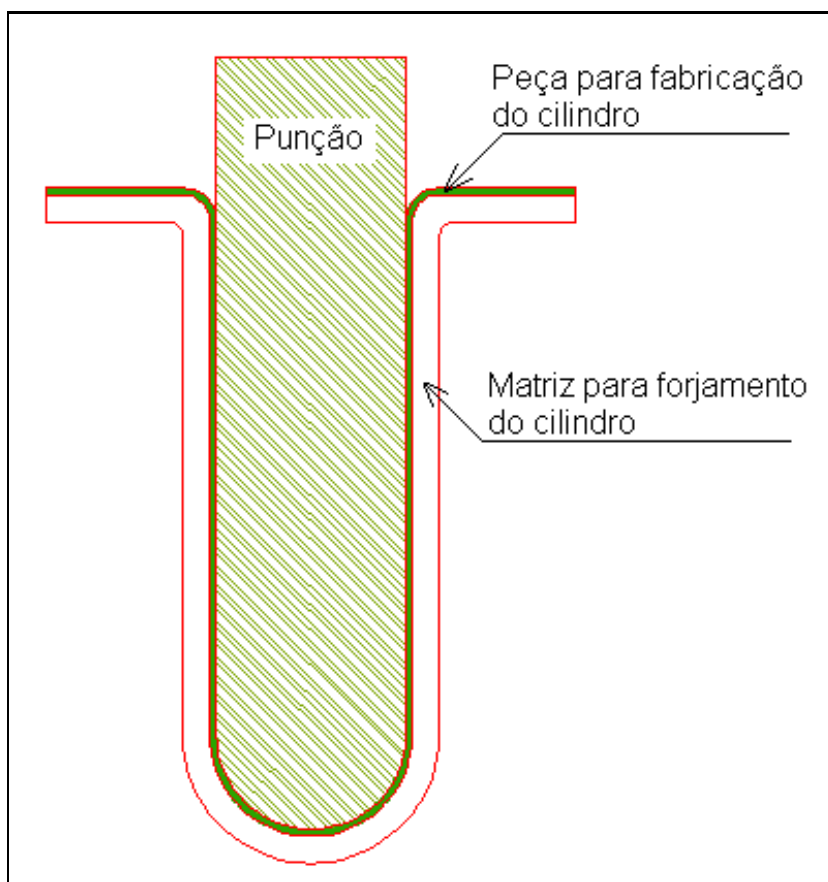


Figura 21 – Conjunto de forjamento de cilindro para biometano (Souza & Schaeffer, 2010).

Depois da conformação e do tratamento térmico (têmpera e revenido), todos os cilindros deverão ser ensaiados de modo a detectar algum tipo de defeito construtivo como trincas e falhas que possam comprometer sua integridade estrutural conforme NBR 12274:2003.

Os cilindros podem, também, ser fabricados em alumínio e reforçados com fibra de carbono. Estes são significativamente mais leves que os de aço-liga, porém, seu preço será mais elevado devido ao custo destes materiais. As características físicas do cilindro de alta pressão exigem que este equipamento seja fabricado seguindo um conjunto de etapas que permitem a obtenção de um equipamento seguro e confiável. Estas etapas compreendem as especificações do projeto, análise, ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos e por fim a aprovação (Souza & Schaeffer, 2010).

2.9 COMBUSTÍVEL METANO VEICULAR (GMV)

Para que possa ser utilizado como combustível para veículos os gases devem ser comprimidos para que atinja pressões de abastecimento da ordem de 200 a 220bar (ISO 11439:2000). Este aumento de pressão é possível com o uso de compressores que elevem a pressão do gás. Em função da grande diferença entre a pressão de admissão (na entrada do compressor) e a pressão de saída, normalmente, é necessário o uso de múltiplos estágios (usualmente entre 3 a 5 estágios). O biometano é admitido, filtrado e medido através de dispositivos instalados logo na entrada do sistema de compressão. Estes dispositivos devem ser dimensionados em função da produção de biogás. Existem diversas concepções para construção de um compressor de biometano. Há alguns anos era comum utilizar compressores óleo-dinâmicos, que comprimiam o gás por meio de um fluido (óleo hidráulico) incompressível que ocupava a câmara de compressão reduzindo o espaço disponível para o gás e causando a compressão. Esta tecnologia, embora eficaz para que se atingissem as elevadas pressões necessárias ao uso de gás veicular, mostraram-se pouco eficientes, apresentando altos índices de contaminação do gás pelo óleo de compressão (Najibi, et al., 2007).

Normalmente os compressores alternativos a pistão utilizam óleo como lubrificante o que pode contaminar o gás. Algumas tecnologias admitem o uso de anéis de segmento de material com baixo coeficiente de atrito (p.ex.: teflon) e buchas especiais. Uma composição de conceitos também é possível, com o uso de lubrificante e componentes especiais. Na maioria dos casos os compressores são propelidos por motores elétricos e tracionados por transmissões de polias e correias (Linares, 2002).

2.10 MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA PARA BIOGÁS

O funcionamento dos motores a gás obedece ao princípio dos motores diesel e a gasolina (Zareh, 1998). Verifica-se atualmente a aplicação dos motores diesel ou a gasolina em equipamentos e veículos que são convertidos para funcionar com gás, o maior exemplo são os veículos automotores transformados de gasolina para GNV (Muraro, 2006).

A transformação para gás constitui-se basicamente em modificações nos sistemas de alimentação e de ignição, bem como taxa de compressão. Os motores a gás, de ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor que se utiliza dos combustíveis fósseis, porque quando ocorre a adição de gás reduz-se o volume de ar aspirado. Contudo, essa menor eficiência volumétrica é, geralmente, compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas, entre 12-13:1 (Souza, et al., 2007). Isto é possível porque o poder antidetonante do gás está ligado ao número de metano, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior será a resistência à detonação.

Ensaio realizado com motor Honda 270cm³, alimentado com biogás bruto e mantidos o ponto de ignição e a taxa de compressão da gasolina, as curvas de torque e potência tiveram um decréscimo de 50% em relação ao combustível original (Muños et al., 2000). Pesquisas mostram que a melhor taxa de compressão é de 13:1, por atender a todas as misturas que compõe o biogás. Motores construídos para essa mistura de gases que compõe o biogás são encontrados no mercado em alguns modelos e características. O modelo B4T-10HBio é um motor com 3600rpm, 10CV, 4 tempos, 389cm³, refrigerado a ar e que pode ser instalado para utilização diretamente com biogás com pressão variável. Essa tecnologia possui filtragem integrada com o motor que permite a instalação direta no reator de geração de biogás (Huang & Crookes, 1998).

O desenvolvimento de tecnologia de compressão de biometano para unidades descentralizadas de produção de biogás destina-se à compressão do primeiro para a utilização em motores e turbinas, armazenamento em cilindros, entre outras aplicações. Isso implica no desenvolvimento de um equipamento inovador, cujo suas partes e componentes sejam de um material que tenha resistência química e mecânica e que ofereça uma capacidade de compressão para baixas e médias pressões para usinas de produção de biogás. A tecnologia de compressão deverá ser flexível, portátil e de fácil instalação e manutenção para universalização e acesso de pequenos e médios proprietários de usinas e mini usinas de biogás (como suinocultores, agroindústrias e aterros municipais). Para tanto deverá também ser

movido através do próprio biocombustível produzido na usina, atendendo o viés da sustentabilidade energética.

Atualmente necessita-se de alternativas em tecnologias de compressão. Uma das alternativas possíveis é a bomba tipo Booster, dotado de uma camisa de compressão que é fabricada para gases em geral. É produzida por complicado processo de fabricação e com ligas especiais. Composto basicamente por um cilindro hidropneumático acionado por bomba ou compressor deve ser instalado em local afastado o suficiente para não provocar riscos, separado do ambiente de produção do biogás. Este deve ser flexível e pode ser movimentado com motor utilizando o próprio gás, combustível em abundância no local onde é produzido. Esse equipamento fácil de instalar e de baixa manutenção é bastante robusto. Ideal para esse tipo de aplicação, pois é fácil de ser transportado, instalado e operado. Os materiais precisam ser os mais resistentes possíveis ao desgaste, atrito e pressão. Com esse intuito efetuou-se a análise da parte mais crítica e delicada do sistema de compressão e que tem contato com o biogás conhecida por camisa de compressão. O funcionamento desse dispositivo se dá basicamente através de dois passos; o gás é admitido no recuo de cilindro, PASSO 1, e comprimido no avanço, PASSO 2, quando é forçado para dentro de um reservatório, como pode ser visto na figura 22. Esse movimento oscilante é efetuado com uma velocidade que dependerá da vazão e da força necessária para deslocar o cilindro e a compressão desejada.

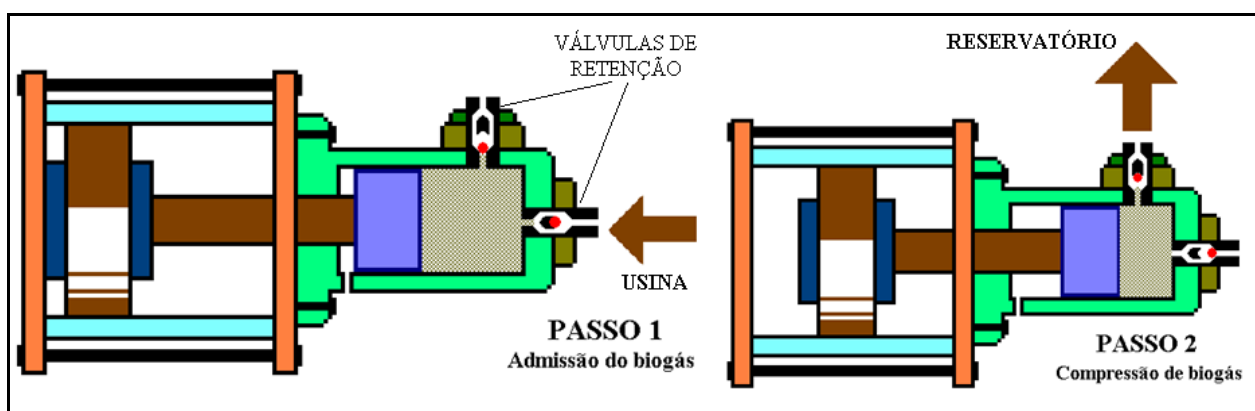


Figura 22 – Compressor para biogás (Souza, et al., 2010).

A admissão e compressão do gás na camisa são controladas através das válvulas de retenção colocadas na entrada e saída da camisa, elas são

responsáveis por impedir que o biogás escape na compressão ou retorne do reservatório.

A camisa de compressão deve ser dimensionada para suportar grandes pressões, desgaste e corrosão, para tanto foi modelada em polímero. Geralmente esta é fabricada através de um processo conhecido por forjamento e tem alto custo para ser desenvolvido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A queima eficiente de metano proveniente do biogás é dificultada sem a compressão do mesmo, pois o gás possui uma densidade de $1473,3\text{cm}^3/\text{g}$ à pressão atmosférica conforme pode ser visto na tabela 1. A escolha da tecnologia de compressão deverá considerar a demanda, produção e tipo de gás produzido. Os custos envolvidos também compõem importante papel, pois a aquisição ou construção de equipamentos para a compressão precisa ser economicamente viável uma vez que este biocombustível compete com outros combustíveis. Este trabalho está fundamentado na grande necessidade que um País tropical como o nosso, com todo potencial produtor de biomassa tem de melhorar suas tecnologias para utilizar da melhor forma este potencial energético. Soma-se a isso o problema ambiental da grande quantidade de resíduos sem tratamento ou destino apropriado. Estima-se que um habitante produz em média 0,5kg de resíduos orgânicos por dia no Brasil e estes em sua maioria não recebem tratamento adequado (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2000).

3.1 ACIONAMENTO ELETROPNEUMÁTICO DO COMPRESSOR

Inicialmente desenvolveu-se o projeto de acionamento do cilindro de compressão que se dá através de um circuito eletropneumático. Utilizou-se para isso válvulas pneumáticas e dispositivos de acionamentos elétricos já vistos. Entende-se que estes são eficazes para compor o circuito de comando que é responsável pelo movimento do cilindro pneumático.

O projeto foi desenvolvido em software FluidSim Versão Demo fornecido pela empresa Festo. Este é utilizado para o projeto de acionamentos eletropneumáticos. O circuito completo pode ser visto no Anexo I, com o respectivo diagrama passo, descrição dos dispositivos e especificações. Na figura 23 pode ser visto a energização do circuito. As linhas destacadas representam a condução da corrente elétrica.

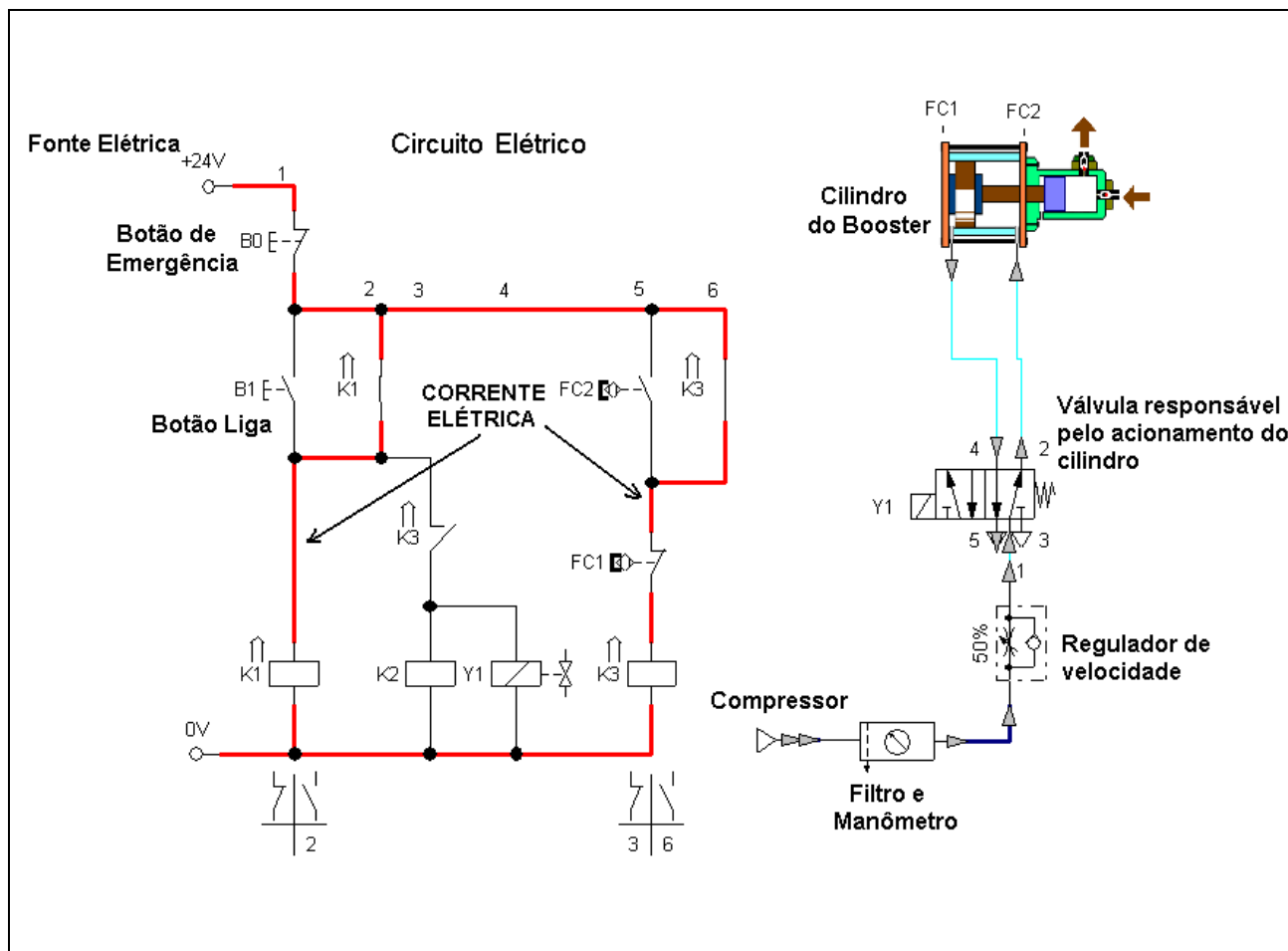


Figura 23 – Circuito eletropneumático do compressor (Software FluidSim da Festo – Versão Demo).

O funcionamento do dispositivo se dá quando o cilindro avança na energização da válvula solenóide Y_1 , por meio do relé K_1 até o seu final. A chave FC_2 é responsável pela detecção do avanço do cilindro acionando o seu retorno através da válvula solenóide Y_2 , acionada pelo relé K_2 , até o seu início completando a manobra. A chave FC_1 reinicia o ciclo e com isso o movimento de avanço e retorno sucessivo até o desligamento do circuito acarreta a compressão do biogás presente na camisa do compressor.

O circuito ainda possui a regulação da velocidade da manobra do cilindro o que acarreta em maior ou menor volume de gás comprimido. O sentido do movimento oscilatório e a sequência do ar na compressão do gás são dados através das setas conforme pode ser visto na figura 24.

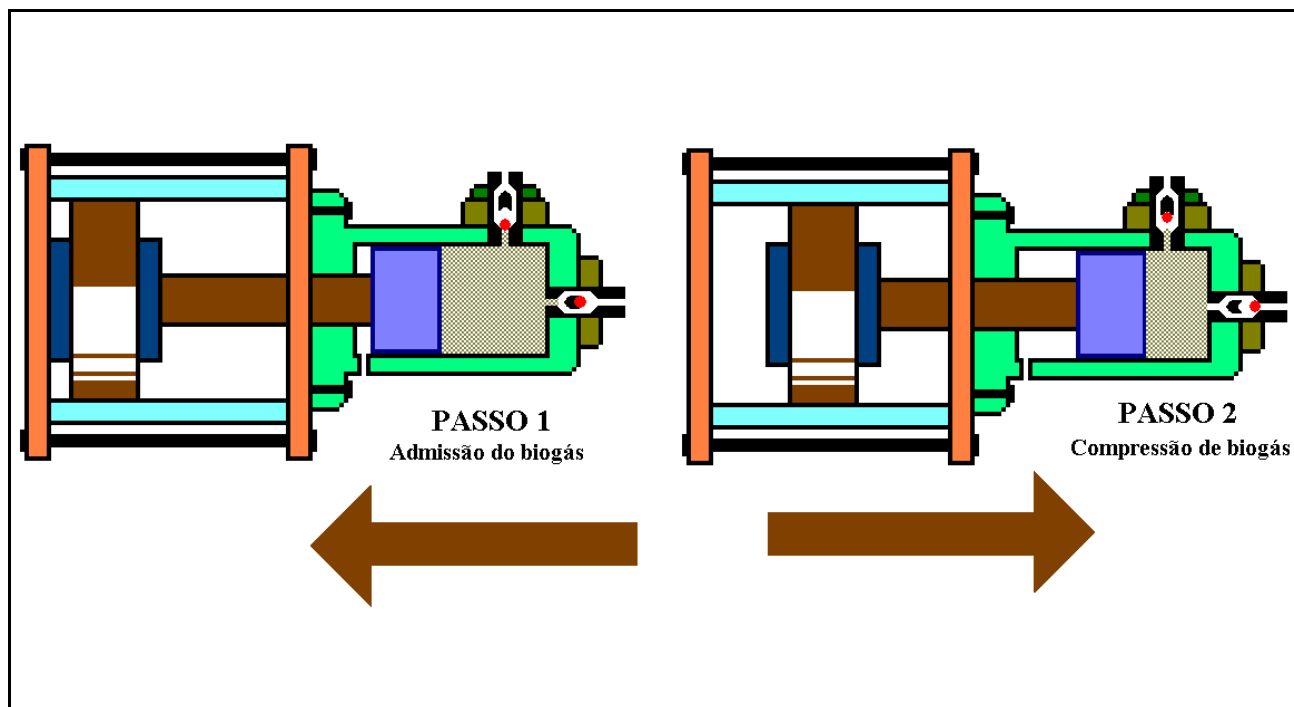


Figura 24 – Esquema do movimento do compressor ilustrado para visualização.

O circuito pneumático utiliza um compressor juntamente com uma unidade de filtro de ar, manômetro e conexões, uma válvula 5/2 vias acionada por solenóide e retorno por mola e uma válvula redutora de fluxo unidirecional conforme projeto Anexo I.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE COMPRESSÃO

O sistema de compressão deve ser dotado de uma camisa ou jaqueta principal. Dentro da camisa o cabeçote é recuado na admissão e, este, avança quando o biogás é comprimido através da redução forçada do volume. Juntamente com a camisa principal são necessárias válvulas especiais que fazem a retenção do biogás apenas liberando-o em um sentido. Na figura 25 pode ser visto o sistema projetado em software Inventor 2010 versão Student.

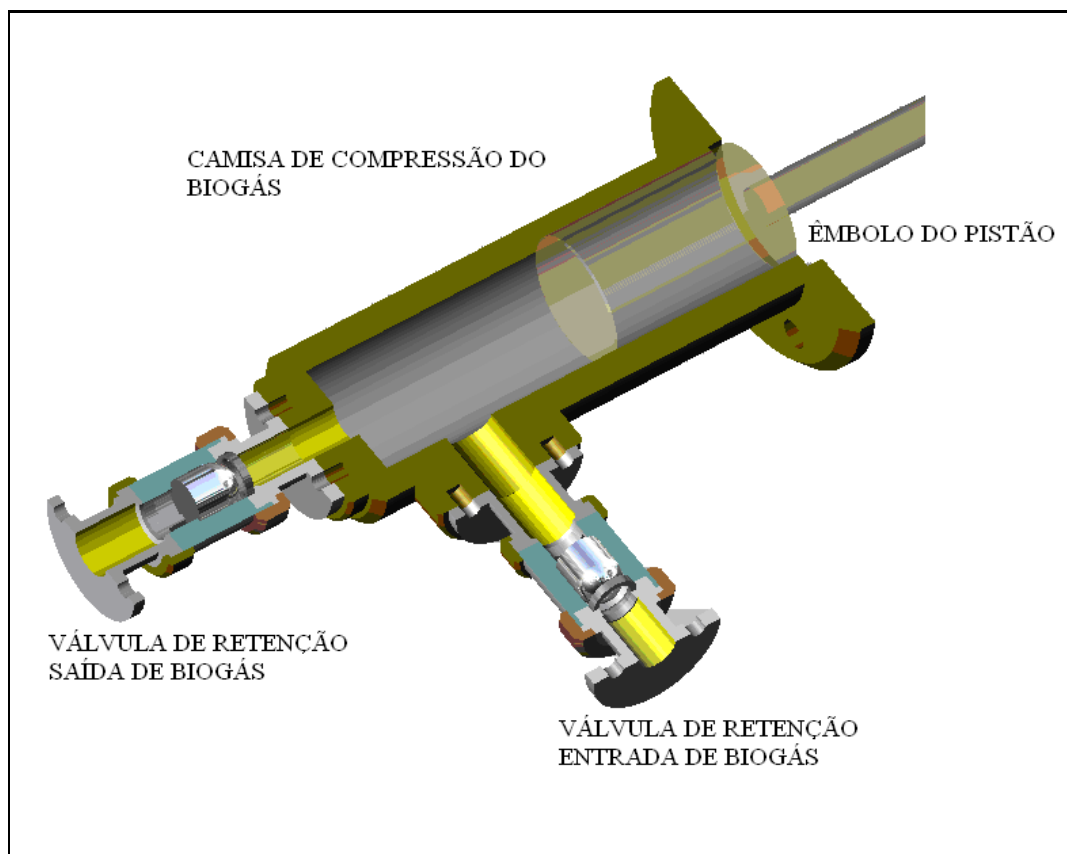


Figura 25 – Camisa de compressão com válvulas de retenção modelado em software Inventor 2010 versão Student.

No espaço interno ocorre a compressão do gás através da redução do volume pelo cabeçote do êmbolo empurrando o gás para o reservatório. A camisa necessita, portanto, de ser robusta suficiente para que possa suportar a pressão imposta pelo êmbolo do pistão e o atrito gerado através do movimento oscilante da compressão.

O acoplamento das válvulas de retenção se dá através de parafusos de fixação. Estas são responsáveis pelo bloqueio reverso do fluxo e tem por princípio bloquear a passagem do fluido em um sentido, permitindo o fluxo em outro, com a menor perda de carga possível. É utilizada aos pares em um ou dois jogos tornando-o de simples ou dupla ação, onde alterna o bloqueio e a abertura de fluxo em dois sentidos. Verificam-se os pares de válvulas de retenção para bloquear e transmitir a passagem do biogás na entrada e na saída conforme pode ser constatado nas figuras 26 e 27 que foram modeladas para o entendimento do seu funcionamento.

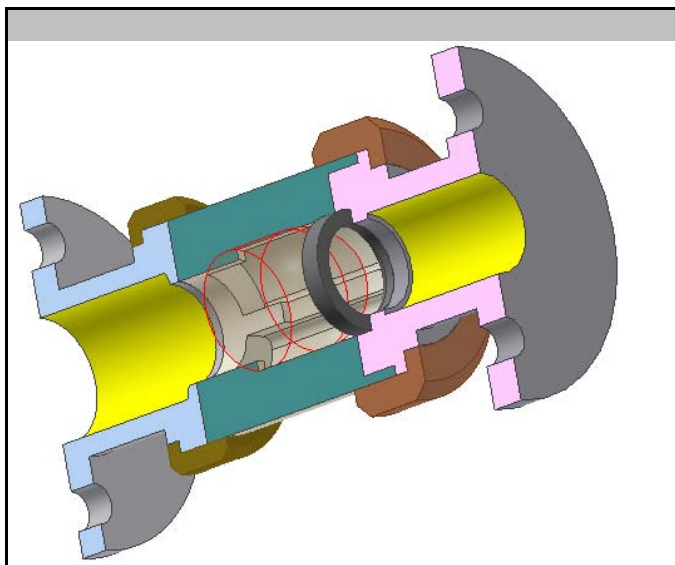


Figura 26 – Válvula de retenção, detalhe do retentor modelado em software Inventor 2010 versão Student.

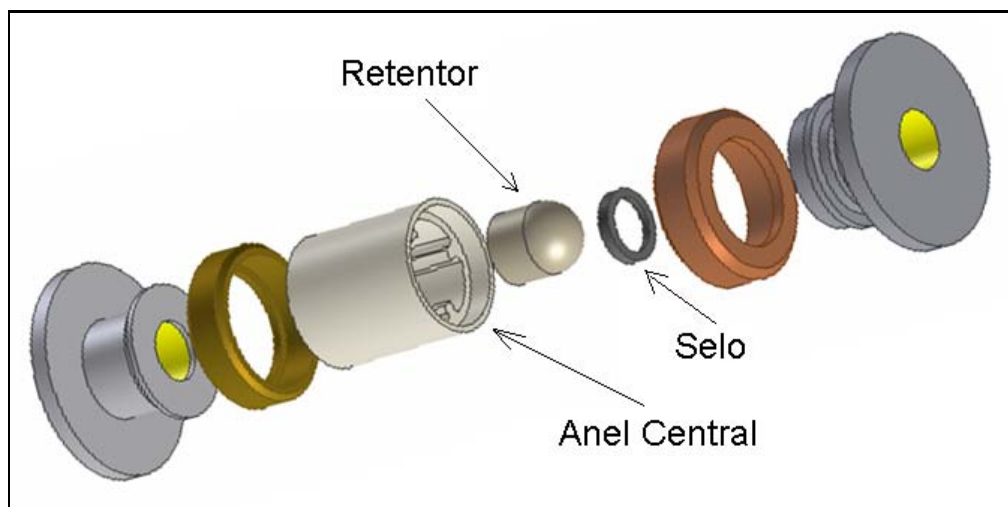


Figura 27 – Válvula de retenção, em vista explodida modelada em software Inventor 2010 versão Student.

Esta válvula pode ser equipada com uma mola. Neste caso ela traciona o selo no sentido oposto ao fluxo, retendo o retorno de fluido quando a linha é despressurizada.

A pressão do fluxo de entrada desloca o retentor, detalhe da figura 28, da válvula contra o anel central em sentido de abertura, dando passagem ao fluido. Interrompendo-se o fluxo de entrada, a contrapressão à jusante desloca o retentor em sentido ao selo, fechando a válvula. O curso reduzido do retentor encurta o

tempo de fechamento abrandando substancialmente o golpe de fechamento e minimizando o refluxo antes da obstrução completa do selo pelo retentor.

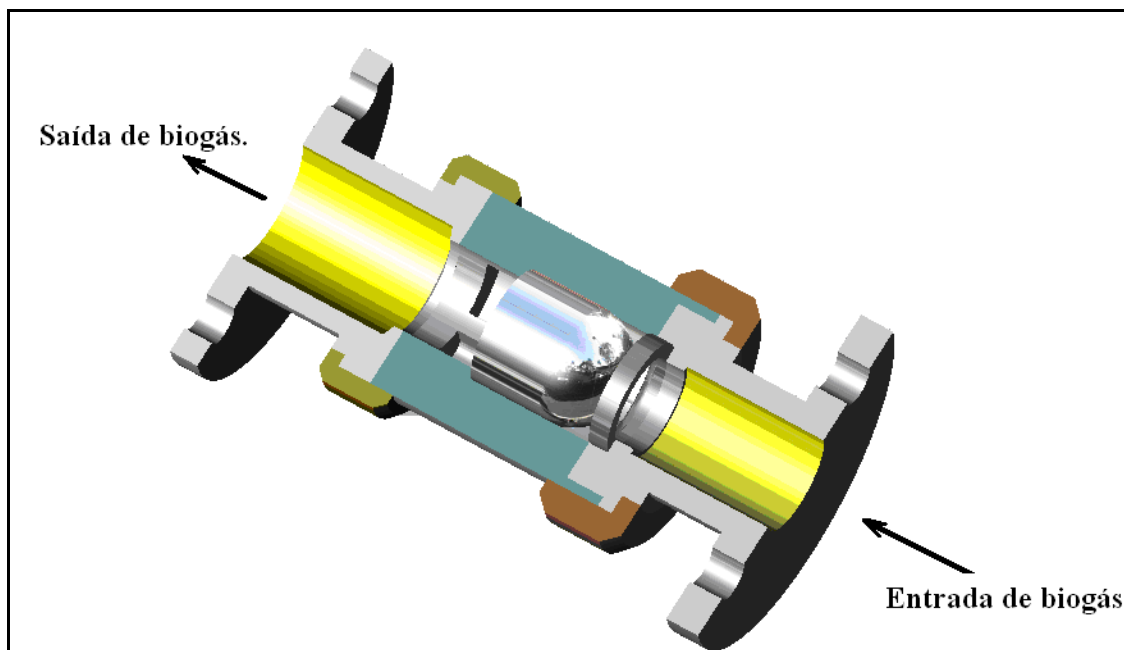


Figura 28 – Válvula de retenção, com detalhe de fluxo do biogás, modelada em software Inventor 2010 versão Student.

Para a utilização de uma poliamida para construção da camisa de compressão para o compressor inicialmente foi dimensionado o tamanho e volume da mesma.

3.3 CAMISA DE COMPRESSÃO

3.3.1 Escolha do material

Para a construção do projeto da camisa de compressão do sistema verificou-se que a substituição do material por um tipo mais acessível. Este deve ser aplicável a altas pressões e com boa resistência ao atrito e ao desgaste é fundamental na construção desse sistema. Para a construção do projeto da camisa de compressão do sistema verificou-se que a substituição do material por um tipo mais acessível, aplicável a altas pressões e com boa resistência ao atrito e ao desgaste é fundamental. A escolha por uma poliamida se dá uma vez que este material possui ótimas características e baixo custo de fabricação. Peças de ligas metálicas são

cada vez mais substituídas por materiais poliméricos devido às vantagens técnicas e econômicas, pois os polímeros são leves e oferecem boa resistência química e à abrasão e possuem boa durabilidade (Ramkumara & Gnanamoorthy, 2008).

Analisaram-se as características da poliamida PA 6.6 e examinaram-se as propriedades mecânicas deste material como pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 – Características Físicas e Mecânicas da Poliamida PA 6.6.

Característica	Unidade	Seco	*UR, 65%
FÍSICAS			
Densidade	g/cm ³	1,14	-
Ponto de fusão	°C	235-240	-
MECÂNICAS			
Dureza Rockwell	R	118	101
Dureza Shore	D	85	75
Módulo de elasticidade	MPa	3432	921
Módulo de rigidez à torção	MPa	1078	38
Resistência ao cisalhamento	MPa	68	53
Resistência à tração	MPa	74	44
Resistência à compressão	MPa	107	78
Resistência ao choque	MPa	0,5	3,3 a 4,4
Coeficiente de atrito: a seco		0,3	

*Umidade Relativa

Esse material polimérico, conhecido na indústria de fabricação como um dos plásticos de engenharia, apresenta propriedades físico-químicas e mecânicas muito propícias ao desenvolvimento dos mecanismos que são aplicados às condições adversas existentes em usinas de biogás. A poliamida PA 6.6 é um plástico de engenharia que possui boa resistência mecânica (semelhante às ligas de alumínio) e, além de ser inerte aos agentes ácidos da fermentação e do biogás (alta resistência química), possui baixo coeficiente de atrito com alta resistência à abrasão, semelhante ao Teflon (Sinha, et al., 2009).

3.3.2 Dimensionamento da camisa de compressão

O copo que forma a camisa de compressão, conforme é chamada por alguns autores é composta por um copo cilíndrico conforme pode ser visto na figura 29. Para o dimensionamento da camisa utilizou-se um modelo conforme pode ser vista

na figura 30. Com medidas internas de 60mm x 80mm de espaço obteve-se um volume interno de 48cm³. O que provoca um deslocamento de mesmo volume de gás por ciclo da bomba.

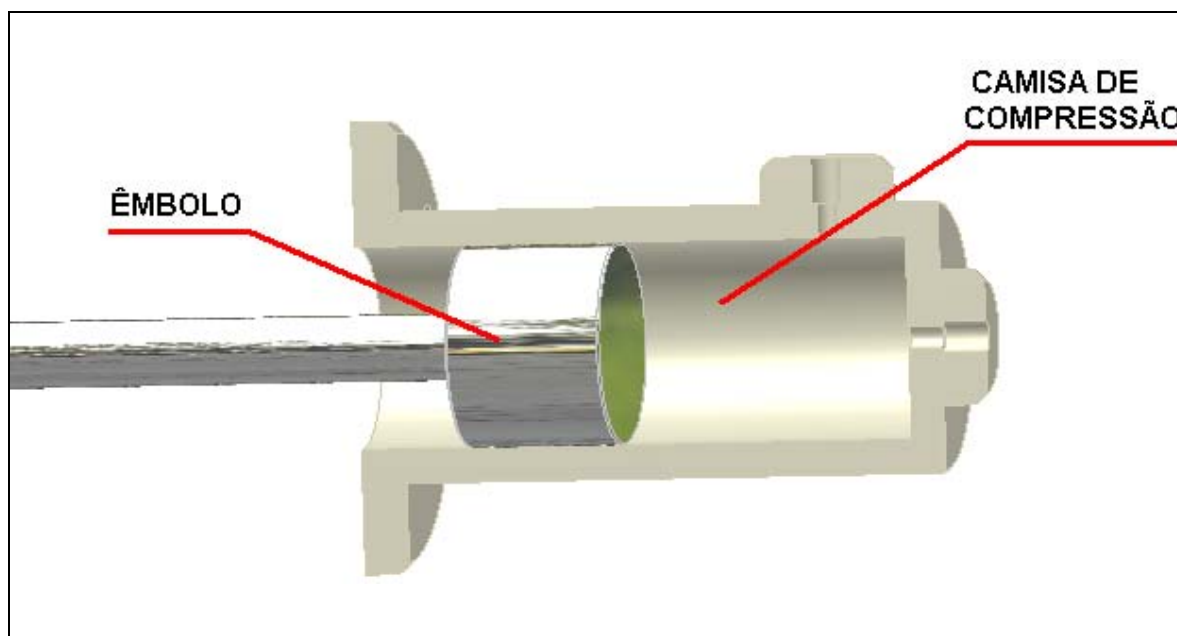


Figura 29 – Camisa de compressão modelada em software Inventor 2010 versão Student.

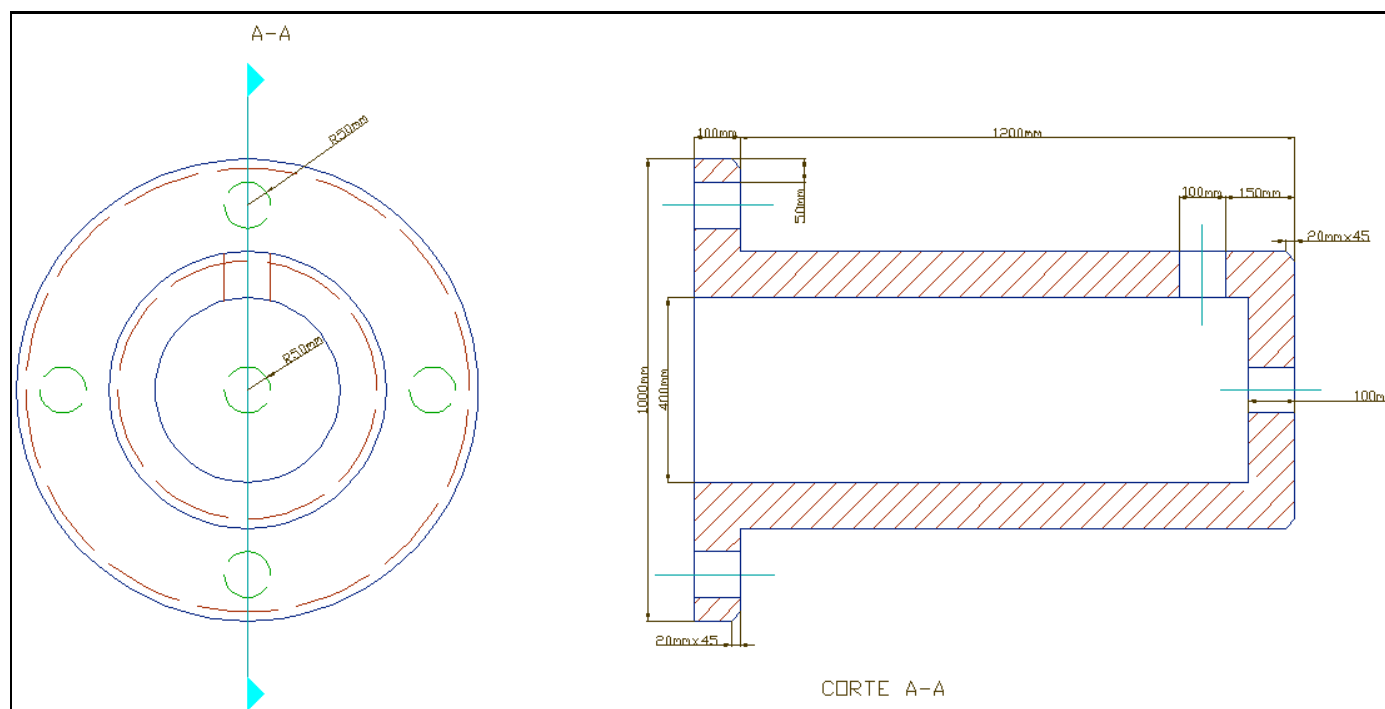


Figura 30 – Desenho em CAD da camisa de compressão.

3.3.3 Processo de Fabricação da Camisa de compressão

O método de conformação a quente de materiais plásticos pode ser feito através de material previamente colocado na cavidade da matriz ou molde. Amolece em função da pressão e aquecimento dando forma assim ao produto. Para o projeto da matriz da camisa de compressão são necessárias duas partes formando assim uma matriz bipartida, conforme pode ser visto na figura 31.



Figura 31 – Matriz Bipartida modelada em software Inventor 2010 versão Student.

Além das duas partes que formam a base a matriz é composta da base e do punção como visto a seguir na figura 32.

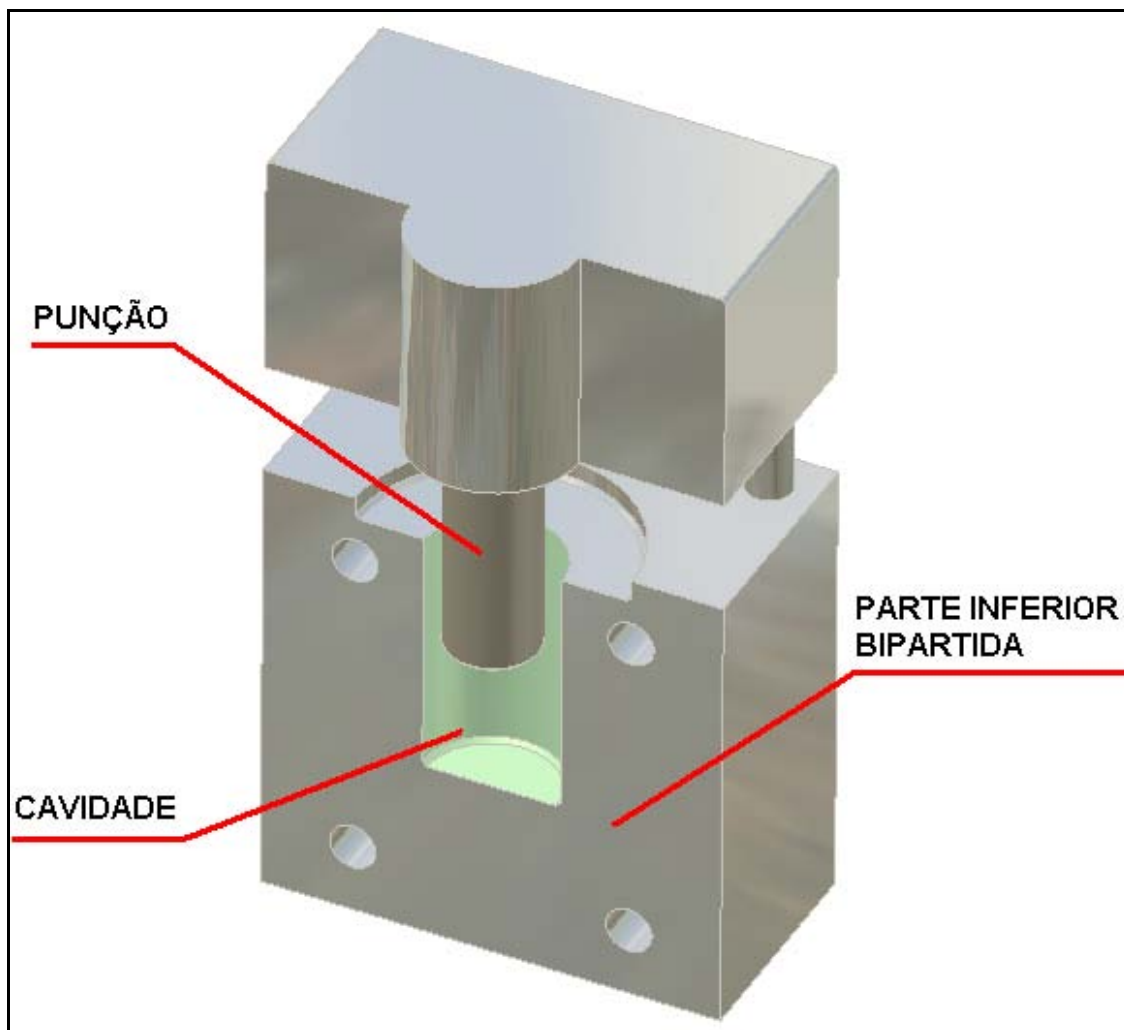


Figura 32 – Punção da Matriz.

3.4 UTILIZAÇÃO DO COMPRESSOR PARA COMPRESSÃO DE BIOMETANO

O compressor para plantas de biodigestão deve ser dimensionado em função da quantidade de gás gerado, da utilização e armazenagem que será utilizada. Caso seja necessária a compressão do biometano tendo-se produção em grande volume é imprescindível que se utilize parte deste combustível para comprimir o mesmo. Para tanto devem ser utilizados motores a biogás que possam ser instalados em sistemas de baixa pressão e acoplados aos compressores. Dessa forma utiliza-se uma pequena parte do biogás o que torna esse sistema inovador e tem um enorme diferencial.

Portanto dimensionou-se o compressor modelado para dois casos diferentes, caso 1 e caso 2.

Caso1:

Quantidade de gás gerado: $4\text{m}^3/\text{hora}$;

Utilização: Queima em motor de combustão interna, baixa pressão.

Compressor para o biogás:

Sistema de Acionamento: Motor elétrico;

Tamanho do Reservatório: $0,12\text{m}^3$;

Relação da área êmbolo do cilindro x Camisa de compressão: 10:1;

Pressão nominal: 8bar;

Diâmetro do cilindro: 150mm;

Diâmetro da Camisa de compressão: 45mm;

Capacidade de compressão: $6\text{m}^3/\text{hora}$.

Caso2:

Quantidade de gás gerado: $24\text{m}^3/\text{hora}$;

Utilização: Estocagem em cilindros e queima em motores e turbinas.

Compressor para o biogás:

Sistema de Acionamento: Motor à biogás;

Tamanho do Reservatório: 240m^3 ;

Relação da área êmbolo do cilindro x Camisa de compressão: 150:1;

Pressão nominal: 120bar;

Diâmetro do cilindro: 500mm;

Diâmetro da Camisa de compressão: 40mm;

Capacidade de compressão: $30\text{m}^3/\text{hora}$.

O biogás produzido é canalizado através de dutos de uma liga metálica ou PEAD (Polietileno de Alta Densidade) para a estação de compressão. Em seguida passa por uma filtragem para redução de gases e elementos indesejados transformando o biogás em biometano. A filtragem de CO_2 , H_2S , entre outros

componentes é necessária para a utilização eficiente, aumento do poder calorífico, concentração de metano e não agressão às partes metálicas do motor (Ogejo, 2007). No Caso 2 parte do biogás é utilizada pelo motor no compressor de ar. O biometano obtido é então comprimido para ser utilizado no motor e turbina.

Abaixo a figura 33 a planta baixa da estação de compressão de biometano.

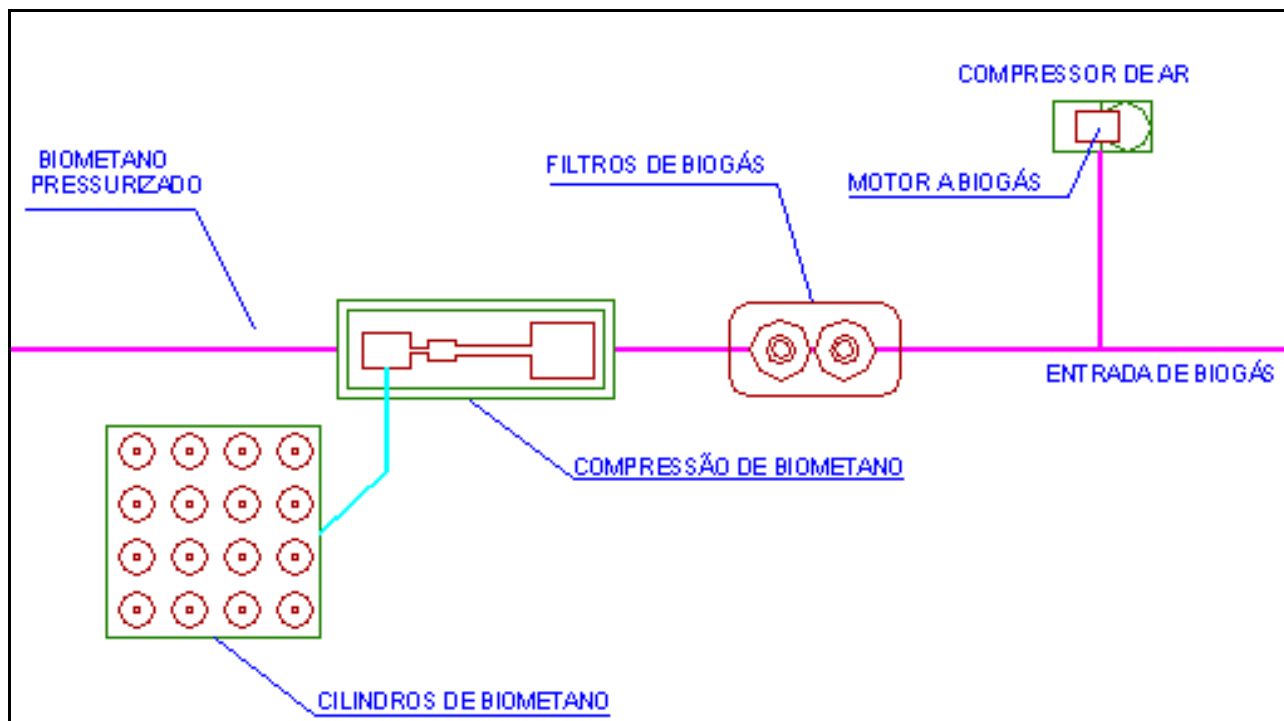


Figura 33 – Planta baixa da estação de compressão para biometano.

O biogás entra no sistema de compressão e uma pequena parte é utilizada pelo motor do compressor. A maior parte do biogás é então transformada em biometano através dos filtros. Em seguida o biometano passa pelo compressor que carrega os cilindros e pressurizado na linha de dutos que pode ser utilizada nos motores e, ou turbinas a gás. O biometano pode, também, ser armazenado em gasômetros maiores ou bombeado através de gasodutos por grandes distâncias (Technical Guidance for Biofuels, 2008).

A verificação da configuração foi realizada através da modelagem do projeto tridimensional para visualização da planta de compressão conforme figura 34.

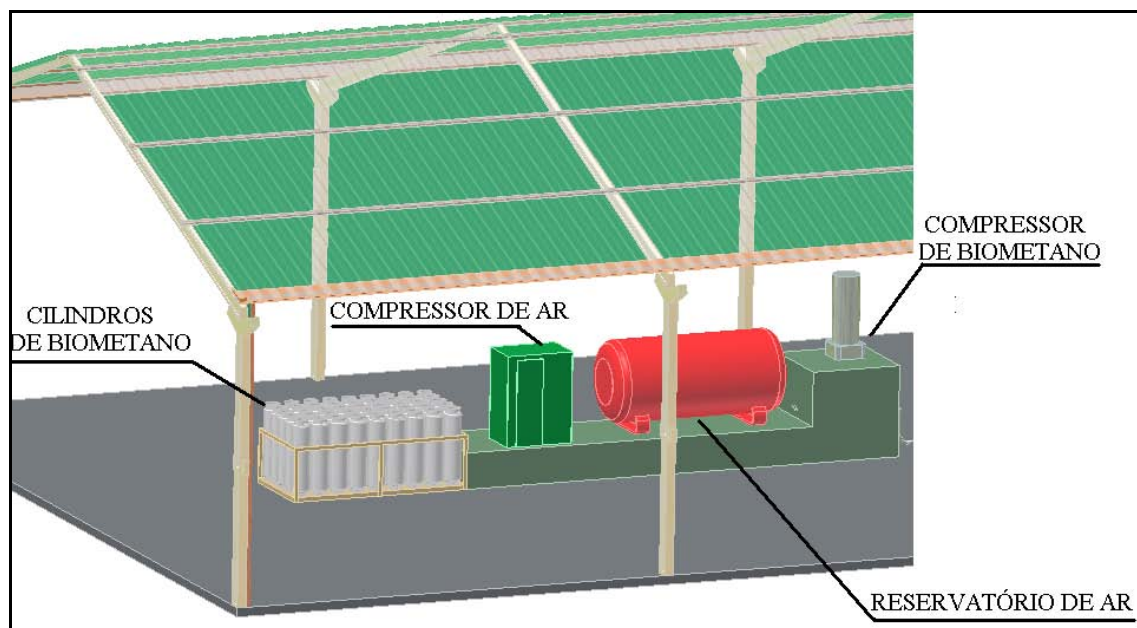


Figura 34 – Planta de compressão em 3D para biometano.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os compressores óleo-dinâmicos comprimem o gás por meio de um fluido (óleo hidráulico) incompressível que ocupava a câmara de compressão reduzindo o espaço disponível para o gás e causando a compressão. Esta tecnologia, embora eficaz para que se alcance elevadas pressões, como no caso do gás veicular, mostram-se pouco eficientes e apresentam altos índices de contaminação do gás pelo óleo de compressão.

Os compressores alternativos a pistão utilizam óleo como lubrificante o que também pode contaminar o gás. Algumas tecnologias admitem o uso de anéis de segmento de material com baixo coeficiente de atrito e buchas especiais. Uma composição de conceitos também é possível, com o uso de lubrificantes e componentes especiais. A estrutura de compressão destes é essencialmente metálica. A câmara de compressão é composta de uma liga, geralmente aço ou alumínio.

Estes compressores são na maioria dos casos propelidos por motores elétricos e tracionados por transmissões de polias e correias. A utilização da energia elétrica é considerada quando da possibilidade de se utilizar uma fonte local, como o próprio biogás.

O compressor tipo Booster não possui nenhum tipo de contaminante, pois não utiliza óleo na compressão. Por outro lado, a compressão se dá em ambiente separado do acionamento, já que o ar comprimido utilizado na movimentação do cilindro pode ser produzido em separado e conduzido através de dutos especiais.

A possibilidade utilização direta de motores a biogás para movimentação do Booster determina sua maior eficiência energética, utilizando uma fonte local ao invés de um motor elétrico que utiliza energia de fonte exterior ou produzida através de gerador elétrico. Isso garante às plantas de geração de biometano dotadas de Boosteres que utilizem o próprio como combustível tornando-se mais eficientes do ponto de vista econômico, pois não necessita comprar energia externa. O esquema da figura 35 mostra a comparação do sistema com a utilização de um motor a biogás

destacado na primeira linha sequencial em substituição ao sistema de conversão motor elétrico na segunda linha.

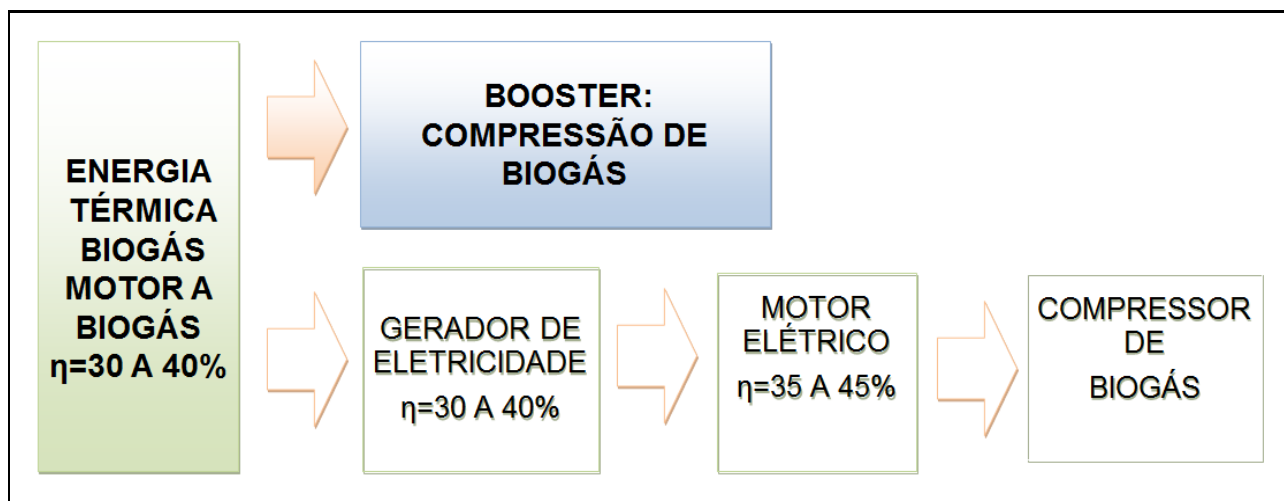


Figura 35 – Esquema de aproveitamento energético do compressor booster.

Um fator importante a considerar na fabricação do sistema proposto é que essa tecnologia terá aplicação para baixas pressões. Pode ser aplicado em pequenas usinas para queima do biogás em motores e turbinas bombeando e mantendo pressão do gás constante e o fornecimento estável.

Para construção da camisa em poliamida ainda necessita-se considerar a composição da poliamida. A composição da fibra de vidro nas poliamidas pode variar até 50% o que influencia suas características mecânicas. Para uma poliamida com 33% de fibra de vidro, 18% do volume a tensão de ruptura chega a 125,5 MPa. Maior concentração da fibra de vidro pode aumentar ainda mais a resistência mecânica deste material. O mesmo ainda possui excelente comportamento devido ao baixo atrito o que é fundamental devido ao movimento do êmbolo dentro da camisa exercendo a força para compressão do biogás.

O compressor tipo Booster é uma alternativa a ser considerada na compressão do biogás. Verificou-se que a eficiência de tal mecanismo pode ser bem maior quando da utilização de motores que utilizem o próprio gás como combustível o que representa em um ganho energético.

5 CONCLUSÕES

No início deste trabalho pesquisou-se sobre a produção e o tratamento do biogás, filtragem de umidade e gases corrosivos, devido à necessidade para o seu acondicionamento. Um combustível sem um pré-tratamento e dentro de um padrão aceitável no mercado não poderá ser comercializado nem utilizado de maneira eficiente. Isso implica no emprego de novas tecnologias. Verificou-se inclusive que tecnologias aplicadas ainda não estão disponíveis e talvez desenvolvidas para a crescente necessidade. É preciso destacar, que a utilização do combustível dependerá da qualidade final que não terá valor agregado e, portanto não atrairá investimentos. O tratamento, assim sendo, é imprescindível para que possamos comprimir o biogás e com isto possibilitar a seu transporte uso e armazenamento. Razões mais do que suficientes para manter atenção e empenho na procura do conhecimento e o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem tal acontecimento.

Assim também o transporte de biogás só é possibilitado quando o carregamento, descarregamento e manuseio se tornem possíveis. O que dependerá da compressão deste em cilindros ou reservatórios especiais. Verificou-se também a necessidade destes cilindros para acondicionamento do biogás, uma vez que a compressão do mesmo só será possível quando se tem condições e recipientes apropriados para sua armazenagem.

Conclui-se ainda a necessidade de avançar mais na aplicação deste equipamento em campo para avaliações de desempenho e comportamento do polímero. A aplicação em situações adversas deverá ser avaliada separadamente para melhorias.

As alternativas para fabricação do compressor passam pelos materiais poliméricos (plásticos de engenharia) que apresentam boas propriedades físico-químicas e mecânicas. Propriedades propícias ao desenvolvimento de mecanismos aplicados às condições adversas existentes em usinas de biogás. Verificando-se a poliamida PA 6.6, obteve-se boa resistência mecânica, resistência tração e compressão, que podem ser vistas na tabela 4. Aliado a isso se verificou que a poliamida é inerte aos

agentes ácidos da fermentação e do biogás (alta resistência química) e possui baixo coeficiente de atrito (alta resistência à abrasão).

Constatou-se que com a utilização de uma poliamida reduz-se o peso do compressor devido a sua baixa densidade $1,14\text{g/cm}^3$ comparada a outros materiais, como por exemplo, um aço 1020 que possui densidade de $7,86\text{g/cm}^3$.

A camisa de compressão em poliamida pode ser uma excelente alternativa às ligas metálicas. Para o caso estudado verifica-se a possibilidade da substituição da peça o que pode trazer vantagens em determinadas situações e desvantagens em relações a outros materiais. Em contraponto às vantagens já mencionadas detectou-se o fato de que a poliamida possui menor ponto de fusão, entre 235 e 240°C , o que não permite que a temperatura do processo a exceda. Outro ponto contraproducente apresentado é que a PA não é um bom condutor de calor, impedindo que o calor se dissipe rapidamente.

6 FUTURAS AÇÕES E MELHORIAS A SEREM EMPREENDIDAS

O estudo, pesquisa e dimensionamento, seja de plantas para produção de biogás ou compressão e acondicionamento deste, dependerão de pesquisas e ensaios laboratoriais e plantas em escala piloto. A experimentação em tais plantas possibilitará o dimensionamento através do acompanhamento do sistema possibilitando interferir otimizando-o.

A otimização da produção trará não só a maior quantidade de gás possível, mas também o melhor processo a ser adotado. Possibilitará também o conhecimento do comportamento da biomassa em condições conhecidas e que variam de lugar para outro.

O acompanhamento deste processo em pequena escala auxiliará também a melhoria na tecnologia empregada na fabricação destes equipamentos, como também nos processos adotados.

O processo de fabricação adotado na produção de equipamentos empregados na produção, compressão e acondicionamento de biogás está diretamente ligado à configuração e necessidade de tais plantas biodigestoras.

7 REFERÊNCIAS

ABREU, C. A., PECORA, V., VELÁZQUEZ, S., COELHO, S. T. – **Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação** – IEE/CENBIO – Instituto de Eletrotécnica e Energia / Centro Nacional de Referência em Biomassa. USP – Universidade de São Paulo – 2006.

ALVES, J. W. S. – **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos**. Dissertação de Mestrado, PIPGE, USP – São Paulo, 2000.

AMON, T., KRYVORUCHKO, V., AMON, B., SCHREINER, M. – ***Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiesystem*** – Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, Austria, 2006.

ANDRADE, M. A. N., RANZI, T. J. D., MUNIZ, R. N., SILVA, L. G. S. S., ELIAS, M. J. – **Biodigestores Rurais no contexto da atual crise de Energia Elétrica Brasileira e na perspectiva da Sustentabilidade Ambiental**. Coordenadoria de Gestão Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis – SC – UFSC – 2003.

ANGONESE, A. R., CAMPOS, A. T., ZACARKIM, C. E., MATSUO, M. S., CUNHA, F. – **Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor** – Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.10, n.3, p.745–750, 2006 Campina Grande, PB, DEAg/UFCG – <http://www.agriambi.com.br>, 2005.

AVELLAR, L. H. N., CARROCCI, L. R., SILVEIRA, J. L. – **Biogás na co-produção: a utilização de subprodutos agroindustriais na geração de energia em unidades co-geradoras**. Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento. Novas Tecnologias. 2006. Disponível em: <www.biotecnologia.com.br/bio13/13_g.asp>. Acesso em 22 de set. 2008.

BAIRD, C. – **Química Ambiental** – Editora Bookman, 2ª Edição – Porto Alegre – 622 pág. – 2002.

BIOENERGIA HANDBOOK – **Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação** – Agência para a Energia (ADENE) www.adene.pt – Jan 2004.

BONACORSO, N. G., & NOLL, V. – **Automação Eletropneumática** – Editora Érica – São Paulo – SP, 2007.

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT – **Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlagen**. Publicado por Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Wien, Austria, 2007.

CASTELÓ, D. L., MONGE, J. A., CASA-LILLO, M. A., AMORÓS, D. C., SOLANO, A. L. – ***Advances in the study of methane storage in porous carbonaceous materials*** – Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Alicante, Apartado 99, E-03080 Alicante, Spain – Departamento de Ciencia y Tecnología de los Materiales, Universidad Miguel Hernández de Elche, E-03202 Alicante, Spain – Elsevier – 2002.

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.

COSTA, D. F. – **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás do tratamento de esgoto** – Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo – São Paulo, 2006.

CUNHA, M. E. G. – **Análise do Setor Ambiental no Aproveitamento Energético de Resíduos: Um estudo de caso do município de Campinas** – Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos/Área Interdisciplinar. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP – 2002.

DAN HU, A. B., WANG, A. B., YAN, A. R. J. C. X. B., WANG, C. Y. – ***A pilot ecological engineering project for municipal solid waste reduction, disinfection, regeneration and industrialization in Guanghan City, China*** – Ecological Engineering 11 (1998) 129–138 – Elsevier – 1998.

DEMIRBAS, A. – ***Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections*** – Sila Science and Energy, University Mah, Mekan Sok Turkey Energy Conversion and Management – Elsevier – 2008.

_____ ***Combustion characteristics of different biomass fuels***. Prog. Energy Combust Science; 30:219–30, 2004.

DEMIRER, G.N. & CHEN, S. – ***Anaerobic biogasification of undiluted dairy manure in leaching bed reactors*** – Department of Environmental Engineering, Middle East Technical University, 06531 Ankara, Turkey – Department of Biological Systems Engineering, Washington State University, Pullman, WA 99163, USA – Elsevier, 2007.

DIN 24300 – **Fluidtechnik Schaltsymbole für Ölhydraulik und Pneumatik** – Blatt 3, Seite 2, Nr. 0.4. März, 1966.

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

ESPERANCINI, M. S. T., COLEN, F., BUENO, O. C., PIMENTEL, A. E. B., SIMON, E. J. – **Viabilidade Técnica e Econômica da Substituição de Fontes Convencionais de Energia por Biogás em Assentamento Rural do Estado De São Paulo** – Eng. Agrícola - Jaboticabal, v.27, n.1, p.110 -118, jan./abr. 2007.

FIALHO, A. B. – **Automação Hidráulica: projetos, dimensionamento e análise de circuitos** – 260 pg – Editora Érica – São Paulo – SP, 2002.

_____ – **Automação Pneumática: projetos, dimensionamento e análise de circuitos** – 260 pg – Editora Érica – São Paulo – SP, 2006.

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.

Gama Gases – Propriedades do gás Metano – Disponível em: http://www.gamagases.com.br/propriedades_metano.htm Acesso em 06/04/2010
Gama Gases - São Bernardo do Campo/SP.

GAS BOOSTER CATALOG, Haskel Energy Systems, Ltd – Sunderland England, UK. Hidraulic and Pneumatic Engineering. 2006, disponível em www.haskel.com.

GASPAR, R. M. B. L. – **Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias propriedades Rurais com ênfase na agregação de valor: Um Estudo de Caso na região de Toledo – Pr** – Dissertação de Mestrado – 2003.

GILES, R. V., EVETT, J. B., LIU, C. – **Mecânica dos Fluidos** – 2ª. Ed. Makron Books – 458pg – São Paulo – SP, 1996.

HARRY, L. S. – **Pneumática & Hidráulica** – Editora Hemus, 482 pg – São Paulo – SP, 1998.

HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION – Published for U. S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program Tennessee Valley Authority Muscle Shoals, Alabama 35660 – Research institute Georgia institute of Technology Atlanta, Georgia 30332 – 1990.

HORIKAWA, M. S., ROSSI, F., GIMENES, M.L., COSTA, C. M. M., SILVA, M. G. C. – ***Chemical Absorption of H₂S For Biogas Purification*** – Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 21, No. 03, pp. 415 - 422, July – September, 2004.

HORIKAWA, M.S. – **Purificação de Biogás – Remoção de H₂S** – Dissertação de Mestrado – PEQ, Universidade Estadual de Maringá, 2001.

HUANG, J. & CROOKES, R. J. – ***Assessment of Simuled Biogas as a Fuel for the Spark Ignition Engine***. Fuel Vol.77, nº 15, pp. 1793-1801. Ed Elsevier Science Ltda. 1998.

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.

IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS) **Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado** – IPT/CEMPRE, 2ª Edição Revista e Ampliada, São Paulo, 370p. – 2000.

ISO 11439:2000 – **Gas cylinders – High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles** – Manual de Normas Técnicas.

ILYAS, S. Z. – **A Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders as Source of Power for Rural Industries Development in Pakistan**. World Applied sciences Journal, Group of Renewable of Physics, University of Balochistan - Pakistan – 2006.

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, Índia – 2005.

LEITE, V. D., SOUSA, J. T., PRASAD, S., LOPES, W. S., JÚNIOR, G. B. A., DANTAS, A. M. M. – **Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbio de batelada** - Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.318-322, - Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, 2003.

LUCAS, J. – **Estudo comparativo de biodigestores modelos indiano e chinês**. 114 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1987.

LINARES, S. A. – **Adsorbed natural gas storage for alternative motor fuels**. – Conference of the 6th framework programme, Warsaw, Poland, 2002.

MAGALHÃES, E. A., SOUZA, S. N. M., AFONSO, A. D. L., RICIERI, R. P. – **Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO₂ contido no Biogás** *Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, Brasil*. Maringá, v. 26, no. 1, p. 11-19, 2004.

MACLEAN, H. L. & LAVE, L. B. – ***Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies***. Prog Energy – Combust. Science 29:1–69. 2003.

MUNÕZ, M., MORENO, F., MOREA-ROY, J., RUIZ, J., ARAUZO, J. – ***Low heating value gas on spark ignition engines***. Biomass and Bioenergy. Vol 18, pp 431-439, 2000.

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.

NAJIBI, H., CHAPOY, A., TOHIDI, B. – ***Methane/natural gas storage and delivered capacity for activated carbons in dry and wet conditions*** – 10.1016/j.fuel.2007.03.044 – Elsevier – 2007.

NBR 12791 – **Cilindro de aço sem costura, para armazenamento de gases a alta pressão** – 2006.

NBR 12274:2003 – **Inspeção em cilindros de aço sem costura para gases** – Elaborada pelo Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos (ABNT/CB-04), Comissão de Estudo de Cilindros para Gases e Acessórios (CE-04:009.07).

O'BRIEN, M. – ***Catalytic oxidation of Sulphides in Biogas, ventilation air and Wastewater streams from Anaerobic Digesters*** – Proceedings 1991 Food Industry Environmental Conference, USA 1991.

OGEJO, J. A. – **Biomethane Technology**. Virginia Cooperative extension. Blacksburg, VA, Communications and Marketing, College of Agriculture and Life

Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, n. 442-881, 2007.
Disponível em: < <http://pubs.ext.vt.edu/442/442-881/442-881.html>>

PARK, D., LEEB, D. S., JOUNGA, Y., PARKA, J. M. – ***Comparison of different bioreactor systems for indirect H₂S removal using iron-oxidizing bacteria*** – Process Biochemistry 40 (2005) 1461–1467– Elsevier, 2004.

PETERSSON, A., THOMSEN, M. H., HAUGGAARD-NIELSEN, H. – ***Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean*** – National Laboratory, P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark – 2007.

RAMKUMARA, A. & GNANAMOORTHY, R. – ***Axial fatigue behaviour of polyamide-6 and polyamide-6 nanocomposites at room temperature*** – Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, India – 2008.

REDONDO, R., MACHADO, V. C., BAEZA, M., LAFUENTE, J., GABRIEL, D. – ***On-line monitoring of gas-phase bioreactors for biogas treatment: hydrogen sulfide and sulfide analysis by automated flow systems*** – Anal Bioanal Chemistry 391:789 – 798, 2008.

RUTZ, D., & RAINER, J. – **BioFuel Technology Handbook** – WIP Renewable Energies Sylvensteinstr. 281369 München – Germany – February, 2007.

SAMPAIO, J. L. & CALÇADA, C. S. – **Universidade da física 2: tópicos especiais de mecânica, termodinâmica e óptica** – 566 pg – São Paulo: Atual SP, 2001.

SCHLOSSER, J. F., CAMARGO, M. N., MACHADO, P. R. M. – **Comportamento de um Motor de Ignição por Compressão trabalhando com Óleo Diesel e Gás Natural** – Eng. Agríc. Jaboticabal, v.24, n.3, p.736-744, set./dez. 2004.

SCHOLZ, V. & ELLERBROCK, R. – ***The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany***. Biomass & Bioenergy 23:81–92 / 2002.

SEADI, T. A., RUTZ, D., PRASSL, H., KÖTTNER, M., FINSTERWALDER, T., VOLK, S., JANSSEN, R. – **Biogas Handbook** – University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark 126p, 2008.

SILVA, F. M. D., JUNIOR, L., BENINCASA, M., OLIVEIRA, E. D. – **Desempenho de um aquecedor de água a biogás** – Eng. Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.3, p.608-614, set./dez, 2005.

SILVA, C. L., RABELO, J. M. O., BOLLMANN, H. A. – **Energia no lixo: Uma avaliação da viabilidade do uso do biogás a partir de resíduos sólidos urbanos** – IV Encontro Nacional da Anppas – Brasília, 2008.

SINHA, S. K., SONGA, T., WANA, X., TONGB, Y. – ***Scratch and normal hardness characteristics of polyamide 6/nano-clay composite*** – Sujeet Tingwan Songa, XuefeiWana, Yuejin Tongb, - Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore – College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fujian Key Laboratory of Polymer Materials, Fuzhou – China, 2009.

SORUM, L., GRONLI, M. G., HUSTAD, J. E. – ***Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes*** – Norwegian University of Science and Technology/ Institute of Thermal Energy and Hydropower – Elsevier – 2000.

SOUZA, J. D., MELEGARI, S. N. M., MACHADO, P. R. M. – **Desempenho de um motor ciclo otto utilizando Biogás como combustível** – UFSM-DEM – Santa Maria/RS – 2007.

SOUZA, J. D., SILVA, G. G. D., SCHAEFFER, L., KRUMMENAUER, E. J., LIMA, H. Q. D. – **Eficiência energética de biocombustíveis: Compressão de Biogás** – VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental – PUC/RS – Porto Alegre, 2010.

_____ – **Tecnologia de produção de biocombustíveis: Desenvolvimento de tecnologias para compressão de Biogás** – 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente – Bento Gonçalves – RS, Brasil, 2010.

SOUZA, J. & SCHAEFFER, L. – **Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano** – REVISTA LIBERATO – Educação, ciência e Tecnologia – v. 11, n. 15, pg 33-38, jan./jun. 2010.

TECHNICAL GUIDANCE FOR BIOFUELS – Technical information concerning the application of biofuels 2008, Senter Novem, Utrecht, Netherlands Kristina Birath, Haide Backman, Ulrika Franzén, Ulf Liljenroth (WSP Sweden AB) www.biofuel-cities.eu.

TRIVELIN, P. C. O. & BENDASSOLLI, J. A. – **Técnicas com Vácuo**. Curso de Pós - Graduação em Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP Piracicaba – 2006.

TOLEDO, A. A. G. F. & LUCAS, J. – **Produção de biogás a partir de águas residuárias de pocilgas utilizando reatores UASB sob quatro tempos de retenção hidráulica**. Energia na Agricultura, Botucatu, v.12, n.12, p.49-55, 1996.

VIJAY, V. K., CHANDRA, R., SUBBARAO, P. M. V., KAPDI, S. S. – **Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications** – Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology, Delhi, Hauz Khas, New Delhi – 110 016, India – 2006.

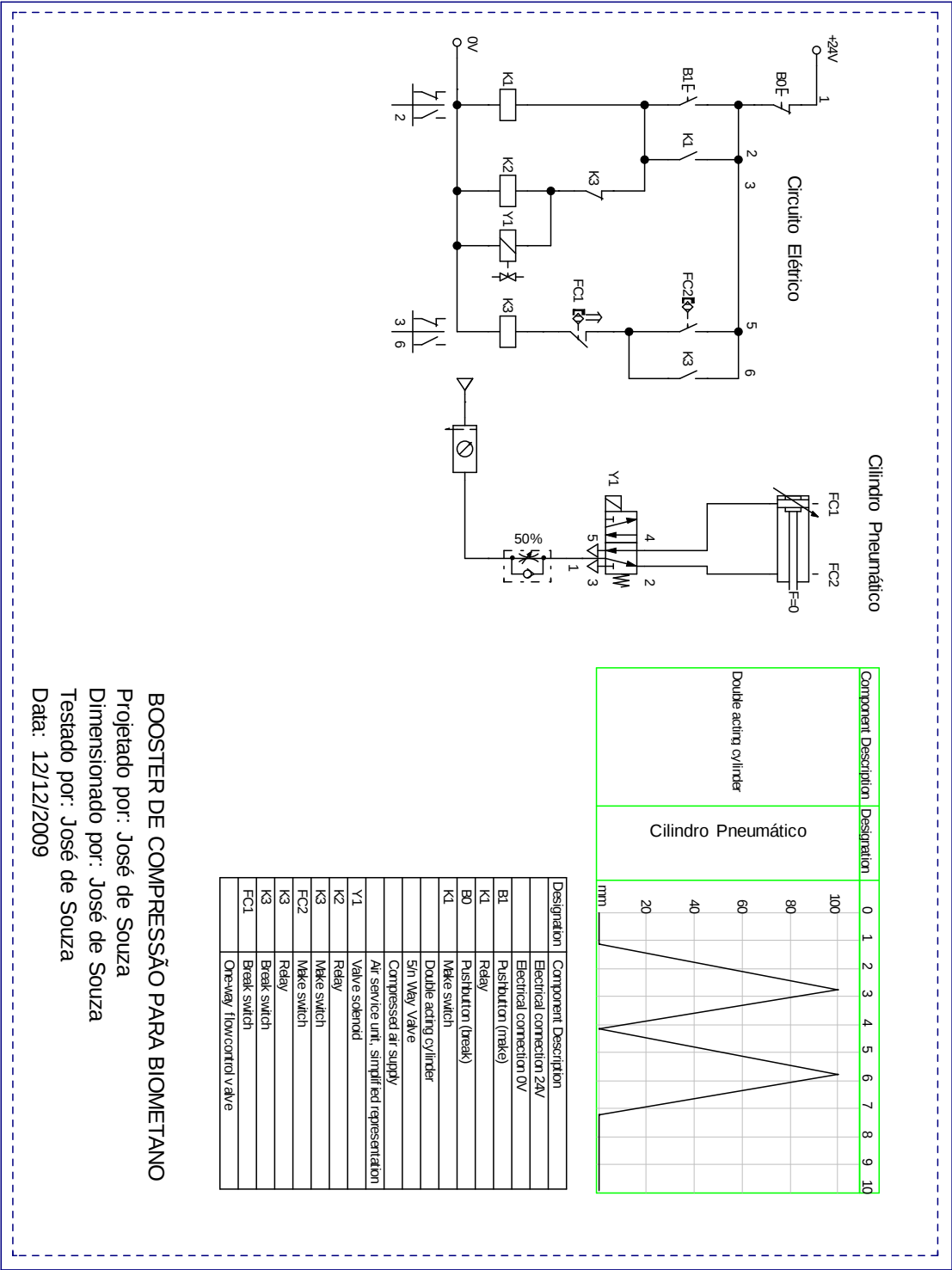
ZAREH, A. – **Motores a Biogás**. Lubrificação. Rio de Janeiro, V 81, nº 04, p 2-4, 1998.

ZHANG, Z. G., XU, G., CHEN, X., HONDA, K., YOSHIDA, T., – **Process development of hydrogenous gas production for PEFC from biogas** - National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2-17 Tuskisamu-Higashi, Toyohira, Sapporo 062-8517, Japan – Elsevier – 2003.

WARITH, M. – **Bioreactor landfills: experimental and field results** – Ryerson Polytechnic University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario, Canada – 2001.

WELLINGER A, & LINDEBERG, A. – ***Biogas upgrading and utilization***. Task 24:
Energy from biological conversion of organic wastes. 1–19. 1999.

ANEXO I – Projeto Eletropneumático de Compressor tipo Booster para Biometano



BOOSTER DE COMPRESSÃO PARA BIOMETANO
Projetado por: José de Souza
Dimensionado por: José de Souza
Testado por: José de Souza
Data: 12/12/2009