

UNESP

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2001



1110000463



***"A Valorização dos Subprodutos
Agroindustriais Visando a
Co-geração e a Redução
da Poluição Ambiental"***

LUÍS HENRIQUE NOBRE AVELLAR

150



A VALORIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS VISANDO A CO-GERAÇÃO E A REDUÇÃO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL

LUÍS HENRIQUE NOBRE AVELLAR

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Guaratinguetá, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica (Área de Concentração: Transmissão e Conversão de Energia).

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
2001



463

463

24/01/02

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIXO

C

A VALORIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS
AGROINDUSTRIAIS VISANDO A
CO-GERAÇÃO E A REDUÇÃO DA
POLUIÇÃO AMBIENTAL
LUÍS HENRIQUE NOBRE AVELLAR

Ficha catalográfica preparada na Seção de aquisição e Tratamento da
Informação da Biblioteca – FEG/UNESP

A949v

Avellar, Luís Henrique Nobre

A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a co-geração e a redução da poluição ambiental/Luís Henrique Nobre Avellar. Guaratinguetá, 2001

111f.: il.; 30cm

Bibliografia: 107-111p.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1.Co-geração 2. Subprodutos Agroindustriais 3. Poluição Ambiental, I. Título

CDU 536.72

**“A VALORIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS VISANDO A
CO-GERAÇÃO E A REDUÇÃO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL”**

LUÍS HENRIQUE NOBRE AVELLAR

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

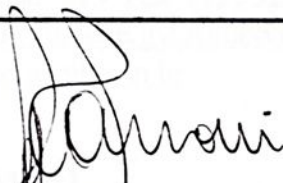
**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador / Unesp-FEG



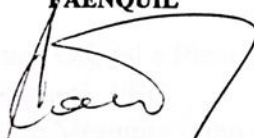
Prof. Dr. CARLOS DANIEL EBINUMA
Unesp-FEG



Prof. Dr. JORGE DE LUCAS JÚNIOR
Unesp-FCAV



Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
FAENQUIL



Prof. Dr. SUANI TEIXEIRA COELHO
USP/CENBIO

Julho de 2001

DADOS CURRICULARES

Junho, 2001

1 DADOS PESSOAIS

Nome: Luís Henrique Nobre Avellar

Filiação: Nilton de Paula Avellar e Creusa Nobre Avellar

Nascimento: 11/10/1971, São Paulo/SP - Brasil

Endereço profissional: UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
FEG – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Secretaria de Pós-Graduação
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333
Caixa Postal: 205
12516-410 Guaratinguetá, SP – Brasil
Telefone: (12) 5252800 Ramal: 215 Fax: (12) 5252466
E-mail: lavellar@feg.unesp.br, bioenergy@globo.com,
professor.energy@zipmail.com.br

2 FORMAÇÃO ACADÊMICA/TITULAÇÃO

1996 - 1997 Mestrado em Engenharia Mecânica [Guaratinguetá].
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP,
São Paulo, Brasil.
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG.
Título: A Influência dos Sistemas de Controle e Redução de
Poluentes nos Custos da Co-geração, Ano de obtenção: 1997.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci.
Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira.
Bolsista CNPq.

1989 - 1993 Graduação em Engenharia Mecânica.
Universidade Paulista, UNIP, São Paulo, Brasil.

3 APERFEIÇOAMENTO/ESPECIALIZAÇÃO

1997 Primeira Escola de Verão em Dinâmica Orbital e Planetologia.
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG.
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP,
Guaratinguetá, São Paulo, Brasil.

- 1993 - Técnicas de Acionamentos com Velocidade Variável CA/CC.
 - Técnicas de Acionamentos com Velocidade Variável CA/CA.
 - Comando e proteção para Motores Elétricos.
 - Características e Especificações de Motores Elétricos CA.
 WEG Indústrias S.A., Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil.

4 FORMAÇÃO PROFISSIONAL

4.1 Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - FEG

Atividades Universitárias – Representação de Pós-graduação

Comissão Permanente de Ensino	Titular	10/1999 – 10/2000
	Suplente	08/1999 – 10/1999
Comissão Permanente de Pesquisa	Suplente	10/1999 – 10/2000
	Titular	06/1999 – 10/1999
Congregação	Suplente	07/1997 – 07/1999
Comissão Extensão Universitária e Assuntos Comunitários	Titular	08/1996 – 08/1997

4.2 Governo do Estado de São Paulo – GOVERNO/SP

04/1994 – 06/1994 Servidor Público, Professor II.

4.3 Arconterma Ar Condicionado Ltda. – ARCONTERMA

04/1993 – 10/1993 Estagiário, Departamento Técnico e de Projetos.

4.4 Grammer do Brasil – GRAMMER

06/1992 – 12/1992 Estagiário, Departamento de Controle da Qualidade.

5 IDIOMAS

	Compreende	Fala	Lê	Escreve
Inglês	Bem	Razoavelmente	Bem	Razoavelmente
Italiano	Bem	Pouco	Razoavelmente	Pouco
Espanhol	Bem	Pouco	Razoavelmente	Pouco

À Nilton, Creusa

e Rosicler

AGRADECIMENTOS

Nos poucos anos de minha vida acadêmica estive exercendo várias atividades, sempre com o envolvimento de muitas pessoas, várias empresas e instituições, as quais manifesto meus mais sinceros agradecimentos e dedico este trabalho:

- à FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela viabilização financeira.

- ao Magnífico Prof. Dr. José Carlos Souza Trindade, Reitor da Universidade Estadual Paulista – UNESP, à V.S. Prof. Dr. Guilherme Eugênio Fernandes Fillipo Filho, diretor do Campus de Guaratinguetá, ao Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci, chefe do Departamento de Energia, pela efetiva viabilização deste projeto de pesquisa, e ao Prof. Dr. José Luz Silveira, coordenador do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da FEG/UNESP.

- aos órgãos colegiados onde tive a possibilidade de atuar, pela grande influência no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

- à todos os funcionários da FEG/UNESP, principalmente, aos da Secretaria de Pós-graduação, do Departamento de Energia, e os da Biblioteca, em especial aos técnicos do laboratório da área térmica.

- à todos os colegas, alunos da Pós-graduação em Engenharia Mecânica, área Transmissão e Conversão de Energia, em especial aos amigos mais próximos que me proporcionaram uma intensa vivência nesta fase tão importante de minha vida.

- ao Professor Jorge de Lucas Júnior – UNESP/Jaboticabal.

- à todos os professores da FEG/UNESP, em especial àqueles alocados junto a Pós-graduação em Engenharia Mecânica, e ao Departamento de Energia.

- ao co-orientador Prof. José Luz Silveira, por sempre me ensinar, apoiar, e ajudar em muitos momentos decisivos.

- ao orientador Prof. Luiz Roberto Carrocci pelos ensinamentos, pela idealização, pela nova oportunidade de realização deste trabalho, e em especial, pela compreensão, orientação e amizade dedicadas como um verdadeiro Pai acadêmico.

LUÍS HENRIQUE NOBRE AVELLAR



APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio financeiro das seguintes instituições:

- FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através do processo número 97/11744-6.
- Pós-graduação em Engenharia Mecânica da FEG/UNESP, por viabilizar a participação em viagens, visitas técnicas e congressos.

SOMÁRIO

1. Introdução	1
2. O Dicionário	2
3. O Dicionário e a Língua	3
4. O Dicionário e a Gramática	4
5. O Dicionário e a Literatura	5
6. O Dicionário e a História	6
7. O Dicionário e a Filosofia	7
8. O Dicionário e a Arte	8
9. O Dicionário e a Ciência	9
10. O Dicionário e a Vida	10
11. O Dicionário e o Trabalho	11
12. O Dicionário e o Sucesso	12
13. O Dicionário e o Tempo	13
14. O Dicionário e o Espaço	14
15. O Dicionário e o Poder	15
16. O Dicionário e a Liberdade	16
17. O Dicionário e a Justiça	17
18. O Dicionário e a Verdade	18
19. O Dicionário e a Beleza	19
20. O Dicionário e a Vida	20

“O único lugar onde o Sucesso vem antes do
Trabalho é no Dicionário”

Albert Einstein

SUMÁRIO

CAPA	
FOLHA DE ROSTO	
DADOS CURRICULARES	
DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTOS	
APOIO FINANCEIRO	
EPÍGRAFE	
SUMÁRIO	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE EQUAÇÕES	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
RESUMO	
<i>ABSTRACT</i>	

1 Aspectos Gerais	1
1.1 Objeto de Estudo	1
1.2 Caracterização do Problema e Proposta do Trabalho	2
1.3 Estrutura Geral	4
 2 Fatos Históricos e Atualidades	 6
2.1 Rejeitos Agroindustriais e Rurais	6
2.1.1 Rejeitos Agroindustriais	7
2.1.1.1 Indústria Sucro-Alcooleira	8
2.1.1.2 Indústria de Laticínios	11
2.1.1.3 Indústria de Papel e Celulose	13
2.1.2 Rejeitos Rurais	15
2.1.2.1 Bovinos Leiteiros	18
2.1.2.2 Frangos de Corte	19
2.1.2.3 Suinocultura	20

2.2	Fatos Históricos, Tipos e Atualidades dos Biodigestores	24
2.2.1	História dos Biodigestores	24
2.2.2	Processo de Biodigestão Anaeróbia	26
2.2.3	Tipos de Biodigestores	28
2.2.3.1	Biodigestores Rurais	28
2.2.3.2	Biodigestores Industriais	30
2.2.4	Biofertilizante	32
2.2.5	Biogás	33
2.2.5.1	Poluição do Biogás	34
2.2.5.2	Purificação e Compressão de Biogás	37
2.3	Fatos Históricos e Tipos de Co-geração	42
2.3.1	A Co-geração de Energia	43
2.3.2	Formas de Co-gerar Energia	45
2.3.3	Ciclos Disponíveis para a Co-geração de Energia	47
2.3.3.1	Co-geração com Motores de Combustão Interna	47
2.3.4	Escolha de Tecnologias	49
3	Biodigestores: Projeto, Construção, Operação e Experimentos	52
3.1	Projeto de Biodigestores	52
3.2	Protótipos de Biodigestores	55
3.3	Experimentos Realizados	58
3.3.1	Experimento com Lodo Anaeróbio	59
3.3.2	Água de Lavagem de Tubulação Industrial	67
3.4	Análise do Biogás	73
4	Cálculos e Projetos	74
4.1	Cálculos com unidades utilizando Turbinas a Gás	75
4.2	Cálculos com unidades utilizando MCI usado em automóveis	84
5	Resultados e Conclusões	101
5.1	Resultados e Conclusões dos Experimentos	101
5.2	Resultados e Conclusões dos Cálculos	103
5.3	Considerações e Propostas para Trabalhos Futuros	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Sequência simplificada da digestão anaeróbia	27
Figura 2.2 - Fase Metanogênica	28
Figura 2.3 - Biodigestor Modelo Indiano	29
Figura 2.4 - Biodigestor Modelo Chinês	29
Figura 2.5 - Biodigestor Modelo Marinha Brasileira	30
Figura 2.6 - Biodigestor usado em tratamento de Esgotos	31
Figura 2.7 - Biodigestor com Leito de Lodo (UASB)	31
Figura 2.8 - Estação de Purificação e Compressão de Biogás	38
Figura 2.9 - Instalação de Purificação e Compressão de Biogás	39
Figura 2.10 - Sistema de elevação a partir de gases quentes (smokejack)	43
Figura 2.11 - Regime " <i>Bottoming</i> "	45
Figura 2.12 - Ciclo Rankine regime " <i>Topping</i> "	46
Figura 2.13 - Unidade de Co-geração com Ciclo Combinado	46
Figura 2.14 - Unidade de Co-geração com Motor de Combustão Interna	48

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Biodigestor 30 litros – vista externa	55
Figura 3.2 - Biodigestor 30 litros – vista interna	56
Figura 3.3 - Biodigestor 200 litros – Completo	56
Figura 3.4 - Biodigestor 200 litros – Campânula - vista interna	57
Figura 3.5 - Biodigestor 200 litros – Campânula - vista externa	57
Figura 3.6 - Mistura Líquida	61
Figura 3.7 - Caixa de Entrada Entupida	61
Figura 3.8 - Caixa de Entrada Vazia	62
Figura 3.9 - Caixa de Saída com princípio de entupimento	62
Figura 3.10 - Caixa de Saída Líquida	63
Figura 3.11 - Mistura muito densa	63
Figura 3.12 - Câmara com biogás	64
Figura 3.13 - Aumento da pressão interna	64
Figura 3.14 - Garrafa de armazenamento de biogás	65
Figura 3.15 - Teste de queima – biogás do lodo anaeróbio	66
Figura 3.16 - Mistura água de lavagem com esterco	68
Figura 3.17 - Câmara de armazenamento vazia	68
Figura 3.18 - Biofertilizante	69
Figura 3.19 - Mistura após vários dias	70
Figura 3.20 - Câmara de armazenamento	70
Figura 3.21 - Biofertilizante seco	70
Figura 3.22 - Teste de queima – biogás com água de lavagem	71
Figura 3.23 - Moto-gerador a biogás	72
Figura 3.24 - Equipamento de Cromatografia Gasosa	73

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Sistema Híbrido com Turbina a Gás	75
Figura 4.2 - Turbinas Seleccionadas	77
Figura 4.3 - Gráfico Receita Final	81
Figura 4.4 - Gráfico Receita Final – custo 0,001 [US\$/kWh]	82
Figura 4.5 - Sistema Híbrido com Motores de Combustão Interna	85
Figura 4.6 - Esquema Gerador Elétrico	87
Figura 4.7 - Esquema Trocador água-água	88
Figura 4.8 - Esquema Trocador gás-água	88
Figura 4.9 - Esquema Caldeira convencional	89
Figura 4.10 - Esquema sistema de refrigeração por absorção de amônia	91
Figura 4.11 - Gráfico Receita Final com MCI	95
Figura 4.12 - Esquema Sistema Híbrido com moto-gerador	97

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela	2.1	- Bagaço de cana – Umidade X Poder Calorífico	9
Tabela	2.2	- Composição química média do vinhoto	10
Tabela	2.3	- Produção diária de celulose e rejeitos	14
Tabela	2.4	- Poder calorífico médio dos rejeitos	14
Tabela	2.5	- Rejeitos X DBO	16
Tabela	2.6	- Manejo – Esterco - Biogás	18
Tabela	2.7	- Destruição de agentes patogênicos - Bovinos	19
Tabela	2.8	- Produção de biogás e agentes patogênicos, tipo Cama	20
Tabela	2.9	- Produção de Dejetos – Fases de Produção	21
Tabela	2.10	- Composição dos Dejetos de Suínos	22
Tabela	2.11	- Produção de Biogás – Estrume de Suínos	23
Tabela	2.12	- Fatos Históricos dos Biodigestores	26
Tabela	2.13	- Características do Biogás	33
Tabela	2.14	- Poder Calorífico Inferior - Combustíveis	34
Tabela	2.15	- Características da Estação de Biogás Automotivo	40
Tabela	2.16	- Técnicas de Compressão de Biogás	41
Tabela	2.17	- Principais Fatos Históricos da Co-geração	44

CAPÍTULO 4

Tabela	4.1	- Turbinas a Gás Corrigidas	78
Tabela	4.2	- Dados de Entrada – Viabilidade Econômica	79
Tabela	4.3	- Receita da Geração Elétrica e Vapor	80
Tabela	4.4	- Consumo de Biogás	82
Tabela	4.5	- Animais – Esterco - Biogás	83
Tabela	4.6	- Demanda de rejeitos agrícolas	84
Tabela	4.7	- Consumo de Biogás pelo Motor	86
Tabela	4.8	- Potência Elétrica Produzida	87
Tabela	4.9	- Produção de Vapor	90
Tabela	4.10	- Produção de Água Gelada	91
Tabela	4.11	- Consumo de Biogás	92
Tabela	4.12	- Número de Animais	93
Tabela	4.13	- Número de Animais – Demanda de rejeitos agrícolas	94
Tabela	4.14	- Animais e Rejeitos Agrícolas	98
Tabela	4.15	- Turbinas a Gás x MCI Zetec Rocam 1.0	99

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO 3

Equação	3.1	- Volume do biodigestor para atender a demanda	54
Equação	3.2	- Volume calculado do biodigestor	54
Equação	3.3	- Comparação da altura do biodigestor	54
Equação	3.4	- Comparação da razão diâmetro interno/altura	54
Equação	3.5	- Cálculo do diâmetro do gasômetro	54
Equação	3.6	- Cálculo do Volume da parede divisória interna	54

CAPÍTULO 4

Equação	4.1	- Demanda de vapor	76
Equação	4.2	- Energia necessária para atender a demanda térmica	76
Equação	4.3	- Vazão Mássica X Temperatura	76
Equação	4.4	- Custo de produção de energia elétrica	79
Equação	4.5	- Investimento no sistema de turbinas a gás	79
Equação	4.6	- Investimento no sistema de biodigestão aneróbia	79
Equação	4.7	- Investimento no sistema de biodigestores	79
Equação	4.8	- Investimento no sistema de purificação e compressão	79
Equação	4.9	- Fator de anuidade	79
Equação	4.10	- Taxa de juros	79
Equação	4.11	- Perdas	79
Equação	4.12	- Energia real entregue pela caldeira na forma de vapor	80
Equação	4.13	- Custo de produção de vapor	80
Equação	4.14	- Investimento no sistema de geração de vapor	80
Equação	4.15	- Investimento no sistema caldeira de recuperação	80
Equação	4.16	- Custo de produção de vapor convencional	80
Equação	4.17	- Ganho na produção de energia elétrica	80
Equação	4.18	- Ganho na produção de vapor	80
Equação	4.19	- Receita Final	80
Equação	4.20	- Perdas para MCI	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 2

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica.
CA	- Caldeira convencional.
CFC	- Cloro-fluor-carbono.
CH ₄	- Metano.
CO	- Monóxido de Carbono.
CO ₂	- Dióxido de carbono.
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio.
EIA	- Estudo de Impacto Ambiental.
EMATER	- Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural.
ES1	- Estrume fresco.
ES2	- Estrume pré-fermentado.
ES3	- Estrume seco ao ar.
FCAV	- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.
GE	- Gerador elétrico.
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo.
HCl	- Cloreto de Hidrogênio.
H ₂ CO ₃	- Ácido carbônico.
H ₂ S	- Sulfeto de Hidrogênio.
MS	- Matéria Seca.
NO _x	- Óxidos de Nitrogênio.
NPK	- Nitrogênio, Fósforo e Potássio.
PCI	- Poder calorífico inferior.
pH	- Potencial Hidrogeniônico.
PNUD	- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.
PVC	- Policloreto de Vinila.
RIMA	- Relatório de Impacto no Meio Ambiente.
SO ₂	- Dióxido de Enxofre.
SO _x	- Óxidos de Enxofre.
TRH	- Tempo de Retenção Hidráulica.
TSA	- Toneladas secas ao ar.
TV	- Turbina a vapor.
UASB	- Biodigestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Leito de Lodo (<i>Up-flow Anaerobic Sludge Blanket</i>).
UNESP	- Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

CAPÍTULO 3

carga	- Volume da carga diária da mistura [m ³].
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio.
Dg	- Diâmetro do gasômetro [m].
Di	- Diâmetro interno do biodigestor [m].
espessura	- Espessura da parede divisória interna do biodigestor [m].

h	- Altura da parede divisória interna [m].
H	- Altura do biodigestor [m].
H ₂	- Gás Hidrogênio.
O ₂	- Gás Oxigênio.
TRH	- Tempo de retenção hidráulica [dias].
V	- Volume do biodigestor para atender a demanda [m ³].
Vb	- Volume calculado do biodigestor [m ³].
Vp	- Volume da parede divisória interna do biodigestor [m].

CAPÍTULO 4

Cbgd	- Consumo de biogás por dia [m ³ /dia].
Ccomb	- Custo do combustível [US\$/kWh].
Ccomb acg	- Custo do combustível antes da co-geração [US\$/kWh].
Cele pc	- Consumo elétrico da unidade de purificação e compressão [kW].
Cmsacg	- Custo de manutenção sistema antes da co-geração [US\$/kWh].
Cmscr	- Custo de manutenção sistema caldeira de recuperação [US\$/kWh].
Cmstg	- Custo de manutenção do sistema de turbinas a gás [US\$/kWh].
Cp	- Calor específico a pressão constante [kJ/kg°C].
Cpel	- Custo de produção de eletricidade [US\$/kWh].
Cpv	- Custo de produção de vapor [US\$/kWh].
Cpvc	- Custo de produção de vapor convencional [US\$/kWh].
Ec	- Energia dos Gases de Exaustão que entram na caldeira [kW].
Ec real	- Energia dos Gases de Exaustão real que entra na caldeira [kW].
Ecomb	- Energia do combustível [kW].
Eecr	- Energia real entregue pela caldeira na forma de vapor [kW].
Ep real	- Eletricidade realmente produzida [kW].
Er	- Eletricidade requerida pelo processo [kW].
Ev	- Energia na forma de vapor (demanda térmica do processo) [kW].
F	- Fator de anuidade.
Gpel	- Ganho na produção de eletricidade [US\$].
Gpv	- Ganho na produção de vapor [US\$].
H	- Tempo de funcionamento [h/ano].
Ibio	- Investimento no sistema de biodigestores [US\$].
Icbio	- Investimento na construção de biodigestores [US\$/m ³ /dia].
Icp	- Investimento no sistema de controle de poluição [US\$].
Icr	- Investimento na caldeira de recuperação [US\$].
Iea	- Investimento no equipamento auxiliar de geração de vapor [US\$].
litg	- Investimento na instalação de turbinas a gás [US\$/kW].
licr	- Investimento na instalação da caldeira de recuperação [US\$].
Ipc	- Investimento em equipamentos purificação e compressão [US\$].
Isb	- Investimento no sistema de biodigestão aneróbia [US\$].
Iscr	- Investimento no sistema caldeira de recuperação [US\$].
Isgv	- Investimento no sistema de geração de vapor [US\$].
Ispc	- Investimento no sistema de purificação e compressão [US\$].
Istg	- Investimento no sistema turbinas a gás [US\$/kW].

Itg	- Investimento em turbinas a gás [US\$/kW].
k	- Tempo de retorno do investimento [anos].
MCI	- Motor de Combustão Interna.
Mgás	- Vazão mássica dos gases de exaustão da turbina [kg/s].
Mv	- Demanda de vapor do processo [kg/h].
Ncr	- Rendimento da caldeira de recuperação [%].
Nconv	- Rendimento da caldeira convencional [%].
Pág gelada	- Potência produzida de água gelada pelo MCI [kW].
Pag quente	- Potência produzida de água quente pelo MCI [kW].
Pcr ele	- Preço de compra da eletricidade [US\$/kWh].
Pel	- Potência elétrica produzida pelo MCI [kW].
Per	- Perdas [kW].
Pvd ele	- Preço de venda da eletricidade excedente [US\$/kWh].
R	- Taxa de juros [%/ao ano].
SH	- Sistemas Híbridos.
Te	- Temperatura dos gases lançados na atmosfera [°C].
T4	- Temperatura de saída dos gases da turbina [°C].
ΔH	- Variação de Entalpia [kJ/kg°C].

RESUMO

AVELLAR, L. H. N. *A Valorização dos Subprodutos Agroindustriais Visando a Co-geração e a Redução da Poluição Ambiental.* Guaratinguetá, 2001, 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

A contribuição deste trabalho se concentra nos aspectos tecnológicos, mostrando alternativas para a melhoria da qualidade de vida e a busca do desenvolvimento sustentável.

A proposta deste trabalho é apresentar soluções viáveis, de maneira prática, para reduzir a quantidade de resíduos agroindustriais, com poder calorífico considerável, hoje lançados na natureza, e melhorar os rendimentos energéticos através do uso de unidades co-geradoras, diminuindo a poluição ambiental e estabelecendo um elo de ligação entre alguns rejeitos rurais e agroindustriais, os biodigestores como um veículo de transformação destes rejeitos em biocombustível e a utilização deste combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia, montando assim os chamados sistemas híbridos.

São realizados experimentos com rejeitos provenientes de agroindústrias de laticínios e propriedades agrícolas que permitem avaliar a viabilidade (ou não) de produzir combustível alternativo (biogás) em biodigestores a partir de tais rejeitos.

Numa etapa posterior, podem ser encontrados estudos, que têm como objetivo mostrar a real possibilidade de utilização do biogás, como combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia, apresentando como resultados o tempo de retorno do investimento juntamente com o lucro esperado.

Além de ajudar na melhoria da qualidade de vida da população e a manter o homem no campo, a industrialização do produto agrícola dentro da propriedade rural, ou comunidade isolada, seja leite, frangos, peixe, carne, frutas, verduras, etc...., todas utilizando como fonte de energia rejeitos que seriam descartados no meio ambiente, é de grande valia para o tripé energia-sociedade-meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: rejeitos rurais agroindustriais, biodigestão anaeróbia, co-geração de energia, poluição ambiental.

ABSTRACT

AVELLAR, L. H. N. *A Valorização dos Subprodutos Agroindustriais Visando a Co-geração e a Redução da Poluição Ambiental.* Guaratinguetá, 2001, 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

The contribution of this work concentrates on technological aspects, showing alternatives for the improvement of life's quality and looking for the sustainable development.

The proposal of this work is to present, in a practical way, some solutions to reduce the rural and agroindustrial waste, with considerable calorific power, today thrown in the environment, and to improve energy revenues using co-generation units, decreasing the environmental pollution and establishing a connection between some rural and agroindustrial waste, biodigestors, as a vehicle of transformation of these rejects in biofuel, and the use of this alternative fuel in energy co-generation units, setting up this hybrid systems.

Experiments are accomplished with rural and dairy waste that allow to evaluate the viability (or not) of alternative fuel produce (biogas) in biodigestors.

In a posterior stage, can be found studies, that has as objective to show to real possibility of use of the biogas, as alternative fuel in energy co-generation units, showing investment payback with the expected profit.

Furthermore the improvement of the population life's quality and to preserve the farmer in his place, the industrialisation of the agricultural product inside of the rural property, or isolated community, as milk, chickens, fish, meat, fruits, green vegetables, etc....., using waste that would be discarded in the environment as energy source, is great for the tripod energy-society-environment.

KEYWORDS: rural and agroindustrial waste, anaerobic biodigestion, energy co-generation, environmental pollution

CAPÍTULO 1

Aspectos Gerais

1.1 Objeto de Estudo

Em termos macroscópicos, os objetos de estudo desta tese são as problemáticas ambientais no cenário energético-social, com vistas ao desenvolvimento sustentável.

Pode-se considerar que “A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a co-geração e a redução da poluição ambiental”, baseia-se em três linhas de pesquisa: rejeitos agrícolas e agroindustriais, co-geração de energia e poluição ambiental.

Quanto aos rejeitos rurais e agroindustriais a idéia principal é a realização de alguns testes em biodigestores e verificar a real viabilidade de utilização destes rejeitos na produção de biogás, que poderá ser usado como combustível alternativo na geração de energia.

Já para a co-geração de energia realizam-se estudos voltados a atender pequenas demandas energéticas de agroindústrias de pequeno porte, e propriedades rurais, o que acredita-se ser uma contribuição no aspecto social.

No âmbito da poluição ambiental, as pesquisas dividem-se em três frentes: poluição causada pelo uso do biogás, das unidades co-geradoras de energia e a poluição agrícola e agroindustrial. Os resultados oriundos desses estudos podem ser encontrados no texto dessa tese.

1.2 Caracterização do Problema e Proposta do Trabalho

O modo pelo qual os rejeitos dos processos agrícolas e agroindustriais vêm sendo descartados no meio ambiente tem causado graves problemas, atingindo a sociedade como um todo.

O desenvolvimento deste trabalho se concentra nos aspectos tecnológicos, mostrando alternativas para a melhoria da qualidade de vida e a busca do desenvolvimento sustentável.

Um outro problema é a escassez de energia em propriedades rurais, localidades de difícil acesso e comunidades isoladas. Assim, suprir energeticamente esta população através de unidades co-geradoras de energia operando com equipamentos alternativos, e combustível produzido por rejeitos, é de grande valia.

Produzir a própria energia, através de rejeitos, para assim ter a oportunidade de industrializar os produtos agrícolas a baixo custo, ainda dentro da propriedade rural, pode ajudar na melhoria da qualidade de vida e a manter o homem no campo.



Destaca-se a relevância mundial de tais problemas pela apresentação por parte do Banco Mundial de algumas de suas prioridades visando a melhoria das condições de vida da humanidade, como: a redução da pobreza no meio rural, o uso sustentável dos recursos naturais renováveis, o combate à poluição e ao desperdício de recursos e energia, a preservação da diversidade genética de espécies e ecossistemas.

A proposta deste trabalho é apresentar soluções adequadas, de maneira prática, para reduzir a quantidade de resíduos agroindustriais, com poder calorífico considerável, hoje lançados na natureza, e melhorar os rendimentos energéticos através do uso de unidades co-geradoras, diminuindo a poluição ambiental e estabelecendo um elo de ligação entre alguns rejeitos rurais e agroindustriais, os biodigestores como um veículo de transformação destes rejeitos em biocombustível e a utilização deste combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia, montando assim os chamados sistemas híbridos.

Os experimentos com rejeitos provenientes de agroindústrias de laticínios e propriedades agrícolas como o lodo anaeróbio, água de lavagem de tubulação industrial e esterco bovino fresco, permitirão avaliar a viabilidade (ou não) de produzir combustível alternativo (biogás) em biodigestores a partir de tais rejeitos.

Numa etapa posterior, estão os estudos de viabilidade energoeconômica de uso do combustível alternativo em diferentes tipos de unidades co-geradoras de energia.



Tais estudos tem como objetivo mostrar a real possibilidade de utilização do biogás, gerado a partir de rejeitos rurais e agroindustriais, como combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia, apresentando como resultados o tempo de retorno do investimento juntamente com o lucro esperado.

Levando-se em consideração o disposto até o momento, bem como os problemas energético-ambientais que o Brasil vêm enfrentando neste início de milênio, destaca-se a importância do tema.

1.3 Estrutura Geral

Faz parte desta: aspectos gerais; fatos históricos e atualidades; biodigestores: projeto, construção, operação e experimentos; cálculos e projetos; resultados e conclusões.

No capítulo 1, aspectos gerais, faz-se uma breve descrição do objeto de estudo, uma caracterização do problema e a proposta do trabalho como um todo, citando os objetivos da tese em termos gerais.

O capítulo 2, fatos históricos e atualidades, está dividido em três grandes frentes: biodigestores, co-geração de energia, e rejeitos agrícolas e agroindustriais.

O capítulo 3, biodigestores, projeto, construção, operação e experimentos, possui considerações sobre os testes e experimentos realizados.



No capítulo 4, sugere-se algumas propostas e apresentam-se alguns resultados da utilização de alguns rejeitos como combustíveis alternativos em unidades co-geradoras de energia.

Já no capítulo 5, Resultados e Conclusões, através da análise dos resultados obtidos, serão apresentadas as conclusões dos estudos efetuados. Neste capítulo também poderão ser encontradas algumas propostas para estudos futuros como sugestão para a continuidade deste trabalho.



CAPÍTULO 2

Fatos Históricos e Atualidades

Este capítulo está dividido em três partes. Inicialmente faz-se referências e citações à alguns tipos de rejeitos agroindustriais e rurais, como os rejeitos de laticínios e da suinocultura, visando seu aproveitamento como combustível alternativo.

Numa segunda etapa, encontram-se fatos históricos tipos e atualidades dos biodigestores, enfatizando além de suas principais características, seus produtos.

Finalizando o capítulo, são apresentadas considerações sobre co-geração de energia, seus principais fatos históricos e atualidades, as formas de co-gerar energia, alguns ciclos disponíveis para co-geração, e notas de como realizar a escolha de tecnologias.

2.1 Rejeitos Agroindustriais e Rurais

Neste item caracterizam-se alguns tipos de rejeitos rurais e agroindustriais. Enfatizam-se àqueles com grande potencial poluidor e que simultaneamente têm apresentado viabilidade de utilização como combustíveis alternativos ou veículos energéticos.

Referindo-se aos rurais, nesta tese, optou-se por dar prioridade àqueles rejeitos provenientes da criação de bovinos leiteiros, frangos de corte e os da suinocultura, deixando para uma nova oportunidade estudos para os rejeitos agrícolas.

Quanto aos agrícolas, somente destaca-se a existência de inúmeros tipos que merecem maiores estudos visando seu aproveitamento como combustível alternativo. Como exemplo os restos do cultivo de culturas do milho, sorgo, feijão, soja e arroz, dentre outros.

Já com relação aos agroindustriais realizam-se, a seguir, citações àqueles provenientes das fábricas de papel e celulose e sucro-alcooleiras, enfatizando-se os provenientes dos laticínios.

2.1.1 Rejeitos Agroindustriais

Nas últimas décadas do século XX, e neste início de novo milênio, os problemas ambientais, juntamente com a crise energética mundial acrescida pelas estimativas negativistas de esgotamento das reservas primárias, alertaram o mundo para a necessidade de melhoria nos processos industriais.

Surge então uma busca visando utilizar os rejeitos agroindustriais como combustíveis alternativos em processos industriais e em unidades independentes geradoras de energia (geração distribuída ou descentralizada).



Em termos energéticos, os rejeitos dos laticínios, principalmente o lodo anaeróbio e a água de lavagem de tubulação industrial tem destaque entre os demais. Estes também fazem parte dos rejeitos produzidos por agroindústrias localizadas dentro de propriedades rurais, e que visam a pasteurização e ensacamento do leite além da fabricação de alguns derivados, como ricota, manteiga e queijo tipo frescal.

Em termos ambientais o descarte dos rejeitos agroindustriais é considerado como poluição pontual, pois estão concentrados e possuem características conhecidas, uma vez definido o processo industrial. Mas, uma vez proveniente de pequenas agroindústrias, ainda dentro da propriedade agrícola, estes rejeitos juntamente com os agrícolas, passam a ser considerados como poluição difusa.

2.1.1.1 Indústria Sucro-Alcooleira

A indústria sucro-alcooleira no Brasil pode ser dividida entre aquelas que produzem somente álcool etílico e aquelas que produzem açúcar e álcool. É importante caracterizar esta diferença visto que cada uma delas produzirá diferentes tipos de rejeitos.

Segundo Carvalho (1985), em valores médios, na produção exclusiva de álcool, uma tonelada de cana de açúcar fornece 70 litros de álcool, 300 kg de bagaço e 870 litros de vinhoto. Já em fabricas de álcool e açúcar, com uma tonelada de cana consegue-se produzir 90 kg de açúcar, 45 kg de melaço que irão gerar 12 litros de álcool e 156 litros de vinhoto.



Russomano (1987) cita que o bagaço *in natura* possui 50% de umidade e em relação à sua composição química tem-se: 47% de carbono, 6,5% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 2,5% de cinzas. A Tabela 2.1, apresenta a variação do poder calorífico do bagaço de cana em função da umidade.

TABELA 2.1 – Bagaço de Cana – Umidade x Poder Calorífico

Umidade	PCI Inferior	PCI Superior
[%]	[kcal/kg]	[kcal/kg]
0	4202	4552
10	3717	4092
20	3237	3632
30	2747	3172
40	2262	2712
50	1777	2252

Fonte: [Russomano, 1987]

Destaca-se que muitos dos problemas enfrentados na tentativa de utilização do bagaço está relacionada a sua densidade e seu potencial poluidor e com a necessidade de instalação de tecnologias de controle da poluição. Além disso, muitas empresas tem investido em processos de enfardamento, briquetagem e peletização, para o bagaço excedente.

Referindo-se ao vinhoto, Rasovsky (1979) o conceitua como sendo o vinho esgotado durante o processo de destilação e apresenta na Tabela 2.2 sua composição química média para destilarias operando com melaço ou xarope e açúcar diluído. Além disso, cita a existência de uma variação em sua composição em função da matéria prima utilizada, o tipo de destilação e o tipo de fermentação.

TABELA 2.2 – Composição química média do vinhoto

Componentes	Melaço ou Xarope	Açúcar diluído
Sólidos totais	46000 [ppm]	85000 [ppm]
Sólidos totais orgânicos	37000 [ppm]	65000 [ppm]
Sólidos decantáveis	900 [ppm]	4500 [ppm]
Acidez	4500	-
pH	4,5	5
DBO 20°C – 5 dias	12000 [mg/l]	28700 [mg/l]
DBO 20°C – 20 dias	45000 [mg/l]	-

Fonte: [Rasovsky, 1979]

No aspecto ambiental, ressalta-se dentre outros a nocividade do vinhoto devido ao seu teor da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Portanto, estudos voltados ao seu aproveitamento são de grande valia, seja como alimento para o gado, combustível alternativo (biogás), ou ainda como fertilizante na agricultura (biofertilizante).

Silva & Lucas Júnior (1993) citam o potencial de produção de biogás a partir do vinhoto, sendo necessário 1,3 litros de vinhoto para cada litro de biogás produzido.

Assim, levando-se em consideração o descrito por Carvalho (1985), na produção exclusiva de álcool é possível gerar aproximadamente 670 litros de biogás com 1 (uma) tonelada de cana de açúcar. Já em fabricas de álcool e açúcar, essa mesma quantidade de cana é capaz de produzir, a partir do vinhoto, 120 litros de biogás.

Lembra-se que, na última década do século XX e início de novo milênio, vêm sendo desenvolvidas muitas pesquisas nesta área, inclusive com a implantação das novas tecnologias em empresas sucro-alcooleiras. Tais tecnologias visam a utilização dos subprodutos destas indústrias para a geração de energia.

Como exemplo, Coelho (1999), cita o financiamento de um projeto à uma agroindústria sucro-alcooleira, por parte do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, com o objetivo de avaliar e desenvolver tecnologia para a produção de energia a partir da biomassa da cana de açúcar.

2.1.1.2 Indústria de Laticínios

Para efeito de análise, este tópico foi dividido em duas partes: para laticínios de pequeno porte e micro-laticínios. Entenda-se micro-laticínios como uma pequena industrialização ainda dentro da propriedade agrícola. Caracterizam-se laticínios de pequeno porte como aqueles capazes de produzir, já em escala comercial, visando atender no máximo, uma única cidade de médio (ao redor de 100.000 habitantes) ou um conjunto de pequenas localidades e comunidades rurais como muitas espalhadas pelo Brasil.

Como exemplo de tais cidades, estão algumas localizadas na região leste do estado de São Paulo, na Serra do Mar e da Mantiqueira, como Lagoinha, Silveiras, Areias, Bananal, São José do Barreiro, Cunha, Lavrinhas, São Luiz do Paraitinga, Redenção da Serra, Natividade da Serra, Santo Antônio do Pinhal, Penedo, Visconde de Mauá, e outras pequenas comunidades.

Tais cidades caracterizam-se, além de serem pequenas, por localizarem-se em regiões montanhosas onde há uma grande dificuldade de escoamento da produção agrícola, principalmente na época das chuvas.

Assim, os laticínios de pequeno porte ficam restringidos somente ao leite *in natura*, o que significa, o recebimento, análise, a pasteurização do leite, o envase em “saquinho”, e a distribuição e venda nos comércios locais. Como exemplo, a Granja Leiteira da UNESP, Campus de Jaboticabal, que realiza duas ordenhas de 30 (trinta) vacas, com um total médio de 380 litros diários, sendo vendido à comunidade aproximadamente 150 (cento e cinquenta) litros, pasteurizados e ensacados.

Diferentemente, os laticínios de médio porte ficam responsáveis pelo beneficiamento do leite, o que inclui a fabricação de queijos, requeijão, iogurtes, manteiga, ricota e demais derivados.

Quanto aos rejeitos gerados no processo de fabricação dos laticínios de pequeno porte, encontram-se, por exemplo, a gordura, o lodo anaeróbio, a água de lavagem de tubulação industrial, as diferentes águas residuárias de diversos processos de fabricação, como o soro do leite dos queijos, as águas dos vários tipos de iogurte, dentre outros.

Já para os pequenos laticínios estão os resíduos do próprio leite, e as águas de lavagem dos tanques leiteiros e tubulações, incluindo as águas com detergente, cloro e soda cáustica, que sem dúvida contaminam o meio ambiente.

Além disso, o leite *in natura* quando contaminado, impróprio para o uso humano ou de animais, também pode causar vários danos ao meio ambiente.

Como principais contaminantes do leite *in natura* estão os medicamentos e compostos farmacológicos, agentes quimioterápicos, hormônios (Somatotropina bovina), e os endo e ectoparasiticidas, como os piretróides, utilizados no tratamento do carrapato e da mosca do chifre.

Relativamente aos medicamentos antibióticos destacam-se a Penicilina, Cefalosporina, Tetraciclina, Macrolidas, Aminoglicosídeos. Já entre os quimioterápicos encontram-se as Sulfonamidas, Diaminopirimidina, Nitrofuranas e Nitroimidazoles, dentre outros.

2.1.1.3 Indústria de Papel e Celulose

Segundo Silveira (1989), uma fábrica de celulose branqueada de eucalipto gera como subprodutos, para cada 34 kg de pasta celulósica produzida, 10 kg de cascas e 22 kg de resíduos, com diferentes poderes caloríficos. Para cada tonelada de celulose seca ao ar tem-se 294 kg de cascas e 647 kg de resíduos energeticamente disponíveis.



Na Tabela 2.3, Silveira (1989), apresenta a produção diária de uma fábrica de celulose, a produção de lixívia, de cascas de madeira e de resíduos (cavacos). Já na Tabela 2.4 podem ser encontrados os valores dos poderes caloríficos médios dos diferentes tipos de rejeitos.

TABELA 2.3 – Produção diária de celulose e rejeitos

Produção Celulose [TSA/dia]	Lixívia [ton/h]	Cascas [ton/h]	Resíduos [ton/h]
900	47,25	11,03	24,26
950	49,88	11,64	25,61
1000	52,50	12,26	26,96
1050	55,13	12,87	28,31
1100	57,75	13,48	29,66
1150	60,38	14,09	31,01
1200	63,00	14,71	32,35

TSA: toneladas secas ao ar

Fonte: [Silveira, 1989]

TABELA 2.4 – Poder calorífico médio dos rejeitos

Rejeitos	Poder Calorífico Médio [Mcal/ton]
Lixívia ou Licor Negro	3200
Resíduos (cavacos de madeira)	2520
Cascas de madeira	2320

Fonte: [Silveira, 1989]



É importante salientar o aspecto poluidor destes rejeitos, seja através de seu descarte no meio ambiente, mesmo após sistemas de tratamento, ou por meio dos gases tóxicos lançados na atmosfera quando da queima direta em caldeiras, por exemplo.

2.1.2 Rejeitos Rurais

Não somente no Brasil, mas em todo o planeta, pode-se considerar que são inúmeros os tipos de rejeitos agrícolas descartados no meio ambiente, causando efeitos extremamente danosos.

Não se pretende realizar aqui a caracterização de todos os tipos de rejeitos, mas alguns que, em estudos iniciais, apresentam maior viabilidade de utilização como combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia.

Num primeiro item caracterizam-se os rejeitos provenientes dos bovinos leiteiros, em seguida os da criação de frangos de corte, e num terceiro estágio, os dejetos de suínos. Além disso, em todos itens são enfatizadas algumas características poluidoras, bem como a possibilidade de sua redução quando do uso de biodigestores.

Em termos ambientais, considera-se pertencente à poluição difusa os rejeitos provenientes de propriedades agrícolas e agroindústrias caseiras. Apesar de não existir estudos específicos estima-se que 50% da poluição é considerada difusa, sendo os outros 50% creditados à poluição pontual.



Como exemplo de poluição difusa, Johnson & Johnson (1995), citado por Rosa (2000), declara que é estimada em 60 milhões de toneladas por ano a emissão global de metano proveniente da plantação de arroz alagado.

Ainda referindo-se a poluição difusa, Hooda et al (1999), citado por Melo (2000), apresenta-se na Tabela 2.5, as variações da DBO para vários tipos de rejeitos agrícolas e agroindustriais.

TABELA 2.5 – Rejeitos x DBO

Tipos de Rejeitos	DBO [mg/l]
Efluente de Silagens	30000 - 80000
Dejetos de Suínos	20000 – 30000
Dejetos de Bovinos	10000 – 20000
Efluente Líquido Drenado de Dejetos Estocados	1000 - 12000
Água de Limpeza de Sala de Ordenha e Espera	1000 – 5000
Leite	140000
Esgoto Doméstico Não Tratado	300
Esgoto Doméstico Tratado	20 – 60
Água de Rios Limpos	< 5

Fonte: [Hooda et al, 1999]

Quanto maior a demanda oxigênio dos rejeitos descartados nos rios, maior quantidade de oxigênio será consumida das águas dos rios, ocasionando uma diminuição do oxigênio disponível para os peixes, causando em muitos casos sua mortandade.

Segundo Derisio (1992), os testes que analisam o valor da DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio, são realizados a uma temperatura constante e durante um período de incubação também fixo.

Ainda quanto ao aspecto poluidor dos rejeitos agrícolas destacam-se aqueles provenientes de animais devido aos seus agentes patogênicos, doenças e parasitas existentes, como a Salmonelose, Leptospirose, Tuberculose, Brucelose, Listeriose, Tétano, Erisipelas, Colibacilose, Histoplasmosis, Protozoárias, Coccídioses, Toxoplasmose, Ascaridíase e Sarcocistíase, dentre outros.

Uma curiosidade neste início de terceiro milênio, são os dados da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, onde somente 2% das 490 EIA/RIMA (Estudos de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto no Meio Ambiente) existentes, são para projetos agrícolas, Simões (2000).

É importante citar que estudos vêm sendo desenvolvidos visando a caracterização, quantificação e qualificação do potencial poluidor dos rejeitos agrícolas, como exemplo, as pesquisas sobre a percolação dos agentes poluidores dos rejeitos agrícolas no solo.

Justifica-se tais estudos principalmente em regiões como o Vale do Paraíba, onde o lençol freático está muito perto da superfície do solo, facilitando a contaminação das águas.



2.1.2.1 Bovinos Leiteiros

Segundo Amaral (2000), as formas de manejo, incluindo o tipo de instalação e os regimes de estabulação são os verdadeiros responsáveis pela quantidade e qualidade dos dejetos destes animais.

A quantidade de dejetos produzidos por animal por dia, bem como seus teores de matéria seca (MS) e composição química variam principalmente em função do peso do animal, idade, tipo de alimentação, digestibilidade do alimento, quantidade ingerida de água e estação do ano.

Silva (1981) e Benincasa, *et al.* (1991), citam a disponibilidade diária de esterco em função do manejo, para bovinos estabulados, semi e não estabulados, e também o potencial de produção de biogás por animal por dia, Tabela 2.6.

TABELA 2.6 – Manejo - Esterco - Biogás

Manejo	Esterco [kg/dia]	Biogás [m ³ /animal/dia]
Estabulado	30	1,11
Semi-estabulado	15	0,56
Não estabulado	10	0,36

Fonte: [Silva, 1981] e [Benincasa, et al., 1991]

Salientando a contribuição da biodigestão anaeróbia como vetor na redução da poluição ambiental, demonstra-se, através da Tabela 2.7, Acuri (1986), os fatores de destruição de alguns agentes patogênicos do esterco de bovinos durante a digestão anaeróbia, com diferentes temperaturas e tempo de retenção hidráulica (TRH).

TABELA 2.7 – Destruição de agentes patogênicos – Bovinos

Agentes	Temperatura [°C]	TRH [dias]	Remoção [%]
Poliovírus	35	2	98,5
<i>Salmonella sp.</i>	22 – 37	6 – 20	82 – 96
<i>Salmonella typhosa</i>	22 – 37	6	99
<i>Micobacterium tuberculosis</i>	30	-	100
Ascaris	29	15	90
Cistos de parasitas	30	10	100

Fonte: [Acuri, 1986]

2.1.2.2 Frangos de Corte

A criação de frangos de corte, quando consideradas criações de cunho comercial, acontece geralmente em galpões com grande capacidade de alojamento de aves. Como característica específica para este tipo de criação, Santos (2001), cita a utilização de substrato vegetal (serragem de madeira, pó de serra), chamada de cama de frango.

Almeida (1986), relata que o teor de umidade da cama de frango deve situar-se entre 20 e 35%, pois a umidade excessiva pode levar a problemas de intoxicações pelo desenvolvimento de altos teores de amônia, liberada à medida que as bactérias degradam o esterco destas aves.



A Tabela 2.8, mostra uma união de dados apresentados por Santos & Lucas Jr. (1997), com as quantidades de agentes patogênicos presentes nos efluentes da biodigestão anaeróbia e o potencial de produção de biogás em biodigestores tipo batelada, em função da quantidade e tipo de cama na criação de frango de corte.

TABELA 2.8 – Produção de Biogás e agentes patogênicos, tipo Cama

Tipo de Cama	[1420 kgMS]	[1197 kgMS]	A	B	Salmonella
[Tipo de Capim]	Biogás [m ³]	Biogás [m ³]	[g]	[g]	
Napier	354	324	3,3	27,7	Negativo
Napier-Maravalha	297	295	0,0	24,0	Negativo
Maravalha	243	275	3,8	15,0	Negativo

A = Coliformes Fecais; B = Coliformes Totais; MS = Massa Sólida

Fonte: [Santos & Lucas Júnior, 1997]

2.1.2.3 Suinocultura

No Brasil, o estado de Santa Catarina se destaca como um dos maiores produtores de carne e derivados de suínos. Nas últimas décadas muitas empresas se instalaram na região o que acarretou um significativo crescimento econômico-social, bem como um centro de destaque na criação de suínos.

Com o passar dos anos, esta concentração tem ocasionado um grave problema ambiental, em níveis extremamente perigosos para a população de algumas localidades, devido principalmente a quantidade e característica destes dejetos descartados no meio ambiente.

Oliveira (1993), apresenta a produção de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos, Tabela 2.9.

TABELA 2.9 – Produção de Dejetos – Fases de Produção

Fases de Produção	Esterco [kg/dia]	Esterco + Urina [kg/dia]	Dej. Líquidos [litros/dia]
Animais 25 a 100 kg	2,30	4,90	7,00
Porca gestante	3,60	11,00	16,00
Porca em lactação	6,40	18,00	27,00
Macho	3,00	6,00	9,00
Leitões creche	0,35	0,95	1,40

Fonte: [Oliveira, 1993]

Kozen (1983), relata que a quantidade total de resíduos líquidos produzidos por um suíno varia entre 4,9 a 8,5% do peso vivo por dia para animais entre 15 e 100 kg. Relata ainda que a urina é a grande responsável neste processo, uma vez que ela representa 60% da quantidade de água ingerida.

Este mesmo autor, citado por Lucas Júnior (1994), apresenta a composição NPK dos dejetos de suínos em função do sistema de manejo, Tabela 2.10.



TABELA 2.10 – Composição dos Dejetos de Suínos

Sistema de Manejo	Matéria Seca [%]	[kg / Tonelada de dejetos]			
		N Total	N (mineral)	P ₂ O ₅	K ₂ O
Esterco sem cama	18	4,54	2,73	4,08	3,63
Esterco com cama	18	3,63	2,27	3,17	3,63
Liquame fosso de retenção	4	4,08	2,27	3,06	2,15
Liquame tanque oxidação	2,5	2,72	1,36	3,06	2,15
Líquido da Lagoa	1	0,45	0,34	0,23	0,45

Fonte: [Kozen, 1983]

Lucas Júnior (1994), apresenta vários resultados de estudos e testes realizados em biodigestores tipo batelada, contínuos e de fluxo ascendente com leito de lodo, com a utilização de rejeitos da suinocultura (estrume fresco, pré-fermentado e de esterqueiras).

A Tabela 2.11, traz um resumo destes resultados, para biodigestores tipo batelada, sendo ES1 referente ao estrume fresco, ES2 ao estrume pré-fermentado, e ES3 ao estrume fresco seco ao ar.

TABELA 2.11 – Produção de Biogás – Estrume de Suínos

Tempo de Retenção Hidráulica	ES1	ES2	ES3
[dias]	[m ³]	[m ³]	[m ³]
7	0,0087	0,4212	0,0202
14	0,0114	0,1178	0,0005
28	0,0039	0,0836	0,0014
35	0,0302	0,0560	0,0002
42	0,0000	0,0639	0,0020
70	0,0000	0,1246	0,0013
105	0,0000	0,0331	0,1165
133	0,0000	0,0166	0,1525
147	0,0154	0,0090	0,0586
154	0,0210	0,0090	0,0589
161	0,0483	0,0052	0,0718
175	0,0748	0,0024	0,0965
189	0,1589	0,0021	0,0583
196	0,0934	0,0021	0,0800
210	0,1798	0,0014	0,0543
217	0,1143	-	0,0373
231	0,0793	-	0,0175
245	0,1189	-	0,0122
252	0,0796	-	0,0106
Total	1,5044	1,8809	1,8860

Fonte: [Lucas Júnior, 1994]



2.2 Fatos Históricos, Tipos e Atualidades dos Biodigestores

Os biodigestores são instalações operacionais destinadas a produzir gás combustível (biogás), e adubo orgânico (biofertilizante). Além de seus produtos, os biodigestores destacam-se principalmente como redutores dos agentes poluentes ambientais, contribuindo em muito para o saneamento ambiental.

2.2.1 História dos Biodigestores

Na realidade, a história dos biodigestores não começou com a construção da primeira instalação operacional destinada à produção de gás combustível para um hospital em Bombaim, Índia, datada de 1857. Um primeiro fato ocorreu com a descoberta de metano como resultado da decomposição de restos vegetais em ambientes fechados, realizada por Alessandro Volta, em 1776, na Itália (Nogueira, 1992).

Nesta mesma época, bases teóricas experimentais, no tocante à biodigestão anaeróbia foram estabelecidas por vários pesquisadores em diferentes países como Fisher e Scharader, na Alemanha e Grayon, na França. Mas a principal contribuição para o tratamento anaeróbio de esgotos residenciais foi realizada na Alemanha por volta de 1920, por Karl Imhoff, que desenvolveu o Tanque biodigestor Imhoff.

Apesar disso, o grande avanço ocorreu em 1950, no interior da Índia, com o modelo de biodigestor indiano. Assim, quase meio milhão deles foram instalados com o objetivo de tratar o esterco, obter gás combustível e fertilizante.

A China, no auge da Guerra Fria, nas décadas de 50 e 60, investiu em uma política de descentralização energética, daí a busca por uma auto-suficiência em suas pequenas vilas. Assim, em 1972, os biodigestores chineses atingiram seu cume, com a instalação de aproximadamente 7,2 milhões de unidades.

No Brasil, só após os primeiros “choques do petróleo” em 1973, com a busca de novas “alternativas energéticas”, os biodigestores se alavancaram com o “Projeto Biogás” (projeto de difusão do biogás no meio agrícola brasileiro), lançado em 1977 pela EMATER (Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural), que possuía como objetivo implantar cerca de 9000 unidades.

Tal projeto, apesar de ter implantado mais de 3000 biodigestores em propriedades rurais, não atingiu seus objetivos, devido principalmente à insuficiência de investimentos do governo, ao agravamento da política governamental e amenização da crise do petróleo de tal época.

Além disso também houveram influências negativistas, através da adoção lenta e difícil do meio rural, devido a mentalidade do homem do campo, e pela ausência de unidades biodigestoras comerciais já prontas para uso, fatos que continuam a acontecer neste início de terceiro milênio.

A Tabela 2.12, apresenta alguns fatos históricos dos biodigestores pelo mundo, a partir do descrito por Nogueira (1992), bem como algumas de suas mais recentes atualidades.

TABELA 2.12 – Fatos Históricos dos Biodigestores

Data	Alguns Fatos Históricos
1776	- Alessandro Volta descobriu gás metano como resultado da decomposição de restos vegetais em lugares fechados.
1806	- Humprey Davy encontra gás rico em carbono e dióxido e carbono como resultado da decomposição de animais mortos.
1857	- Construção da primeira instalação operacional destinada à produção de gás combustível.
1920	- Desenvolvimento do Tanque Biodigestor Imhoff.
1950	- Aparecimento do Biodigestor Indiano.
1972	- Surge o Biodigestor Chinês.
1977	- Início do projeto “Biogás”.
1983	- Instalação de 3000 biodigestores no Brasil.
1999	- Nepal – Programa de Energia no Meio Rural - Biodigestores

2.2.2 Processo de Biodigestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é caracterizado pela ausência de ar, e pode ser dividido em três etapas principais: a Liquefação, a Formação de Ácidos e Metanogênese.

Numa primeira etapa a matéria orgânica, em forma sólida, é dissolvida em água de modo que possa vir a ser digerida pelas bactérias formadoras de ácidos.

Na Formação de Ácidos, segunda etapa, aparece o ácido acético, o propiônico e o butírico, como também a liberação de dióxido de carbono e hidrogênio, como pode ser observado na Figura 2.1.

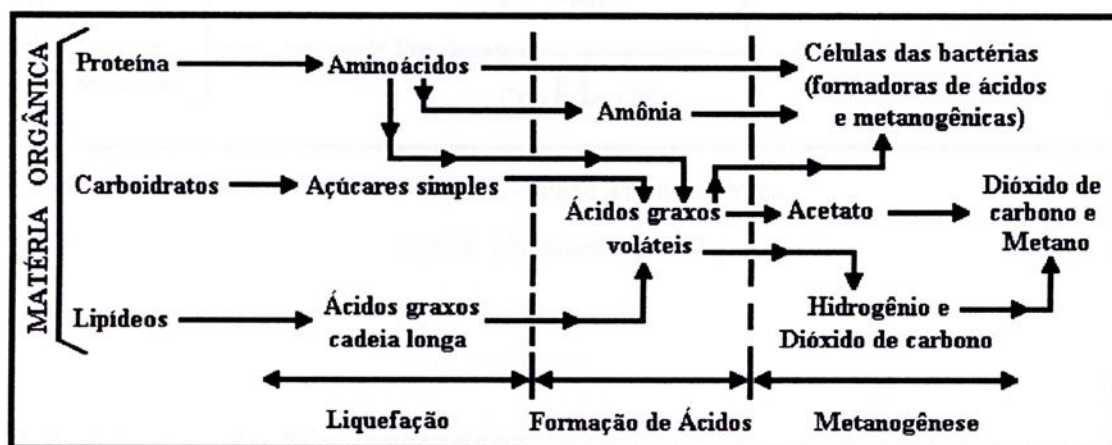


FIGURA 2.1 – Seqüência simplificada da digestão anaeróbica

Fonte: [Nogueira, 1992]

As bactérias formadoras de ácidos são bem resistentes, capazes de suportar mudanças súbitas das condições de alimentação e do ambiente externo, além de possuir enzimas que agem sobre as proteínas e aminoácidos, liberando sais de amônia, únicas fontes de nitrogênio aceitas pelas bactérias metanogênicas (Nogueira, 1992).

No terceiro estágio, metanogênese, Figura 2.2, as bactérias metanogênicas começam seu trabalho utilizando os produtos da fase de formação de ácidos convertendo-os em gases, metano e dióxido de carbono.

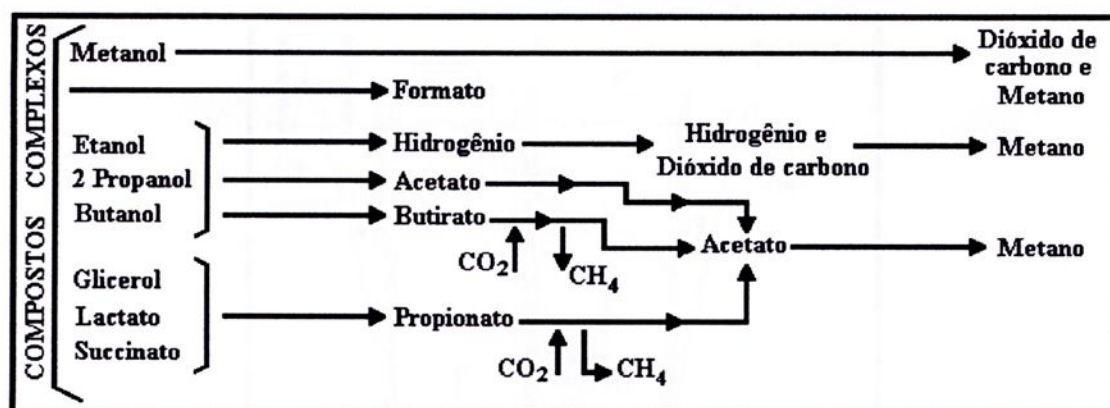


FIGURA 2.2 – Fase Metanogênica

Fonte: [Nogueira, 1992]

2.2.3 Tipos de Biodigestores

Na atualidade são inúmeros os tipos de biodigestores espalhados pelo mundo. Dentre tais, destacam-se alguns como os biodigestores do tipo batelada, os tanques sépticos, os rurais, os de grande porte, os filtros anaeróbios e ainda os biodigestores em leito fluidizado.

2.2.3.1 Biodigestores Rurais

Os biodigestores rurais podem ser caracterizados substancialmente devido à sua simplicidade de construção, operação e baixo custo. Entre os rurais estão os modelos paquistanês, o tailandês, o coreano, o filipino, o de deslocamento horizontal, além daqueles que tem sido mais amplamente implantados, os modelos indiano e chinês, Figuras 2.3 e 2.4, respectivamente.

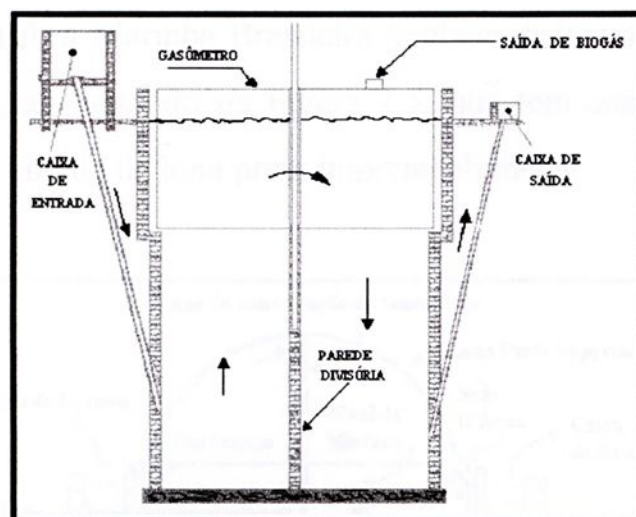


FIGURA 2.3 - Biodigestor Modelo Indiano

Fonte: [Benincasa, et al., 1991]

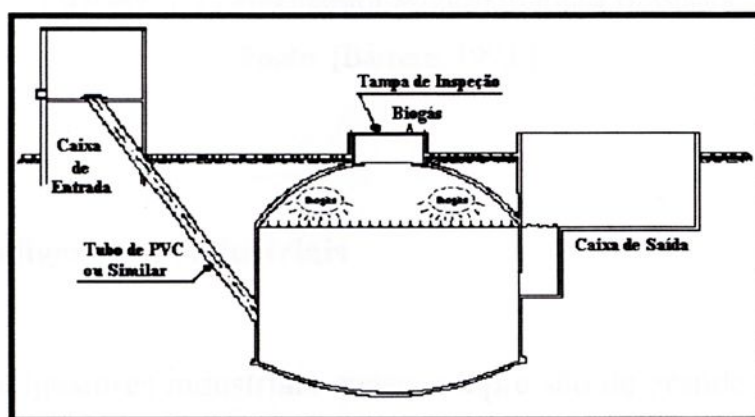


FIGURA 2.4 - Biodigestor Modelo Chinês

Fonte: [Benincasa, et al., 1991]

Quanto ao funcionamento, ambos, indiano e chinês utilizam a ação gravitacional. Em termos de circulação interna, o modelo indiano caracteriza-se por ser bem determinado, Figura 2.3, já no modelo chinês, o deslocamento ocorre pelo aumento da pressão interna do biogás (princípio da prensa hidráulica), Figura 2.4.

No Brasil, a Marinha Brasileira também desenvolveu um modelo de biodigestor, apresentado na Figura 2.5, que tem como característica específica uma cúpula de lona preta impermeabilizada.

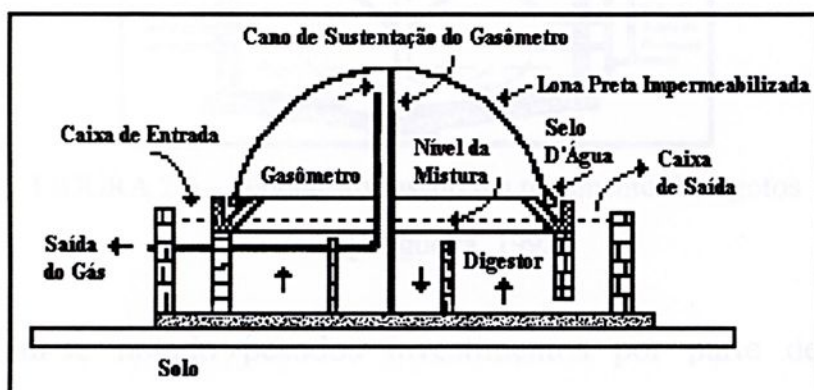


FIGURA 2.5 - Biodigestor Modelo Marinha Brasileira

Fonte: [Barrera, 1993]

2.2.3.2 Biodigestores Industriais

Biodigestores industriais quase sempre são de grande porte, mas o inverso, ou seja, biodigestores de grande porte nem sempre podem ser considerados industriais.

Com relação aos de grande porte, encontram-se, entre outros, o de contato anaeróbio e aqueles utilizados em tratamento de esgotos, Figura 2.6.

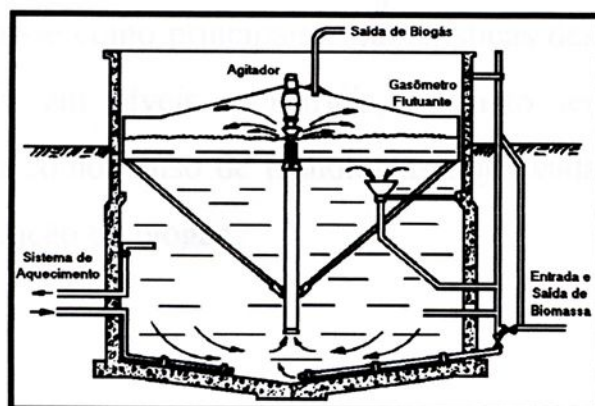


FIGURA 2.6 – Biodigestor usado em tratamento de esgotos

Fonte: [Nogueira, 1992]

Têm-se notado pesados investimentos por parte de algumas indústrias, no intuito de desenvolver alternativas para eliminar seus rejeitos e tentar aproveitá-los como fonte energética. Dentre tais empresas, vêm-se destacando as sucro-alcooleiras e as do setor de papel e celulose, com a utilização de bagaço de cana, cascas de madeira e lixívia para a produção de energia alternativa.

A Figura 2.7 apresenta o Biodigestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente com Leito de Lodo (UASB, *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), como um exemplo típico de biodigestor utilizado por tais indústrias, que também é utilizado no tratamento de esgotos.

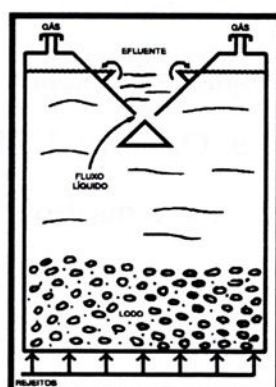


FIGURA 2.7 – Biodigestor com Leito de Lodo (UASB)

Fonte: [Lucas Júnior, 2000]

Destacam-se como principais características destes biodigestores, quando utilizado em níveis industriais, o baixo tempo de retenção hidráulica, assim como o uso de tecnologias objetivadas ao controle e à melhoria da produção de biogás.

2.2.4 Biofertilizante

O biofertilizante é o efluente de um biodigestor, sem odor e com grande poder na melhoria das condições do solo, no que diz respeito à acidez e microorganismos. Além disso, existe a possibilidade de utilização destes rejeitos na ração animal e diretamente para alimentar peixes.

O biofertilizante propriamente dito não possui as mesmas características dos fertilizantes minerais comuns, no tocante à adubação do solo. Na verdade, o biofertilizante funciona como um corretor da acidez do solo, equilibrando o pH, favorecendo a proliferação de microorganismos úteis à terra.

Segundo Santos (2001), os valores médios dos teores de NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) encontrados no biofertilizante a partir da biodigestão de dejetos da criação de frangos de corte (cama de frango) foram em média de 2,27% N, 1,46% P_2O_5 e 5,71% K_2O na matéria seca.

Diversas pesquisas mostram a real eficácia do biofertilizante para a agricultura, como os casos citados por Barrera (1993), que mostram o aumento da produtividade para o milho e para o arroz-sequeiro.



2.2.5 Biogás

Segundo Magalhães (1986), o Biogás é um gás resultante, da fermentação anaeróbia de resíduos vegetais, e dejetos de animais, incluindo o dos humanos, isto é, da degradação da matéria orgânica em condições adequadas de umidade, temperatura e acidez.

Silva & Lucas Júnior (FCAV-UNESP), citam que o biogás produzido em biodigestores é constituído basicamente de 60 a 70% de metano (CH_4), e 30 a 40% de dióxido de carbono (CO_2), além de traços de oxigênio (O_2), hidrogênio (H_2), e ácido sulfídrico (H_2S).

Outra importante observação é o fato do biogás se tornar mais leve que o ar quando o teor de metano no biogás ultrapassa os 75%, como pode ser verificado na Tabela 2.13.

TABELA 2.13 – Características do Biogás

Composição Química	Peso Específico	Poder Calorífico
Biogás	[kg/m^3]	Inferior [kcal/kg]
10% CH_4 , 90% CO_2	1,8393	465,43
40% CH_4 , 60% CO_2	1,4643	2.338,52
60% CH_4 , 40% CO_2	1,2143	4.229,98
65% CH_4 , 35% CO_2	1,1518	4.831,14
75% CH_4 , 25% CO_2	1,0268	6.253,01
95% CH_4 , 5% CO_2	0,7768	10.469,60
99% CH_4 , 1% CO_2	0,7268	11.661,02

A Tabela 2.14 apresenta, a título comparativo, o poder calorífico de vários tipos de combustíveis. Ressalta-se para esta tabela o aspecto ambiental e a possível poluição quando da queima destes combustíveis.

TABELA 2.14 – Poder Calorífico Inferior - Combustíveis

Combustíveis	PCI [kcal/kg]
Biogás	6200 (a)
Lenha	3600 (b)
Álcool	6700
Bagaço de Cana de Açúcar	3700 (c)
Carvão Vegetal	7000
GLP	11900
Diesel	10900
Óleo Combustível 1A	10400
Nafta	11000
Carvão Energético CE5200	5200

(a) 74,28% metano; (b) 25% umidade; (c) 10% umidade

Fonte: [Carvalho, 1985]

2.2.5.1 Poluição do Biogás

O biogás poderá ser inviável e agressivo ao meio ambiente, dependendo fundamentalmente de suas características químicas e de como for utilizado.



Levando-se em consideração sua composição média, e que o processo de queima desse biogás acontece com a utilização do ar atmosférico como oxidante, poderão existir vários tipos de poluentes nos gases de exaustão como o SO_x , NO_x , e o CO , por exemplo.

A quantidade de poluentes, bem como suas características, dependem fundamentalmente da composição química do biogás a ser utilizado e das condições atmosféricas locais.

Apesar disso, o biogás destaca-se por ser considerado limpo, frente a outras fontes de tipos de combustíveis, principalmente após passar através de sistemas de purificação. Ou seja, em geral, a poluição causada pelo biogás é muito menor que a de outros tipos de combustíveis, como com o carvão, a lenha, o diesel e o bagaço da cana de açúcar quando queimados diretamente.

Dependendo das condições atmosféricas, esses poluentes poderão proporcionar a formação da chuva ácida, e do efeito estufa, por exemplo. Além destes, também pode ocorrer o *smog* (poluição fotoquímica), que causa a degradação da vegetação.

Resumidamente, a Chuva Ácida é formada pela reação atmosférico do SO_2 , NO_x , e HCl , com partículas de água presente no ar, contaminando as águas e destruindo florestas e plantações. Já o Efeito Estufa possui como contribuidores para sua formação o CFC, CO_2 , CH_4 as poeiras, que, juntamente com a umidade presente no ar, e na presença de condições atmosféricas favoráveis, causam um aquecimento na baixa camada da atmosfera terrestre.



Referindo-se aos efeitos sobre a saúde do homem, Derisio (1992), cita que o NOx irrita o aparelho respiratório, reduz a função pulmonar, e aumenta os riscos de infecções virais. Além disso, pode causar efisema, anemia e câncer nos pulmões.

Como exemplo, a região do Vale do Paraíba, por estar localizada entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira, devido às suas condições geográfica e atmosférica, possui dificuldades na dispersão dos poluentes, aspecto que faz com que os danos sejam agravados, sendo muito prejudiciais ao meio ambiente e à população local.

Ainda sobre a poluição ambiental, não se pode deixar de relatar que neste final de século, uma das principais ênfases em matéria de emissões de gases danosos ao meio ambiente na atmosfera está relacionada às emissões de metano proveniente das culturas alagadas de arroz e dos ruminantes.

A Environment Europea Agency (1999), apresenta em relação ao meio ambiente, a tendência de desenvolvimentos desfavoráveis até o ano de 2010, para as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e para mudança de clima, e em matéria de lixo, biodiversidade, substâncias tóxicas e degradação do solo.

Esta mesma agência cita também que as emissões de CO₂ na União Européia caíram 1% em 1996 e se estabilizaram no ano 2000 nos patamares de 1990. No Protocolo de Kyoto a União Européia concordou em reduzir as emissões de CO₂ em 8%, até 2008-2012. Todavia o cenário base, projeta para a União Européia, um aumento de 6% até 2010, no total das emissões dos gases que provocam o efeito estufa.

No tocante a poluição ambiental, um outro aspecto é com relação a poluição das águas e do solo, causado pelos rejeitos agrícolas e agroindustriais descartados diretamente no meio ambiente, como os derramamento nos rios e a percolação de contaminantes no solo podendo atingir o lençol freático principalmente em regiões onde estas águas encontram-se muito perto da superfície do solo como é o caso do Vale do Paraíba.

Neste aspecto enfatiza-se Kozen (1983), que cita a biodigestão anaeróbia como o processo mais eficiente no aproveitamento para a produção de biogás (combustível alternativo) e também na redução do potencial poluidor e de contaminação dos dejetos.

2.2.5.2 Purificação e Compressão de Biogás

Uma das alternativas utilizadas para reduzir e tentar evitar ao máximo este tipo de poluição ambiental, bem como tentar viabilizar a utilização deste combustível alternativo, é a adoção de sistemas capazes de purifica-lo e comprimi-lo. Tais sistemas são chamados como unidades de purificação e compressão.

Para a utilização do biogás no ramo automotivo, mesmo após este ter passado por tais unidades, torna-se necessária a realização de algumas adaptações dependendo do ciclo de funcionamento do motor (Otto ou Diesel).



A Figura 2.8 apresenta um fluxograma da estação de biogás automotivo a baixa pressão da UNESP/Jaboticabal. Já a Figura 2.9 mostra a fotografia desta estação, a qual trabalha em duas etapas: purificação e compressão.

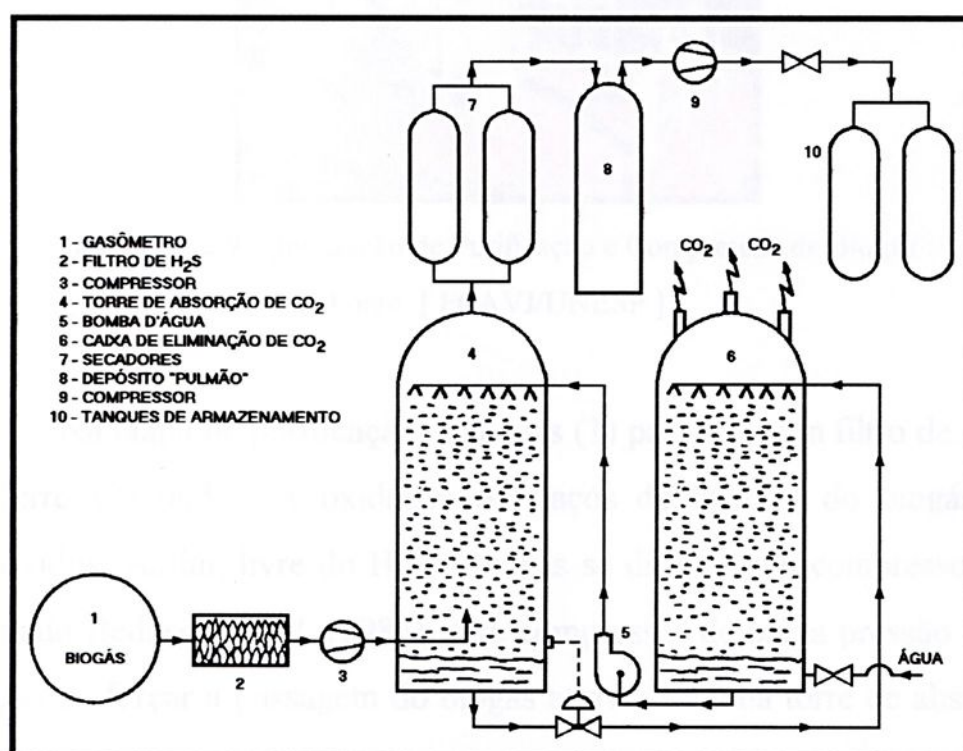


FIGURA 2.8 – Estação de Purificação e Compressão de Biogás

Fonte: [Beduschi, *et al*, 1986]



FIGURA 2.9 – Instalação de Purificação e Compressão de Biogás

Fonte: [FCAVJ/UNESP]

Na etapa de purificação, o biogás (1) passa por um filtro de óxido de ferro (2) onde por oxidação os traços de enxofre do biogás são removidos. Assim, livre do H_2S o biogás se dirige a um compressor (3). Segundo Beduschi *et al.* (1986), este compressor de baixa pressão tem a função de forçar a passagem do biogás através de uma torre de absorção de CO_2 (4).

Na torre de absorção, água pressurizada é pulverizada em pequenas gotículas para assim facilitar a absorção do CO_2 . Este processo de adsorção física que implica na dissolução do gás carbônico na água irá formar o ácido carbônico (H_2CO_3), que vai da torre para a caixa de eliminação (6), onde o CO_2 é liberado para a atmosfera.

A finalidade desta caixa (6) é justamente realizar o inverso da torre de absorção, separar a água do gás carbônico. Após esta fase, um conjunto moto-bomba (5) recalca a água remanescente na caixa para a torre de absorção, para ser pulverizada novamente, assim fechando o sistema de purificação.

A segunda etapa, isto é, o processo de armazenamento, faz com que o metano purificado passe através de secadores à base de carvão ativado, cuja finalidade é remover a umidade adquirida na torre de absorção de CO_2 .

Já seco, o metano purificado é armazenado em um depósito (pulmão). Tal depósito constituiu-se na realidade de dois cilindros onde o biogás é armazenado a aproximadamente 196 [kPa]. Em seguida um segundo compressor engarrafa o biogás purificado nos tanques de armazenamento na pressão final de 1667 [kPa], concluindo o sistema de compressão.

A Tabela 2.15, baseada em Beduschi *et al.* (1986), apresenta também algumas características dos equipamentos utilizados nos sistemas de purificação e compressão de biogás. Os dados foram extraídos da estação de biogás automotivo a baixa pressão da UNESP – Campus de Jaboticabal, que tem a capacidade de processamento de $5 \text{ m}^3/\text{h}$.

TABELA 2.15 – Características da Estação de Biogás Automotivo

Equipamentos	Características
Remoção do H_2S	1 Tubo PVC; altura 0,60 m; diâmetro 0,17m; pedra britada 0,15m; palha de aço enferrujada 0,45m.
Remoção do CO_2	Lavadores de gases; tubo aço; altura 3,00 m; diâmetro 0,185 m; 01 compressor a 392 kPa; 01 conjunto moto-bomba de 2,24 kW (3,0 cv).
Secadores	02 Tubos PVC; altura 0,60m; diâmetro 0,17m.
Compressão	04 Cilindros de $0,108\text{m}^3$; pressão 196 e 1667 kPa; 01 compressor de 2,24 kW (3,0 cv).



Silva & Lucas Júnior (FCAV/UNESP), citam que um dos maiores problemas no armazenamento biogás purificado (95% de metano) é que este não se liquefaz a baixa pressão e temperatura, como acontece com o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo).

Segundo Brito (1985), existem três principais técnicas para a estocagem e armazenamento do biogás, a Criogenia, o armazenamento a Alta Pressão e o armazenamento por Adsorção. A Tabela 2.16 apresenta, a título comparativo, algumas das características de cada técnica.

TABELA 2.16 – Técnicas de Compressão de Biogás

Características	Criogenia	Alta Pressão	Adsorção
Temperatura	113 [K]	Ambiente	Ambiente
Pressão	196 [kPa]	19613 [kPa]	1667 [kPa]
Densidade (a)	0,40 [kg/m ³]	0,16 [kg/m ³]	0,5 [kg/m ³]
Razão de Estocagem (b)	1 [kg/Nm ³]	6,50 [kg/Nm ³]	13 [kg/Nm ³]

(a) quantidade de gás/volume físico, (b) peso do tanque/quantidade estocada

Fonte: [Brito, 1985]

Silva & Lucas Júnior (FCAV/UNESP), citam que num cilindro de 120 litros hidráulicos, utilizando-se adsorção comum (adsorvente adequado), consegue-se armazenar metano num cilindro equivalente a apenas 5% do peso total (7,0 m³ de metano adsorvido), sendo que o peso do cilindro e o peso do adsorvente representam 35% e 60% do peso total, respectivamente.

Para o armazenamento do metano purificado a Alta Pressão, é importante ressaltar o aspecto da dificuldade e do custo deste processo.

2.3 Fatos Históricos e Tipos de Co-geração

A palavra co-geração significa gerar simultaneamente, assim, um dos principais e mais aceitos conceitos para a co-geração de energia é de que ela está diretamente associada a geração simultânea combinada de dois ou mais tipos de energia (energia térmica e eletromecânica) a partir de um tipo de fonte energética.

Tem-se que a co-geração de energia se sobressai sobre outros tipos de formas de geração de energia, devido ao aspecto de aproveitamento dos rejeitos energéticos passíveis de uso e que são descartados no meio ambiente.

Silveira (1994), cita como exemplo comparativo que unidades co-geradoras podem atingir rendimentos globais na ordem de 50 a 90%, ao passo que os rendimentos das unidades termelétricas convencionais situam-se ao redor dos 34%.

Alguns exemplos típicos de empresas que permitem o uso da co-geração são: fábricas de cerveja, indústria plástica, campus universitário, plataformas de petróleo, olarias, agroindústrias em geral, indústrias de vidro e de incineração de dejetos.

Em termos agroindustriais, por exemplo, as sucro-alcooleiras são possuidoras de significantes demandas térmicas e elétricas, ao passo que as fábricas de cerveja demandam grande quantidade de vapor (energia térmica) para o processo industrial.



2.3.1 A Co-geração de Energia

Apesar da co-geração de energia ter seu início na última década no Brasil, foram encontradas ilustrações alemãs datadas de 1350 referentes a sistemas de elevação a partir de gases quentes (*smokejack*). Balestieri (1997), Figura 2.10.

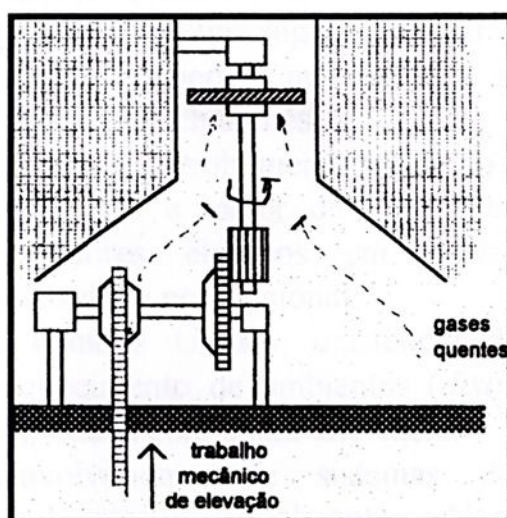


FIGURA 2.10 – Sistema de elevação a partir de gases quentes (*smokejack*).

Fonte: [Balestieri, 1997]

A Tabela 2.17 mostra sucintamente alguns dos principais fatos históricos sobre co-geração, envolvendo conceitos, dados, curiosidades, como a descrição do inglês John Evelyn, em 1685, sobre um sistema de elevação a partir de gases quentes (*smokejack*) instalado em sua residência a pelo menos cem anos (Balestieri, 1997).

TABELA 2.17 – Principais Fatos Históricos da Co-geração

Data	Alguns Fatos Históricos
1350	- Ilustrações alemãs sobre sistemas de elevação a partir de gases quentes (<i>smokejacks</i>).
Século XIV	- Introdução dos <i>smokejacks</i> , sendo basicamente uma "turbina", movida por ar quente que sobe uma chaminé, na Europa a partir das ilustrações alemãs.
Século XVI	- Diversas referências sobre o emprego dos <i>smokejacks</i> na Alemanha e na Itália.
1685	- O inglês John Evelyn descreve um <i>smokejack</i> instalado em sua residência há mais de cem anos.
1758	- Benjamin Franklin sugeriu o uso de <i>smokejack</i> para produzir energia no verão a partir da ventilação natural das chaminés.
1870	- Início do desenvolvimento moderno da co-geração, com máquinas a vapor de eixo alternativo acopladas a geradores elétricos em áreas urbanas de alta densidade populacional.
1909	- Nos Estados Unidos, existência de 150 sistemas de aquecimento de ambientes (<i>district heating</i>), muitos operados com baixa eficiência.
1920-1930	- Desenvolvimento de sistemas de aquecimento de ambientes, principalmente no Norte Europeu.
1970-1980	- Grande impulso à co-geração devido à crise do petróleo.
1978	- Publicação nos Estados Unidos do PURPA (<i>Public Utilities Regulatory Policy Act</i>). O PURPA abriu novos horizontes na medida que introduziu a noção de competição em mercado aberto de energia elétrica.
1990	- Início da Co-geração no Brasil.
1993	- No Brasil, o Decreto 915 autorizando a formação de consórcios para a geração de energia elétrica.
2000	- Resolução da Aneel sobre qualificação de centrais co-geradoras de energia.

2.3.2 Formas de Co-gerar Energia

Segundo Balestieri (1994), as configurações das centrais co-geradoras de energia podem ser divididas em três grandes grupos: aquelas que utilizam ciclo Brayton, as que operam com ciclos combinados, e as que usam os ciclos Rankine.

Já quanto ao regime de operação estes podem ser divididos em dois grandes grupos, os regimes “*bottoming*” e os “*topping*”. Os “*bottoming*”, Figura 2.11, caracterizam-se por priorizar a demanda térmica (água quente ou vapor utilizado na industrialização do produto rural) sendo deixado a posterior a demanda elétrica.

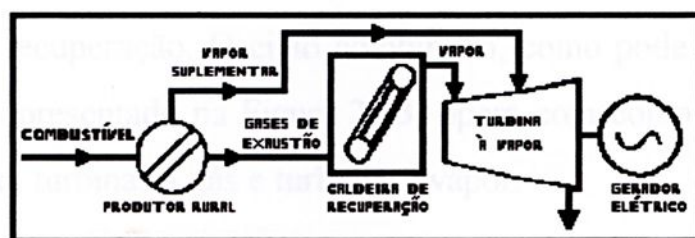


FIGURA 2.11 – Regime “*Bottoming*”

Em contraste, o regime “*topping*”, Figura 2.12, tem como primeiro objetivo o fornecimento da demanda elétrica, sendo deixado em segundo plano a demanda térmica. Este tem se destacado como aquele que possui maior número de unidades em operação.

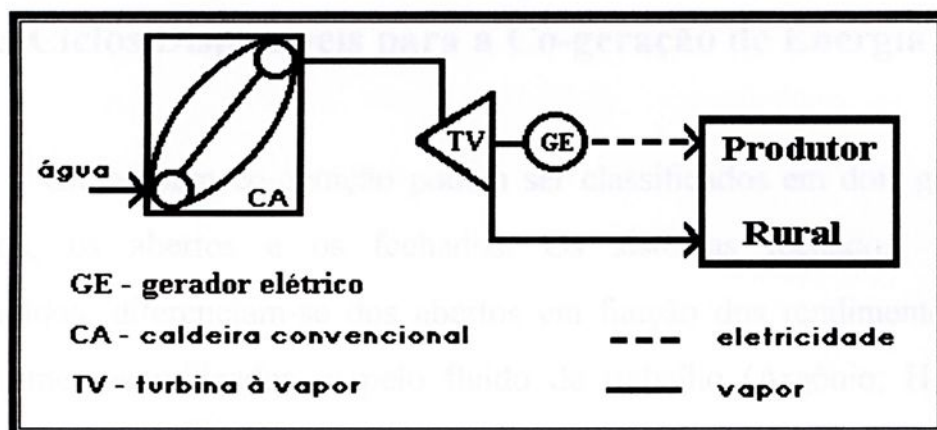


FIGURA 2.12 – Ciclo Rankine regime "Topping"

As diferenças básicas entre tais ciclos são: O Rankine caracteriza-se pela existência de caldeiras convencionais atreladas a turbinas a vapor de Condensação e Extração ou de Contrapressão. Já o Brayton utiliza compressor, câmara de combustão, turbinas a gás e caldeiras de recuperação. O ciclo combinado, como pode ser observado no exemplo apresentado na Figura 2.13, opera com compressor, câmara de combustão, turbinas a gás e turbinas a vapor.

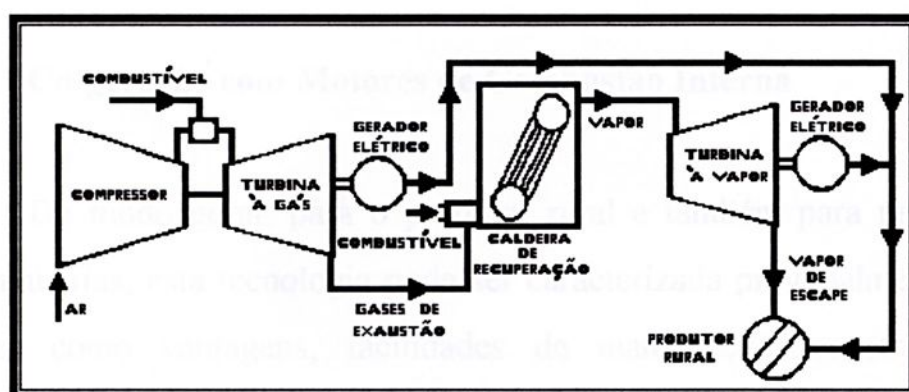


FIGURA 2.13 – Unidade de co-geração com ciclo combinado

2.3.3 Ciclos Disponíveis para a Co-geração de Energia

Ciclos para co-geração podem ser classificados em dois grandes grupos, os abertos e os fechados. Os sistemas fechados, menos difundidos, diferenciam-se dos abertos em função dos rendimentos dos equipamentos utilizados, e pelo fluido de trabalho (Argônio, Hélio, e outros gases de baixo peso molecular).

Dentre as possíveis configurações de centrais de co-geração de energia destacam-se os ciclos a gás e a vapor, os combinados, e os motores de combustão interna.

Em turbinas a gás a queima do combustível acontece em uma câmara de combustão. O ar se aquece causando uma expansão a qual é responsável pelo acionamento das pás da turbina produzindo assim a energia mecânica no eixo, que irá acionar um gerador elétrico. Após esta etapa, os gases de exaustão saem da turbina através dos bocais.

2.3.3.1 Co-geração com Motores de Combustão Interna

De modo geral, para o produtor rural e também para pequenas agroindústrias, esta tecnologia pode ser caracterizada principalmente por possuir como vantagens, facilidades de manutenção, construção e instalação.

Já para agroindústrias de grande porte, tal sistema fica inviabilizado pela limitação construtiva destes motores automotivos com relação à potência produzida, uma vez que tratam-se de motores direcionados ao uso veicular e não como produtor de energia térmica e/ou eletromecânica.

Informa-se porém a existência no mercado internacional, de motores de combustão interna específicos para geração de energia, inclusive para empresas de grande demanda energética, e que não são utilizados no ramo automotivo.

A Figura 2.14 apresenta esta tecnologia alternativa que visa a possibilidade de aproveitar a energia mecânica destes motores para acionamento de geradores elétricos e/ou compressores. Os calores residuais da água de refrigeração, do óleo de lubrificação e dos gases de escape podem ser aproveitados para aquecimento de água e geração de vapor, visando atender a demanda térmica do produtor rural.

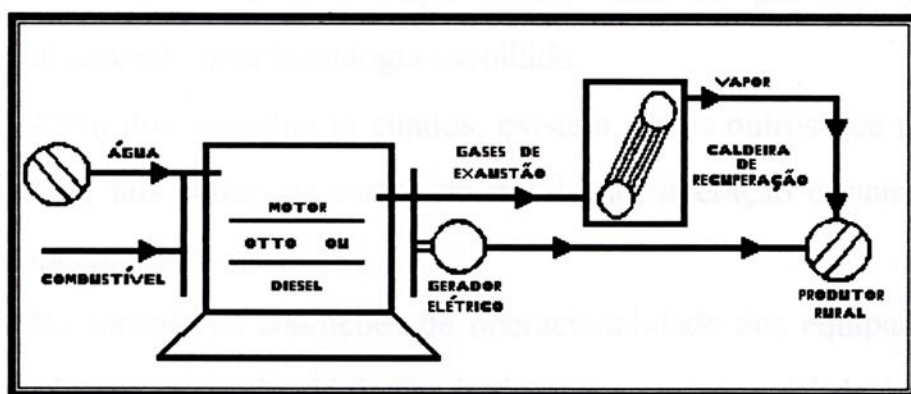


FIGURA 2.14 – Unidade de co-geração com Motor de Combustão Interna

Um dos grandes cuidados no projeto destas tecnologias referem-se aos tipos de gases que são lançados na atmosfera, que muitas vezes, dependendo das características do combustível utilizado, podem vir a ser altamente poluentes.

2.3.4 Escolha de Tecnologias

A efetivação da escolha da tecnologia a ser utilizada em cada aplicação deve ser analisada de forma cuidadosa e criteriosa, avaliando e quantificando vários critérios, como os citados por Gurney (1988), e Gorges (1982 e 1983): a razão potência/calor gerada pelo equipamento; o consumo específico de vapor (*steam rate*), do consumo de combustível e de calor (*heat rate*); a eficiência termodinâmica do equipamento; a disponibilidade e confiabilidade do equipamento; a variação da carga diária, semanal e/ou mensal; o consumo específico e a disponibilidade de obtenção de combustível a baixo custo; além do possível impacto ambiental causado pela tecnologia escolhida.

Além dos aspectos já citados, existem vários outros que também influenciam, tais como, os custos de instalação, operação e manutenção dos equipamentos.

No tocante as condições de operacionalidade dos equipamentos, ocasionada pela variação de demanda do processo industrial destacam-se algumas estratégias operacionais como as apresentadas por Balestieri (1994), a seguir:



- Operação em paridade térmica,
- Operação em paridade elétrica,
- Operação econômica,
- Operação em cargas parciais.

A operação em paridade térmica trata-se de atender toda a demanda de calor do processo industrial. Já a paridade elétrica baseia-se no suprimento da energia elétrica.

A operação em paridade econômica está relacionada à operação dos equipamentos de forma que estes consumam a menor quantidade de combustível possível.

A operação em cargas parciais refere-se ao funcionamento abaixo da capacidade nominal dos equipamentos, mesmo que isto ocasione um maior consumo específico.

Com relação ao possível impacto ambiental causado pela co-geração de energia está a poluição atmosférica através da emissão de gases de exaustão e dos resíduos utilizados. Nestes gases, destacam-se como poluentes, o NO_x, o SO₂, o CO-CO₂, os Materiais Particulados, os Componentes Orgânicos Voláteis (Dioxinas e Furanos), dentre outros.

Apesar de seu relativo potencial poluidor, a co-geração de energia continua a sobressair sobre outras tecnologias (termelétricas convencionais e nucleares) devido principalmente ao seu alto rendimento, o que ocasiona um menor custo específico (US\$/kWh).



Em termos ambientais, a co-geração de energia, como as termelétricas convencionais, permitem a incorporação de tecnologias capazes de controlar e reduzir para níveis aceitáveis as emissões de poluentes na atmosfera. Como exemplo cita-se a Redução Catalítica Seletiva, Combustor de Baixo NO_x, Injeção de Água ou Vapor, Lavadores de Gases, Câmara de Deposição Gravitacional, Separadores Centrífugos.



CAPÍTULO 3

Biodigestores: Projeto, Construção, Operação e Experimentos

Este capítulo tem como objetivo principal a apresentação de estudos, testes, e experimentos realizados em biodigestores com alguns tipos de rejeitos agroindustriais e rurais.

Tais estudos procuram verificar a real viabilidade de utilização destes rejeitos como combustíveis alternativos em unidades co-geradoras de energia.

Este capítulo divide-se em quatro frentes principais: o projeto de biodigestores, a construção de protótipos, testes e experimentos, e metodologia de análise dos resultados.

3.1 Projeto de Biodigestores

O projeto de biodigestores, à primeira vista, é um pouco complexo, dependendo de muitos fatores, desde características do resíduo a ser utilizado, condições climáticas do local onde o biodigestor deverá ser instalado, e do tipo de biodigestor.

Percebe-se, entretanto, algumas semelhanças no projeto de diferentes tipos de biodigestores, como na metodologia utilizada para levantamento da demanda energética de biogás a ser suprida, no modo pelo qual os resultados são apresentados. Além disso, existem semelhanças em alguns valores padrão de projeto, como por exemplo, a altura mínima da caixa de entrada de rejeitos para os biodigestores contínuos, tipo indiano e chinês; otimizados durante anos de funcionamento do biodigestor, e que têm como objetivo facilitar a operação diária.

Dentre as dificuldades de cálculo encontradas, estão a grande quantidade de equações e comparações de parâmetros ideais de projeto, como as relações ótimas entre altura, diâmetro interno, volume e altura da parede divisória para biodigestores do tipo indiano.

Outra dificuldade encontrada é a necessidade de realização de testes prévios com os rejeitos, para a determinação de alguns parâmetros iniciais fundamentais para o projeto.

Como exemplo, encontram-se os testes para os teores de sólidos, de modo a estabelecer o fator de diluição do rejeito a ser utilizado. Fator este que é fundamental tanto para a otimização da produção de biogás, como também para a caracterização da mistura ideal em termos de escoamento dentro do biodigestor, garantindo assim, condições ótimas de operação e fluidez do sistema, diminuindo as possibilidades de entupimento do biodigestor.

Apesar das dificuldades encontradas destaca-se como principal vantagem dos cálculos a simplicidade das equações de projeto, o que facilita em muito a construção dos biodigestores.



Deve-se citar que os comentários baseiam-se em vários autores como: Ortolani, et al. (1991), Barrera (1993), Nogueira (1986) e Governo do Estado de Santa Catarina – ACARESC (1984).

Algumas das equações de projeto de biodigestores que comprovam a simplicidade das equações e comparações de parâmetros ideais podem ser observadas a seguir. As Equações 3.1 a 3.6 apresentadas, tem como fonte Lucas Jr. (2000).

$$V = \text{carga} \cdot \text{TRH} \quad (3.1)$$

$$V_b = (\pi \cdot D_i^2 \cdot H) / 4 \geq 1,1 \cdot V \quad (3.2)$$

$$3,0 \leq H \leq 6,0 \text{ [m]} \quad (3.3)$$

$$0,6 \leq (D_i/H) \leq 1,0 \quad (3.4)$$

$$D_g = D_i + 0,10 \text{ [m]} \quad (3.5)$$

$$V_p = h \cdot D_i \cdot \text{espessura} \quad (3.6)$$

sendo:

V = Volume do biodigestor para atender a demanda [m^3],

carga = Volume de carga diária da mistura [m^3],

TRH = Tempo de retenção hidráulica [dias],

V_b = Volume calculado do biodigestor [m^3],

D_i = Diâmetro interno do biodigestor [m],

H = Altura do biodigestor [m],

D_g = Diâmetro do gasômetro [m],

V_p = Volume da parede divisória interna [m^3],

h = Altura da parede divisória interna [m],

espessura = Espessura da parede divisória interna [m].

3.2 Protótipos de Biodigestores

Os protótipos de biodigestores do tipo indiano, construídos em chapa galvanizada, escala laboratorial, foram testados e utilizados nos experimentos.

Um primeiro protótipo mostrado na Figura 3.1, foi construído em chapa galvanizada, com capacidade de 30 litros de mistura, diâmetro interno de 0,30m e altura máxima de 0,55m na campânula armazenadora de gás.

Nesta figura também podem ser observados o sistema de vedação, o cano de saída do biogás, uma base metálica na parte superior da campânula e as caixas de entrada da mistura (nível superior, lado esquerdo) e saída de biofertilizante (nível inferior, lado direito da figura).

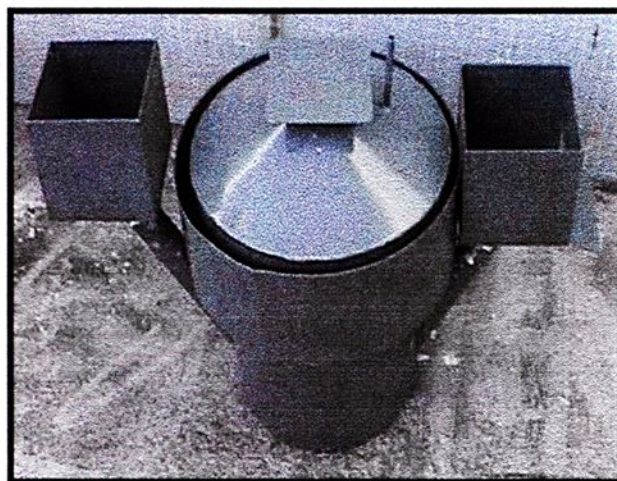


FIGURA 3.1 - Biodigestor 30 litros - vista externa

Já a Figura 3.2 mostra a vista interna do biodigestor de 30 litros, onde se pode observar claramente o diâmetro da tubulação da caixa de entrada e o da caixa de saída. Além disto, é possível visualizar a parede divisória interna e o anel externo responsável pela vedação, ou seja, onde se localiza o selo d'água.



FIGURA 3.2 - Biodigestor 30 litros - vista interna

Numa segunda etapa construiu-se outro biodigestor piloto, do tipo indiano, com capacidade de 200 litros de mistura, com 1m de altura máxima e aproximadamente 0,60m de diâmetro interno (Figura 3.3).



FIGURA 3.3 - Biodigestor 200 litros - Completo

A Figura 3.4 mostra em detalhes a parte interna da campânula do biodigestor de 200 litros com hastes internas cuja função é ajudar a agitação da parte superior da mistura.

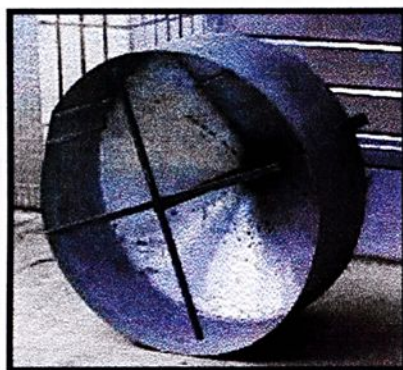


FIGURA 3.4 – Biodigestor 200 litros - Campânula – vista interna

Já a Figura 3.5 apresenta a parte externa da campânula, cuja inovação em relação ao primeiro protótipo são as alças externas, que servem de apoio no momento em que se deseja realizar agitação na mistura, facilitando este processo.

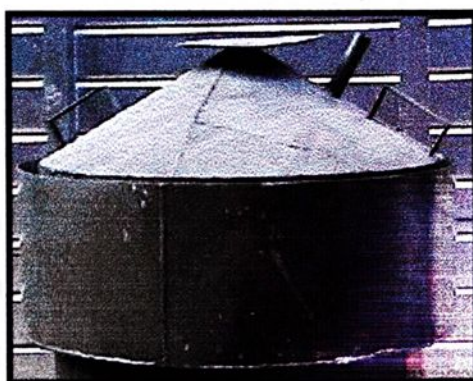


FIGURA 3.5 – Biodigestor 200 litros - Campânula – vista externa

Resumindo, ambos os protótipos foram construídos tendo como objetivo principal seu funcionamento para testes piloto, em escala laboratorial, de modo que sejam facilitadas melhorias futuras como a colocação de sistemas de aquecimento da mistura e sensores, por exemplo, termopares.

Ainda referindo-se aos protótipos, justifica-se a escolha pelo indiano, primeiramente pela dificuldade de construção dos biodigestores do tipo chinês, no manuseio da chapa galvanizada. Outro fato é a facilidade de alteração do protótipo indiano em batelada, ou seja, caso se deseje transformar os protótipos tipo indiano em tipo batelada será necessário pequenas adaptações como: o fechamento das caixas de entrada e saída, e a retirada da parede divisória interna.

3.3 Experimentos Realizados

Ao total foram realizados 16 (dezesesseis) experimentos, desde o início de 1999, muitos com o mesmo tipo de rejeito, variando-se o teor de sólidos da mistura e o tempo de permanência da mistura dentro do biodigestor (TRH, tempo de retenção hidráulica).

Nos experimentos variou-se o TRH entre 20 e 30 dias para os tipos de rejeitos estudados. Mas existem rejeitos que necessitam de um maior TRH para produzir biogás, como exemplo cita-se os testes realizados por Lucas Júnior (1994), com estrume de suínos em biodigestores tipo batelada, onde nota-se a produção de biogás com TRH de 250 dias, como pôde ser observado nos dados apresentados pela Tabela 2.11.

Neste item apresenta-se dois experimentos: primeiramente aquele que apresentou o melhor resultado, numa segunda etapa um teste que não produziu resultados satisfatórios.



Com relação aos tipos de rejeitos utilizados nos testes, cita-se que apesar da vários tipos de rejeitos existentes na região, optou-se por restringir os estudos àqueles que têm apresentado grande relevância local, no caso, os rejeitos da industrialização do leite, como a água de lavagem de tubulação industrial e o lodo anaeróbio, que é o efluente de um biodigestor industrial.

Devido ao mau odor característico dos rejeitos estudados, ficou inviável a realização dos experimentos nos laboratórios da universidade. Assim, os protótipos e rejeitos foram transportados para uma fazenda nos arredores de Guaratinguetá, onde os testes foram realizados sem maiores problemas.

3.3.1 Experimento com Lodo Anaeróbio

O rejeito primário e o lodo anaeróbio podem ser caracterizados dentre principais rejeitos das agroindústrias de laticínios. Alguns desses laticínios já aproveitam o rejeito primário colocando-o em um biodigestor industrial que produz um biogás primário e um rejeito secundário (lodo anaeróbio).

O lodo anaeróbio, além possuir como agente poluidor do meio ambiente um alto valor de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), tem causado, em Guaratinguetá, muita reclamação da população devido ao seu mau odor, uma vez que, as indústrias de beneficiamento do leite estão localizadas em áreas urbanas.

Visando sanar tais problemas, realizaram-se experimentos tendo como objetivo principal aproveitar o lodo para produzir energia e servir como biofertilizante em propriedades rurais localizadas nos arredores das agroindústrias. Deste modo, da mesma forma que o leite é retirado da propriedade agrícola o lodo pode ser entregue (doador).

Pelo fato de se tratar de um rejeito de biodigestor industrial, e também por suas características, mostrou-se a necessidade de adicionar matéria orgânica suficiente para que as bactérias realizassem seu trabalho (transformando o lodo em biogás secundário e biofertilizante), assim fez-se a mistura lodo anaeróbio, água e esterco fresco de bovino.

Na realidade foram realizados seis testes com o lodo, sendo atravessado diversas dificuldades como: a não-homogeneidade do lodo, o escape de biogás através do selo d'água, e a heterogeneidade da mistura (lodo + esterco + água). Tais dificuldades acabaram ocasionando problemas de funcionamento do biodigestor, chegando até se extinguir a produção de biogás durante alguns dias.

O envase do biogás em garrafas armazenadoras adaptadas muitas vezes ficou comprometido por problemas operacionais de ordem prática. Aconteceu ainda, através do selo d'água, escape de biogás para o meio ambiente, devido ao aumento da pressão interna do biodigestor.

A seguir são apresentados algumas figuras dos testes com o lodo anaeróbio no biodigestor de 30 litros, como a Figura 3.6, com a mistura dentro do biodigestor no instante da carga de partida. Pode-se notar que na realidade trata-se de uma mistura não homogênea, e há a presença de restos de capim, pois, trata-se de esterco fresco de bovino retirado diretamente da sala de ordenha.





FIGURA 3.6 - Mistura Liquida

A Figura 3.7 mostra a caixa de entrada da mistura entupida, ocasionada na tentativa de estabelecer uma relação ótima entre lodo anaeróbio, água e esterco fresco de bovino visando a produção de biogás e funcionamento adequado do biodigestor.



FIGURA 3.7 - Caixa de Entrada Entupida

A Figura 3.8, ao inverso da Figura 3.7 apresenta a caixa de entrada vazia, caracterizada por uma outra relação entre lodo anaeróbio, água e esterco bovino fresco.

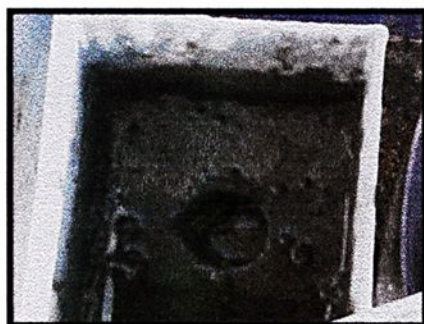


FIGURA 3.8 - Caixa de Entrada Vazia

Já a Figura 3.9 mostra a caixa de saída com biofertilizante muito denso, dando início ao entupimento da caixa. Tal fato ocasionou-se em função do sistema de operação, ou seja, da carga diária do biodigestor.



FIGURA 3.9 - Caixa de Saída com princípio de entupimento

Assim, após vários testes, conseguiu-se uma mistura mais homogênea na caixa de saída, Figura 3.10. Ainda pôde-se notar o biofertilizante bem digerido, sem a presença de fortes odores nem moscas.



FIGURA 3.10 - Caixa de Saída Líquida

Um dos objetivos dos testes realizados era obter uma relação ótima da mistura esterco fresco de bovino com lodo anaeróbico, que permitisse o perfeito funcionamento biodigestor.

Numa das várias tentativas de se obter esta relação ótima, observou-se o entupimento das caixas de entrada e de saída, bem como uma diminuição drástica na produção de biogás. A Figura 3.11, mostra a mistura neste instante, onde pode-se notar a existência de “postas” de material digerido, compactado, e a formação de sobrenadante.



FIGURA 3.11 – Mistura muito densa

Uma câmara de armazenamento cheia de biogás produzido a partir da mistura lodo anaeróbico, água e esterco bovino fresco, pode ser vista na Figura 3.12.



FIGURA 3.12 - Câmara com biogás

Referindo-se aos testes como um todo, destacam-se alguns cuidados como quanto à possibilidade da existência de contaminantes presentes na água, uma boa higienização principalmente das partes internas do biodigestor, antes de se começar um novo teste, e na descontaminação da câmara de armazenamento de biogás, dentre outros.

Quando da operação do biodigestor sem entupimento, a produção de biogás ocasionou além do enchimento da câmara armazenadora, um aumento da pressão interna dentro do biodigestor. Este acréscimo na pressão interna ocasionou a elevação parcial da campânula, a ponto de causar perda de biogás através do selo d'água, como pode ser observado na Figura 3.13.



FIGURA 3.13 – Aumento da pressão interna

O armazenamento do biogás para posterior análise foi executado através de garrafas plásticas adaptadas, Figura 3.14, que pode ser caracterizada pelo seu baixíssimo custo.

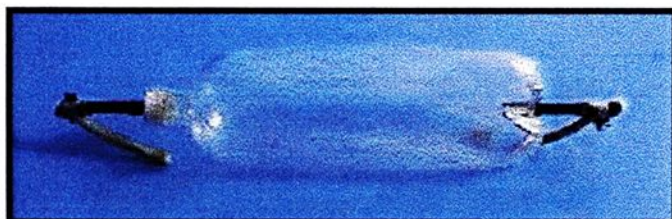


FIGURA 3.14 – Garrafa de armazenamento de biogás

A análise de algumas amostras do biogás, produzido a partir da mistura lodo anaeróbio, água e esterco fresco de bovino, realizada por cromatografia gasosa, apresentou a seguinte composição química média:

- 24,28% de CO_2 ;
- 74,30% de CH_4 ;
- 1,30% de H_2 ;
- 0,12% de O_2 .

Fazendo os cálculos, conclui-se que a composição química apresentada equivale a um biogás com poder calorífico inferior de 6200 kcal/kg. Além disso, informa-se ainda que as características do cromatógrafo utilizado, bem como as condições de análise do biogás são apresentadas no item 3.4, a seguir.

Destaca-se ainda que para a análise do biogás foi utilizado como amostra o biogás produzido no biodigestor, coletado e durante todos os experimentos, diretamente da câmara de armazenamento.

Explica-se que o objetivo principal do teste de queima é verificar somente a queima do biogás. Na Figura 3.15, observa-se um dos testes de queima do biogás, onde este combustível alternativo é pré-misturado com o ar atmosférico antes da queima, o que explica a chama azulada.



FIGURA 3.15 – Teste de queima – biogás do lodo anaeróbio

Finalizando o item, informa-se que de acordo com os resultados dos experimentos conclui-se que a melhor relação encontrada para a produção de biogás foi 1:1, ou seja, para cada parte de lodo anaeróbio adiciona-se a mesma quantidade de esterco fresco de bovino, sem a necessidade de colocação de água adicional.

Explica-se que o esterco fresco de bovino refere-se à aquele esterco retirado diretamente da sala de ordenha, e logo após a saída dos animais desta sala. Já o lodo anaeróbio trata-se do efluente de um biodigestor industrial, composto de 97% de água.

Quanto a produção de biogás, cita-se que após conseguir a mistura ótima, levou-se quinze dias para o enchimento da câmara armazenadora, o que segundo os cálculos, significa um volume de biogás de $0,048\text{m}^3$, o que em média equivale a uma produção de 3,2 litros de biogás por dia, no caso do biodigestor de 30 litros..

É imprescindível ressaltar que deve-se tomar muito cuidado quando da utilização destes resultados, pois, durante o enchimento da câmara armazenadora houve perda de biogás pelo selo d'água, assim, acredita-se o potencial de produção de biogás desta mistura seja na realidade maior do que os dados obtidos durante o teste.

Explica-se ainda que o objetivo principal desses testes é provar que é possível produzir biogás a partir de uma mistura de rejeito rural (esterco fresco de bovino) com rejeito agroindustrial (lodo anaeróbio). biogás este que será utilizado como combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia. Tais unidades serão as responsáveis pelo suprimento da demanda energética (térmica e eletromecânica), por exemplo, de agroindústrias localizadas dentro de propriedades rurais.

3.3.2 Água de Lavagem de Tubulação Industrial

Neste item apresenta-se um experimento que não produziu resultados satisfatórios, ou seja, diferentemente do lodo anaeróbio, concluiu-se, a partir dos resultados obtidos nestes testes, que é inviável a utilização de água de lavagem de tubulação industrial para a produção de biogás e biofertilizante em propriedades agrícolas.

Resumindo, a água de lavagem de tubulação industrial é outro típico rejeito das agroindústrias de laticínios, e é aquela água proveniente da limpeza dos tubos por onde escoam os produtos e subprodutos transformados no processo industrial.

Seguindo as mesmas considerações dos experimentos com o lodo anaeróbio, optou-se por adicionar esterco fresco de bovino a esta água de lavagem, de modo a fornecer os alimentos necessários às bactérias.

Um exemplo de partida do biodigestor com a mistura água de lavagem de tubulação industrial com esterco bovino fresco, pode ser observado na Figura 3.16.



FIGURA 3.16 – Mistura Água de lavagem com esterco

Na Figura 3.17, observa-se a câmara de armazenamento vazia, mesmo após a realização de vários testes variando-se o tempo de retenção hidráulica, e a relação água de lavagem e esterco fresco de bovino.



FIGURA 3.17 – Câmara de Armazenamento Vazia

Acredita-se que tal fato tenha ocorrido devido à existência de contaminantes na mistura, como a presença da soda cáustica utilizada na limpeza da tubulação industrial, apesar de não terem sido realizados experimentos específicos que comprovam esta teoria.

Na tentativa de se produzir o biogás, variou-se o TRH e diminui-se a quantidade de água de lavagem presente na mistura, com a colocação de água limpa, assim fazendo uma nova mistura água de lavagem - água limpa - esterco fresco de bovino.

Na pouca quantidade de biofertilizante produzido pela mistura, Figura 3.18, percebe-se a existência de componentes branco-leitosos característicos da água de lavagem.



FIGURA 3.18 – Biofertilizante

Nota-se na Figura 3.19, o biodigestor entupido depois de alguns dias de funcionamento, com a existência de sobrenadante bem denso, e a presença de água de lavagem de tubulação, caracterizada pela coloração branco-leitosa.



FIGURA 3.19 – Mistura após vários dias

A Figura 3.20 mostra o início de enchimento da câmara de armazenamento de biogás. Nota-se a presença de material branco leitoso no biofertilizante, Figura 3.21, após este ser seco ao ar durante alguns dias.



FIGURA 3.20 – Câmara de Armazenamento



FIGURA 3.21 – Biofertilizante seco

Apesar da pouca produção de biogás, conseguiu-se realizar os testes de queima. Percebe-se através da Figura 3.22 que chama é amarelada, fato que é justificado pois, diferentemente do lodo anaeróbio, não houve a pré-mistura do biogás com ar atmosférico.



FIGURA 3.22 – Teste de queima – biogás com água de lavagem

Como uma dos resultados desses experimentos, concluiu-se na necessidade de uma grande quantidade de esterco fresco de bovino misturado com uma pequena quantidade de água de lavagem de tubulação industrial, e a adição de água limpa, para assim se conseguir produzir biogás.

Cita-se ainda que a quantidade de água de lavagem de tubulação industrial ficou em torno dos 5% na mistura, já a água limpa 45% e o esterco bovino fresco 50%.

Assim sugere-se mais estudos, visando outros tipos de aproveitamento deste tipo de rejeito, pois, a partir dos resultados apresentados, acredita-se na inviabilidade da utilização desta água de lavagem juntamente com esterco fresco de bovino na produção de biogás em biodigestores do tipo indiano.

Levando-se em consideração os resultados obtidos nos experimentos, e alguns estudos citados no capítulo 2, acredita-se na viabilidade dos biodigestores para o meio agrícola, além de seu potencial de redução da poluição difusa, e pela real possibilidade de se produzir combustível alternativo para a geração de energia.

Já pensando em termos agroindustriais, deve-se levar em consideração a vazão necessária de biogás, a composição variável e a baixa pressão dos biodigestores quando a intenção é a utilização deste combustível na geração de energia.

A título ilustrativo, apresenta-se, na Figura 3.23, um conjunto motogerador com um motor combustão interna, monocilíndrico, ciclo Otto, funcionando a biogás.

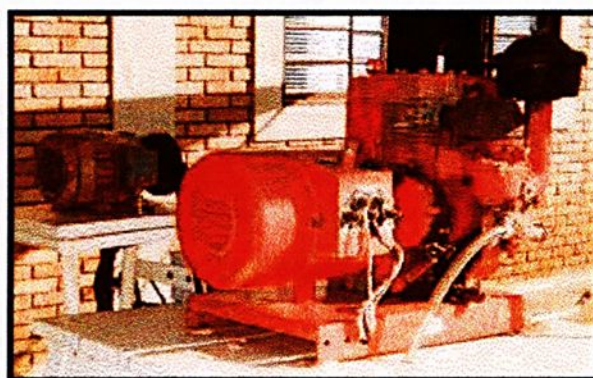


FIGURA 3.23 – Moto-gerador a Biogás

Fonte: [FCAVJ/UNESP – Engenharia Rural]

3.4 Análise do Biogás

A análise do biogás produzido nos experimentos foi realizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Rural da UNESP, campus de Jaboticabal em um cromatógrafo a gás.

O equipamento utilizado foi um Cromatógrafo da marca FINIGAN GC-9001N, Figura 3.24, com detector de condutividade térmica, integrador Processador DATAJET SP4600.

As colunas são Peneira Molecular 13X, de comprimento de 3 m e diâmetro interno de 1/8 de polegada, e Porapack Q, com o mesmo diâmetro interno e comprimento. Como condições de análise estão as temperaturas do detector em 100 °C, das colunas e do injetor de 60 °C.

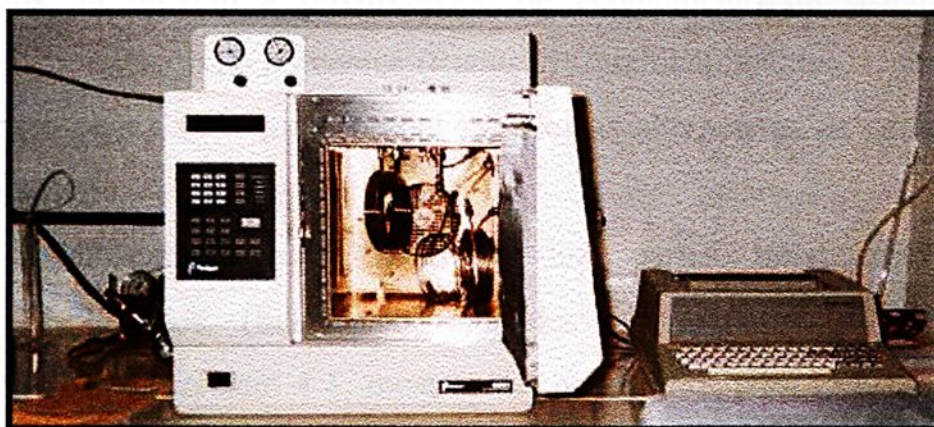


FIGURA 3.24 – Equipamento de Cromatografia Gasosa

Fonte: [FCAVJ/UNESP – Engenharia Rural]

Como procedimento de análise, primeiramente é injetado um gás padrão no cromatógrafo. Após esta etapa (primeira detecção) é injetado o biogás que se deseja analisar, o cromatógrafo então realiza uma comparação dos gases presentes no biogás com aqueles injetados como padrão.

CAPÍTULO 4

Cálculos e Projetos

Neste capítulo apresentam-se propostas de projetos e cálculos, incluindo análise de viabilidade econômica, envolvendo sistemas híbridos operando separadamente com turbinas a gás e motores de combustão interna.

Tais sistemas tratam da associação de biodigestores, unidades de purificação e compressão de biogás e unidades co-geradoras de energia. Na realidade, estes projetos, através das ferramentas utilizadas nos cálculos, já prevêem a possibilidade de acoplamento de sistemas de controle e redução de poluentes (Redução Catalítica Seletiva, Combustor de Baixo NOx), bem como outras tecnologias alternativas de geração de energia (eólica e solar).

Este capítulo está dividido em duas partes, todas envolvendo sistemas híbridos (SH) com unidades co-geradoras de energia. Primeiramente, no item 4.1, mostram-se os cálculos para turbinas a gás atreladas a caldeira de recuperação dos gases de exaustão.

Na segunda parte, item 4.2, as centrais operam com motores de combustão interna (MCI) e sistemas independentes de geração de vapor e produção de água gelada. Neste item faz-se cálculos utilizando motores de uso automotivo. Nesse item é realizado uma breve citação envolvendo um conjunto motogerador.

4.1 Cálculos com unidades utilizando Turbinas a Gás

Nestes cálculos os sistemas híbridos, Figura 4.1, envolvem biodigestores, sistemas de purificação e compressão de biogás, e unidades co-geradoras de energia funcionando com turbinas a gás e caldeira de recuperação.

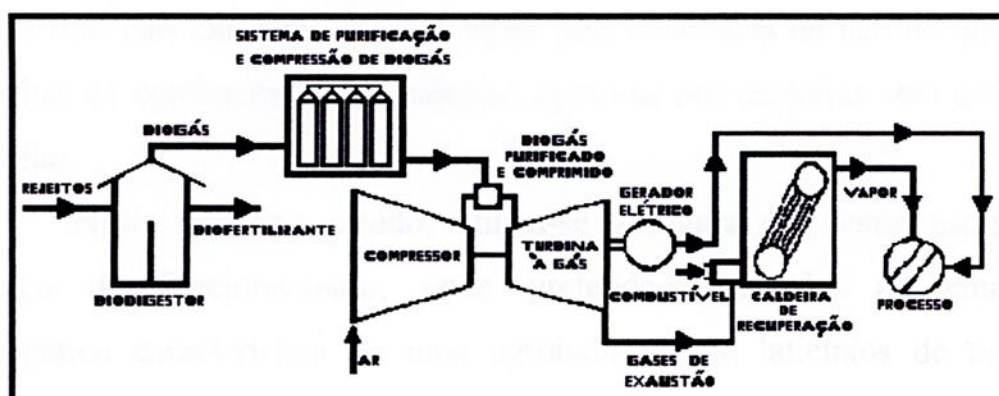


FIGURA 4.1 – Sistema Híbrido com Turbina a Gás

Os rejeitos do processo industrial são despejados no biodigestor, onde são produzidos o biogás e o biofertilizante. Enquanto o biofertilizante pode ser diretamente comercializado, o biogás dirige-se a um sistema de purificação e compressão.

Justifica-se a etapa a etapa de purificação pela necessidade de remoção do H_2S presente no biogás, para assim obter um maior aproveitamento do calor presente nos gases de exaustão, através da redução da temperatura destes gases quando lançados na atmosfera, de $220^{\circ}C$ para $150^{\circ}C$. Além disso, para a queima do biogás em turbinas a gás é uma pressão maior do que a pressão de funcionamento do biodigestor.

Assim, depois de purificado e comprimido, o biogás, juntamente com o ar atmosférico que passou pelo compressor, misturam-se na câmara de combustão, onde acontece a queima propriamente dita. Os gases quentes de exaustão passam então pela turbina a gás que produz energia mecânica e/ou elétrica.

Deste modo, ao saírem da turbina, os gases vão à caldeira de recuperação, onde é produzida a energia térmica para o processo industrial. Nas caldeiras pode-se optar pela existência ou não de queima auxiliar de combustível, nos cálculos optou-se por caldeiras sem queima auxiliar.

Neste primeiro estudo, utiliza-se a Figura 4.1 como esquema básico de funcionamento, onde pretende-se atender a demanda energética característica de uma agroindústria de laticínios de médio porte, neste caso, 400 kW elétricos e 1500 kg de vapor por hora à pressão de 0,78MPa.

Adotando-se que este estudo tem como prioridade suprir a demanda térmica, o que significa a escolha pela paridade térmica, e que não existe queima de combustível auxiliar na caldeira de recuperação, apresenta-se algumas das equações utilizadas nos cálculos.

$$E_v = M_v \cdot \Delta H \quad (4.1)$$

$$E_c = E_v / N_{cr} \quad (4.2)$$

$$E_c = M_{gás} \cdot C_p \cdot (T_4 - T_e) \quad (4.3)$$

Sendo:

E_v = Energia na forma de vapor [kW],

M_v = Demanda de vapor do processo [kg/h],

ΔH = Variação de entalpia [kJ/kg°C],

N_{cr} = Rendimento da caldeira de recuperação [%], (70%),

E_c = Energia dos gases que entram na caldeira [kW],

$M_{gás}$ = Vazão mássica dos gases de exaustão da turbina [kg/s],

C_p = Calor específico à pressão constante [kJ/kg°C], (1,055 kJ/kg°C),

T_e = Temperatura dos gases lançados na atmosfera [°C], (150°C),

T_4 = Temperatura de saída dos gases da turbina [°C].

Após o cálculo e levantamento da curva vazão mássica dos gases em função da temperatura de saída dos gases da turbina, Figura 4.2, foram escolhidas algumas turbinas a gás de acordo com as características fornecidas pelos fabricantes, como potência elétrica produzida e temperatura dos gases de exaustão, dentre outros. O critério de escolha adotado baseou-se naquelas mais próximas à referida curva e na capacidade de produção de energia um pouco além da demanda térmica requerida.

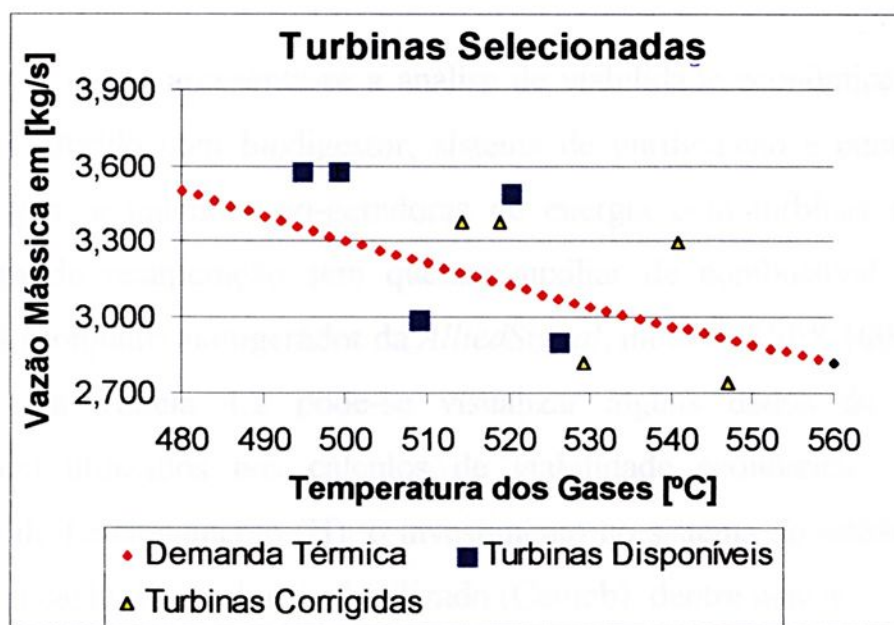


FIGURA 4.2 – Turbinas Seleccionadas

No total foram escolhidas cinco turbinas a gás, que tiveram seus parâmetros corrigidos com base nas condições do local onde serão instaladas, no caso a Cidade de Guaratinguetá. A Tabela 4.1, apresenta, a título de comparação, as turbinas escolhidas já com parâmetros corrigidos, como a energia elétrica realmente produzida (E_p), a vazão mássica real dos gases na turbina ($M_{gás\ Real}$) e a temperatura real de exaustão dos gases na turbina ($T_4\ real$).

TABELA 4.1 – Turbinas a Gás corrigidas

Casos	Fabricante	Modelos	Potência	Vazão	Temp.
			Produzida	Mássica	Exaustão
			[kW]	[kg/s]	[°C]
1	AlliedSignal	ASE8-1000	505,96	3,379	514,2
2	Sterwart & Stevenson	Garret-831	468,65	3,379	518,9
3	Kawasaki Heavy Industries	S1T – 02	358,54	3,294	540,8
4	Pratt & Whitney Canadá	ST 6 L –721	423,15	2,823	529,3
5	Ebara	PW-4E	382,20	2,738	547,0

A seguir apresenta-se a análise de viabilidade econômica, de um sistema híbrido com biodigestor, sistema de purificação e compressão de biogás, e unidades co-geradoras de energia com turbinas a gás e caldeira de recuperação sem queima auxiliar de combustível, para o Caso 1 (conjunto motogerador da *AlliedSignal*, modelo ASE8-1000).

Na Tabela 4.2 pode-se visualizar alguns dados de entrada (valores) utilizados nos cálculos de viabilidade econômica, como o tempo de funcionamento (H), o investimento no sistema de turbina a gás (I_{stg}), o custo do combustível utilizado (C_{comb}), dentre outros.

TABELA 4.2 – Dados de Entrada – Viabilidade Econômica

H =	7.000,00 [h/ano]	Pcr ele =	0,070 [US\$/kWh]
Ecomb =	2.588,29 [kW]	Pvd ele =	0,035 [US\$/kWh]
Ec real =	1.298,31 [kW]	Cmstg =	0,015 [US\$/kWh]
Ep real =	505,96 [kW]	Ccomb =	1,00 E-5 [US\$/kWh]
Per =	784,02 [kW]	Cmscr =	0,008 [US\$/kWh]
Isb =	783.470,00 [US\$]	Ncr =	70,00 [%]
Ibio =	525.416,00 [US\$]	Ncconv =	85,00 [%]
Icbio =	80,00 [US\$/m ³ /dia]	Cbgd =	6.193,30 [m ³ /dia]
Istg =	1.114,23 [US\$/kW]	Cele pc =	4,50 [kW]
Itg =	660,00 [US\$/kW]	Ispc =	258.054,00 [US\$]
litg =	132,00 [US\$/kW]	Ipc =	1.000,00 [US\$/[m ³ /dia]
Isgv =	339.035,00 [US\$]	Ccomb acg =	0,012 [US\$/kWh]
Iscr =	141.000,00 [US\$]	Cmsacg =	0,010 [US\$/kWh]
Er =	400,00 [kW]	Eecr =	908,82 [kW]

A seguir encontram-se algumas das equações governantes da análise de viabilidade econômica. Já a Tabela 4.3 apresenta partes da análise econômica referente à produção de vapor e de eletricidade.

$$C_{pel} = [(I_{stg} \cdot F) / H] + C_{mstg} + \{C_{comb} \cdot [E_{comb} - E_{c \text{ real}} - (Per/2)]\} / E_{p \text{ real}} \quad (4.4)$$

$$I_{stg} = I_{tg} + I_{itg} + 0,5 \cdot I_{sb} + 0,5 \cdot I_{scp} \quad (4.5)$$

$$I_{sb} = I_{bio} + I_{scp} \quad (4.6)$$

$$I_{bio} = I_{cbio} \cdot C_{bgd} \quad (4.7)$$

$$I_{scp} = I_{pc} \cdot C_{bgd} \quad (4.8)$$

$$F = [q^k \cdot (q-1)] / (q^k - 1) \quad (4.9)$$

$$q = 1 + (R/100) \quad (4.10)$$

$$Per = E_{comb} - E_{c \text{ real}} - E_{p \text{ real}} \quad (4.11)$$

$$E_{\text{ecr}} = E_{\text{c real}} \cdot N_{\text{cr}} \quad (4.12)$$

$$C_{\text{pv}} = [(I_{\text{sgv}} \cdot F) / (H \cdot E_{\text{ecr}})] + C_{\text{mscr}} + \{C_{\text{comb}} \cdot [E_{\text{c real}} + (P_{\text{er}}/2)]\} / E_{\text{ecr}} \quad (4.13)$$

$$I_{\text{sgv}} = I_{\text{scr}} + I_{\text{icr}} + 0,5 \cdot I_{\text{sb}} + 0,5 \cdot I_{\text{scp}} \quad (4.14)$$

$$I_{\text{scr}} = I_{\text{cr}} + I_{\text{ea}} \quad (4.15)$$

$$C_{\text{pvc}} = C_{\text{msacg}} + (C_{\text{comb acg}} / N_{\text{conv}}) \quad (4.16)$$

$$G_{\text{pel}} = E_{\text{r}} \cdot H \cdot (P_{\text{cr ele}} - C_{\text{pel}}) + (E_{\text{p real}} - E_{\text{r}} - C_{\text{ele pc}}) \cdot H \cdot (P_{\text{vd ele}} - C_{\text{pel}}) \quad (4.17)$$

$$G_{\text{pv}} = E_{\text{ecr}} \cdot H \cdot (C_{\text{pvc}} - C_{\text{pv}}) \quad (4.18)$$

$$\text{Receita Final} = G_{\text{pel}} + G_{\text{pv}} \quad (4.19)$$

TABELA 4.3 – Receita da Geração Elétrica e Vapor

Tempo [anos]	Eletricidade – Retorno [US\$]			Vapor – Retorno [US\$]		
	8 [%]	10 [%]	14 [%]	8 [%]	10 [%]	14 [%]
4	-68933	-79576	-101359	-68866	-79559	-92304
6	-1695	-12135	-33774	-20265	-27811	-43452
8	31529	20982	-1110	3751	-3873	-19841
10	51154	40381	17628	17936	10149	-6297
12	63983	52934	29444	27210	19223	2243

A Tabela 4.3 apresenta na realidade a diferença entre os custos de produção de energia elétrica depois da co-geração de energia e antes dela, quando a eletricidade era comprada diretamente da concessionária. Já com relação à produção da energia térmica, mostra-se a diferença depois da co-geração e antes quando o vapor era produzido em caldeiras convencionais.

A receita final, representando a somatória dos ganhos de produção de vapor e de eletricidade, pode ser observado na Figura 4.3. Destaca-se que o sistema é extremamente lucrativo, fato que está diretamente relacionado ao custo do combustível, considerado baixíssimo por ser produzido a partir dos próprios rejeitos agroindustriais, não havendo mais necessidade de compra, como acontecia antes da utilização destes sistemas híbridos.

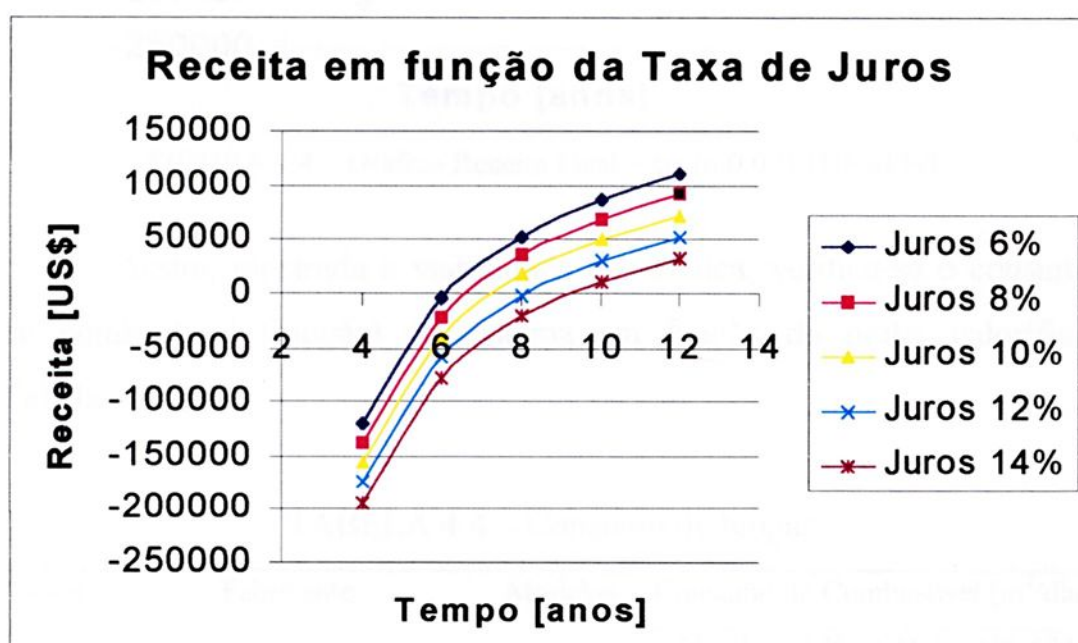


FIGURA 4.3 – Gráfico Receita Final

Na Figura 4.4 encontram-se resultados com as mesmas configurações e condições de cálculo da Figura 4.3, apenas com a alteração do preço do combustível (0,001 US\$/kWh). Estes novos cálculos possuem como principal objetivo destacar a influência do preço do combustível no retorno do investimento e conseqüentemente na viabilidade ou não do sistema.

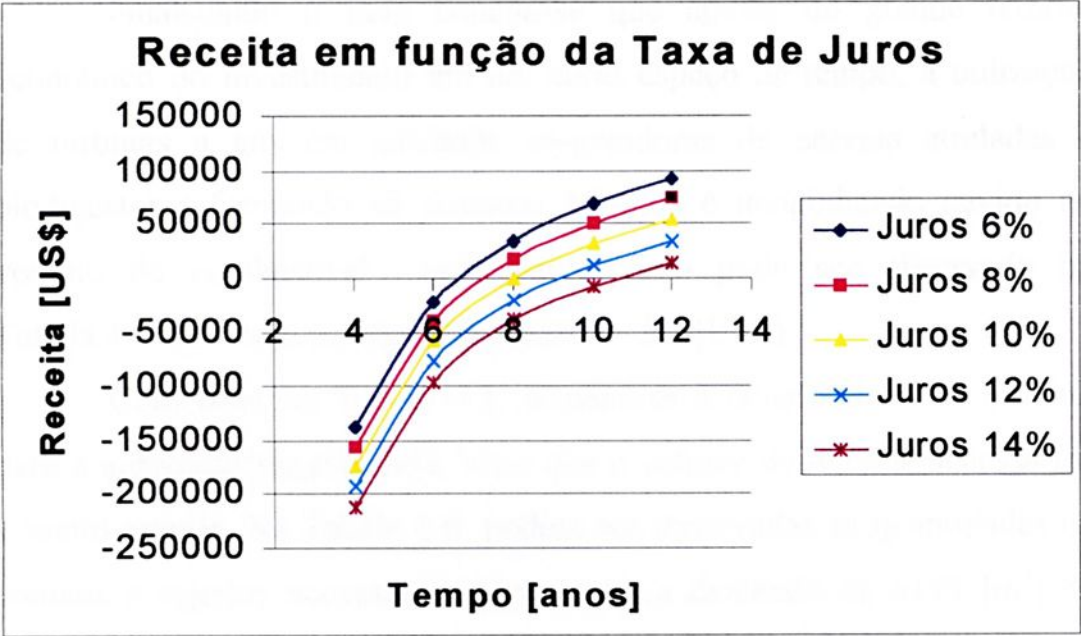


FIGURA 4.4 – Gráfico Receita Final – custo 0,001 [US\$/kWh]

Assim, mostrada a viabilidade econômica, verifica-se o consumo de combustível (biogás) do sistema em função do poder calorífico, Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Consumo de biogás

Casos	Fabricante	Modelos	Consumo de Combustível [m³/dia]		
			[65%CH₄]	[75%CH₄]	[95%CH₄]
1	AlliedSignal	ASE8-1000	9052	7845	6193
2	Sterwart & Stevenson	Garret-831	9010	7809	6165
3	Kawasaki Heavy Industries	S1T – 02	9445	8186	6463
4	Pratt & Whitney Canadá	ST 6 L –721	7658	6637	5240
5	Ebara	PW-4E	7862	6814	5379

Finalizando o item conclui-se que apesar do grande retorno econômico do investimento em um curto espaço de tempo, a utilização de turbinas a gás em unidades co-geradoras de energia atreladas a biodigestores formando os sistemas híbridos é inviabilizado devido ao volume de combustível necessário, como pode ser observado na Tabela 4.4 (potência instalada da turbina = 506[kW]).

Com base na Tabela 4.5, destaca-se a inviabilidade do sistema para a agroindústria estudada, visto que o volume de rejeitos necessários é muito grande. Na Tabela 4.6, podem ser observadas as quantidades de animais e rejeitos necessários para suprir a demanda de 6193 [m³] de biogás por dia, considerando a turbina funcionando durante 24 [horas].

TABELA 4.5 – Animais - Esterco - Biogás

Manejo	Esterco [kg/dia]	Biogás [m ³ /animal/dia]
Estabulado	30	1,11
Semi-estabulado	15	0,56
Não estabulado	10	0,36
Suíno	2,3	0,18
Suíno adulto	5,8	0,33
Galinha Poedeira	0,14	0,02
Frango de Corte	0,05	0,01

Fonte: [Silva, 1981] e [Benincasa, et al., 1991]



TABELA 4.6 – Demanda de rejeitos agrícolas

Tipo de Rejeitos	Animais [unidade]	Quantidade [kg/dia]
Bovinos estabulados	5579	167370
Bovinos semi-estabulados	11059	165885
Bovinos não estabulados	17053	170530
Suínos	34406	79133
Suínos adultos	18767	108849
Galinhas Poedeiras	309650	43351
Frangos de Corte	619300	30965

4.2 Cálculos com unidades utilizando MCI usado em automóveis

Já os sistemas híbridos com motores de combustão interna (MCI) são direcionados às pequenas agroindústrias com pequena demanda energética, muitas delas localizadas dentro da propriedade agrícola.

Um exemplo é a pasteurização, o processamento, e envase do leite *in natura*, seus derivados e subprodutos pelo produtor rural em pequenas agroindústrias caseiras. Como proposta sugere-se a utilização de sistemas híbridos com unidades co-geradoras funcionando com motores de combustão interna, conforme mostra a Figura 4.5.

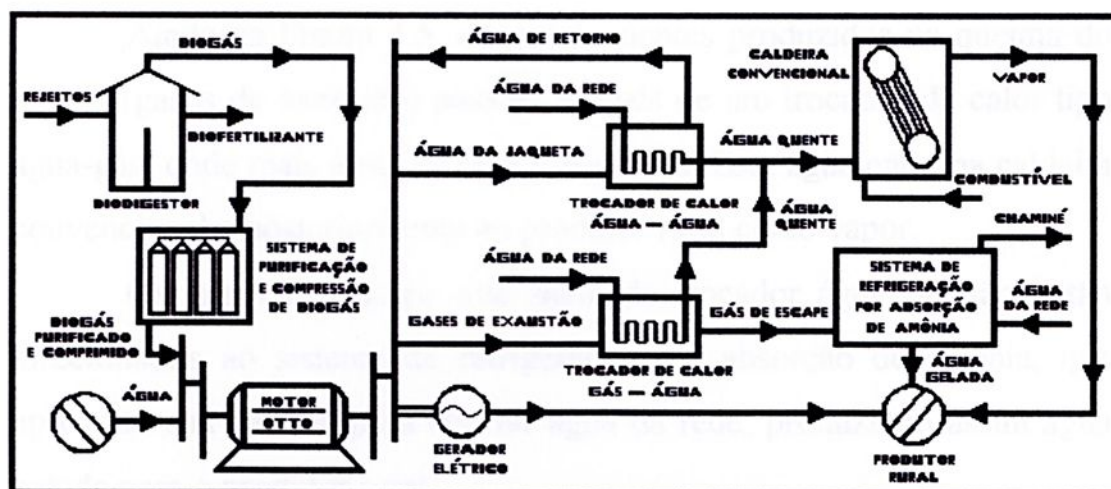


FIGURA 4.5 – Sistema Híbrido com Motores de Combustão Interna

Os rejeitos da criação de animais, do cultivo agrícola, e da biomassa da propriedade são colocados no biodigestor, onde através do processo de digestão anaeróbia, acontece a formação de biogás e biofertilizante (matéria digerida).

Este biogás passa então através do sistema de purificação e compressão, sendo posteriormente usado como combustível alternativo em unidades co-geradoras de energia com MCI de ciclo Otto.

Quando o motor em funcionamento, a potência de eixo produzida é transmitida a um gerador elétrico, através de acoplamentos, para só então estar disponível ao produtor rural na forma de energia elétrica.

A refrigeração da água da jaqueta do motor é feita em um trocador de calor tipo água-água, onde a água da rede é aquecida. Esta água, agora quente, entra na caldeira convencional onde é transformada em vapor e distribuída para o produtor rural, Figura 4.5. A energia consumida pela caldeira convencional para transformar a água quente em vapor é também fornecida pelo biogás.

Ainda na Figura 4.5, os gases quentes produzidos na queima do biogás (gases de exaustão) passam através de um trocador de calor tipo água-gás, onde mais água da rede é aquecida. Esta água entra na caldeira convencional e posteriormente ao produtor rural como vapor.

Os gases de escape que saem do trocador água-gás são então direcionados ao sistema de refrigeração por absorção de amônia, que aproveita sua energia para resfriar água da rede, produzindo assim água gelada para o produtor rural.

Neste item, propõe-se estudo dos sistemas híbridos operando com motor de combustão interna, de uso automotivo, Zetec Rocam 1.0, da marca Ford. Destaca-se que a escolha por este motor específico pela facilidade de disponibilidade de dados reais de seu funcionamento.

A Tabela 4.7, apresenta, a partir de dados reais, o consumo de biogás em função de seu poder calorífico e da rotação do motor, operando em sua capacidade máxima, para biogás com dois diferentes teores de metano, 65% e 95%.

TABELA 4.7 – Consumo de biogás pelo motor

Rotação [rpm]	Consumo Efetivo [kJ/h]	Consumo de Biogás [m ³ /h]	
		[65%CH ₄]	[95%CH ₄]
4000	684787	29,39	20,11
4500	726923	31,20	21,35
5000	799764	34,33	23,49
5500	883596	37,93	25,95
6000	952842	40,90	27,98
6500	1007563	43,25	29,59

Poder Calorífico Inferior do biogás com 65% de metano = 23297 [kJ/m³]
95% de metano = 34050 [kJ/m³]

Dividindo-se o estudo por partes, a Figura 4.6, representa o esquema de um gerador elétrico, sendo acionado pelo motor Zetec Rocam 1.0, adaptado para biogás.

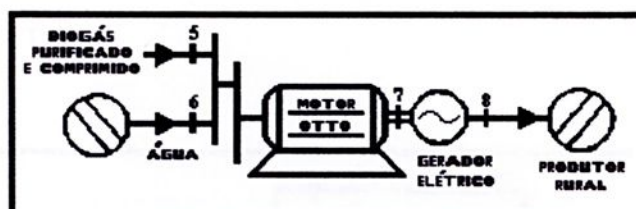


FIGURA 4.6 – Esquema Gerador Elétrico

A Tabela 4.8, apresenta, a potência elétrica máxima capaz de ser fornecida pelo motor em função do rendimento do gerador elétrico (95%) e da rotação do motor, e da potência fornecida pelo combustível que é transmitida à árvore de manivelas (virabrequim).

TABELA 4.8 – Potência Elétrica Produzida

Rotação [rpm]	Consumo Efetivo [kW]	Potência Elétrica Produzida [kW]		
		Potência Transferida		
		26 [%]	30 [%]	34 [%]
4000	190,22	46,98	54,21	61,44
4500	201,92	49,87	57,55	65,22
5000	222,16	54,87	63,31	71,76
5500	245,44	60,62	69,95	79,28
6000	264,68	65,38	75,43	85,49
6500	279,88	69,13	79,77	90,40

O esquema de um trocador água-água, que utiliza a água da jaqueta do motor para aquecer água da rede, pode ser verificado na Figura 4.7. Esta água da jaqueta é então resfriada, de 90°C (T13) até 70°C (T15), e retorna ao motor. Já a água da rede será aquecida de 15°C (T14) até 85°C (T16).

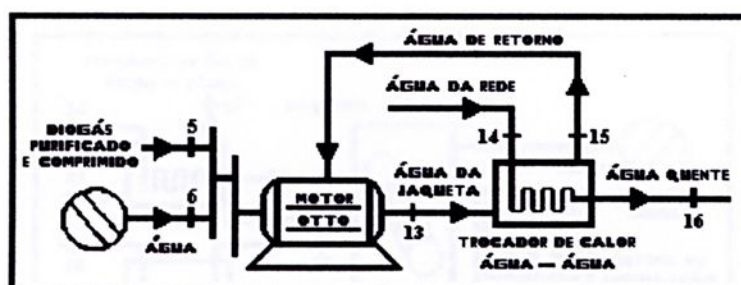


FIGURA 4.7 – Esquema trocador água-água

Dos catálogos de motores têm-se que a vazão da água da jaqueta dos motores automotivos varia de 1300 a 2000 [l/h] (litros por hora). Como resultados dos cálculos têm-se que a quantidade de água aquecida até 85°C varia aproximadamente de 316 a 486 [kg/h] (quilogramas por hora).

A Figura 4.8 mostra o esquema de um trocador gás-água, onde os gases de exaustão saem do MCI, a aproximadamente 440°C (T9), passam pelo trocador de calor e aquecem água da rede de 15°C (T10) a 85°C (T11), saindo como gás de escape a 190°C (T12).

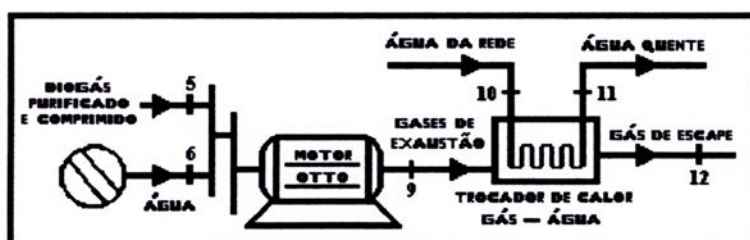


FIGURA 4.8 – Esquema Trocador Gás-Água

O esquema da caldeira convencional, responsável pela geração de vapor é explicado na Figura 4.9. A água quente que sai do trocador de calor água-água une-se a água que sai do trocador gás-água, são entregues à caldeira. Na caldeira a água é aquecida e transforma-se em vapor a 0,78MPa (aproximadamente 170°C).

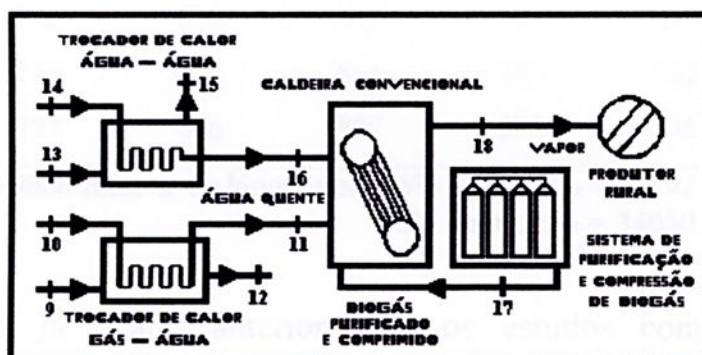


FIGURA 4.9 – Esquema caldeira convencional

A Tabela 4.9 menciona a vazão mássica de vapor entregue ao produtor rural em função da vazão mássica da água da jaqueta, da relação ar/combustível (AF), do poder calorífico do biogás e da rotação do motor.

TABELA 4.9 – Produção de Vapor

Rotação [rpm]	AF = 11		AF = 12		AF = 14	
	[65%CH ₄] [kg/h]	[95%CH ₄] [kg/h]	[65%CH ₄] [kg/h]	[95%CH ₄] [kg/h]	[65%CH ₄] [kg/h]	[95%CH ₄] [kg/h]
4000	626	459	704	495	874	664
4500	645	467	728	506	898	676
5000	678	483	769	525	939	695
5500	716	500	817	547	987	717
6000	748	515	856	565	1026	735
6500	772	526	887	579	1057	749

Poder Calorífico Inferior do biogás com 65% de metano = 23297 [kJ/m³]
 95% de metano = 34050 [kJ/m³]

Como já citado anteriormente os estudos com motores de combustão interna visam atender demandas de pequenas agroindústrias, inclusive aquelas localizadas dentro das propriedades rurais. Assim, Tabela 4.8, com o sistema híbrido operando um motor Zetec Rocam 1.0, a 6500 [rpm], funcionando com biogás com 65% de metano, produz teóricamente 1057 [kg/h] de vapor a 0,78 MPa.

Tal produção excede em muito a demanda térmica desse agroindústrias. Comparativamente, tem que uma agroindústria de médio porte (item 4.1) consome 1500kg de vapor por hora e tem capacidade de processamento de 130.000 litros de leite por dia.

Referindo-se a produção de outro tipo de energia térmica, a água gelada, têm-se que o sistema de refrigeração e absorção de amônia, utiliza a energia ainda presente nos gases de escape, (T12), proveniente do trocador gás-água para resfriar água da rede de 15°C (T20) até 5°C (T19), com os gases que saem da chaminé sendo lançados na atmosfera ao redor dos 170°C (T21), como exemplificado na Figura 4.10.

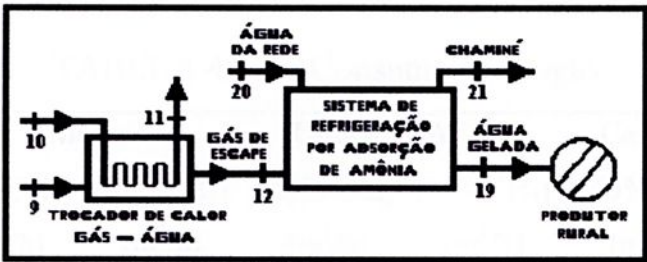


FIGURA 4.10 – Esquema sistema de refrigeração por absorção de amônia

A Tabela 4.10, indica a quantidade de água gelada disponível ao produtor rural em função da razão ar/combustível (AF), da porcentagem de metano presente no biogás e da rotação do motor.

TABELA 4.10 – Produção de Água Gelada

Rotação [rpm]	AF = 11		AF = 12		AF = 14	
	[65%CH ₄]	[95%CH ₄]	[65%CH ₄]	[95%CH ₄]	[65%CH ₄]	[95%CH ₄]
	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]
4000	266	123	288	133	333	154
4500	283	130	306	141	353	163
5000	311	143	337	156	389	179
5500	344	158	372	172	429	198
6000	370	171	401	185	463	214
6500	392	181	424	196	490	226

A Tabela 4.11 aponta uma comparação entre o consumo de biogás do motor e da caldeira. Nota-se um consumo de biogás extremamente elevado somente para transformar a água quente em vapor. Além disso cita-se que a vazão da água da jaqueta utilizados nos cálculos desta tabela é de 316 [kg/h] (catálogo de fabricantes).

TABELA 4.11 – Consumo de biogás

Rotação [rpm]	Motor		Caldeira - AF = 11		Caldeira - AF = 14	
	[65%CH ₄] [m ³ /h]	[95%CH ₄] [m ³ /h]	[65%CH ₄] [m ³ /h]	[95%CH ₄] [m ³ /h]	[65%CH ₄] [m ³ /h]	[95%CH ₄] [m ³ /h]
4000	29,39	20,11	76,26	38,24	85,72	41,22
4500	31,20	21,35	78,59	38,97	88,63	42,14
5000	34,33	23,49	82,61	40,24	93,66	43,73
5500	37,93	25,95	87,24	41,71	99,44	45,56
6000	40,90	27,98	91,07	42,91	104,23	47,07
6500	43,25	29,59	94,09	43,87	108,00	48,26

Poder Calorífico Inferior do biogás com 65% de metano = 23297 [kJ/m³]
 95% de metano = 34050 [kJ/m³]

O número de animais necessários para atender o sistema híbrido como um todo motor e caldeira, em função da rotação do motor, do poder calorífico do biogás, da relação ar/combustível, para vazão mássica da água da jaqueta de 316 [kg/h], aparece citado na Tabela 4.12. Além disso nesta tabela também podem ser encontrados as quantidades de rejeitos disponíveis considerando os animais como sendo bovinos leiteiros em regime semi-estabulado.

TABELA 4.12 – Número de animais

Rotação	Consumo Motor-Caldeira		Número de Animais		Quantidade Rejeitos	
	[65%CH ₄]	[95%CH ₄]	[65%CH ₄]	[95%CH ₄]	[65%CH ₄]	[95%CH ₄]
[rpm]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[unidade]	[unidade]	[kg/dia]	[kg/dia]
4000	105,65	58,35	189	105	2835	1575
4500	109,79	60,32	196	108	2940	1620
5000	116,94	63,73	209	114	3135	1710
5500	125,17	67,66	224	121	3360	1815
6000	131,97	70,90	236	127	3540	1905
6500	137,74	73,46	246	132	3690	1980

Poder Calorífico Inferior do biogás com 65% de metano = 23297 [kJ/m³]
95% de metano = 34050 [kJ/m³]

A título comparativo, a Tabela 4.13 traz, para vários tipos de animais e regimes de criação, a quantidade de animais e de rejeitos necessários para o funcionamento do motor Zetec Rocam 1.0, durante 1 (uma) hora por dia, a 4000 [rpm], com vazão mássica de água da jaqueta de 316 [kg/h]. Ressalta-se que a elaboração da Tabela 4.13 foi baseada, em Silva (1981) e Benincasa, et al. (1991), na Tabela 4.5.

TABELA 4.13 – Número de Animais e Demanda de rejeitos agrícolas

Tipo de Rejeitos	[65%CH ₄]		[95%CH ₄]	
	Animais [unidade]	Rejeitos [kg/dia]	Animais [unidade]	Rejeitos [kg/dia]
Bovinos estabulados	96	2880	53	1590
Bovinos semi-estabulados	189	2835	105	1575
Bovinos não estabulados	294	2940	163	1630
Suínos	587	1350	324	745
Suínos adultos	320	1856	177	1027
Galinhas Poedeiras	5283	740	2918	409
Frangos de Corte	10565	529	5835	292

Da Tabela 4.13, pode-se concluir que é necessário o estrume de aproximadamente de 189 bovinos semi-estabulados, para o funcionamento do sistema híbrido, Figura 4.5, composto de biodigestor, sistema de purificação e compressão de biogás, e unidade co-geradora de energia funcionando com caldeira convencional de 0,78MPa e motor Zetec Rocam 1.0, (potência instalada desse motor = 54 [kW], considerando 30% a fração energética transferida ao virabrequim), adaptado para biogás, operando a 4000 [rpm] durante 1 (uma) hora por dia.

Na sequência é realizada a análise de viabilidade econômica do sistema proposto. É importante ressaltar que as equações que regem este estudo são baseadas naquelas citadas no item 4.1, com as devidas alterações para os motores de combustão interna como acontece com a equação de perdas no sistema, para este caso:

$$\text{Per} = \text{Ecomb} - \text{Pel} - \text{Pag quente} - \text{Pag gelada} \quad (4.20)$$



O mesmo acontece para os dados de entrada, ou seja, alguns não sofrem variações como é o caso do preço de compra da eletricidade da concessionária antes da co-geração. Mas existem outros, como o investimento no sistema, dividido em custo de geração elétrica e térmica, que agora passa a ser função dos custos de construção dos biodigestores, das unidades de compressão e purificação, custo dos motores e da caldeira.

A Figura 4.11 apresenta a receita final obtida em função da taxa de juros anual, do sistema híbrido composto por biodigestor, unidade de purificação e compressão de biogás, motor de combustão interna Zetec Rocam 1.0, trocadores de calor e caldeira flamotubular.

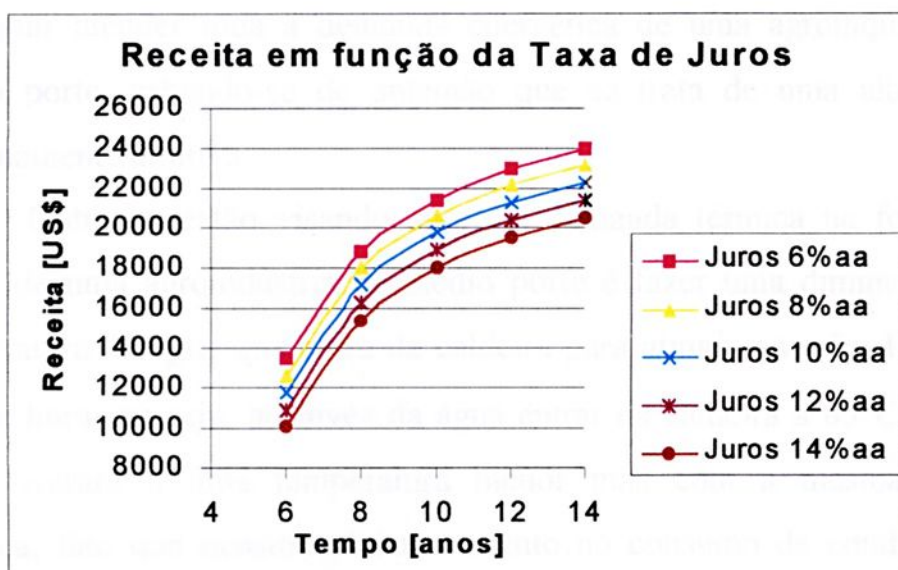


FIGURA 4.11 – Gráfico Receita Final com MCI

Com relação ao custo do combustível utilizado, considerou-se 0,001 [US\$/kWh], que representa o custo da mão de obra da carga diária do biodigestor e da água adicionada.

Levando em consideração os resultados dos cálculos acredita-se que este sistema híbrido, mais especificamente o motor de combustão interna citado tem capacidade de produzir bem mais do que as demandas energéticas características das agroindústrias de pequeno porte, inclusive aquelas localizadas dentro de propriedades rurais.

Levando-se em consideração os resultado apresentado na Tabela 4.9, onde mostra-se que este sistema híbrido estudado, tem capacidade de produzir ao redor de 1057 [kg/h] de vapor a 0,78MPa, pode-se concluir que este sistema consegue suprir praticamente 70% da demanda térmica de uma agroindústria de médio porte (1500kg/h de vapor a 0,78 MPa), assim sugere-se estudos com MCI de uso automotivos, de maior capacidade, como os 1600, 1800, 2000 cilindradas, para quem sabe conseguir atender toda a demanda energética de uma agroindústria de médio porte, sabendo-se de antemão que se trata de uma alternativa extremamente atrativa.

Outra sugestão visando suprir a demanda térmica na forma de vapor de uma agroindústria de médio porte é fazer uma diminuição da temperatura da água que entra da caldeira para atingir a vazão dos 1500 kg por hora, ou seja, ao invés da água entrar na caldeira a 85°C (T11 e T16), entrará a uma temperatura menor mas com a mesma vazão mássica, fato que ocasionará um aumento no consumo de combustível, no caso biogás.

Para projetos futuros para agroindústrias de pequeno porte, inclusive aquelas localizadas dentro de propriedades rurais, ou mesmo dentro de fazendas experimentais, como é o caso da Granja Leiteira da UNESP/Jaboticabal, que pasteuriza, ensaca e vende o leite produzido por seu rebanho, e possui uma demanda instalada de 70 kW elétricos e 64 kW térmicos, sugere-se estudos com motores de combustão interna menores, por exemplo de motocicletas, ou moto-geradores.

Apresenta-se ainda na Figura 4.12, um esquema que visa a utilização de sistemas híbridos com motores de combustão interna pequenos, de moto-geradores por exemplo.

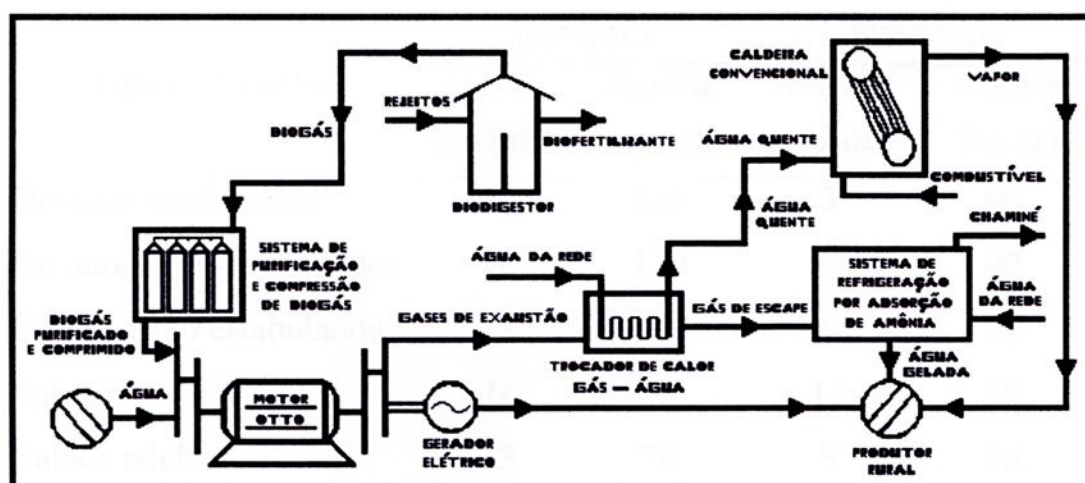


FIGURA 4.12 – Esquema sistema híbrido com moto-gerador

A idéia principal é usar esses motores como unidades co-geradoras de energia através da produção de eletricidade e aproveitamento dos gases de exaustão para a geração de energia térmica.

Como exemplo pode-se mostrar um sistema com um moto-gerador de pequeno porte que na análise energética mostrou-se capaz de produzir aproximadamente 6 [kW] elétricos, 57 [kg/h] de água quente a 85°C, e 48 [kg/h] de água gelada a 5°C, consumindo por volta de 4,28 [m³/h] e 2,93 [m³/h] de biogás com 65% e 95% de metano, respectivamente.

A Tabela 4.14, apresenta uma estimativa do número de animais e rejeitos necessários para suprir a demanda deste moto-gerador, baseado no descrito por Silva (1981) e Benincasa, et al. (1991), na Tabela 4.5.

TABELA 4.14 – Animais e Rejeitos Agrícolas

Tipo de Rejeitos	[65%CH ₄]		[95%CH ₄]	
	Animais	Rejeitos	Animais	Rejeitos
	[unidade]	[kg/dia]	[unidade]	[kg/dia]
Bovinos estabulados	4	120	3	90
Bovinos semi-estabulados	8	120	6	90
Bovinos não estabulados	12	120	9	90
Suínos	24	56	17	39
Suínos adultos	13	76	9	53
Galinhas Poedeiras	214	30	147	21
Frangos de Corte	428	22	293	15

Concluindo o capítulo, realizam-se comparações energéticas, Tabela 4.15, entre os sistemas híbridos funcionando com turbinas a gás - caldeira de recuperação (item 4.1) e aqueles que operam com motor de combustão interna (MCI) e caldeira convencional (item 4.2).

TABELA 4.15 – Turbina a Gás x MCI Zetec Rocam 1.0

	Turbina Gás Caldeira Recuperação	Zetec Rocam 1.0 Caldeira Conv.
Potência Elétrica Produzida	505,96 [kW]	54,21 [kW] (a)
Potência Térmica - Vapor	908,82 [kW]	371,74 [kW] (b)
Potência Térmica - Água Gelada	—	1,55 [kW] (b)
Potência Total Fornecida	1.414,78 [kW]	427,50 [kW]
Tempo de Funcionamento [horas/dia]	24	1
Número Animais Necessários (c)	5579 [animal/dia]	53 [animal/h]
Relação [animal / hora func.] (c)	232 [animal/h]	53 [animal/h]
Potência Elétrica Específica	2,18 [kW/animal/h]	1,02 [kW/animal/h]
Potência Térmica Específica	3,92 [kW/animal/h]	7,04 [kW/animal/h]
Potência Total Específica	6,10 [kW/animal/h]	8,06 [kW/animal/h]

(a) Potência transferida ao virabrequim = 30% a 4000 [rpm],

(b) para AF=12, 4000 [rpm] com biogás a [95% CH₄], (c) bovinos estabulados,

Na Tabela 4.15 apresenta-se a potência elétrica, a potência térmica na forma de vapor e de água gelada e a potência energética total fornecida por tais sistemas híbridos. Nesta mesma tabela podem ser observados o número de animais que se precisa para atender a demanda de biogás diário, o tempo de funcionamento diário de cada sistema e o número de animais necessários para o funcionamento de cada sistema durante 1 hora por dia.

Ainda na Tabela 4.15 destacam-se os resultados obtidos para a potência elétrica, potência térmica e potência total específicas. A potência específica representa a divisão entre a potência produzida pelo número de animais necessário para o funcionamento de cada sistema durante 1 hora por dia.

Desta maneira justifica-se, após a comparação dos sistemas híbridos, a viabilidade do sistema equipado com MCI e caldeira convencional, para pequenas agroindústrias, inclusive aquelas localizadas em pequenas propriedades rurais.

Destaca-se ainda as turbinas a gás necessitam de etapas e procedimentos específicos para serem ligadas e desligadas, fato que não acontece com os motores de combustão interna (MCI).



CAPÍTULO 5

Resultados e Conclusões

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados e conclusões encontrados, bem como algumas considerações e propostas para projetos futuros.

Na realidade, uma primeira consideração acontece já no capítulo 2. A apresentação dos biodigestores como potenciais redutores da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e dos agentes patogênicos presentes nos rejeitos agrícola-industriais. Desta forma, os biodigestores contribuem para sociedade em geral, também como agente redutor da poluição ambiental.

Assim, pode-se considerar a diretriz ambiental como uma contribuição do capítulo 2, seja para os rejeitos agrícolas e agroindustriais, como também para a co-geração de energia.

5.1 Resultados e Conclusões dos Experimentos

No capítulo 3, destaca-se inicialmente os estudos voltados a metodologia de escolha do protótipo a ser construído, e de projeto do então protótipo.

Como já citado anteriormente (item 3.2), optou-se pelos biodigestores do tipo indiano, primeiramente pela dificuldade de construção dos biodigestores do tipo chinês, no manuseio da chapa galvanizada. Outro fato é a facilidade de alteração do protótipo indiano em batelada, ou seja, caso se deseje transformar os protótipos tipo indiano em tipo batelada será necessário pequenas adaptações como: o fechamento das caixas de entrada e saída, e a retirada da parede divisória interna.

Já com relação ao projeto dos biodigestores, destaca-se como principal facilidade a simplicidade das equações, e como dificuldade a grande quantidade de equações e comparações de parâmetros ideais de projeto, como as relações ótimas entre altura, diâmetro interno, volume e altura da parede divisória para biodigestores do tipo indiano.

Mas, para o capítulo 3, o principal ponto a ser destacado são os testes e experimentos, na tentativa de se utilizar alguns tipos de rejeitos agroindustriais para a geração de energia.

Os resultados e considerações encontrados podem ser divididos em duas partes, para o lodo anaeróbio e para a água de lavagem de tubulação industrial.

O Lodo Anaeróbio, rejeito de um biodigestor industrial, possui com principal problema ambiental seu alto teor de DBO e o mau odor. Os experimentos nos protótipos mostraram como resultado que, com a mistura esterco fresco de bovino e lodo anaeróbio, conseguiu-se produzir biogás com poder calorífico de 6200 kcal/kg, além de acabar com o problema de mau odor.

Informa-se ainda que a relação 1:1 entre lodo anaeróbio com 97% de água e esterco fresco de bovino foi aquela que apresentou a melhor produção de biogás além de não apresentar sinais de entupimento.

Os resultados dos testes e experimentos para a água de lavagem de tubulação industrial, com a mistura água de lavagem - água limpa - esterco fresco de bovino, mostraram que a quantidade desse rejeito ficou em torno dos 5% na mistura, 45% para a água limpa e o esterco fresco de bovino 50%.

Assim a água de lavagem de tubulação industrial não produziu resultados satisfatórios, concluiu-se, a partir dos resultados obtidos nestes testes, que é inviável a utilização de água de lavagem de tubulação industrial para a produção de biogás e biofertilizante em propriedades agrícolas.

5.2 Resultados e Conclusões dos Cálculos

Na realidade pode-se considerar que a própria proposta de realização de um elo de ligação envolvendo os rejeitos, os biodigestores e a co-geração de energia, formando os chamados sistemas híbridos, além do aspecto relacionado à redução da poluição ambiental e ao uso eficiente dos recursos naturais, torna-se extremamente atrativa técnica e economicamente.



Num primeiro cálculo com sistemas híbridos operando com turbinas a gás, conclui-se que apesar de um grande retorno econômico do investimento em um curto espaço de tempo (Figura 4.3 e 4.4), o sistema é inviabilizado pela enorme quantidade de rejeitos necessários (Tabela 4.6), ou seja, o número de animais para disponibilizar a demanda de rejeitos é absurdamente grande.

Já os sistemas híbridos com motores de combustão interna, inicialmente tinham como objetivo atender propriedades rurais e agroindústrias caseiras. Os cálculos com o motor utilizado (Zetec Rocam 1.0) mostraram que é possível produzir aproximadamente 1000 [kg/h] de água quente a 85°C, demanda típica de uma agroindústria de médio porte.

Além disso, um sistema híbrido operando com o Motor 1.0 adaptado para queimar biogás e caldeira convencional apresenta um consumo de 106 [m³] de biogás com 65 [% CH₄] a 4000 [rpm], com a produção simultânea de 266 [kg/h] de água gelada a 5°C, 47 [kW] elétricos e produção de vapor de 626 [kg/h] a 780 kPa.

Para atender este consumo de combustível os cálculos mostram a necessidade dos dejetos de 96 bovinos estabulados, ou 320 suínos adultos, ou ainda 10565 frangos de corte (valores bastante coerentes com a realidade brasileira).

Com relação aos estudos de viabilidade econômica para este sistema híbrido, os resultados obtidos (Figura 4.11), mostram a rapidez do retorno financeiro em um curto espaço de tempo. Esses resultados se apresentam bem mais adequados para agroindústrias de pequeno e médio porte.

Assim, para agroindústrias caseiras e propriedades rurais realizou-se um breve estudo (no final do item 4.2) com um conjunto moto-gerador capaz de produzir 6 [KW] com o aproveitamento dos gases de exaustão para produzir simultaneamente 57 [kg/h] de água quente a 85°C, e 48 [kg/h] de água gelada a 5°C, consumindo 4,3 [m³/h] de biogás com 65 [% CH₄]. Estes resultados já se aproximam mais da demanda de agroindústrias caseiras e pequenas propriedades rurais.

5.3 Considerações e Propostas para Trabalhos Futuros

Após apresentar a viabilidade da co-geração de energia com estreita relação com subprodutos de agroindústrias em sistemas utilizando biodigestores, unidades de purificação e compressão de biogás, caldeira, trocadores de calor, sistema de refrigeração por absorção de amônia, e motores de combustão interna, formando os sistemas híbridos para o meio rural brasileiro, fica a pergunta: como um produtor rural poderá instalar tais sistemas.

Como resposta, destaca-se a existência de alguns programas governamentais, como o Banco do Povo, ou ainda, o Projeto Luz no Campo, que oferece recursos com baixa taxa de juros. Outra possibilidade é a solicitação direta ao Banco Mundial, que dispõe de recursos de até R\$8.000,00 (oito mil reais) para projetos como estes, que visam a melhoria da qualidade de vida, com a redução da pobreza rural.

Para projetos futuros, sugere-se o projeto, a construção, instalação e operação de um sistema híbrido de pequeno porte capaz de fornecer energia elétrica e térmica para agroindústrias caseiras.

A UNESP, Campus de Jaboticabal, que reúne todas as condições para tal, pois possui uma fazenda experimental com instalações de uma Granja Leiteira (agroindústria experimental) e ainda rejeitos tanto da agroindústria como agrícolas, poderia ser o local ideal para a instalação de um sistema híbrido.

Outras linhas de investigação para continuação desse trabalho são os estudos para biodigestores industriais, a adição de sistemas de aquecimento e agitação da mistura em biodigestores, realização de vários tipos de testes com diferentes tipos de rejeitos em diferentes tipos de biodigestores (indiano, chinês, batelada, fluxo ascendente), além dos estudos da instrumentação destes biodigestores.

O campo de atuação que se apresenta é muito amplo e vasto, podendo desenvolver pesquisas em muitas áreas, todas com certeza de grande importância para o Brasil, principalmente considerando a atual condição social do homem do campo e o cenário elétrico brasileiro.

A industrialização do produto rural dentro da propriedade rural, ou comunidade isolada, seja leite, frangos, peixe, carne, frutas, verduras, etc..., todas utilizando como fonte de energia rejeitos que seriam descartados no meio ambiente, seria uma alternativa viável técnica e economicamente, além de melhorar as condições de industrialização de produtos rurais e as condições de vida do homem no campo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACURI, P.B. *Efeito da temperatura ambiental na produção e na qualidade do biogás em biodigestor modelo, indiano da zona da mata de Minas Gerais*. 1986. 92 f., Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ALMEIDA, M.A.C. Fatores que afetam a umidade da cama. *Avicultura Industrial*, São Paulo, v. 76, n. 919, p. 6-18, 1986.

AMARAL, C.M.C. Caracterização de dejetos de bovinos leiteiros. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA BOVINOCULTURA DE LEITE, 1., 2000, Jaboticabal. *Anais...Jaboticabal*: UNESP, 2000. Não Paginado.

AVELLAR, L.H.N.; CARROCCI, L.R.; SILVEIRA, J.L. Biogás na Co-geração, a utilização de subprodutos agroindustriais na geração de energia em unidades co-geradoras. *Revista Biotecnologia*. v.2, n.13, p.46-49, 2000.

BALESTIERI, J.A.P. A Co-geração no contexto do desenvolvimento sustentável. In: SEMINÁRIO CIÊNCIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1997. São Paulo. *Proceedings...São Paulo*: USP, 1997. p.255-274.

BALESTIERI, J.A.P., *Planejamento de centrais de co-geração: uma abordagem multiobjetiva*. 1994. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BARRERA, P. *Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural*. São Paulo: Ícone, 1993, 106 p.

BEDUSCHI, L.C.; ORTOLANI, A.F.; COAN, O. *Considerações gerais sobre a estação de biogás automotivo a baixa pressão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal*. Jaboticabal: UNESP, 1986. 5 p.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.F.; LUCAS JÚNIOR., J. *Biodigestores convencionais*. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 25 p.

BRITO, A.S. Usina para purificação e abastecimento de veículos com biogás. IN: ENCONTRO SOBRE BIOGÁS AUTOMOTIVO, 2., 1985, Jaboticabal. *Anais...*Jaboticabal:EMATER/UNESP, 1985. p. 41-44.

CARROCCI, L.R.; JAMES, E.H. Cogeneration at alcohol plants in Brazil. *Energy*, Oxford, v. 16, n. 8, p.1147-1151, 1991.

CARVALHO, J.F. Biomassas utilizáveis industrialmente como fonte de energia primária. In: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. *Biomassa: coadjuvante na oferta total de energia*. [s.l.:s.n], 1985, p.11-27. (Coleção Antonio Ermírio de Moraes).

COELHO, S.T. *Mecanismos para Implementação de Cogeração de Eletricidade a partir de biomassa: um modelo para o Estado de São Paulo*. 1999. 200 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.

DERISIO, J. C. *Introdução ao controle da poluição ambiental*, São Paulo: CETESB, 1992, 201 p.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Environment in the Europe Union at the Turn of the Century, Summary*, EEA, Copenhagen: EEA, 1999.

FCAVJ/UNESP, Equipamento de Cromatografia Gasosa. 2001. 1 foto, color, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Rural.

FCAVJ/UNESP, Estação de Purificação e Compressão de Biogás Automotivo a Baixa Pressão. 2001. 1 foto, color, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Rural.

FCAVJ/UNESP, Motor de Combustão Interna MCI, funcionando a biogás da Estação de Purificação e Compressão de Biogás Automotivo a Baixa Pressão. 2001. 1 foto Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Rural.

GORGES, H.A. Cogeneration for industrial end user - Part I. *Gas Turbine World*, v. 12, n. 5, p. 42-47, 1982.

GORGES, H.A., Cogeneration for industrial end user- Part II. *Gas Turbine World*, v. 13, n. 1, p. 30-35, 1983.

GURNEY, J.D. et al. Industrial combined heat and power: investment, savings and decision-making. *Proc. Inst. Mec. Eng.*, v. 202, n. A1, p. 23-27, 1988.

HOODA, P.S. et al. A review of water quality concerns in livestock farming areas. *The Science of the Total Environment*, Amsterdam, v.250, p.143-167, 2000.

HU, S.D. *Cogeneration*, Reston: Reston Publ. 1985. 428p.

JOHNSON, K.A; JOHNSON, D.E. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, v. 73, Albany, p.2483-2492, 1995.

KOZEN, E.A. Manejo e utilização de dejetos de suínos. Concórdia: EMBRAPA/CNPISA, 1983. 32 p. (Circular Técnica).

LUCAS JÚNIOR., J. *Algumas considerações sobre o uso de estrume de suíno como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios*. 1994. 137 f. Tese (Livre-Docência). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

LUCAS JÚNIOR., J. Biodigestão Anaeróbia. Matéria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração Transmissão e Conversão de Energia. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista. 2000. (Notas de aula).



MAGALHÃES, A.P.T. *Biogás: um projeto de saneamento urbano*. São Paulo: Nobel, 1986. 120 p.

MELO, G.M.P. Problemas ambientais envolvidos nos processos digestivos de vacas leiteiras – enfoque em nitrogênio e fósforo. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA BOVINOCULTURA DE LEITE, 1., 2000, Jaboticabal, *Anais...* Jaboticabal: UNESP, 2000. Não Paginado.

NOGUEIRA, L.A.H. *Biodigestão: a alternativa energética*. São Paulo: Nobel, 1986. 93 p.

OLIVEIRA, M.D.S. *Utilização da cama de frango na alimentação de bovinos*. Jaboticabal: FUNEP, 1997. 47 p.

OLIVEIRA, P.A.V. *Manual de Manejo e utilização dos dejetos de suínos*. Concórdia: EMBRAPA/CNPISA, 1993. 188p. (documento 27).

ORTOLANI, A.F.; BENINCASA, M.; LUCAS JÚNIOR., J. *Biodigestores rurais modelos indiano, chinês e batelada*. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 35 p.

PELICANO, E.R.L. Caracterização Microbiológica da Cama de Frango. In: SIMPÓSIO SOBRE GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA AVICULTURA DE CORTE, 2000, *Anais...* Jaboticabal: FCAVJ/UNESP, 2000, p. 17-42.

RASOVSKY, E.M. *Álcool destilarias*. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Álcool, 1979. 384 p. (Coleção Canavieira, 12).

ROSA, M.S. A emissão de metano por bovinos leiteiros. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA BOVINOCULTURA DE LEITE, 1, 2000, Jaboticabal. *Anais...* Jaboticabal: UNESP, 2000. Não Paginado.

RUSSOMANO, V.H. *Introdução a administração de energia na indústria*. São Paulo: Ed. da USP, 1987. 262p.



SANTA CATARINA (Estado). Serviço de Extensão Rural. *Passos para a construção do biodigestor modelo indiano*. Santa Catarina: ACARESC, 1984. 15p. (Manual para Técnicos).

SANTOS, T.M.B. *Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frango de corte*. 2001. 179 f. Tese (Doutorado em Zootecnia – Produção Animal). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal.

SANTOS, T.M.B. *Caracterização química, microbiológica e potencial de produção de biogás a partir de três tipos de cama, considerando dois ciclos de criação de frangos de corte*. 1997. 95 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual. Jaboticabal.

SANTOS, T.M.B.; LUCAS JÚNIOR., J. *Produção de biogás a partir de três tipos de cama obtidos em dois ciclos de criação de frangos de corte*. *Revista Engenharia Agrícola*, v.17, n.2, p.9-20, 1997.

SILVA, F.M.; LUCAS JÚNIOR, J. *Biogás: Produção e Utilização*. Jaboticabal: FACV-UNESP, 8p.

SILVA, N.A. *Construção e operação de biodigestores modelo indiano*. Brasília: EMBRATER, 1981. (Manual Técnico).

SILVEIRA, J.L. *Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário*. 1994. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVEIRA, J.L. *Estudo de sistema de co-geração aplicado a fabricação de papel e celulose*. 1989. 138 f. Dissertação (Mestrado). Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.

SIMÕES, S. J. C. *Impactos Ambientais Regionais e Globais*. Matéria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração Transmissão e Conversão de Energia. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista. 2000. (Notas de aula).



