

TESE DEFENDIDA POR MARCELO CÔRTEZ  
FERNANDES E APROVADA PEL  
COMISSÃO JULGADORA EM 27/02/2004  
Caio Glauco Sánchez  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado**

**Autor: Marcelo Côrtes Fernandes**

**Orientador: Caio Glauco Sánchez**

09/04

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÕES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

# **Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado**

**Autor: Marcelo Côrtes Fernandes**

**Orientador: Caio Glauco Sánchez**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2004

S.P. - Brasil

UNIDADE	PC
Nº CHAMADA	F391i
COMBO BC/	61101
ROC.	16-117-04
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11.000
DATA	18-11-04
CPD	

Bib Id 331775

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F391i      Fernandes, Marcelo Côrtes  
Investigação experimental de gaseificação de biomassa em  
leito fluidizado / Marcelo Côrtes Fernandes.—Campinas, SP:  
[s.n.], 2004.

Orientador: Caio Glauco Sánchez.  
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia da biomassa. 2. Desenvolvimento sustentável. 3.  
Eletrificação rural. 4. Planejamento estratégico. 5. Energia –  
Fontes alternativas. 6. Desenvolvimento rural. I. Sánchez,  
Caio Glauco. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

## **Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado**

Autor: **Marcelo Côrtes Fernandes**

Orientador: **Caio Glauco Sánchez**



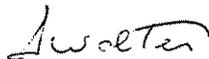
---

**Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez, Presidente**  
**Unicamp**



---

**Prof. Dr. Waldir Antônio Bizzo**  
**Unicamp**



---

**Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter**  
**Unicamp**

---

**Prof. Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras**  
**UnB**



---

**Prof. Dr. Jorge Isaías Llagostera Beltrán**  
**Unicamp**

Campinas, 27 de fevereiro de 2004.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a meus pais e avós. O carinho que eles me deram permanece a me guiar e a vencer os desafios.

## Agradecimentos

Um trabalho deste porte é mais do que resultado de uma pesquisa solitária. É fruto de 20 anos de pesquisa e trabalho em gaseificação, iniciado pelo Prof. Peel no Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos em 1984, seguindo com a dedicação do Prof. Caio Glauco Sánchez ao tema, a qual resultou na formação de diversos profissionais. A esta linhagem, o meu carinho, respeito e agradecimento.

Aos pesquisadores Mario Bernardo Barriga Angulo, Jhon Jairo Ramírez Behainne, Antônio Carlos Neiva e Edgardo Olivares Gómez pela amizade e pelas pesquisas e desenvolvimento que culminaram nesta planta-piloto.

Um profundo agradecimento à Equipe de gaseificação, pois sem ela seria impossível realizar qualquer teste na planta-piloto: Flávio Figueiredo, Alexandre Amaral, Ricardo Perin, Raúl, Thomaz Moura, Eduardo Barreda del Campo e Glória. Ao Wilson Muraro e ao Maurício Monte, o reconhecimento por terem viabilizado a execução do projeto.

Aos técnicos do Laboratório de Combustíveis e Combustão: Luiz Zanaga e Luís Gamma. À Cleusa e à Evelin pelas ajudas junto aos procedimentos burocráticos da faculdade.

A Irmãos Franco Ltda., beneficiadores de arroz em Eng. Coelho, SP, que gentilmente forneceram as toneladas de casca de arroz para o experimento. Ao CNPq, pela bolsa de doutorado.

Aos professores e pesquisadores Waldir Bizzo (UNICAMP), H.V. Shridar (I.I.Sc.), Pio Lobo, Emerson Jaguaribe (UFPB) e Ademar Hakuo Ushida (IPT), pelas discussões e ensinamentos práticos sobre gaseificação. Ao Prof. Eugênio (UNICAMP) pelas conversas sobre suas experiências e aventuras com gasogênios automotivos. Ao Prof. Luís Augusto Cortez, pela colaboração nas pesquisas com biomassa e na logística para a defesa da tese. Aos meus amigos Roland Scialom, Leonardo Machado e Mario Barriga pelo apoio nos momentos difíceis desta tese. Ao José Geraldo Almeida e seu filho Arthur, pelo micro para que eu terminasse a tese. Ao meu primo Alexandre, pelo imprescindível Laptop para que eu fizesse as correções.

Ao Sensei Jorge Kishikawa, ao Sempai Daniel Moraes e aos colegas do Instituto Niten, por me ajudarem no Caminho e nas Vitórias.

Por fim, um agradecimento a todos meus amigo(a)s e amores, quem, entre muitos, fizeram meu cotidiano mais feliz.

A todos aqueles que não citei e que me ensinaram alguma coisa.

A meus aliados.

A meus adversários, meu respeito e agradecimento pela oportunidade de crescimento.

*What the caterpillar  
calls the end of the world,  
the master calls a  
butterfly.*

***R. Bach***

## **Resumo**

Fernandes, Marcelo Côrtes; INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA EM LEITO FLUIDIZADO. Campinas: FEM, UNICAMP, 2004. Tese (Doutorado).

Foi desenvolvida e testada uma planta-piloto de gaseificação de biomassa em leito fluidizado, objetivando o desenvolvimento do meio rural e de comunidades sustentáveis. A gaseificação é uma forma de aumentar a eficiência do uso energético da biomassa e permitir que sua energia química seja convertida em energia mecânica por meio de máquinas térmicas e, posteriormente, em energia elétrica. A planta-piloto consiste de um gaseificador de leito fluidizado de 400 mm de diâmetro interno e altura total de 4.600 mm acoplado a um motor ciclo Otto de 6 cilindros, desenvolvido inicialmente para uso com gás natural. O equipamento foi testado para gaseificação de casca-de-arroz e bagaço de cana, buscando sua otimização para geração de potência. São apresentadas as opções de máquinas térmicas para conversão de energia em plantas-piloto de gaseificação de biomassa e o modo de adaptá-las ao uso com o gás produto. Contextualizando o projeto, são desenvolvidos os temas de geração dispersa de eletricidade, desenvolvimento rural e de comunidades sustentáveis. Um plano estratégico foi elaborado para implementação da tecnologia.

## **Palavras-chave**

Gaseificação de biomassa; desenvolvimento sustentável; eletrificação rural; comunidades sustentáveis; planejamento energético; energia renovável

## **Abstract**

Fernandes, Marcelo Côrtes; INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA EM LEITO FLUIDIZADO. (EXPERIMENTAL RESEARCH ON FLUIDIZED BED BIOMASS GASIFICATION). Campinas: FEM, UNICAMP, 2004. Tese (Doutorado).

A fluidized-bed biomass gasification pilot-plant was developed and tested, aiming at rural development and sustainable communities. Gasification is a means to increase the efficiency of the energetic use of biomass and allow that its chemical energy be converted into useful mechanical energy and from that into electricity. The pilot-plant consists on a gasifier with internal diameter of 400mm and total high of 4600mm coupled to a spark ignition engine of 6 cylinders, firstly developed for use with natural gas. The equipment was tested for sugar-cane bagasse and rice-husk gasification, looking for the best operational condition for power generation. The work present the alternatives of thermal engines for converting the producer gas into useful energy and the way to adapt them for working on such gas. The project lies in the themes of decentralised electricity generation, rural development and sustainable communities, which are also herein developed. A strategic planning was written to implement the technology.

## **Key-words**

Biomass gasification; sustainable development; rural electrification; sustainable communities; energy planning; renewable energy.

## ÍNDICE

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>ii</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>iii</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>iv</b>
<b>1. Introdução e Objetivos.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão de Literatura.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Desenvolvimento Rural e Comunidades Sustentáveis.....</b>	<b>37</b>
<b>4. Equipamento e Métodos.....</b>	<b>53</b>
<b>5. Resultados Experimentais.....</b>	<b>72</b>
<b>6. Planejamento Estratégico.....</b>	<b>84</b>
<b>7. Conclusões.....</b>	<b>102</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo I – Artigos Publicados.....</b>	<b>113</b>
<b>Anexo II – Dados Primários.....</b>	<b>115</b>

## Lista de Figuras

2.1 – Diagrama Ciclo Padrão Otto.....	17
2.2 – Diagrama Ciclo Padrão Diesel.....	18
2.3 – Configuração básica do ciclo combinado com condensação do vapor.....	21
3.1 – Escola pública na Comunidade de Itancoã – PA.....	41
3.2 – Casa do grupo-gerador diesel junto aos painéis fotovoltaicos danificados. Comunidade de Itancoã – PA.....	42
3.3 – Exemplo de habitação isolada na comunidade de Itancoã – PA.....	44
4.1 - Gaseificador: vistas do sistema de pré-aquecimento, refrigeração e parcial do sistema de alimentação.....	55
4.2 - Dimensões do gaseificador.....	56
4.3 - Croqui do conjunto do gaseificador.....	58
4.4 – Sistema artesanal de limpeza de gases.....	61
4.5 – <i>Flare</i> queimando gás produto da gaseificação de casca-de-arroz.....	62
4.6 – Motor utilizado na planta-piloto.....	63
5.1 – Composição dos gases combustíveis x FA - Dispersão amostral.....	74
5.2 – Composição dos gases combustíveis x FA - Médias.....	74
5.3 – Composição completa dos gases x FA – Médias.....	75
5.4 – PCI do gás x FA, para altura de leito = 0,6 m – Médias e desvio padrão.....	75
5.5 – PCI do gás produto x Temperatura do Leito – Dispersão amostral.....	76
5.6 – Temperatura do leito x FA, para altura do leito = 0,6m – Média e desvio padrão.....	76
5.7 – PCI do gás x Velocidade de Fluidização – Média, desvio padrão e tendência.....	77
5.8 – PCI do gás x Velocidade de Fluidização – Média e tendência, discretizadas para diferentes Tempos de Residência.....	78
5.9 – PCI do gás x Velocidade de Fluidização – Dispersão amostral e tendência linear.....	78
5.10 – PCI do gás x Tempo de residência – Média, desvio padrão e tendência linear.....	79
5.11 – Eficiência a frio do gás x FA – Médias e tendência linear.....	79
5.12 – Potência a frio do gás x taxa de alimentação de biomassa – Médias discretizadas por fator de ar.....	80
5.13 – PCI do gás x FA – Médias e desvio padrão para Bagaço.....	81
5.14 – Composição completa dos gases x FA – Médias e ajuste polinomial para Bagaço.....	81

## Lista de Tabelas

2.1 – Comparação termodinâmica dos ciclos.....	20
2.2 – Desempenho de algumas turbinas.....	24
2.3 – Rotas de conversão termoelétrica para biomassa.....	27
2.4. – Diâmetro da tubulação para o gás pobre.....	30
2.5 – Faixa de concentração de NH <sub>3</sub> e HCN no gás produto.....	33
2.6 – Emissões típicas de plantas de gaseificação.....	34
2.7 - Análise imediata.....	35
2.8 - Análise elementar.....	36
2.9 - Poder calorífico.....	36
5.1 – Poder calorífico- experimental.....	72
5.2 – Desempenho do motor, operando 100% com gás pobre (4,6 MJ/Nm <sup>3</sup> ).....	83
6.1 – Estimulos e desestimulos ao investimento no Brasil.....	90
6.2 – Indicadores Econômicos.....	91
6.3 – Análise de pontos fortes e fracos, oportunidades e riscos.....	97

## Nomenclatura

- $\alpha_i$  : coeficiente de transferência de calor;
- $\lambda$  : cociente entre a relação ar-combustível estequiométrica e a ar-combustível real;
- $\tau$  : torque no eixo do motor, N.m;
- $\omega$  : velocidade angular do eixo do motor, rad/s;
- [C] : teor de carbono na biomassa, % massa;
- [H] : teor de hidrogênio na biomassa, % massa;
- [O] : teor de oxigênio na biomassa, % massa;
- [S] : teor de enxofre na biomassa, % massa;
- $C_{carb}$  : concentração de carbono nas cinzas, nos gases, %;
- $C_{CH_4}$  : concentração de  $CH_4$  nos gases, %;
- $c_{cin}$  : calor específico das cinzas, nos gases,  $MJ/Nm^3\ ^\circ C$ ;
- $C_{CO}$  : concentração de CO nos gases, %;
- $C_{H_2}$  : concentração de  $H_2$  nos gases, %;
- $C_{p_{a1}}$  : calor específico do ar na temperatura  $t_{a1}$ ,  $MJ/Nm^3\ ^\circ C$ ;
- $C_{p_{a2}}$  : calor específico do ar na temperatura  $t_{a2}$ ,  $MJ/Nm^3\ ^\circ C$ ;
- FA :  $(Var/m_c)/VA$ , fator de ar;
- $F_i$  : área na secção do reator, numa secção  $i$ ;
- $h_{a1}$  : entalpia do ar na entrada do compressor, MJ/kgcomb;
- $h_{ar}$  : entalpia do ar na saída do compressor, MJ/kgcomb;
- $h_{CO}$  : entalpia do gás CO a  $t_s$ , MJ/kgcomb;
- $h_{CO_2}$  : entalpia do gás  $CO_2$  a  $t_s$ , MJ/kgcomb;
- $h_{gás}$  : entalpia do gás a  $t_s$ , MJ/kgcomb;
- $m_c$  : vazão de combustível, kg/s;
- $m_{cin}$  : vazão de cinzas, kg/s;
- n.d. : dado não disponível;
- PCI : poder calorífico inferior do combustível, MJ/kgcomb;
- $PCI_{carb}$  : poder calorífico inferior do carbono fixo = 32,804 MJ/kg;
- $PCI_{gás}$  : poder calorífico inferior do gás combustível,  $MJ/ Nm^3$ ;
- $Pot_{motor}$  : potência de eixo do motor, kW;

$Q_{amb}$  : perda de calor para o meio-ambiente, MJ/kgcomb;  
 $Q_{ar}$  : energia do ar do compressor, MJ/kgcomb;  
 $Q_{cin}$  : perda de energia com o arraste das cinzas, MJ/kgcomb;  
 $Q_d$  : energia disponível, MJ/kgcomb;  
 $Q_g$  : perda de energia pela entalpia do gás, MJ/kgcomb;  
 $Q_{util}$  : energia útil, MJ/kgcomb;  
RPM : rotação do motor, rotações por minuto;  
 $t_{a1}$  : temperatura do ar na entrada do compressor, °C;  
 $t_{a2}$  : temperatura do ar na saída do compressor, °C;  
 $t_{cin}$  : temperatura das cinzas, no ciclone, °C;  
 $t_e$  : temperatura de entrada do combustível no reator, °C;  
 $t_s$  : temperatura do gás antes do ciclone, °C;  
 $t_{si}$  : temperatura externa do reator, numa secção  $i$ , °C;  
 $VA$  : volume de ar estequiométrico, Nm<sup>3</sup>/s;  
 $V_{ar}$  : vazão de ar, Nm<sup>3</sup>/s;  
 $V_{gás}$  : vazão do gás na saída do reator, Nm<sup>3</sup>/s;

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1. APRESENTAÇÃO

A gaseificação de biomassa apresenta-se como alternativa para geração de energia de modo renovável. Esta é um das visões desta tese, o desenvolvimento da tecnologia. A tecnologia, porém, não é grande novidade. A gaseificação de biomassa é uma das tecnologias buscadas como alternativa às fontes tradicionais derivadas do petróleo. Se o cultivo e preparo da biomassa forem realizados de maneira adequada, haverá pouca emissão de gases de efeito estufa. O carbono liberado na conversão da biomassa é o mesmo que foi retido durante a fase de crescimento do vegetal. Sim, a gaseificação já foi utilizada amplamente como substituta do petróleo durante a Segunda Guerra Mundial. Eram os famosos gasogênios, utilizados até para mover carros com gás derivado de carvão ou lenha.

Mas os tempos são outros. Este é a outra visão desta tese. Há uma crise sendo vivenciada, mas não restrita apenas ao setor energético. Ela abrange cada aspecto da nossa atual civilização humana. Ousa-se dizer que estamos nos deparando com um degrau na escalada da humanidade. Em um aspecto psicológico, deparamo-nos com uma grave crise de valores. A grande dificuldade percebida é no campo da convivência e cooperação para um crescimento mútuo, aceitando as diferenças e permitindo o bem-estar do grupo, i.e. a Humanidade como um todo. Daí, pode-se observar crises repercutindo em todos os outros setores sociais: perspectivas de graves crises financeiras globais; epidemias (ou mesmo pandemias), fome e guerras civis na África; novas ameaças de holocausto nuclear; novas guerras por recursos minerais (petróleo e água); guerras por intolerância histórica entre israelenses e palestinos, paquistaneses e indianos; crime organizado e narcotráfico em níveis globais nunca antes vistos. Parece que os recursos estão acabando e os detentores do poder lutam pelo pouco que sobra. Mas será que é essa a realidade que deve perdurar?

Em um movimento contrário ao do descrito acima, fortalece-se uma comunidade internacional que luta para o bem-estar e prosperidade da raça humana presente e futura. Esta comunidade é atuante no meio acadêmico-científico, político, médico, artístico, empresarial, operário, esotérico, enfim, também em todas as áreas humanas. Esta tese alinha-se com este movimento.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho originou-se das reflexões e necessidades geradas pela dissertação de mestrado “Análise Tecno-econômica da Gaseificação da Biomassa para Eletrificação Rural” [FERNANDES, 2000]: como seria gerar potência mecânica e/ou eletricidade com o gaseificador de leito fluidizado?; seria correto apontar a eletrificação rural como mercado para este produto?; onde e como poder-se-ia implementar esta tecnologia?

A partir destas questões, foram elencados os seguintes objetivos.

1. Desenvolver um gaseificador de biomassa em leito fluidizado, objetivando geração de potência em máquina térmica.
2. Investigar os pontos de melhor operação e a variação dos parâmetros operacionais do gaseificador visando a melhoria da qualidade do gás e maior potência térmica.
3. Adaptar uma máquina térmica para testes de demonstração de geração de potência em planta-piloto de gaseificação de biomassa em leito fluidizado.
4. Analisar a implementação de projetos no meio rural e em comunidades sustentáveis.
5. Apresentar um planejamento estratégico para implementação da tecnologia.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

A gaseificação é uma forma de flexibilizar o uso energético da biomassa. Por apresentar-se na forma sólida, como lenha, bagaço-de-cana, casca-de-arroz, ou outros, a biomassa costuma ser aproveitada ao ser queimada em fornos, gerando calor para processos ou, associada a caldeira, gerando vapor para processo térmico ou para mover uma turbina a vapor. O uso da biomassa tradicionalmente em fogões, lareiras ou mesmo caldeiras industriais é muitas vezes feito com equipamentos de baixa eficiência energética, altos níveis de poluição e, mesmo, associado a práticas não sustentáveis de obtenção da biomassa (desmatamento, queimada, etc.). Se a biomassa for produzida e consumida de maneira sustentável, fecha-se o ciclo de consumo-produção do gás carbônico, não aumentando a concentração de gases de efeito-estufa presente na atmosfera. Por isto, pesquisa-se a tecnologia como forma de gerar energia de forma ecologicamente mais responsável.

A gaseificação é um processo termo-químico que consta basicamente da queima parcial de um combustível (líquido ou sólido), obtendo disto um gás ainda combustível [ALDERUCCI et al.,1993]. Por ele se obtém um gás de baixo a médio poder calorífico, com resíduos de particulados, alcatrão e cinzas.

Este processo ocorre em duas etapas: na primeira, a biomassa sofre uma pirólise, produzindo gás e carvão. Na segunda, o carvão reduz os gases (na maior parte dióxido de carbono e vapor d'água) para formar monóxido de carbono e hidrogênio [KINOSHITA, 1997]. São também gerados metano e outros hidrocarbonetos superiores, dependendo do projeto e condições de operação do gaseificador. O gás combustível produzido é composto de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e nitrogênio, podendo ser queimado diretamente para iluminação ou produção de calor. Desejando-se potência mecânica ou elétrica pode-se usar o gás para alimentar um motor de combustão interna ou também pode ser utilizado em turbinas a gás, simples ou combinadas a uma turbina a vapor. Pode-se ainda utilizar o processo de gaseificação-geração elétrica para gerar simultaneamente calor, processo chamado de cogeração. MUKUNDA [1993] indica que o gás pode ser usado em motores de combustão interna convencionais,

substituindo 60% de gasolina ou 75 a 85% de diesel. Esta aplicação é interessante para países em desenvolvimento, onde é ainda incipiente a eletrificação do meio rural.

Uma futura aplicação prevista para a gaseificação é a produção de hidrogênio para células-combustível. Segundo HALL [1993], a biomassa é mais reativa do que o carvão, sendo assim uma fonte energética mais adequada à tecnologia da gaseificação para geração energética, à produção de metanol e à produção de hidrogênio.

Uma forma de se aumentar a fração de hidrogênio (e conseqüentemente aumentar o poder calorífico) do gás é pela adição de elementos catalizadores (dolomita ou níquel por exemplo) na reação. Os catalizadores auxiliam a conversão do alcatrão e de outros hidrocarbonetos em gás, aumentando a eficiência do processo e o teor de hidrogênio no gás [ALDERUCCI et al.,1993].

Uma outra forma de aumentar a formação de hidrogênio é pela adição de vapor d'água ao processo de gaseificação, substituindo parcialmente a injeção de ar. BARNO [1998] constata que, com o aumento da presença de vapor d'água na reação, há intensificação na reação de "shift" e conseqüentemente maior produção de H<sub>2</sub> e maior poder calorífico no gás. A reação de "shift" é a conversão de CO e H<sub>2</sub>O em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.

## 2.2 TIPOS DE GASEIFICADORES

Gaseificadores são classificados por suas características construtivas e operacionais. SÁNCHEZ, [1994], apresenta as classificações mais usuais:

- PODER CALORÍFICO DO GÁS: gás de baixo poder calorífico (até 5 MJ/ Nm<sup>3</sup>); gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ/ Nm<sup>3</sup>); gás de alto poder calorífico (de 10 a 40 MJ/ Nm<sup>3</sup>).
- AGENTE GASEIFICADOR: ar; vapor d'água; oxigênio; hidrogênio.
- DIREÇÃO DO MOVIMENTO RELATIVO DA BIOMASSA E DO AGENTE DE GASEIFICAÇÃO: contracorrente; concorrente; fluxo cruzado; leito fluidizado; leito circulante; topo aberto.
- PRESSÃO DE TRABALHO: atmosférico ou pressurizado (geralmente até 20 atm).
- TIPO E FORMA DO COMBUSTÍVEL: carvão; resíduos agrícolas; resíduos industriais; resíduos sólidos urbanos (lixo); biomassa in natura; biomassa peletizada; biomassa pulverizada.

### 2.2.1 Gaseificadores de Leito Fluidizado

Nos gaseificadores de leito fluidizado um leito de partículas inertes (óxido de alumínio, areia ou cinzas) é fluidizado e mantido em suspensão com o combustível pelo empuxo gerado por um fluxo de ar. Isto cria melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura dentro do gaseificador. Nestas condições, a maior parte dos voláteis está em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação completa e limpa, o que melhora a eficiência do equipamento [SÁNCHEZ, 1994]. O leito inerte é inicialmente aquecido por outro combustível (processo de pré-aquecimento do reator) até que alcance a temperatura de operação ou a temperatura de auto-ignição da biomassa [ANGULO, 2002], para que a partir de então, por meio do início de sua alimentação, ocorram reações exotérmicas que aqueçam o leito até a temperatura de equilíbrio para a reação de gaseificação desejada.

A alta temperatura do leito após o pré-aquecimento permite a manutenção do processo de gaseificação apenas utilizando-se da biomassa, sem necessidade de mais consumo de GLP.

SÁNCHEZ [1994] defende o uso de gaseificadores de leito fluidizado em relação aos de leito fixo, por algumas razões:

- fácil controle da temperatura pela variação na alimentação de ar e de combustível;
- flexibilidade na taxa de alimentação;
- flexibilidade na composição do combustível; e
- alta potência volumétrica.

Algumas desvantagens são também citadas por SÁNCHEZ [1994]:

- temperatura de operação limitada;
- alto conteúdo de cinzas no gás;
- arraste de carbono fixo com as cinzas; e
- altos teores de alcatrão no gás, devido a operações em baixas temperaturas (entre 700 e 900°C).

O leito inerte passa por quatro fases de fluidização, ao se aumentar o fluxo de ar: leito fixo (quando as partículas ainda estão em repouso); leito fluidizado incipiente (quando o arrasto do fluxo de ar equilibra o peso das partículas); leito fluidizado borbulhante e transporte pneumático das partículas. Esta última fase é utilizada nos reatores de leito fluidizado circulante, onde há elutriação do leito e uma posterior coleta em separadores ciclônicos para reaproveitamento do material inerte.

O processo de fluidização ocorre da seguinte maneira [SÁNCHEZ, 1994]: o leito de partículas oferece resistência ao escoamento vertical do ar. Ao se aumentar a velocidade de escoamento do ar, aumenta-se a força de arrasto exercida sobre as partículas, que tendem a se reorganizar, oferecendo menos resistência ao escoamento. Neste momento ocorre a expansão do leito. Ao se aumentar ainda mais a velocidade do fluxo de ar, a expansão continua e as forças de arrasto equivalem ao peso das partículas (fluidização incipiente). Neste estágio, o sistema fluido-partículas se comporta como um fluido - daí a denominação leito fluidizado. Neste ponto, a velocidade do fluido é chamada de velocidade mínima de fluidização. Até o início da fluidização, o leito se expande uniformemente e logo após a fluidização incipiente começam a se formar bolhas de gás/ar de fluidização responsáveis pela recirculação das partículas dentro do leito, gerando o regime de fluidização borbulhante. Se a velocidade do fluido é elevada além do regime de surgimento de bolhas, o leito é levado a uma situação na qual as partículas são arrastadas na corrente de gás/ar e carregadas para fora do leito. Este fenômeno se chama elutriação. Partículas menores são elutriadas a velocidades menores. Quando a velocidade é alta o suficiente para elutriar todas as partículas do leito, chega-se ao regime de transporte pneumático.

A fluidização promove um íntimo contato entre partículas e gases, assim como uma intensa circulação e mistura das partículas. Isso resulta em alta taxa de velocidade de reação gás-sólido e uma temperatura uniforme em todo o leito.

Duas fases podem ser identificadas no leito: a emulsão e as bolhas. A primeira contém as partículas sólidas com gás que percola através delas. O fluxo de gás na emulsão é limitado pela quantidade que permite a fluidização incipiente. Qualquer quantidade maior de gás passa pelo leito na forma de bolhas. As bolhas são praticamente livres de partículas sólidas, mas com sua passagem pelo leito, acabam por arrastar algumas partículas, auxiliando à mistura de partículas no leito.

## 2.3 EQUACIONAMENTO QUÍMICO

### 2.3.1 Reações Químicas

A gaseificação de biomassa em leito fluidizado inclui várias reações químicas concomitantes. ANGULO [2002] apresenta as principais como sendo:

#### Reações Heterogêneas (gás-sólidos)

Oxidação do carbono:



Reação de Boudouard:



Reação de Gás d'água (ou Reação de "shift"):



Formação do Metano:



#### Reações Homogêneas (fase gasosa)

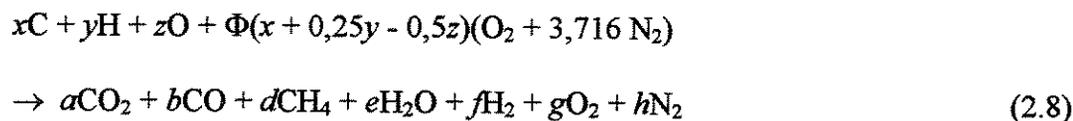


Observa-se que as reações das Equações 2.3, 2.4 e 2.7, responsáveis pela formação do monóxido de carbono, são endotérmicas. O processo de gaseificação como um todo é endotérmico. O calor necessário para a manutenção destas reações será fornecido pelas reações de oxidação do carbono (Equações 2.1 e 2.2). Uma das funções do leito de inertes fluidizado é propiciar um reservatório térmico para a manutenção das reações endotérmicas de gaseificação.

ERGÜDENLER et al. [1997a,b,c] desenvolveram um modelo capaz de prever a performance em regime estacionário da gaseificação da biomassa em leito fluidizado. Foi feita uma análise de sensibilidade e testes experimentais [ERGÜDENLER et al.,1997b,c], o que comprovou a eficiência do modelo para analisar o desempenho da gaseificação, antes de se começar os experimentos com determinada biomassa, ou ainda, durante a fase de projeto de um gaseificador de leito fluidizado.

### 2.3.2. Estequiometria

O processo de gaseificação pode ser sintetizado na seguinte reação sub-estequiométrica [FERNANDES, 2000]:



onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são respectivamente os números de moles de carbono, hidrogênio e oxigênio na biomassa e  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $g$  e  $h$  são os números de moles de dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, água, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio no gás produzido.

O fator de excesso de ar  $\Phi$  é a razão entre a razão ar/combustível real e a estequiométrica. Testes iniciais deste equipamento, operando com capim-elefante utilizaram fator de ar 0,33, alcançando eficiência a frio de 28,2% [FERNANDES, 2000]. ANGULO [2002] operando com o protótipo experimental em escala menor (1/3 de capacidade) da planta-piloto, conseguiu, operando com casca-de-arroz, eficiências entre 40% e 48%.

### 2.3.3. Balanço de massa

$$m_c + m_{ar} = m_{gás} + m_{cinzas} \tag{2.9}$$

onde  $m_c$  é a massa de biomassa alimentada;  $m_{ar}$  é massa de ar na entrada;  $m_{gás}$  é a quantidade de gás produzida e  $m_{cinzas}$  a quantidade de cinzas elutriadas. Quando ideal, a relação (massa produtos)/(massa insumos) vale 1. A inequação representa ou falta de precisão estatística, erro experimental ou algum vazamento não detectado.

A relação estequiométrica é calculada pela equação

$$VA = 0,0889.([C] + 0,375.[S]) + 0,265.[H] - 0,033.[O] \quad (2.10)$$

#### 2.3.4. Balanço energético

O balanço energético, em base úmida, pode ser equacionado da seguinte modo [SÁNCHEZ, 1994]:

$$Q_d = Q_{util} + Q_g + Q_{cin} + Q_{amb} \quad (2.11)$$

ou

$$Q_d = PCI + Q_{ar} \quad (2.12)$$

$$Q_{ar} = FA.(h_{a2} - h_{a1}) \quad (2.13)$$

$$h_{a2} = VA.Cp_{a2}.t_{a2} \quad (2.14)$$

$$h_{a1} = VA.Cp_{a1}.t_{a1} \quad (2.15)$$

$$Q_{util} = (V_{gás}/m_c).PCI_{gás} \quad (2.16)$$

$$PCI_{gás} = 0,126.C_{CO} + 0,358.C_{CH4} + 0,108.C_{H2} \quad (2.17)$$

$$Q_g = (h_{gás} - FA.h_{a1}) \quad (2.18)$$

$$h_{gás} = [C_{CO}.h_{CO} + \dots + C_{CO2}.h_{CO2}].V_{gás}/m_c \quad (2.19)$$

$$Q_{cin} = (m_{cin}/m_{gás} \cdot 100).[C_{carb}.PCI_{carb} + c_{cin} \cdot (t_s - t_e)] \quad (2.20)$$

$$c_{cin} = 0,832 + 0,00167.t_{cin} \quad (2.21)$$

$$Q_{amb} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i.F_i/m_c).(t_{si} - t_e) \quad (2.22)$$

como o compressor utilizado é superdimensionado e distorceria os resultados de eficiência, optou-se por retirá-lo do volume de controle, ficando a Equação 2.13 da seguinte forma:

$$Q_{ar} = FA.h_{a2} \quad (2.23)$$

### 2.3.5. Eficiência do gaseificador

Define-se eficiência a frio como:

$$\eta_f = Q_{util}/Q_d ; \quad (2.24)$$

e eficiência a quente como:

$$\eta_q = (Q_{util} + Q_g \cdot 100)/Q_d ; \quad (2.25)$$

### 2.3.6. Potência do motor

A potência de eixo do motor, em kW, é calculada por:

$$Pot_{motor} = \tau \cdot \omega / 1000 ; \quad (2.26)$$

sendo:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot RPM / 60 \quad (2.27)$$

## 2.4 FATORES DE INFLUÊNCIA NA GASEIFICAÇÃO

### 2.4.1 Descrição das Variáveis

GUPTA e SATHIYAMOORTHY [1999] apresentam as seguintes variáveis que afetam a fluidização:

#### Variáveis Independentes:

- a) Propriedades do fluido: densidade, viscosidade, umidade relativa;
- b) Propriedades da partícula: densidade, tamanho, formato, granulometria, aspereza da superfície, porosidade;
- c) Parâmetros do sistema: direção de fluxo do fluido, geometria do reator, velocidade de operação, temperatura, pressão, forças impostas (por ex. forças centrífugas), placa distribuidora.

#### Variáveis Dependentes:

Forças capilares, forças eletrostáticas, forças de Van der Waals, compactação do leito, velocidade de mínima fluidização.

Segundo David TILLMAN [1991], a variável mais importante nos processos em leito fluidizado é a velocidade do gás (chamada de velocidade de operação na listagem de Gupta), geralmente quantificada como velocidade superficial ou velocidade de fluidização. Típicas velocidades superficiais são: 0,92-2,76 m/s para leito fluidizado borbulhante e 4,62-9,24 m/s para leito fluidizado circulante.

Como as partículas ficam em suspensão, a densidade do leito também varia, ficando menor do que quando o leito fica estagnado. Segundo BABCOCK E WILCOX [1992], a densidade do leito borbulhante fica em torno de  $720 \text{ kg/m}^3$  e a do leito circulante situa-se próximo a  $560 \text{ kg/m}^3$ .

SÁNCHEZ [1994] mostra que o fator de ar é de maior influência na temperatura de gaseificação e, portanto, na composição do gás produto da gaseificação e na eficiência do processo. ERGÜDENLER et al.[1997b,c] comprovam esta afirmação tanto por modelagem matemática como por via experimental. Outros autores corroboram o resultado [BEHAINNE, 1999; ESPERANZA *et al.*, 1999].

O trabalho de ERGÜDENLER [1997a,b,c] indica que a velocidade de fluidização e a altura do leito não influem na composição dos gases e eficiência. Vale citar que o pesquisador trabalhou com velocidades de fluidização apenas na faixa de 0,28 m/s a 0,37 m/s.

#### 2.4.2. Tempo de residência

O tempo de residência é outro parâmetro importante em um reator de leito fluidizado. Definido como o tempo que o agente gaseificante leva para atravessar o leito fluidizado, relaciona-se com o tempo disponível para que ocorram as reações no leito. Se o tempo de residência for muito curto, as reações podem não se completar.

BARNO [1998] trabalhou com o conceito de tempo espacial, quociente da altura de leito fixo pela velocidade superficial do agente gaseificante. Justifica-se pela maior precisão na determinação, pois as avaliações da altura de leito fluidizado são menos precisas, apesar de maior importância na avaliação do tempo real da reação.

Trabalhando com casca-de-arroz, BARNO realizou experimentos com tempos espaciais na faixa de 1,15s e 1,35s, indicando também que esta variável não possui influência importante no resultado da gaseificação para valores superiores a 0,9s. Este valor equivaleria aproximadamente a 1,12s no leito fluidizado. SÁNCHEZ [1994] trabalhou com tempos de residência entre 0,80s e 0,95s.<sup>1</sup> O pesquisador encontrou eficiência a frio na ordem de 40%. Infelizmente, não chegou a pesquisar a influência do tempo de residência sobre a eficiência do processo.

Por outro lado, ANGULO [2002] trabalhou com tempos de residência entre 0,61s e 0,77s, sem variação significativa nos resultados, mas apresentando tendência de melhor eficiência e potência volumétrica para os tempos de residência de 0,61s-0,62s (velocidades de fluidização de 0,80 m/s e 0,77 m/s em 0,48m de leito fluidizado. Diâmetro de leito 150 mm).

YIN et al. [2002], trabalhando com gaseificação de casca-de-arroz em leito fluidizado circulante (que por sua concepção já considera tempos de residência maiores do que o de leito fluidizado borbulhante), trabalhou com taxas de tempo de residência de 4 s, indicando que para reduzir a taxa de alcatrão na gás de biomassa, deve-se trabalhar com tempos de residência entre 3 e 4 s.

---

<sup>1</sup> Calculado a partir de dados apresentados na fonte citada.

## 2.5 LIMPEZA DE GASES

Os elementos que devem ser controlados para que se possa utilizar o gás em um motor ou turbina são o alcatrão, cinzas volantes e os óxidos de nitrogênio. Dependendo da aplicação, os sistemas para controle e limpeza dos gases são tecnicamente viáveis, mas podem se mostrar caros a ponto de inviabilizar economicamente o projeto. Se utilizado um grupo-gerador para converter o gás em eletricidade, costuma-se limpar o gás frio. [FOSSUM, 2001; MUKUNDA, 1993; BARTHELEMY, 1981]. Se utilizada uma turbina a gás, deve-se considerar a temperatura de entrada dos gases para manter uma adequada eficiência térmica do ciclo. KINOSHITA [1997] indica que deve-se desenvolver a tecnologia de limpeza de gases quentes para tornar a geração de energia pela gaseificação da biomassa um processo comercialmente viável. As tecnologias aplicadas para a limpeza dos gases dependem do uso ao qual estes se destinam e do ponto no processo a ser aplicada a tecnologia (antes, durante ou depois da gaseificação). BRIDGEWATER [1995] sugere o uso de multi-ciclones e de precipitadores eletrostáticos para controlar os particulados na saída de gases do reator. Para o controle dos óxidos de nitrogênio e redução do monóxido de carbono e carbono voláteis, BRIDGEWATER recomenda o uso de um reator de leito fluidizado circulante. ZAPOROWSKI [2003] comenta que o tipo de limpeza do gás combustível para uso em turbinas tem também um impacto significativo na eficiência energética. A substituição de limpeza de gás a frio por limpeza a quente resulta em um aumento de 2% na eficiência de geração de eletricidade no ciclo combinado.

MUKUNDA [1993] indica que motores de combustão interna aceitam pequenas quantidade de particulados, mas em quantidade não excessiva. O pesquisador comenta que os gaseificadores produzem partículas finas de carbono e alcatrão, cujos níveis devem ser constantemente monitorados para evitar danos ao motor se trabalhado em condições extremas.

Segundo JANSEN [2002], o melhor custo benefício para gaseificadores ainda é o uso de resfriamento dos gases e filtração com filtro de manga.

STEINWALL [1997] modelou e testou um gaseificador de leito circulante. O gás gerado está na temperatura de 920°C e é refrigerado a 420°C antes de passar por um filtro de vela de cerâmica ou metal, para ser limpo dos álcalis e partículas presentes.

## 2.6 CONVERSÃO DE POTÊNCIA EM PLANTAS DE GASEIFICAÇÃO

A densidade energética da biomassa é baixa se comparada com outras fontes como carvão ou petróleo. Esta baixa densidade energética e a característica dispersa da produção da biomassa limitam sua aplicação a uma conversão energética (eletricidade ou combustíveis) realizada em instalações descentralizadas, relativamente pequenas, para evitar altos custos de transporte. Segundo CRAIG E MANN [1996], a eficiência média para geração de energia elétrica pela gaseificação da biomassa não tem superado 25%, devido a tecnologia ainda não sofisticada e limitações econômicas para transporte e armazenagem de combustível. Como consequência, tem havido limitações às dimensões das plantas de geração e alto custo da eletricidade gerada.

YIN et al. [2002] apresentam o resultado de uma planta de demonstração de gaseificação de casca-de-arroz em leito fluidizado circulante, na província de Fujian, China. A planta consiste em um gaseificador de 1000 kW e cinco grupo-geradores de 200 kW, consumindo 1,5 ton/h de biomassa e apresentando eficiência global de 17% (a eficiência apenas do gaseificador é de 65%, não referenciada se eficiência frio ou quente). Para uma outra planta, de 200kW, baseada na tecnologia de leito fixo concorrente (downdraft), apresentaram a eficiência global de 12% e a eficiência do gaseificador de 47%.

CRAIG E MANN [1996] defendem a construção de grandes centrais de geração ou cogeração elétrica a partir da biomassa. A justificativa para tal é a necessidade de economias de escala para justificar economicamente a produção e distribuição elétrica. LEVIN [1995], analisando ciclos combinados integrados a gaseificação de carvão, também favorece este argumento. Na análise econômica de OVEREND e BAIN [1994], verifica-se que o aumento em eficiência tem duas consequências: reduzir o custo do capital relativo ao kW produzido e reduzir a sensibilidade do custo final de eletricidade em relação ao componente combustível do custo.

Segundo JOHANSSON [1992], a tendência de investimento no desenvolvimento de grandes centrais deve baratear e disseminar o custo da tecnologia e aumentar a eficiência do processo, permitindo o desenvolvimento paralelo de plantas geradoras descentralizadas, se houver interesse político ou comercial para isto. O autor apresenta a viabilidade de projetos já realizados de pequenas centrais geradoras de energia pela gaseificação da biomassa.

Apesar de ainda incipiente o uso da gaseificação de biomassa, há várias plantas de gaseificação de carvão mineral para geração ou cogeração de energia elétrica propostas e desenvolvidas no mundo. Por exemplo, LEVIN [1995] descreve uma grande planta para gaseificação de carvão, na Rússia. A solução adotada para aumentar a potência gerada foi instalar em paralelo seis unidades de gaseificação, cada uma gerando 500 MW.

### 2.6.1 ALGUMAS DEFINIÇÕES

A gaseificação é definida como a conversão de um combustível sólido (biomassa ou carvão, por exemplo), em um gás combustível, por meio de uma queima parcial. O gás resultante ainda possui compostos que reagem com o oxigênio liberando energia contabilizada na forma de entalpia de combustão ou poder calorífico. Entalpia de combustão é definida como a diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes quando ocorre uma combustão completa em uma certa temperatura e pressão [MORAN et SHAPIRO, 2002]. Como a combustão é uma reação exotérmica, o sinal da entalpia de combustão é negativo. Poder calorífico é denominação tradicional e consagrada nas ciências de combustão, de mesmo significado que a entalpia de combustão, mas é um número positivo. Se toda a água formada na combustão estiver no estado líquido, esta energia chama-se poder calorífico superior (PCS), se a água estiver no estado vapor, chama-se poder calorífico inferior (PCI). A diferença entre os dois equivale à energia necessária para vaporizar a água.

Esta energia disponível no gás produto será convertida em energia útil, na forma de calor em fornos ou aquecedores ou em energia mecânica em máquinas térmicas operando ciclos de potência.

No interesse da tese, estudam-se as opções básicas de conversão de energia química (entalpia dos reagentes), por meios térmicos, para fins mecânicos (trabalho e potência de eixo). Objetivando a eletrificação de comunidades, considera-se também a conversão de potência mecânica em elétrica.

#### Máquinas Térmicas

Máquinas térmicas são equipamentos que convertem energia térmica em trabalho mecânico. Exemplos são as velhas máquinas a vapor, os motores Diesel e Otto, e as turbinas a vapor e a gás. São invenções características de nossa civilização, surgidas e totalmente

relacionadas à Revolução Industrial. Sem máquinas térmicas não haveria Revolução Industrial e sem a expansão desta, não haveria o desenvolvimento destes inventos.

A energia térmica necessária geralmente é fornecida por uma reação de combustão, ocorrida em uma câmara de combustão interna ou externa à máquina. Exemplificando: em um motor de automóvel, a combustão ocorre em uma câmara formada pelo conjunto cilindro e pistão. A queima gera uma expansão dos gases e esta energia térmica é convertida no movimento do pistão (i.e. trabalho mecânico). Em um ciclo de turbina a vapor, a energia térmica do vapor é gerada externamente à máquina, em uma caldeira ou outro equipamento (caso do aproveitamento de calor residual de processo), sendo transferida ao vapor por meio de um trocador de calor. Tem-se assim máquinas térmicas de combustão interna ou externa.

As máquinas térmicas são importantes para este estudo, pois, por meio delas, consegue-se utilizar o processo de gaseificação em uma aplicação útil, ou seja, realizar-se-á trabalho. De relevância, as duas formas básicas de conversão seriam o uso do gás produto em um motor de combustão interna - ciclo Otto ou Diesel - ou em uma turbina a gás. Neste caso poder-se-ia operar em ciclo Brayton ou anexa a uma turbina a vapor, em ciclo combinado Brayton-Rankine.

## **2.6.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

### **Descrição de Motores e Ciclos de Potência**

Motores de combustão interna, ou simplesmente “motores”, neste trabalho, são máquinas que convertem a energia química de um combustível, por meio da combustão ou oxidação com ar, em energia térmica. Há uma expansão dos gases resultantes desta reação, dentro de um conjunto cilindro-pistão, com aumento de temperatura e pressão. Esta expansão dos gases move o pistão que aciona o conjunto biela-virabrequim, convertendo movimento linear do pistão, em movimento circular de eixo (virabrequim), sendo o movimento então transmitido deste ao volante (disco de inércia na parte externa do bloco do motor) e do volante a qualquer outro mecanismo externo para utilizar o trabalho disponível (potência de eixo).

Estes são motores de movimento recíproco ou alternado, contrastando com motores de movimento rotativo, como os motores Wankel.<sup>2</sup>

Basicamente, os motores de movimento alternado podem ser classificados como de ignição por centelha ou por compressão. No primeiro caso, tem-se o clássico ciclo Otto, operando a gasolina, etanol, GLP ou GN, cuja ignição ocorre por uma centelha elétrica gerada por um eletrodo, comumente chamado de vela. No segundo caso, tem-se o ciclo Diesel, operando com óleo diesel, cuja ignição ocorre por detonação espontânea quando submetido a alta pressão no cilindro de combustão.

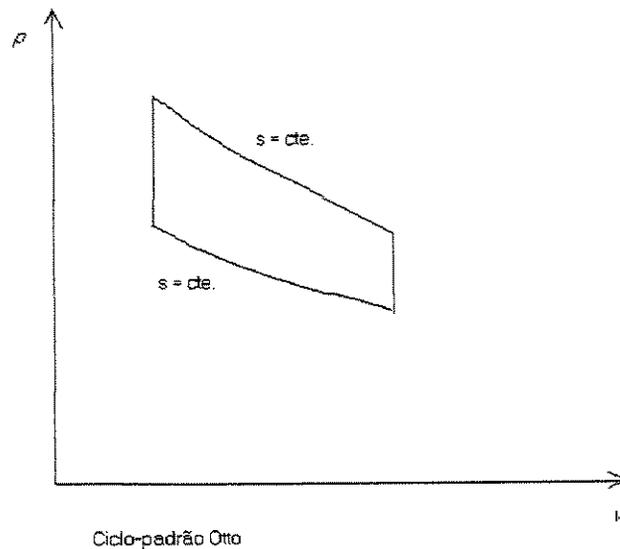


Figura 2.1 – Diagrama Ciclo Padrão Otto.

<sup>2</sup> Maiores informações sobre motores rotativos podem ser encontradas na literatura específica [GALLO et WALTER, 1986; PULKRABEK, 1997].

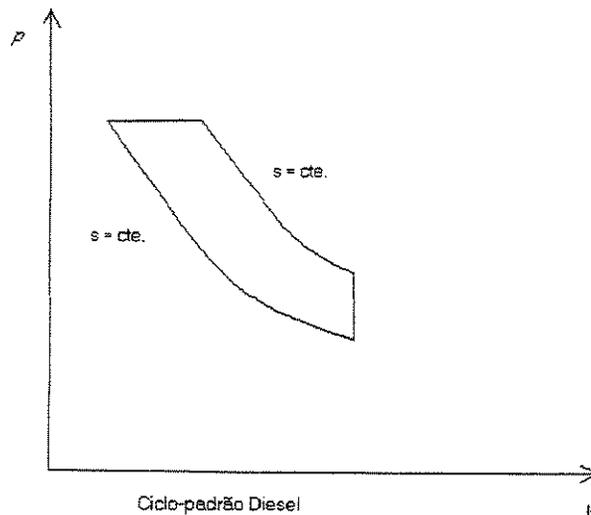


Figura 2.2 – Diagrama Ciclo Padrão Diesel.

Como pode-se ver na Figura 2.1, o Ciclo Padrão Otto consta de uma adição instantânea de calor pela ignição da centelha, causando um aumento de pressão a volume constante. A seguir, ocorre a expansão do volume com movimento do pistão em um processo isentrópico. A expulsão dos gases quentes é simbolizada por uma redução de pressão e perda de calor a volume constante, seguida de uma compressão do volume de controle, causada pelo retorno do pistão ao ponto-morto superior (ver definição na próxima secção).

Na Figura 2.2, é vista a representação do Ciclo Padrão Diesel. Considera-se que a adição de calor ocorre à pressão constante, iniciando a expansão dos gases e o deslocamento do pistão, o qual continua depois em uma expansão isentrópica. Como no ciclo Otto, o calor é rejeitado pela expulsão dos gases quentes e admissão do ar frio. Segue, finalmente, a compressão do ar até o volume mínimo, quando é injetado o combustível a alta pressão, causando a ignição.

#### Algumas definições para motores

Ponto-morto superior: posição do pistão mais avançada no percurso de compressão, resultando no menor volume dentro do cilindro.

Ponto-morto inferior: posição do pistão menos avançada no percurso de compressão, resultando no maior volume dentro do cilindro.

Taxa de compressão: relação entre os volumes no cilindro entre o ponto-morto superior e o ponto-morto inferior. Atualmente, os motores de ignição a centelha possuem taxa de compressão entre 8 e 11, enquanto os motores de ignição por compressão possuem taxa de compressão entre 12 e 24 [PULKRABEK, 1997]. Quanto maior a taxa de compressão, maior a eficiência térmica do ciclo [MORAN et SHAPIRO, 2002]

Fator Lâmbda ( $\lambda$ ): relação entre a relação ar-combustível estequiométrica e a relação ar-combustível real. Se maior que 1, a mistura é chamada de rica, significando rica em combustível. Se menor que 1, a mistura é chamada pobre. Tecnicamente falando, é o inverso do Fator de Ar, parâmetro comum na gaseificação.

### 2.6.3. CICLO COMBINADO

#### Descrição

Como dito, o gás produto pode ser utilizado em uma turbina a gás, operando em ciclo Brayton. O ciclo combinado almeja unir dois ciclos com o propósito de aumentar a eficiência do processo: um, com alta temperatura de processo e o outro, com baixa temperatura de liberação do calor residual. Vale lembrar que, para aumentar a eficiência de um ciclo termodinâmico, aumenta-se a temperatura média de fornecimento de calor no ciclo e diminui-se a temperatura média de rejeição do calor residual.

Utiliza-se, portanto, um ciclo Brayton no qual o fluido de trabalho opera a altas temperaturas na turbina a gás, mas com os gases residuais a temperatura ainda alta. O calor destes gases é aproveitado para gerar vapor em um ciclo Rankine, com turbina a vapor, cujo calor residual pode ser liberado a temperaturas mais próximas da temperatura ambiente. A tabela 2.1 apresenta comparação de temperaturas dos ciclos e as eficiências de ciclo ideal. Na verdade as eficiências reais são bem inferiores, estando na ordem de 55 a 60% para o ciclo-combinado. HUGUES [2003] indica que a tecnologia de ciclo combinado pode ser associada à gaseificação de biomassa para potências acima de 10 MW, com eficiência global entre 40 e 55%.

	Brayton	Rankine c/ Reaquecimento	Rankine sem Reaquecimento	Ciclo- combinado
Temperatura média de fornecimento de calor	950-1000 K	640-700 K	550-630 K	950-1000 K
Temperatura média de rejeição de calor	500-550 K	320-350 K	320-350 K	320-350 K
Eficiência teórica do ciclo	42-47%	45-54%	37-50%	63-68%

Tabela 2.1: comparação termodinâmica dos ciclos [KEHLHOFER, 1991]

Um diagrama do ciclo-combinado básico pode ser visto na Figura 2.3.

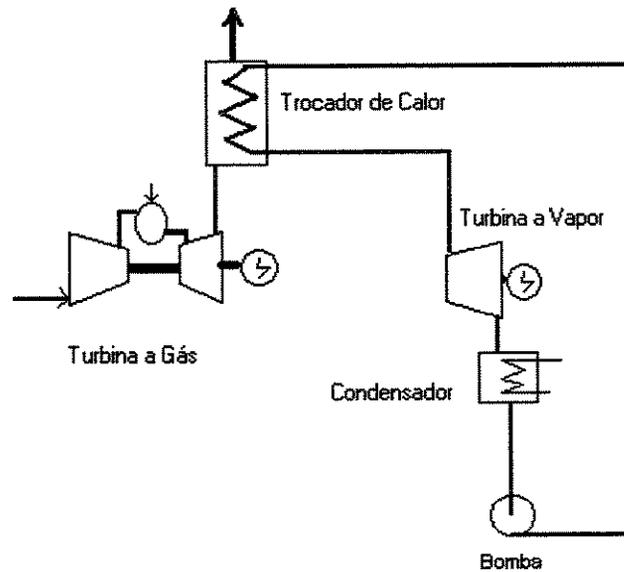


Figura 2.3: configuração básica do ciclo combinado com condensação do vapor.

A eficiência do ciclo combinado é dada pela equação 2.8:

$$\eta_{CC} = \frac{W_{TG} + W_{TV}}{Q_d} \quad (2.8)$$

onde:

$\eta_{CC}$  : eficiência global do ciclo-combinado;

$W_{TG}$  : trabalho produzido no ciclo Brayton (Turbina a gás);

$W_{TV}$  : trabalho produzido no ciclo Rankine (Turbina a vapor);

$Q_d$  : calor disponível ao ciclo.

Na configuração da Figura 2.3, o calor disponível ao ciclo está associado à energia liberada na queima do combustível na câmara de combustão da turbina a gás.

## **Turbinas térmicas**

### Turbina a gás

Turbinas a gás são máquinas térmicas rotativas acionadas pela expansão de gases contra um conjunto de aletas. Na verdade, o equipamento que chama-se turbina é composto de três partes principais: o compressor, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita, na qual ocorre a expansão dos gases gerados na câmara de combustão e onde a energia térmica dos gases é convertida em trabalho mecânico de eixo.

### Turbinas Aeroderivativas

Ultimamente têm-se utilizado cada vez mais turbinas a gás aeroderivativas para geração de potência. Sua maior vantagem é o custo e a flexibilidade de operação. Elas podem ser de ciclo simples (Brayton), STIG (steam injected gas turbines – turbinas a gás com injeção de vapor para aumento de potência) ou ainda integradas em ciclos combinados.

As turbinas aeroderivativas combinam o estado da arte de tecnologia de altas temperaturas, metalurgia e altas relações de pressão, alcançando eficiência térmica de até 40%.

Por sua origem aeronáutica, as turbinas aeroderivativas são uma ótima opção para geração de potência em ciclos simples ou em aplicações intermitentes como em geração para suprimento de picos de demanda, da mesma forma que uma aeronave atua com potência variável. Além disto, turbinas aeroderivativas possuem ignição rápida (cerca de 1 minuto), ideal para suprimento de emergência.

### Turbina a vapor

Turbinas a vapor podem ser fabricadas numa larga faixa de geração. Contudo, ciclos a vapor com turbinas de capacidade menor que 5 MW apresentam eficiência na geração elétrica baixa, entre 10 e 20%, e custos de manutenção relativamente altos. Para capacidades entre 5 MW e 20 MW, a eficiência do ciclo situa-se na ordem de 25% e, somente para sistemas de capacidade acima de 50 MW, consegue-se obter eficiência de ciclo superior a 30% [HUGUES, 2003].

A vantagem de turbinas a vapor é a maturidade tecnológica e confiabilidade de operação. A desvantagem está no alto custo de instalação e operação e na baixa eficiência se operada em cargas parciais. Na opção do ciclo combinado a turbina a vapor é a solução para reaproveitamento do calor residual dos gases de exaustão da turbina a gás.

ESPÍRITO SANTO [2001] indica que geralmente, em ciclos combinados, as plantas costumam trabalhar com a produção de vapor entre 62 e 103 bar. Acima deste valor, o ganho de eficiência da planta seria marginal, não justificando economicamente o maior investimento.

### **Configurações**

O objetivo de definir uma configuração mais complexa para uma planta de ciclo-combinado é otimizar a eficiência global e a produção de potência elétrica.

A maior eficiência global não ocorrerá para a maior eficiência dos dois ciclos, mas para um ponto de compromisso, pois a maior eficiência do ciclo Brayton deve resultar em menores temperaturas nos gases de exaustão, o que, conseqüentemente, diminui a temperatura de geração de vapor e a potência e eficiência do ciclo Rankine. O fator crítico, portanto, é a temperatura na entrada da turbina a gás.

No lado do ciclo Rankine, costuma-se considerar a temperatura dos gases de exaustão do ciclo Brayton como dado do problema, buscando-se, a partir deste, otimizar a conversão de calor em potência no ciclo vapor.

Muitas vezes são utilizadas várias turbinas a gás em paralelo para cada turbina a vapor. Observa-se geralmente, no mercado, a utilização de duas turbinas a gás para cada turbina a vapor. Utilizam-se também variações dos ciclos Brayton e Rankine, que aumentem a eficiência da planta.

## Performance

Na tabela 2.2 pode-se ver a performance comparada de algumas configurações, utilizando-se de turbinas General Electric [Williams et Larson, 1993].

	Performance na Cogeração				Performance para máxima potência elétrica		Custo de Capital Instalado
	Eletricidade		Máximo vapor de processo		MW <sub>e</sub>	Eficiência	
	MW <sub>e</sub>	Eficiência	Ton/h	Eficiência			US\$/kW <sub>e</sub>
<b>Biomassa com 15% de umidade</b>							
<b>BIG/ISTIG</b>							
LM-8000 (não-comercial)	97	37,9%	76,2	25,4%	111,2	42,9%	870
<b>BIG/STIG</b>							
LM-5000	39	31,3%	47,7	30,0%	51,5	35,6%	1.120
LM-1600	15	29,8%	21,8	33,8%	20,0	33,0%	1.380
LM-38	4	29,1%	5,7	32,4%	5,4	33,1%	1.840
<b>Biomassa com 50% de umidade</b>							
<b>BIG/STIG</b>	<b>38,3</b>	<b>29,5%</b>	<b>47,7</b>	<b>28,9%</b>	<b>50,8</b>	<b>33,5%</b>	<b>1.220</b>
<b>LM-5000</b>							
<b>CEST<sup>3</sup></b>	<b>37</b>	<b>10,0%</b>	<b>319,0</b>	<b>52,1%</b>	<b>77,0</b>	<b>20,9%</b>	<b>1.520</b>

Tabela 2.2 – Desempenho de algumas turbinas.

Estes valores indicativos servem como “benchmarking”, ou seja, valores de comparação para referenciar os resultados da tecnologia que está sendo desenvolvida neste trabalho.

<sup>3</sup> Turbina a Vapor Extração e Condensação. Entrada: 6,2 MPa, 400 °C. Extração: vapor saturado, 12,9 bar (119 ton/h) e 4,4 bar (300 ton/h). Eletricidade máxima corresponde à extração mínima de 72 ton/h a 4,4 bar [William et Larson, 1993].

#### 2.6.4 GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

A potência de eixo das máquinas térmicas é convertida em potência elétrica por meio dos geradores elétricos. Estes, quando acoplados aos motores de combustão interna, formam os chamados grupo-geradores.

Nos geradores, a energia mecânica que não é transformada em eletricidade resulta em uma perda que aparece como calor. Conseqüentemente, quanto maior for a perda percentual (menor eficiência de conversão), maior será o aumento de temperatura do gerador. Se este aumento de temperatura for excessivo, ultrapassando o limite de temperatura dos componentes (principalmente materiais isolantes) do gerador, será necessário ou aplicar ventilação forçada sobre o gerador ou diminuir a geração de eletricidade (diminuição de carga), resultando conseqüentemente em menor entrada (potência de eixo) e menos perdas [KOSOW, 1979].

Algumas perdas são dependentes da carga imposta ao gerador, enquanto outras são independentes desta carga (“perdas a vazio”). As perdas podem ser classificadas em:

- a) Perdas elétricas: produzidas pela circulação de corrente pelo enrolamento da bobina;
- b) Perdas rotacionais ou potência extraviada: função do movimento do eixo, incluindo as perdas mecânicas da rotação e as perdas no ferro ou no núcleo, também resultantes da rotação. Exemplos destas últimas são as perdas por histerese e perdas por correntes parasitas.

UDAETA [2001] indica que os motores de indução de corrente alternada trifásicos comuns têm uma eficiência desde aproximadamente 73% para equipamentos de 0,75 kW, até 93% para geradores na ordem de 112 kW. KOSOW [1979] reforça este valor, indicando que geradores possuem eficiências na ordem de 90%, levando em conta que, se operados a carga reduzida, a eficiência tenderá a cair até 10%.

Nem sempre a eficiência de uma máquina elétrica (motor ou gerador) é medida por modo direto, ou seja, medindo-se a potência fornecida na entrada e a carga na saída, pois para máquinas grandes, isto pode-se mostrar inviável. Imagine como suprir uma carga elétrica de alguns megawatts, demanda equivalente a de algumas cidades. KOSOW [1979] indica a metodologia para realizar os testes de eficiência por método indireto, i.e. aferindo-se as perdas. KOSOW indica

também que a eficiência de uma máquina elétrica é máxima quando as perdas fixas são iguais a todas as perdas variáveis.

As perdas rotacionais de um gerador CC são determinadas fazendo-o funcionar como motor a vazio (sem qualquer carga mecânica), à sua velocidade nominal e com uma tensão aplicada à armadura, igual a gerada a plena carga. As perdas rotacionais serão praticamente iguais ao produto da tensão aplicada pela corrente medida na armadura [KOSOW, 1979]. As perdas rotacionais de um gerador CA síncrono também são medidas com ele funcionando a vazio.

#### **2.6.5 OUTRAS ROTAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA**

Outras opções de conversão termoelétrica de biomassa são também tecnicamente viáveis e poderiam ser consideradas dependendo do custo associado e da capacidade desejada de geração. Por exemplo, tradicionalmente, o setor sucro-alcooleiro é praticamente auto-sustentado em energia mecânica, elétrica e em calor para o processo. Esta energia é gerada utilizando-se apenas do ciclo a vapor Rankine: o vapor é gerado em caldeiras por meio da queima do bagaço. O vapor fornece calor e potência mecânica para a produção de açúcar e álcool. O vapor também é usado no ciclo Rankine, movendo uma turbina a vapor e gerando energia elétrica. Por causa do excesso de bagaço disponível, geralmente trabalha-se com ciclos de eficiência energética muito baixa, objetivando maximizar a eliminação do resíduo, ao invés de maximizar a geração de energia.

A tabela 2.3, adaptada de HUGUES [2003], apresenta algumas das opções de tecnologias para conversão de biomassa em eletricidade.

<b>Conversão Primária</b>	<b>Conversão Intermediária</b>	<b>Conversão Final</b>	<b>Capacidade Elétrica</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Nível de Desenvolvimento da Tecnologia</b>
Combustão	Geração de Vapor	Motor a Vapor	200 kW – 2 MW	10 – 12%	Comercial
		Turbina a Vapor	> 2 MW	15 – 40%	Comercial
	-	Motor Stirling	0,5 kW – 100 kW	14 – 20%	Demonstração
	-	Turbina para gases quentes de exaustão	> 400 kW	25 – 30%	Demonstração, quase comercial.
Gaseificação	-	Ciclo Combinado	> 10 MW	40 – 55%	Demonstração, quase comercial.
	-	Motor de combustão interna	100 kW – 2 MW	27 – 31%	Demonstração, quase comercial.
	-	Microturbinas	5 kW – 100 kW	15 – 25%	Conceitual.
	Extração H <sub>2</sub>	Células de combustível	20 kW – 2 MW	25 – 40%	Conceitual.
Combustão + Gaseificação	-	“Co-firing”	> 20 MW	-	Comercial.

Tabela 2.3 – Rotas de conversão termoeétrica para biomassa. Adaptado de Hugues [2003].

## 2.7 CONVERSÃO DE MOTORES PARA USO COM GÁS POBRE

### Motores de ignição por compressão

Já é consagrado o uso de motores ciclo Diesel para o uso híbrido com gás pobre. Exemplos são os trabalhos desenvolvidos pela equipe do Prof. Mukunda, no Indian Institute of Science [MUKUNDA, 1993] e pelo SINTEF Energy Research em conjunto com a Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia em Trondheim [FOSSUM et al., 2001]. Nestes motores, pode-se realizar uma substituição de até 80% do diesel. Os 20% restantes são necessários para a ignição da mistura combustível. A exata quantia a ser substituída é função do ponto de operação do motor, relacionado com a carga e rotação a ele aplicadas. Basta apenas adaptar a admissão do combustível, realizando uma pré-mistura do ar ao gás pobre.

FOSSUM et al. [2001] discutem que, entre as adaptações possíveis para o motor Diesel, costuma-se reduzir a taxa de compressão (cerca de 17:1 no motor ciclo Diesel) e instalar um sistema de ignição por centelha (velas).

### Motores de ignição à centelha

Em um motor de ignição à centelha, não é necessário o uso de um combustível auxiliar para a combustão do gás, mas o motor pode ter seu desempenho muito prejudicado se a sua taxa de compressão não for adequada ao gás [BARTHELEMY, 1981]. FOSSUM et al. [2001] quantificam esta redução<sup>4</sup> em aproximadamente 30% da potência nominal do motor. Esta queda de eficiência pode ser reduzida ao se aumentar a taxa de compressão. Neste caso, o aumento da taxa de compressão pode resultar em detonação se houver alto conteúdo de hidrogênio no gás produto.

Se o gás não for limpo, o uso de turbo-compressores para aumentar a eficiência pode ser comprometido pelo alto conteúdo de alcatrão e particulados no gás, que podem causar problemas operacionais no equipamento.

BARTHELEMY [1981] sugere algumas adaptações em um motor a gasolina, para otimizar o seu uso com gás pobre:

1. Aumentar a taxa de compressão, o que pode ser obtido ao se reduzir a altura da câmara de combustão, usinando o cabeçote do motor;

2. Aumentar o diâmetro das válvulas;
3. Aumentar a altura do pistão, de preferência colocando uma cabeça convexa;
4. Aumentar a secção transversal do duto de admissão, para reduzir as perdas de carga.
5. Deve-se avançar o ponto de ignição, pois a velocidade de chama do gás pobre é menor.
6. Deve-se usar velas frias, de aquecimento lento.
7. O gás deve ser alimentado à menor temperatura possível, para aumentar sua densidade e, conseqüentemente, a quantidade mássica de gás alimentado. Recomenda-se 30 ° C.

FOSSUM [2001] sugere a adição de metano ao gás pobre, para melhorar o desempenho do motor e diminuir as emissões de CO. As emissões de CO seriam causadas por combustão incompleta causada por baixa velocidade e estabilidade de chama dentro da câmara de combustão.<sup>5</sup> Uma outra possibilidade seria enriquecer o gás com GN.

#### Taxa de compressão e Octanagem

Octanagem é a medida de tendência à detonação do combustível. Quanto maior o número, menor a tendência à auto-ignição do combustível. Octanagem 100 refere-se à tendência à detonação do iso-octano (2,2,4 trimetil pentano) e Octanagem 0 refere-se ao n-heptano. [PULKRABEK, 1997]. Nos motores de combustão à centelha, o combustível deve ter alta octanagem para resistir à compressão induzida do pistão até o momento correto da ignição pela centelha.

Nils NYGARD [1981] da Purwaco International, Minneapolis, Estados Unidos, relata que o gás pobre tem taxa de octanagem próxima a 100 e funcionaria bem em motores com taxa de compressão acima de 10. Isto indica que os motores a etanol fabricados no Brasil, cuja taxa de compressão é geralmente 11, se adequariam bem ao uso com gás pobre, sem grandes modificações. Uma outra possibilidade é o uso de motores já adaptados ou desenvolvidos para o uso com gás natural veicular. Estes motores, de taxa de compressão 12, funcionariam a contento, necessitando apenas uma regulagem no ponto de ignição, para otimizar sua operação. PULKRABEK [1997] apresenta outra questão: a uma determinada octanagem existe uma taxa de

---

<sup>4</sup> A redução do ponto de operação em relação à potência nominal é muitas vezes conhecida pelo termo inglês “de-rating”, comum também na operação de turbinas a gás.

<sup>5</sup> Ver em Revisão de Literatura: Impactos Ambientais.

compressão crítica acima da qual há risco de detonação. Por exemplo, um combustível de octanagem 80 (AKI)<sup>6</sup> estaria limitado a uma taxa de compressão 8,5.

FOSSUM et al. [2001] realizaram testes em um motor Diesel adaptado para ignição à centelha, com taxa de compressão reduzida de 17 para 11. Os resultados foram satisfatórios e o motor apresentou eficiência de eixo de 21,5% operando com um gás com PCI igual a 4,5 MJ/Nm<sup>3</sup>.<sup>7</sup> O motor foi operado com o ponto de ignição adiantado em 20° em relação ao ponto morto superior.

### Admissão do combustível

Em ambos os tipos de motores citados, a alimentação do combustível, o gás pobre, é feita em uma pré-mistura com o ar e esta mistura é então encaminhada ao motor, pela admissão tradicional de ar [BARTHELEMY, 1981, MUKUNDA et al., 1993; FOSSUM et al., 2001] Pode-se simplesmente fazer uma junção em “T”, com válvulas para regular a mistura gás/ar, ou projetar e construir um venturi adequado ao sistema. A primeira opção apresenta-se como a mais simples e versátil para projetos de desenvolvimento como o realizado nesta tese. Depois que os estudos de desenvolvimento estiverem prontos, pode-se otimizar o sistema de admissão, projetando o venturi.

Quanto à tubulação que liga o gaseificador ao motor, BARTHELEMY [1981] recomenda tubos de aço de 2,5 a 3,0 mm de espessura. O diâmetro da tubulação é indicado segundo a tabela 2.4. A experiência resultante do trabalho desta tese indica que pode-se utilizar tubulações de diâmetro um pouco menor do que o indicado.

---

<sup>6</sup> “Anti-knock index” ou índice antidetonante, representa a média entre o resultado de dois métodos de medição de octanagem: o método do motor e o método de pesquisa.

<sup>7</sup> A composição deste gás era: 19,6% CO; 0,0 CH<sub>4</sub>; 19,0 H<sub>2</sub>; 14,9 CO<sub>2</sub>; 46,5 N<sub>2</sub> [FOSSUM et al., 2001].

	Do gaseificador ao sistema de resfriamento	Do resfriamento ao sistema de filtragem	Da filtragem ao misturador gás/ar
a) Motores de 25 a 45 CV	70 mm	60 mm	54 mm
b) Motores de 45 a 70 CV	80 mm	70 mm	60 mm
c) Motores de 70 a 100 CV	102 mm	89 mm	70 mm

Tabela 2.4: diâmetro da tubulação para o gás pobre [BARTHELEMY, 1981].

## 2.8 ANÁLISE ECONÔMICA

Para o completo estudo de viabilidade econômica e planejamento energético da utilização da biomassa como fonte energética, deve-se levar em conta os custos de plantio, cultivo, colheita, armazenamento e transporte da biomassa. O processo inicia-se com o estudo da disponibilidade e adequação da terra para a cultura da biomassa [ALDERUCCI et al., 1993]. O local deve ter o solo e o clima adequados para se ter uma produtividade agrícola tal que viabilize o projeto. Atualmente ainda se utilizam muitos resíduos como fonte de biomassa, mas para que a biomassa possa contribuir significativamente na matriz energética mundial, pode-se fazer necessárias plantações energéticas, ou seja, o plantio de espécies desenvolvidas especialmente para a geração de energia [KINOSHITA, 1997; HALL, 1992]. Segundo HALL [1992], as plantações energéticas devem ser manejadas intensivamente como as plantações agrícolas normais, mas o ciclo de colheita seria diferente, dependendo da cultura.

HALL [1992] apresenta o balanço energético para o plantio e colheita da biomassa, indicando que deve-se levar em conta a energia necessária para produzi-la e a energia necessária para converter a biomassa colhida.

O balanço energético da conversão da biomassa irá depender de outros fatores. Primeiro deve-se verificar a demanda energética de uma pequena comunidade ou propriedade rural. Existem várias tecnologias de conversão do gás resultante da gaseificação da biomassa. A

escolha da ideal vai depender da demanda de energia, disponibilidade de mão-de-obra e manutenção da planta e facilidade de obtenção de suprimentos. A teoria de análise econômica e tomada de decisões para o setor energético é apresentada por KAPLAN [1983]. HORLOCK [1995] apresenta o equacionamento para se avaliar economicamente uma planta de conversão energética. Seu trabalho enfoca ciclos combinados, mas o equacionamento pode ser utilizado perfeitamente para outros modelos de planta energética.

Finalmente, devem ser incluídos na análise de custos, os impactos ambientais decorrentes, ou mesmo evitados pelo uso da tecnologia da gaseificação da biomassa. FRANGOPOULOS E CARALIS [1997] demonstram como estimar os custos externos (externalidades ambientais e sociais) da geração de energia e como considerá-los na análise econômica do projeto.

## **2.9 IMPACTO AMBIENTAL**

A gaseificação de biomassa, por ser uma oxidação parcial de resíduos orgânicos, tem como produto um gás, composto basicamente de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  e vapor d'água, gás este destinado a um processo térmico, i.e., ser queimado e reduzido.

O gás resultante da gaseificação da biomassa, ao contrário do gerado a partir do carvão, tem conteúdo de enxofre insignificante [KINOSHITA, 1997]. Quanto às emissões de gás carbônico, se a biomassa for produzida e consumida de maneira sustentável, fecha-se o ciclo de consumo-produção do gás carbônico, não aumentando a concentração presente na atmosfera.

Se não houver problemas locais de vazamento na instalação, a maior preocupação ambiental seria com o sistema de limpeza dos gases, ou seja, destino para as cinzas e alcatrão recolhidos. As cinzas costumam ser recolhidas por separadores ciclônicos ou eletrostáticos e o alcatrão é recolhido por lavagem dos gases ou por filtros de vela, metálicos ou de manga (tecido). Daí necessita-se providenciar destino para estes resíduos. As cinzas podem ser utilizadas como adubo ou na indústria do cimento, enquanto o alcatrão pode ser queimado, para aproveitamento do calor ou do carbono de seus componentes (por exemplo, na indústria de negro de fumo). Vale salientar que filtros de manga entopem-se facilmente se houver presença significativa de alcatrão

nos gases. Desta forma, seu uso é restrito a gaseificadores que produzam um gás com pouco alcatrão, ou necessitam de uma pré-limpeza dos gases, para retirar o excesso de alcatrão.

Segundo HALL [1993], o conteúdo de cinzas da biomassa é bem menor do que o de combustíveis fósseis, como o carvão. Geralmente é uma cinza livre de metais tóxicos e possui valor como fertilizante, podendo ser despejada na área de cultivo da biomassa para ajudar a repor os nutrientes do solo. A porcentagem de enxofre presente nas cinzas da biomassa também é irrisória se comparada à do carvão.

Nas aplicações mais usuais da gaseificação, pode-se desconsiderar a formação térmica de  $\text{NO}_x$ , pois a temperatura adiabática de chama do gás produto não ultrapassa  $1.100\text{ }^\circ\text{C}$  [Jansen et al., 2002]. Segundo o pesquisador, a maneira de se formar os óxidos de nitrogênio seria por meio da conversão de  $\text{NH}_3$  ou de  $\text{HCN}$  no gás produto. Concentrações típicas são apresentadas na Tabela 2.5. Yoshida [1997] também concorda neste ponto, indicando que as baixas temperaturas de operação do gaseificador ( $800\text{-}900\text{ }^\circ\text{C}$ ) reduzem a formação de óxidos de nitrogênio.

Tecnologia	$\text{NH}_3$ [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]	$\text{HCN}$ [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]
Leito Fixo	600-1800	60-110
Leito Fluidizado Borbulhante	500-1500	50-150
Leito Fluidizado Circulante	750-1500	150-250

Tabela 2.5: faixa de concentração de  $\text{NH}_3$  e  $\text{HCN}$  no gás produto [JANSEN et al., 2002].

Em turbinas a gás, a conversão de  $\text{NH}_3$  em  $\text{NO}_x$  situa-se na faixa de 50 a 90%. Em motores de combustão interna a gás, pode-se considerar a conversão em 30%. Na Tabela 2.6, JANSEN ET AL. [2002] apresentam valores de emissão de  $\text{NO}_x$  e particulados para plantas piloto de gaseificação, com motor e turbina, ambos operando com 5 MW de potência no gás produto. Para o caso de turbinas a gás, o pesquisador considerou 100% de conversão de  $\text{NH}_3$  em  $\text{NO}_x$ .

FOSSUM [2001], apresenta resultados com menor emissão de  $\text{NO}_x$ , operando um gaseificador de leito fixo de 30 kW, conectado a um motor de combustão interna. Os testes resultaram na emissão de  $\text{NO}_x$  de  $53\text{ mg}/\text{Nm}^3$  ou  $0,27\text{ g}/\text{kWh}$ . No mesmo estudo, apresentam-se valores de emissão de CO de  $4.735\text{ mg}/\text{Nm}^3$  ou  $22,3\text{ g}/\text{kWh}$ .

Tecnologia	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Particulados [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Gaseificador de 5 MW, com motor de combustão interna		
Leito Fixo	133-389	100-1500
Leito Fluidizado Borbulhante	92-275	10.000-60.000
Leito Fluidizado Circulante	130-256	30.000-100.000
Gaseificador de 5 MW, com turbina a gás		
Leito Fixo	443-811	100-1500
Leito Fluidizado Borbulhante	306-917	10.000-60.000
Leito Fluidizado Circulante	467-853	30.000-100.000

Tabela 2.6 – Emissões típicas dos gases de exaustão em plantas de gaseificação [JANSEN et al., 2002].

O alto teor de CO pode ser explicado por alguns fatores: baixa temperatura adiabática de chama para o gás produto, comparado com o gás natural, causando combustão incompleta. Ademais o gás produto possui velocidade de chama relativamente baixa [FOSSUM, 2001] e, conseqüentemente, baixa estabilidade de chama. Isto pode causar pontos localizados de extinção da chama dentro do cilindro do motor, resultando em combustão incompleta. Isto pode ser resolvido com a mistura do gás produto com outro gás de melhores propriedades, como, por exemplo, o gás natural ou aumentando a taxa de H<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> presentes no gás produto.

Uma análise de ciclo de vida é essencial para melhor determinar o impacto ambiental de uma planta de ciclo combinado integrada à gaseificação de biomassa. Conforme mostram Mann et al. [1996], sempre pode-se minimizar o impacto ambiental e melhorar a eficiência de um sistema após a análise de ciclo de vida.

## 2.10. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como referência para os experimentos deste trabalho, apresentam-se alguns resultados de pesquisas anteriores.

### 2.10.1. Análise Imediata

A casca-de-arroz utilizada obteve a seguinte composição, comparada ao do bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados podem ser vistos na tabela 2.7. A umidade é apresentada em base úmida, ou seja referenciando-se à biomassa com umidade. Os outros três valores são tradicionalmente apresentados referenciando-se à biomassa já seca, totalizando entre si, 100%.

Análise Imediata	Casca-de-arroz [ANGULO, 2002]	Capim-elefante [FERNANDES, 2000]	Bagaço-de-cana [SÁNCHEZ, 1998]
Umidade (%b.u.)	9,8%	10,8%	n.d.
Carbono fixo (%b.s.)	10,1%	8,4%	15,0%
Voláteis (%b.s.)	68,9%	82,6%	73,8%
Cinzas (%b.s.)	21,0%	10,9%	11,3%

Tabela 2.7 - Análise imediata.

Verifica-se na tabela, tanto para a casca de arroz, como para o capim-elefante, um alto teor de cinzas, as quais, sob elevadas temperaturas, podem-se fundir e aglomerar com a alumina, levando ao colapso do leito. Para evitar isto, deve-se controlar a temperatura do experimento, para que não passe dos 900°C.

### 2.10.2. Análise Elementar

Os resultados da análise elementar para diversas biomassas, fornecidos pela Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP, são apresentados abaixo, na Tabela 2.8.

Análise Elementar	Casca-de-arroz [ANGULO, 2002]	Capim-elefante [FERNANDES, 2000]	Bagaçodecana [SÁNCHEZ, 1998]
Carbono	39,6%	36,5%	44,8%
Hidrogênio	5,5%	5,3%	5,3%
Nitrogênio	0,4%	1,3%	0,4%
Oxigênio	33,5%	46,7%	39,6%
Cinzas, S, Cl e outros elementos	21,0%	10,1%	9,9%

Tabela 2.8 - Análise elementar.

### 2.10.3. Poder Calorífico

O resultado de pesquisas anteriores é apresentado na tabela 2.9.

	Casca-de-arroz [ANGULO, 2002]	Capim-elefante [FERNANDES, 2000]	Bagaçodecana [SÁNCHEZ, 1998]
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	15,3	14,6	19,1
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	13,0	13,4	17,9

Tabela 2.9 - Poder calorífico.

## **CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO RURAL E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Seguindo a motivação de implementar a planta-piloto de gaseificação de biomassa no meio rural, pesquisou-se o que significa desenvolvimento rural e como implementar projetos na área.

Durante o projeto, foi cogitada a possibilidade de utilizar a tecnologia em comunidades isoladas. Realizou-se, então, visita para observar a realidade de uma comunidade isolada na região amazônica.

Desdobrou-se o conceito de Desenvolvimento Sustentável para o conceito de Comunidades Sustentáveis, o qual não se restringe nem a comunidades rurais, nem a comunidades isoladas ou pequenas, mas abrange qualquer comunidade gerida de forma sustentável. Este conceito permite localizar de forma genérica o segmento inicial de mercado onde poderia ser implementada a tecnologia de gaseificação de biomassa, já que esta é, como fonte de energia renovável, vinculada, já por sua natureza, à idéia de desenvolvimento sustentável.

Convém salientar que a tecnologia de gaseificação em leito fluidizado é comercialmente aplicada para fontes não-renováveis como o carvão, mas este estudo propõe-se trabalhar com o conceito de energia renovável e desenvolvimento sustentável.

### **3.2 DESENVOLVIMENTO RURAL**

O desenvolvimento rural consiste de um conjunto de práticas que levem ao progresso em áreas rurais [SHEPHERD, 1998]. Mas como se pode definir progresso? Tradicionalmente, o progresso está associado ao acúmulo de recursos e riquezas, junto à redução de pobreza. Isto

CAVALIERO [2002] também defende a participação da comunidade na elaboração, implantação e desenvolvimento de projetos de geração de energia elétrica por fontes renováveis.

### Bem-comum

Nas comunidades tradicionais, vários dos recursos são de propriedade e uso comunal, daí denominados de bem-comum. Apesar de ser um conceito arraigado em nossa cultura moderna ocidental, a propriedade privada não é algo universal. Vários povos possuem áreas de pastagem coletivas, assim como os recursos hídricos e florestais. É fato conseqüente da formação do Estado-nação a transformação de bens-comuns em bens-públicos. O bem-comum tem um sentido de “pertencer à comunidade local”, de maneira distinta de um bem-público que é gerido – e muitas vezes taxado – por um governo central. O bem-comum conota coletividade sem posse, enquanto o bem-público é, de certa forma, propriedade do Estado.<sup>10</sup> JANUZZI [2000] denomina bens-públicos como bens e serviços que não são produzidos em função da existência de um mercado competitivo, podendo ser consumidos por todos indivíduos. Segundo o autor, os bens públicos são caracterizados por três fatores: princípio da não-exclusão (uma vez posto à disposição de um consumidor não pode-se restringir o uso pelos demais), princípio da não-rivalidade (o consumo do bem por um indivíduo não diminui as possibilidades dos outros o consumirem – excetuando-se o extremo de uma demanda excessiva) e o fator de que há falta de interesse comercial de firmas ou indivíduos em produzir este bem.

Não apenas recursos naturais podem ser caracterizados como bem-comum. Benfeitorias como moinhos ou mesmo grupo-geradores podem ser considerados bens comuns e geridos como tais. Este é o caso, por exemplo, do grupo-gerador diesel da comunidade Itancoã, próxima a Belém do Pará e visitada pelo autor. Itancoã é uma comunidade quilombola, isolada da rede elétrica, e que participou do PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), tendo um painel solar e um grupo-gerador diesel para eletrificar a escola, o posto de saúde e o centro comunitário (Figura 3.1). O gerador também move a bomba do poço para

---

<sup>10</sup> Segundo o Art. 20 da Constituição Federal Brasileira [Brasil, 1988], são “bens da União”: “III - os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais; V - os recursos naturais da plataforma continental e da zona econômica exclusiva; VIII - os potenciais de energia hidráulica; IX - os recursos minerais, inclusive os do subsolo; XI - as terras tradicionalmente ocupadas pelos índios”. Da mesma forma, no “§ 1º - É assegurada, nos termos da lei, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios, bem como a órgãos da administração direta da União, participação no resultado da exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica e de outros recursos minerais no respectivo território, plataforma continental, mar territorial ou zona econômica exclusiva, ou compensação financeira por essa exploração”. Caracteriza-se portanto a propriedade do Estado sobre o que é bem-público.

abastecer 28 das 98 famílias da comunidade. O sistema fotovoltaico lá instalado estava inoperante durante a visita do autor em outubro de 2003, danificado por uma descarga atmosférica (Figura 3.2). Em compensação, o grupo-gerador apresenta uma manutenção primorosa, demonstrando que um bem-comum pode ser gerido adequadamente pela população local, de maneira mais efetiva do que um outro quando necessárias a gestão e manutenção externa (o painel fotovoltaico danificado).



Figura 3.1 – Escola pública na Comunidade de Itancoã – PA. Foto do autor.



Figura 3.2 – Casa do grupo-gerador diesel junto aos painéis fotovoltaicos danificados.  
Comunidade de Itancoã – PA. Foto do autor.

### Energia e desenvolvimento rural

A energia é um aspecto crítico do processo de desenvolvimento rural [FERNANDES, 2000]. Ao longo das décadas, esta visão tem sido sustentada pelos autores que discutem o tema de desenvolvimento rural [HURLEY, 1981; NAS, 1977]. É essencial para as operações agrícolas, no processamento e transporte de alimentos, na produção de fertilizantes, pesticidas e equipamento agrícola. É necessária também para operações industriais que geram empregos, para iluminação e aquecimento doméstico e para a construção e operação da infra-estrutura necessária para escolas, hospitais e suprimento de água.

Vale citar que, apesar de necessário para o desenvolvimento, fornecer energia não é suficiente para tal. Há de ocorrer também mudanças políticas, sociais, econômicas e culturais.

A principal fonte de energia no meio rural é a biomassa. Esta forma de conversão energética, conhecida há milhares de anos é de baixa eficiência. Os saltos tecnológicos da humanidade estão relacionados a saltos na produção e uso da energia. A implementação das antigas sociedades agrícolas foi impulsionada pelo melhor uso do fogo para produzir ferro para as ferramentas, a revolução industrial foi impulsionada pela máquina a vapor e, posteriormente, pelo motor de combustão interna, a expansão do setor de serviços e de telecomunicações pelo uso da eletricidade e a revolução da informática, pela moderna eletrônica.

Se for incluir a questão rural em um programa de desenvolvimento sustentado – e como visto não há como negá-la –, deve-se considerar a questão da eletrificação rural. Recomenda-se considerá-la nos moldes dos novos paradigmas apresentados por diversos autores como SHEPHERD [1998] e MARSH [2003], referenciados neste trabalho: uso sustentado de recursos locais e participação da comunidade no processo decisório e de gestão do bem-comum. Desta forma, aumenta-se a responsabilidade local em prol do sucesso do projeto.

Uma outra possibilidade é o aproveitamento energético de resíduos e estes não necessariamente se enquadrariam no bem-comum, mas a gestão e aproveitamento destes poderiam sê-lo, se for o caso de resíduos de beneficiamento privado. Neste caso, os resíduos poderiam ser comprados pela comunidade ou a energia poderia ser produzida independentemente por terceiros e vendida para a comunidade. Assim, a discussão do projeto deve incluir a análise dos atores privados locais.

### Geração distribuída

Muitas das comunidades rurais, principalmente na região amazônica, são isoladas da rede elétrica. Este é o caso da Comunidade de Itancoã no Pará. Uma comunidade isolada não apresenta apenas o fato de ser distante da rede como dificuldade para a eletrificação. Verifica-se que sua densidade de habitações também é baixa, ou seja, boa parte das famílias da comunidade reside em casas situadas a centenas de metros, às vezes quase ou mais que um quilômetro, de distância uma das outras (Figura 3.3). Torna-se necessário, portanto, tecer considerações sobre a maneira de proceder a eletrificação rural: se de modo centralizado, como se estabeleceu o modelo elétrico atual, ou de modo distribuído.



Figura 3.3 – Exemplo de habitação isolada na comunidade de Itancoã – PA. Foto do autor.

O modelo de eletrificação brasileiro, assim como o da maioria dos países se desenvolveu de maneira centralizada, baseado em grandes centrais geradoras e extensas linhas de transmissão e distribuição. Apesar disto, no início do processo de eletrificação, o sistema era basicamente de geração distribuída, ou seja, montavam-se os geradores, fossem eles de quais fontes fossem, junto ao local de demanda.

Com o desenvolvimento da tecnologia e aumento da demanda por energia de melhor qualidade, começou-se a centralizar a geração de eletricidade. O investimento em grandes centrais - e no conseqüente sistema de transmissão e distribuição - era amortizado pelo fator de escala da produção.

Hoje, discute-se muito a geração distribuída como alternativa para o desenvolvimento rural e mesmo, por seu menor impacto ambiental, como alternativa para o desenvolvimento sustentável. ACKERMANN [2001] apresenta uma rica discussão sobre a definição de geração distribuída (GD). Em seu trabalho, ele mostra as variações de definição de acordo com a legislação de vários países, onde a classificação pode residir tanto em diferentes capacidades elétricas (1,5 MW na Suécia, 100 MW na Inglaterra) quanto à forma de comercialização e localização da energia e da planta geradora.

O artigo citado apresenta então uma discussão abrangente, englobando nove definições e verificando que a maioria delas não é relevante. No caso mesmo da definição por capacidade instalada, a grande variedade na potência dos geradores mostra que este não é um fator relevante para definir a GD. O autor, porém, propõe usar uma classificação de GD por capacidade: micro GD (< 5 kW); GD de pequeno porte (entre 5 kW e 5 MW); GD de médio porte (entre 5 e 50 MW) e GD de grande porte (entre 50 e 300 MW). Vale observar que, nesta classificação, ACKERMANN acaba restringindo a GD a uma capacidade máxima de 300 MW, contrariando sua suposição anterior.

A definição mais relevante, segundo ACKERMANN, relacionada à localização do gerador, é apresentada a seguir e utilizada nesta tese:

- a) Definição: as unidades geradoras na GD devem estar conectadas diretamente à rede de distribuição (e não transmissão) ou conectadas à rede (tanto distribuição quanto transmissão) junto ao consumidor, do seu lado do medidor.

Uma característica da GD apresentada por ACKERMANN deve ser ressaltada para estudos técnicos: o objetivo da GD é fornecer potência elétrica ativa, sendo desnecessária potência reativa.

A possibilidade de investimentos em geração distribuída é de grande vantagem em uma política de desenvolvimento sustentável, pois:

- Devido a seus baixos custos de investimento inicial e modularidade, favorece a eletrificação rural em áreas distantes da rede elétrica.
- Permite uma maior participação da comunidade local quanto a questões de controle de emissões poluentes.
- Gera mais empregos locais, estimulando ainda mais a economia do que se fosse apenas atendida a demanda elétrica.

Um grande problema é que o modelo de geração distribuída vai contra o interesse de grandes corporações interessadas na alavancagem econômica e financeira de empreendimentos de maior porte, mesmo com um maior custo social. Não é devidamente explorado o potencial econômico da produção em série e instalação concomitante de várias centrais distribuídas dentro de um

programa governamental, como, por exemplo, o PRODEEM. A proposta para um eventual projeto de geração distribuída não seria um programa assistencialista, mas incentivos a que comunidades isoladas adquiram – ou aloquem – uma central de pequeno porte para suas necessidades locais.

#### Demanda de energia em comunidades isoladas ou pequenas

Segundo VALENTE e ALMEIDA [1998], 80% dos sistemas de geração de eletricidade no estado do Amazonas possuem capacidade instalada de menos de 100 kW. MELO JR. et al. [2002] convergem a este valor. Os autores avaliaram a viabilidade de implementação de gaseificadores na Comunidade de Apóstolo Paulo, município de Manacapuru, Amazonas, tendo projetado uma demanda de 15 kW (a demanda calculada foi de 13 kW).

Esses valores inviabilizam este segmento de mercado para os gaseificadores de leito fluidizado, pois estes são de operação mais complexa e custosa do que os tradicionais de leito fixo.

Resta portanto, os segmento de comunidades médias, acima de 100 kW de demanda, ou para agro-indústrias como as beneficiadoras de arroz (encontradas na Região Sul do Brasil) ou em serrarias (Região Norte e parte do Centro-Oeste).

### **3.3 COMUNIDADE SUSTENTÁVEL**

Há discussões e divergências acadêmicas sobre a definição de sustentabilidade [MAZMANIAN et KRAFT, 1999]. Apesar disto, não se pode desconsiderar todo o movimento de transição político, econômico e social que vem acompanhando este termo. HEMPEL [1999] determina bem a importância do movimento ressaltando que é menos importante definir o termo “sustentabilidade” com precisão, do que compreender as características e objetivos do movimento social por ele impulsionado. Ele aprofunda o raciocínio, comentando que, “como outras idéias com potencial de transformação, o conceito de sustentabilidade promete reconstruir o mundo por meio da reflexão e escolha, mas seu potencial de engajar as esperanças, o imaginário e o senso de responsabilidade das pessoas, pode depender muito mais do uso estratégico da ambigüidade do que a clareza e precisão conceitual. Idéias com poder de mobilização aparentam ser muito mais efetivas quando usadas como símbolos aglutinadores que

desafiam o senso estreito de definição, encorajando a construção de coalizões entre interesses distintos e permitindo não mais do que a necessária compreensão social para viabilizar a convergência de atos políticos” [Hempel, 1999]. Desta forma, o ideal da “sustentabilidade” é forte e flexível o bastante para aglutinar os mais diversos interesses, e coerente o bastante para mobilizar os esforços destes atores em uma realização determinada.

O termo sustentável, por si só, já traz contradições. Seria algo permanente, rígido e eterno? Seria o termo melhor compreendido quando associado à conotação de sustento, como manutenção de uma forma de vida?

A partir da idéia de possibilidade de manutenção da vida humana em conjunto com as outras espécies da biosfera terrestre é que se cunhou o termo “desenvolvimento sustentado”, tão em voga e discutido na década de 90.

Infelizmente, o conceito de “desenvolvimento sustentado” traz implícitas concepções ocidentais desenvolvimentistas, ou seja, o bem estar de um povo só advém com o aumento de recursos, acúmulo de riquezas materiais e aumento crescente do consumo por meio de financiamentos ou pagamentos futuros.

CAVALCANTI [1996] expõe que o modelo ocidental de desenvolvimento baseado no aumento do Produto Interno Bruto (PIB) falha em não considerar os efeitos do aumento de entropia causados por um consumo cada vez maior de recursos. O pesquisador adverte que o sistema econômico é apenas um subsistema do sistema ecológico como um todo e que qualquer estudo sobre desenvolvimento deve considerar os efeitos de entropia e de carga suporte<sup>11</sup> do ecossistema que nos envolve. Ele indica que “o caminho para se formularem os predicados de uma sociedade ecologicamente sustentável não pode ser calcado em um sistema como o do mecanismo de mercado. Necessita-se aqui de um modelo biofísico da economia, uma visão do processo econômico submetido a regras compatíveis com leis da natureza como a da conservação de energia e a segunda lei da termodinâmica”.

---

<sup>11</sup> À medida que aumentam o tamanho e a complexidade de um sistema, o custo energético de manutenção tende a aumentar proporcionalmente, a uma taxa maior. Ao se dobrar o tamanho do sistema, torna-se geralmente necessário mais que o dobro da quantidade de energia, a qual deve ser desviada para se reduzir o aumento na entropia associado à manutenção da maior complexidade estrutural e funcional. À medida que um ecossistema torna-se maior e mais complexo, aumenta-se a proporção da produção bruta que deve ser utilizada pela comunidade para sustentá-la e diminui-se a proporção que pode ser dedicada ao crescimento. No momento do equilíbrio entre estas entradas e saídas, o tamanho não pode aumentar mais. A quantidade de biomassa (no sentido abrangente de matéria viva) que pode ser sustentada sob estas condições denomina-se a Capacidade Máxima de Suporte.

Um pouco em resposta a esta questão, começou a ganhar espaço o conceito de comunidade sustentável, valorizando estratégias de sustentabilidade focadas no bem estar social, econômico e ecológico das comunidades. Hempel [1999] descreve que uma comunidade sustentável é aquela onde o bem estar social, a vitalidade econômica, a integridade ecológica, a democracia e o civismo estão todos interligados complementando um ao outro e promovendo uma alta qualidade de vida e um forte senso de interdependência e obrigação mútua entre seus membros. Em uma comunidade sustentável, os níveis de poluição, consumo e população estão dentro dos níveis aceitáveis da carga de suporte local.

MAZMANIAN [1999] aponta três momentos principais no movimento ecológico nos EUA:

- Um foco regulatório governamental, a partir da década de 70, com leis gerais de proteção ambiental;
- Uma época de transição para regulamentos mais flexíveis e localizados e maior discussão descentralizadas das questões e responsabilidades ambientais, durante os anos 80;
- Uma época de atuação cada vez mais descentralizada e consciente, com atores e responsabilidade locais em suas comunidades, a partir da década de 90.

Percebe-se daí, uma tendência à conscientização e atuação em escala local, comunitária, mas em uma tendência de proliferação destes movimentos individuais e comunitários. Um marco desta tendência é a expressão, cunhada na ECO'92 – Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento –, no Rio de Janeiro: “pense globalmente, aja localmente”.

O desenvolvimento de uma comunidade sustentável seria baseado em conceitos de preservação do meio ambiente e desenvolvimento sustentável, buscando:

- Trazer em harmonia os sistemas humanos e natural, de uma forma sustentável, melhorando a qualidade de vida de todos;
- Equilibrar as demandas sociais e da natureza por meio de um projeto consciente e gestão adequada de recursos, reduzindo os desperdícios;
- Resgatar uma ética baseada em valores de respeito e interação da comunidade em si e com o meio-ambiente;

A solução deve incluir conceitos de arquitetura sustentável, energia renovável, engenharia social e gerenciamento de resíduos como, por exemplo:

- Casas projetadas com aproveitamento máximo de recursos naturais de iluminação e conforto térmico;
- Soluções para minimizar o consumo de recursos hídricos e de energia elétrica;
- Uso de fontes de energia renováveis;
- Soluções urbanísticas para maximizar a qualidade de vida da comunidade.
- Escola primária de qualidade voltada para formação de indivíduos socialmente e ecologicamente conscientes.
- Horta e pomar comunitários.

Apesar de ainda pouco conhecido no Brasil, o conceito de comunidade sustentável tem sido amplamente utilizado em projetos recentes da União Européia e Estados Unidos, relacionados à implementação do desenvolvimento sustentável e de energia renovável em pequenas comunidades e comunidades isoladas, como no caso de ilhas, no interior da floresta amazônica ou em regiões afastadas no interior de países em desenvolvimento.

Uma comunidade sustentável deveria gerir seus recursos, entre eles seus geradores de eletricidade, preferencialmente de fontes de energia renováveis. Seus integrantes deveriam sentir-se co-responsáveis pelas decisões e destino da comunidade, ao invés de simplesmente considerarem-se meros residentes locais. Ou seja, deve haver participação e responsabilidade de cada indivíduo na construção do espaço coletivo.

Um exemplo é a vila de Greussenheim, na Baviera, Alemanha. Sua população mobilizou-se para discutir, avaliar e planejar a implantação e gestão de projetos como: uso da água, habitação, trânsito, uso de energia, proteção ao clima e ao meio-ambiente, lazer e turismo. Com o conceito triplice de “Mitdenken-Mitreden-Mitgestalten” (pensar em conjunto, discutir coletivamente e atuação/realização conjunta), foram desenvolvidos projetos de cogeração a partir de óleos vegetais, aquecimento distrital a partir de lenha, carros movidos a biodiesel, uso de painéis solares, entre outros [FISCHER, 2003].

### 3.4 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (CRÉDITOS DE CARBONO)

Em 1997, em Quioto, Japão, realizou-se a Terceira Conferência das Partes da Convenção do Clima, que resultou no Protocolo de Quioto. Este obriga os países desenvolvidos, individual ou conjuntamente, a cortar, no período de 2008 a 2012, em média, 5,2% das emissões de gases de efeito estufa (foram aprovadas cifras diferenciadas para cada país) em relação ao ano-base de 1990. O Protocolo entra em vigor quando ratificado por 55 países, que correspondam a 55% das emissões.

Esta redução deve ser feita pelos países industrializados que podem, como forma de compensação de metas, utilizar os chamados mecanismos de flexibilidade: implementação conjunta (*joint implementation*), Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism - CDM*) e comércio de emissões (*emissions trading*). [JURAS, 2001].

Pelo mecanismo de implementação conjunta, qualquer país do Anexo I (países desenvolvidos e os do leste da Europa que se encontram em processo de transição para uma economia de mercado) pode transferir ou adquirir, de outro país desse mesmo Anexo, unidades de redução de emissões resultantes de projetos destinados a diminuir as emissões ou aumentar as remoções, por sumidouros, dos gases de efeito estufa.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL ou CDM - *Clean Development Mechanism*), que evoluiu a partir de uma proposta apresentada pelos negociadores brasileiros em Kyoto, destina-se a auxiliar os países não desenvolvidos a atingir o desenvolvimento sustentável e contribuir para o objetivo final da Convenção. Por esse Mecanismo, os países industrializados podem investir em projetos de redução de emissões de carbono nos países não desenvolvidos e receber créditos por essa redução.

O Banco Mundial lançou em janeiro de 2000 o *Prototype Carbon Fund* – PCF, destinado a financiar projetos que propiciem redução de emissão de gases de efeito estufa. Em 2001, o PCF já contava com mais de US\$ 145 milhões.

Apesar de, até o momento da escrita desta tese, o Protocolo não ter sido ratificado, já há bolsas experimentais de comércio de emissões de carbono na Dinamarca e nos Estados Unidos (Chicago).

No Brasil, existem propostas para a implementação rápida do MDL em âmbito nacional, o que colocaria o País em posição de vanguarda nesse setor.

Existe uma linha para avaliação e validação de projetos de pequena escala, para evitar os altos custos relacionados ao processo de validação, negociação e implementação de projetos MDL [BROWN et WALKER, 2003]. As três categorias de projetos beneficiadas são:

- Projetos de energia renovável de capacidade inferior a 15 MWe;
- Projetos de eficiência-energética que reduzam o consumo de energia no lado da demanda ou do fornecimento em menos que 15 GWh/ano;
- Outros projetos que simultaneamente reduzam as emissões na fonte e diretamente emitam menos que 15 ktCO<sub>2</sub>/ano.

### **Contabilidade para o Projeto**

Pode-se tentar caracterizar um projeto como mecanismo de desenvolvimento limpo, buscando financiamento via “créditos de carbono”, aumentando o retorno sobre o investimento. Uma possibilidade é caracterizar o projeto como de eficiência energética e seqüestro de carbono, da seguinte forma:

- Eficiência energética se realizada uma análise demonstrando diminuição do consumo de energia para a mesma produção industrial.
- Seqüestro de carbono demonstrando que o resíduo que era simplesmente descartado (por exemplo sendo queimado em incineradores) agora é eliminado gerando energia. Na equação, elimina-se o carbono que seria emitido pela queima de combustíveis fósseis para geração de eletricidade (por exemplo, o diesel usado nos grupos-geradores na região Norte do Brasil). Neste exemplo, poder-se-ia escrever:
  - Emissões atuais:  $C_{\text{diesel}}$  queimado para energia +  $C_{\text{resíduos}}$  incinerados
  - Emissões futuras:  $C_{\text{resíduos}}$  gerando energia

Para validação do projeto, deve-se demonstrar que o valor de emissões futuras é menor do que o de emissões atuais.

Um outro pré-requisito é demonstrar que o projeto só seria viável utilizando-se do mecanismo de desenvolvimento limpo. Este é o princípio da *adicionalidade* [BROWN et WALKER, 2003].

Estimativas para o valor futuro do crédito-carbono variam muito, mas a maioria assume baixos valores para o período de validação do Protocolo, entre 2008 e 2012. O valor de US\$ 5/tCO<sub>2</sub> é freqüentemente utilizado como referência e raramente excedido [BROWN et WALKER, 2003].

### Ratificação

Até o momento da escrita desta tese, o Protocolo de Quioto ainda não foi ratificado pelo número de países suficientes para alcançar a cota de 55% das emissões. O grande opositor do Protocolo são os Estados Unidos, argumentando que as questões científicas que baseiam o Protocolo não são válidas e que a implementação das cotas iria arruinar sua economia. Esta posição foi fortalecida pela administração Bush, que conseguiu a adesão da Austrália.

A esperança é a posição da Rússia, que apesar de favorável ao tratado, ainda opta por uma política de boa vizinhança com a administração Bush, receando perder privilégios comerciais e auxílios econômicos.

## **CAPÍTULO 4 - EQUIPAMENTO E MÉTODOS**

### **4.1 - EQUIPAMENTO**

O objeto tecnológico desta tese, um gaseificador de biomassa em leito fluidizado, foi concebido dentro do conceito de comunidade e desenvolvimento sustentável. Aproveitou-se o gaseificador que havia sido construído pela equipe do Laboratório de Combustíveis e Combustão desta Faculdade [FERNANDES, 2000] e ampliou-se a proposta inicial de implementá-lo em uma comunidade rural, estendendo o público alvo para uma comunidade sustentável, considerando a possibilidade de aproveitamento de resíduos agrícolas ou urbanos. Esta tese conseguiu realizar experimento com duas biomassas: casca-de-arroz e bagaço-de-cana, mas o gaseificador pode ser operado com diversas outras. A capacidade do equipamento, cerca de 180 kW térmicos (kWt, equivalente à potência térmica do gás produto), foi aproveitada em um grupo-gerador, para fornecer, segundo primeira estimativa, cerca de 60 kW de eletricidade (kWe). Para isto, foram feitas mudanças estruturais, incluindo um sistema de limpeza de gases, e adquiriu-se um motor para os testes de geração de potência. Uma bancada de carga mecânica foi construída para permitir os ensaios de funcionamento do motor. O silo de alimentação foi alterado internamente, para permitir um maior escoamento da biomassa, o que permitiu a alimentação do bagaço, apesar de – posteriormente – verificar-se que esta alimentação não fluía a taxas constantes, prejudicando a confiabilidade da análise dos dados referentes ao bagaço-de-cana.

## **Justificativa da escolha do motor como tecnologia para a planta-piloto**

Na faixa de operação da planta-piloto, exclui-se a opção de ciclo-combinado, restando as micro-turbinas e os grupos-geradores tradicionais, movidos a motores Ciclo Otto ou Ciclo Diesel (Tabela 2.3).

As microturbinas, apesar de tecnicamente factíveis, são de custo de instalação e manutenção superior ao dos motores convencionais. A manutenção de um motor de grupo-gerador pode ser facilmente feita por pessoal capacitado em consertar motores automotivos ou náuticos, encontrados em toda e qualquer cidade do interior do Brasil, enquanto ainda precisaria-se-ia capacitar pessoal para realizar a manutenção das microturbinas.

Desta forma, optou-se neste trabalho desenvolver a planta-piloto, operando com motor de combustão interna.

Quanto ao tipo do motor, se com ignição por centelha ou por compressão, optou-se pelo primeiro, para operar sem necessidade de uso de combustível fóssil (diesel). A opção pelo motor de ignição a centelha desenvolvido para uso com gás natural é em razão de sua alta taxa de compressão e adequação para combustível gasoso. Esta opção tecnológica também abre caminho para o desenvolvimento do motor para uso específico com gás produto, possibilidade que pode interessar tanto ao meio científico como ao industrial.

## **Descrição do gaseificador**

O corpo do gaseificador é constituído por um tubo de 920 mm de diâmetro externo, construído de aço carbono 1020 e revestido internamente por uma camada de tijolos refratários de 60 mm de espessura e de uma camada de manta de cerâmica refratária de 200 mm de espessura, servindo esta de isolamento externo ao tijolo.

Na figura 4.1, pode-se ver parte do gaseificador, ressaltando a parte inferior do sistema de alimentação, as tubulações de água de refrigeração para as roscas de alimentação e para a camisa d'água. Nesta figura percebe-se também o sistema de pré-aquecimento de ar, incluindo os equipamentos do sistema de controle de ignição (válvula solenóide, sensor ótico e eletrodo, este último parcialmente oculto na figura).

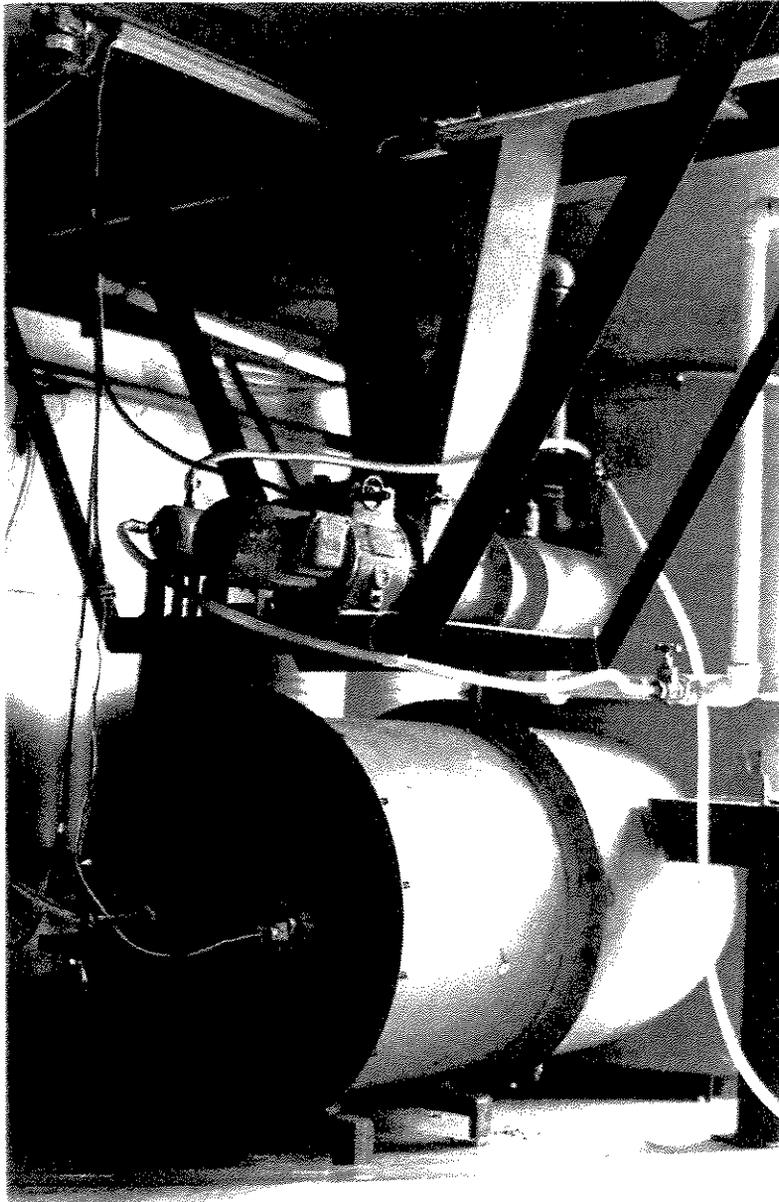


Figura 4.1 - Gaseificador: vistas do sistema de pré-aquecimento, refrigeração e parcial do sistema de alimentação.

O diâmetro interno do reator é de 400 mm. A altura do reator é 4.600 mm. Na zona do *freeboard* (região livre acima da onde ocorrem as reações), o reator é isolado com lã mineral, com diâmetro interno de 520 mm. Tijolos refratários são necessários apenas na parte inferior do reator, devido aos esforços de cisalhamento pela fricção do leito fluidizado contra o revestimento interno do tubo e pela temperatura mais alta alcançada nesta região do reator. Na figura 4.2 pode ser visto um croqui com as dimensões do equipamento.

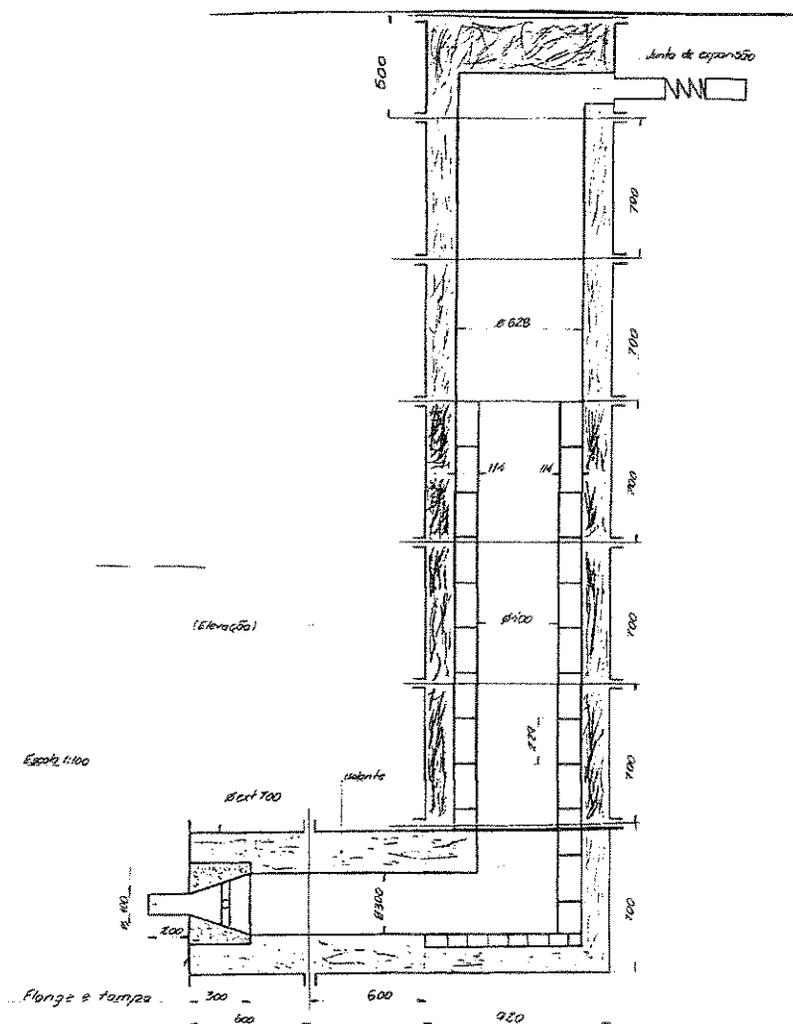


Figura 4.2 - Dimensões do gaseificador.

O reator foi dimensionado para gaseificar até 200 kg/h de biomassa, com altura de leito entre 1,0 e 2,0 m. Por deficiências na construção do equipamento, aliadas a restrições operacionais do laboratório onde o equipamento se localiza, evita-se operá-lo com altas potências térmicas e com altura de leito superior a 0,8 m.

O ar para a gaseificação é fornecido por um compressor tipo Roots (Omel SR-07 de 12 HP), sendo a vazão medida por uma placa de orifício de 27 mm de diâmetro interno, calibrada, e por um medidor de vazão eletrônico. Utiliza-se um manômetro tipo U de coluna de água para a medição do diferencial de pressão produzido pela placa de orifício. A distribuição de ar para o leito é feita por um *plenum*.

O gás utilizado no sistema de pré-aquecimento é o GLP, armazenado em botijões de 90 kg. A linha de transporte possui um regulador de pressão e um rotâmetro com registro para medir e controlar a vazão volumétrica do combustível.

### **Alimentação de biomassa**

Como visto na Figura 4.3, a biomassa é introduzida no reator por um silo dotado de dois conjuntos de roscas transportadoras (roscas sem-fim) - um pente de roscas dosadoras seguido por uma rosca alimentadora única. A rosca alimentadora é refrigerada internamente com água e sua velocidade é controlada por um moto-variador. O pente de roscas, controlado por outro moto-variador, dosa a quantidade de biomassa a ser enviada ao leito pela rosca alimentadora. Um dos fatores críticos da alimentação de gramíneas e outras biomassas fibrosas é sua compactação, formando arcos no silo, ficando a rosca a girar no vazio [SÁNCHEZ, 1994; NEIVA, 1998].

Para contornar este problema, costuma-se diminuir a granulometria da gramínea utilizada, reprocessando-a em moedor com peneiras finas. Como o resultado ainda não estava satisfatório, a parede interna do silo foi revestida por um material de menor rugosidade, para diminuir o atrito e permitir melhor escoamento da gramínea.

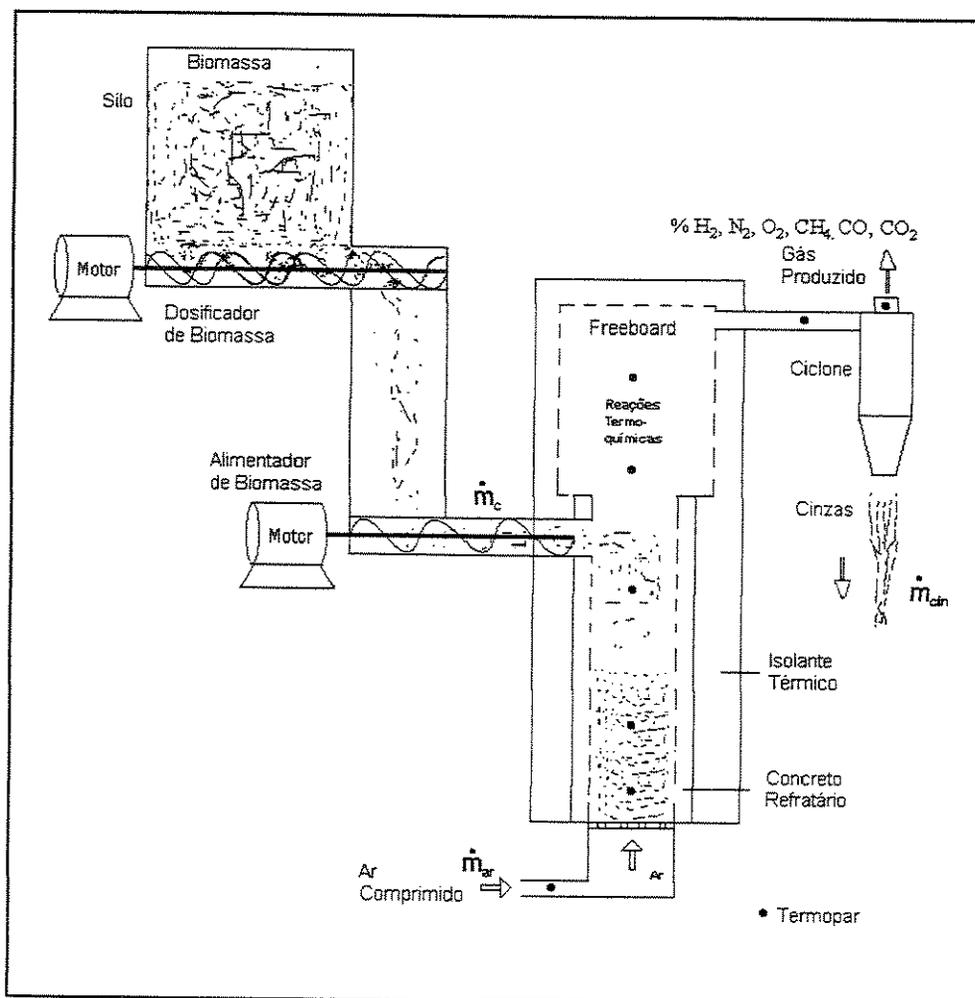


Figura 4.3 - Croqui do conjunto do gaseificador [ANGULO, 2002].

O silo de alimentação tem capacidade suficiente para garantir a operação do reator por cerca de 1 hora. A recarga do mesmo deverá ocorrer antes do seu esvaziamento total, para impedir a entrada de ar em excesso no leito. A biomassa atua também como selo, reforçado pela pressão positiva no silo de combustível. A pressão positiva requer porém boa vedação, para evitar que os gases resultantes escapem para o ambiente do laboratório. Por questões de segurança, têm-se optado por colapsar o leito, cortando a alimentação de ar e de biomassa, para realizar a realimentação do silo. Este processo não leva mais do que 10 minutos e, por causa da inércia térmica do sistema, pouco influi nos testes. Logo após cada recarga, é necessário esperar a estabilização da temperatura do reator o que, neste equipamento, não tem levado mais que 10-15 minutos. Propõe-se para o desenvolvimento posterior da planta-piloto, um sistema de

alimentação contínua, com o silo composto por duas câmaras separadas por uma válvula tipo gaveta ou rotatória.

### **Análise de gases**

O gás produzido, ao sair, passa por um ciclone para separar e coletar particulados e cinzas elutriadas. Os particulados e a cinza separados são coletados em tambor de 200 litros. Entre o ciclone e o tambor existe uma válvula tipo gaveta, permitindo, após cada operação, a retirada do tambor para amostragem.

As amostras de gás de exaustão para análise no cromatógrafo são coletadas após a estabilização da temperatura do reator. O modelo de cromatógrafo utilizado é um CG-90 a gás, com detetor de condutividade térmica e argônio como gás de arraste. Um sistema de aquisição de dados, ligado ao cromatógrafo, registra e analisa quantitativamente os compostos contidos no gás produto.

O gás é coletado para amostra no cromatógrafo após o ciclone, através de tubulação de cobre de 9,5 mm de diâmetro. O gás deve ser resfriado antes do tubo de cobre, pois o cobre é catalizador, e em altas temperaturas poderia influir na composição do gás. A linha de coleta tem um filtro para separar partículas muito finas que possam danificar o cromatógrafo. Uma bomba (marca Air Cadet, modelo 7530-60) succiona o gás até o cromatógrafo.

O sistema de análise de gases, apesar de aparentemente simples, é essencial para a tese e foi um dos fatores que várias vezes inviabilizou a realização dos experimentos e atrasou o cronograma da tese.

O cromatógrafo por condutividade térmica e gás de arraste funciona com duas ramificações de colunas (dutos) paralelas, por onde passam a amostra de gás com o gás de arraste inerte. A diferença de condutividade identificada por uma ponte de Wheatstone gera um sinal que é amplificado e levado para um integrador. No integrador o sinal é integrado numericamente e comparado com valores de uma composição padrão de gás, gerando o resultado da composição do gás amostrado.

Para que este sistema funcione adequadamente, deve-se com freqüência realizar o condicionamento das colunas do cromatógrafo. A freqüência deve ser a maior possível quanto

maior for a precisão requerida, mas, como o processo de recondicionamento leva cerca de um a dois dias para ser realizado, opta-se por uma solução de compromisso. Nos testes de gaseificação, observa-se que para uma seqüência experimental da ordem de 40 amostras, as colunas não precisam ser recondicionadas. Deve-se frisar, porém, que o manuseio incorreto do equipamento pode gerar entupimento das colunas, exigindo o seu recondicionamento. Isto geralmente ocorre quando se esquece de inverter a válvula que redireciona o gás para as colunas de maior diâmetro interno, nas quais deve passar as moléculas de CO<sub>2</sub>, que são de maior dimensão. Quando o gás não é redirecionado, o CO<sub>2</sub> acaba entupindo a coluna de menor diâmetro interno ou porosidade.

Outra dificuldade surgida no sistema de aquisição foi que o sistema existente consistia de uma placa integradora ligada a um micro-computador, o qual trabalhava os dados por meio de um programa chamado PeakSimple<sup>®</sup>. Esta placa integradora não apresentou confiabilidade técnica, tendo seus circuitos queimados com freqüência. A assistência técnica falhou ao corrigir o problema e faltavam recursos para a substituição do sistema, atrasando o cronograma experimental em quase 10 meses. Ademais, o próprio programa PeakSimple<sup>®</sup> não mostrou-se de operação simples e os manuais eram incompletos. A solução foi utilizar, emprestado, um antigo integrador, do tipo com processador e impressora embutida, equipamento mais robusto e confiável.

### **Medição do perfil de temperaturas**

Foram colocados termopares, tipo K, ao longo da altura do gaseificador, para medida da sua temperatura interna.

Medindo a temperatura do gás, na entrada e na saída do ciclone, foram utilizados termopares tipo K, também conectados ao sistema informatizado de aquisição de dados.

O programa de aquisição de dados Strawberry Tree<sup>®</sup> armazena no micro-computador as condições de temperatura do leite, do ar e da água, e da vazão de ar, do gás de pré-aquecimento e da água do sistema de resfriamento. Como interface, é utilizada uma placa eletrônica tipo ACPC 16-16, com 32 canais analógicos (16 de entrada e 16 de saída), conectada a terminais que permitem a ligação dos termopares e dos medidores de pressão e de vazão de água e de ar.

### Sistema de limpeza e destino dos gases

Após o ciclone, há uma ramificação na tubulação, seguindo o gás para o motor ou para ser eliminado por um queimador (*flare*). Para ser usado no motor, o gás passa por um sistema de lavagem para remover alguns compostos solúveis. Estes compostos são removidos por absorção em um tambor com água. Em seguida, o gás é filtrado e sua umidade reduzida ao passar por um segundo tambor, contendo bagaço-de-cana, ou outra biomassa. Este sistema improvisado pode ser visto na Figura 4.4. O sistema de limpeza deve ser corretamente projetado para evitar que ocorra entupimento nos dutos por condensação do alcatrão.

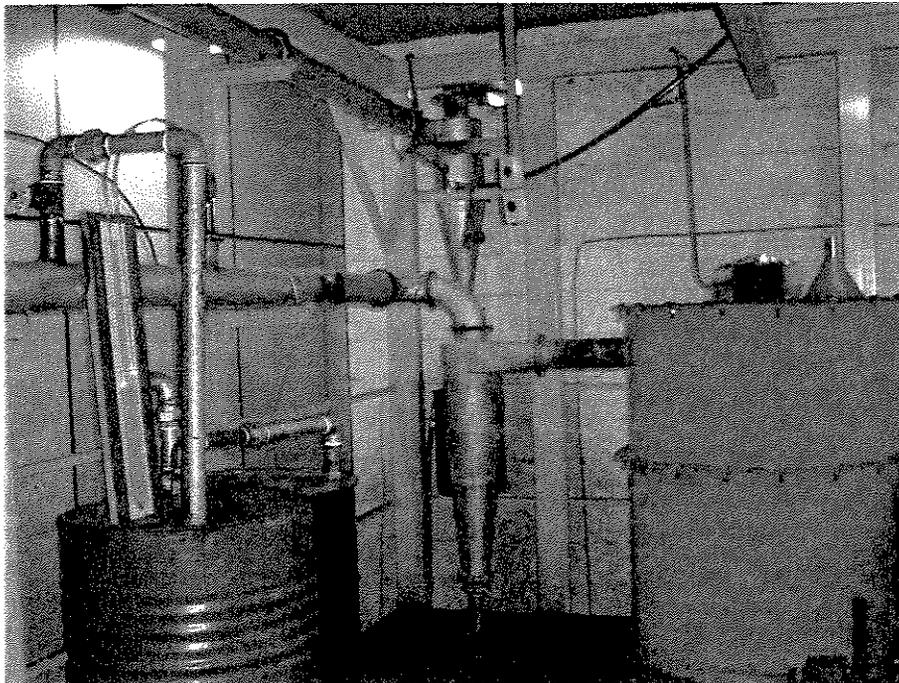


Figura 4.4 – Sistema artesanal de limpeza de gases.

Se o gás produzido não estiver sendo consumido pelo grupo-gerador, ele deve ser eliminado, e a melhor forma é queima-lo em um *flare* (Figura 4.5) no topo de uma chaminé de 6 metros de altura, sendo então os gases inertes, produtos desta combustão, descarregados na atmosfera.

Para monitorar o funcionamento do *flare*, foi instalado um termopar tipo K, cuja leitura é feita junto ao registro de gases do *flare*.



Figura 4.5 – *Flare* queimando gás produto da gaseificação de casca-de-arroz.

### **Motor e bancada de carga**

O motor utilizado para os testes (Figura 4.6) foi um motor marca Mercedes-Benz, tipo M-366G, versão industrial, movido a gás natural veicular (GNV), com 6 cilindros, totalizando 5958 cm<sup>3</sup>. A potência nominal do motor é de 170 kW a 2.600 RPM e o torque máximo é 720 Nm a 1.560 RPM, operando com GNV. Como descrito no capítulo 4, esta condição não é atendida com o gás pobre.

A carga para o motor foi fornecida por um dinamômetro Stuka. Como o objetivo do projeto é geração de eletricidade e não potência automotiva, foram realizados testes de variação de carga a rotação constante de 1.800 RPM. Foi medida a relação ar-combustível no motor utilizando-se de uma sonda lâmbda.

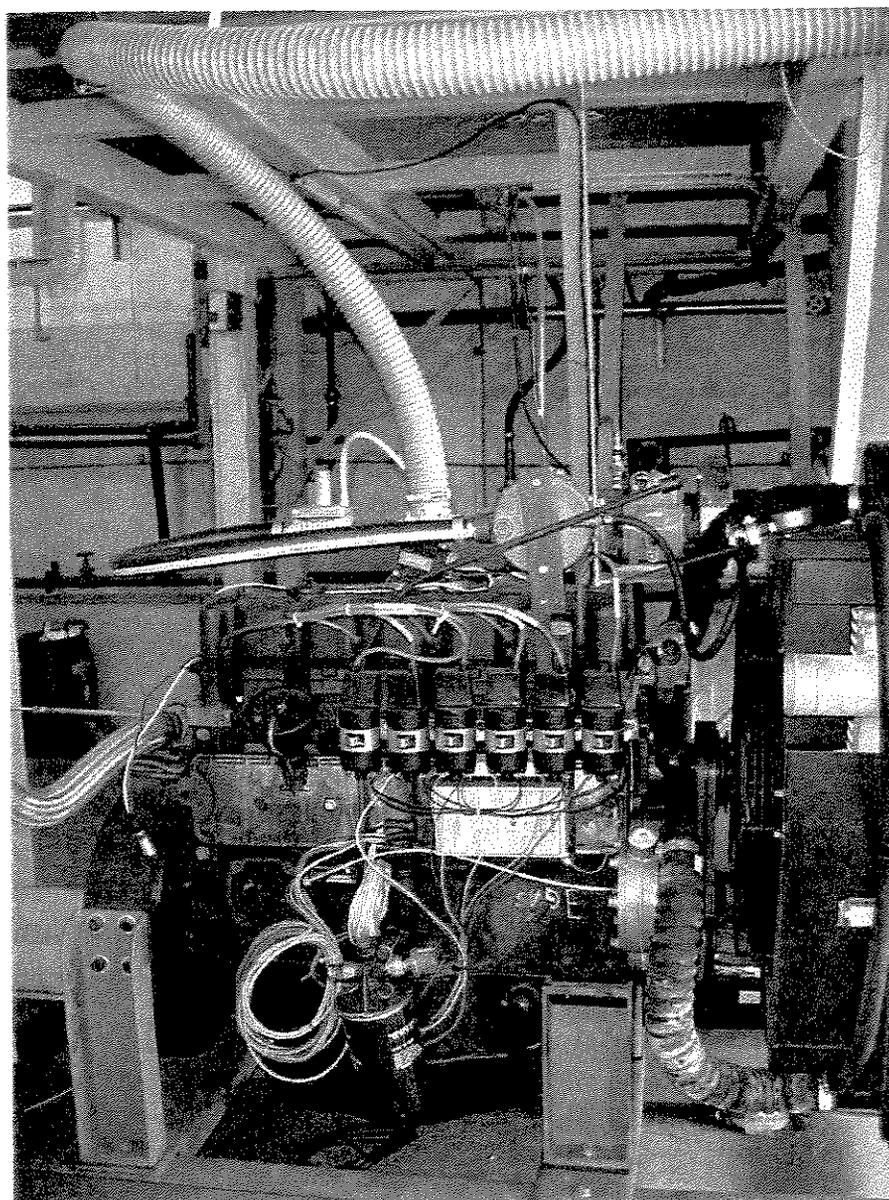


Figura 4.6 – Motor utilizado na planta-piloto.

#### 4.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos dividiram-se em duas fases:

1. Avaliação e otimização do gaseificador para geração de potência;
2. Demonstração da planta piloto operando com motor movido apenas a gás de biomassa.

#### 4.2.1. Definição de variáveis da gaseificação

Os testes visam otimizar a operação do gaseificador para geração de potência, encontrando ponto de máxima eficiência e de melhor qualidade (maior PCI) do gás produto para aumentar rendimento do motor.

Portanto, as variáveis de resposta que deseja-se obter são:

1. Poder Calorífico Inferior (PCI);
2. Potência produzida (de onde tira-se a eficiência);
3. Composição do gás (%CO; % CH<sub>4</sub>; %H<sub>2</sub>; %CO<sub>2</sub>; %N<sub>2</sub>).

Pela equação (2.17), relaciona-se PCI e composição do gás. Esta equação é amplamente utilizada na academia e indústria para o cálculo do PCI [FERNANDES, 2000]. A opção por tal método indireto se deve a dois fatores: dificuldade experimental para se medir diretamente o PCI e, por outro lado, facilidade de se obter a composição do gás por meio de cromatógrafos ou analisadores contínuos. Será portanto monitorada a composição do gás (%CO; % CH<sub>4</sub>; %H<sub>2</sub>; %CO<sub>2</sub>; %N<sub>2</sub>) para determinar o PCI.

As variáveis de influência, apresentadas na literatura [SÁNCHEZ, 1994], são:

1. Altura do leito;
2. Fator de ar;
3. Temperatura do leito.

Baseado na revisão de literatura, resolve-se analisar a influência de mais duas variáveis:

4. Velocidade de fluidização (ou velocidade superficial do gás);
5. Tempo de residência.

SÁNCHEZ [1994] demonstra que a temperatura do leito se relaciona com o fator de ar e que pode-se, então, descartar uma destas variáveis no planejamento experimental. Por praticidade de experimento e consonância com a prática de gaseificação do Laboratório de Combustíveis e Combustão, escolhe-se o fator de ar como variável de influência. Sendo o fluxo de ar constante

(determinado em projeto pela velocidade de ar para fluidização do leito), varia-se no experimento a vazão de alimentação da biomassa. De qualquer forma, pretende-se apresentar gráfico de Temperatura do Leito x Fator de Ar, para comprovar a correlação das variáveis e auxiliar na validação experimental.

#### **4.2.2. Definição de variáveis da operação do motor**

Como o objetivo deste projeto é geração de eletricidade, a qual ocorre à rotação constante (frequência) e carga (demanda elétrica) variável, limitar-se-á a avaliar a operação do motor nestas condições, para a condição otimizada de operação do gaseificador.

Por restrições orçamentárias e técnicas, a pesquisa teve de ficar restrita a testes de carga mecânica no motor, sem alcançar a geração de eletricidade propriamente dita. Tecnicamente isto não invalida a tese, pois a tecnologia de conversão de potência de mecânica de eixo em eletricidade é mais do que consagrada (ver item 2.6.4), bastando, para estimar a capacidade elétrica da planta-piloto, considerar uma eficiência típica dos geradores elétricos multiplicada pela potência de eixo do motor.

Seria importante também realizar uma avaliação mais profunda do motor, em vistas a sua otimização para aumentar o rendimento global da planta-piloto. Estes testes estão programados para uma pesquisa posterior à conclusão desta tese.

#### **4.2.3. Parâmetros monitorados**

Para determinar as variáveis desejadas, foram monitorados experimentalmente os seguintes parâmetros:

##### Gaseificador

1. Vazão de ar de entrada no gaseificador;
2. Vazão de gás obtido;
3. Vazão mássica de biomassa alimentada;
4. Temperatura do leito a diferentes alturas;

5. Temperatura de saída do gás no *free-board*;
6. Temperatura do gás na entrada e na saída do ciclone;
7. Composição do gás produzido;

#### Motor

1. Rotação do motor;
2. Torque no eixo (dinamômetro);
3. Fator Lâmbda (relação ar-combustível estequiométrica/ relação ar-combustível real);
4. Temperatura do gás na entrada do motor;
5. Temperatura dos gases de exaustão do motor

#### **4.3. MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS**

Os resultados dos ensaios foram colocados em programa estatístico e foram construídos gráficos de:

1. Concentração dos componentes combustíveis (CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>) no gás produzido, em função do fator de ar;
2. Poder calorífico inferior do gás, em função do fator de ar;
3. Poder calorífico inferior do gás, em função do tempo de residência;
4. Poder calorífico inferior do gás, em função da velocidade de fluidização;
5. Eficiência a frio em função do fator de ar;
6. Temperatura do leito em função do fator de ar;
7. Energia específica (kWh/kg biomassa) em função do fator de ar.

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A biomassa é caracterizada pelos seguintes testes:

1. **Granulometria** - fornece as frações em peso de cada dimensão característica da biomassa. Esta característica é importante para o dimensionamento do alimentador e da velocidade superficial do gás. A análise granulométrica de partículas sólidas é obtida geralmente pelo uso de um conjunto de peneiras padronizadas, sendo o resultado apresentado em gráfico ou tabela, de fração de amostra por diâmetro característico de cada peneira ou por distribuição acumulativa de dimensões [SÁNCHEZ, 1998].
2. **Análise Imediata** - fornece as frações em peso de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra de biomassa. São usadas as normas ASTM D-3172 a D-3175.
3. **Análise Elementar** - fornece as frações em peso dos elementos constituintes da biomassa. Os principais elementos são carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. Norma ASTM D-3176.
4. **Poder Calorífico** - determinado em bomba calorimétrica; norma ASTM D-2015.

#### 4.5. MÉTODO DE ENSAIO

O gaseificador é inicialmente pré-aquecido pela queima de GLP até que o leito chegue a uma temperatura superior à de auto-ignição da biomassa. Nossa referência era aproximadamente 500 °C. Acende-se o *flare* e se inicia a alimentação da biomassa em taxa para combustão completa ou gaseificação com alto fator de ar (relação quase estequiométrica). Assim consegue-se alcançar a temperatura desejada para equilíbrio da reação. Ajusta-se então a alimentação de biomassa e a vazão de ar até alcançar o fator de ar e a velocidade de fluidização (ou outra variável) desejados. Espera-se entrar em regime, o que ocorre quando a temperatura se estabiliza. Realizam-se então as medições de temperatura e vazão; e coletam-se amostras de gás e cinzas.

Operam-se os ensaios conforme seqüência planejada, e segue-se a análise estatística dos dados, o cálculo dos parâmetros e a construção dos gráficos.

Para o teste do motor, seguem-se os passos anteriores e coloca-se o gaseificador na condição otimizada de operação. Dá-se partida no motor com gás natural para verificar se o

equipamento está operando adequadamente. Coleta-se dados. Abre-se o registro para permitir que o gás produto chegue ao motor e restringe-se o fluxo de saída do gás produto para o *flare*. Corta-se o gás natural e deixa-se o motor funcionando apenas com o gás produto de biomassa. Dependendo da condição de operação isto necessita de maior ou menor regulagem das entradas de ar e combustível. Coletam-se os dados citados no item 4.2.3 para diversas cargas aplicadas ao motor.

Durante este processo, continua-se monitorando o gaseificador, para que ele não altere porventura sua condição de operação.

#### **4.6. ANÁLISE DOS GASES**

O gás é coletado para amostra no cromatógrafo após o ciclone. O gás produto foi analisado por cromatógrafo CG-90, com detector de condutividade térmica e argônio como gás de arraste. Um sistema de aquisição de dados, ligado ao cromatógrafo, registra e analisa quantitativamente os compostos contidos no gás produto.

Cada amostra de gás leva 22 minutos para ser analisada pelo cromatógrafo. Desta forma, costuma-se deixar uma pessoa responsável pela coleta e análise das amostras enquanto outras duas pessoas estão controlando a operação de gaseificação propriamente dita. As amostras foram coletadas em intervalos de 5 minutos e, portanto, o processo de análise do gás continuava por algumas horas após findo o experimento.

#### **4.7. EQUIPE DE TRABALHO**

Para que todo o processo experimental ocorra sem maiores dificuldades, necessita-se uma equipe experimental de cinco pessoas bem treinadas em suas funções específicas. Para que o projeto seja implementado comercialmente, haverá necessidade de um sistema de controle e automação e a equipe poderá se limitar a duas ou três pessoas.

A formação da equipe de trabalho foi outra dificuldade para a realização desta tese. Como não havia uma equipe previamente estruturada para a realização dos experimentos, foi necessário um esforço de mobilização junto a colegas pesquisadores e alunos de graduação para que fosse formada uma equipe interessada na realização dos testes para este trabalho e no desenvolvimento da planta-piloto como projeto de engenharia relacionado ao desenvolvimento sustentável. Em 2003, conseguiu-se agregar esforços de forma sinérgica, permitindo a realização dos testes e todo o trabalho de suporte, incluindo: limpeza e pesagem da areia do leito; manutenção dos termopares; limpeza e manutenção dos dutos de gases; limpeza da tubulação de amostragem de gases; instalação, manutenção e calibração dos manômetros em U; carregamento, secagem, moagem, ensacamento, silagem e transporte da biomassa; construção da bancada de testes do motor; reforma e manutenção do *flare*; calibração do silo de alimentação de biomassa; recondicionamento das colunas do cromatógrafo e calibração do integrador; entre outros.

Durante os experimentos, propriamente ditos, havia-se necessidade das seguintes operações críticas:

- Pré-aquecimento do gaseificador: 01 pessoa verificando se a chama de pré-aquecimento não se apaga;
- Carregamento da biomassa para o mezanino, onde é alimentado o silo: pelo menos 01 pessoa para o trabalho braçal, mais pessoas, mais rápido e menos cansativo, pois são cerca de 22 sacas de casca-de-arroz para alimentar cada silo, o que equivale aproximadamente 100 kg ou cerca de 50 a 60 minutos de operação do gaseificador;
- Controle da temperatura e taxa de alimentação de ar e combustível do gaseificador: 01 pessoa, geralmente responsável por coordenar o processo e registrar as informações no caderno de campo;
- Coleta de amostras de gás e análise no cromatógrafo: 01 pessoa;
- Ensaio do motor: 02 pessoas.
- Emergências técnicas (falha no *flare* ou entupimento na tubulação de amostragem do gás): 01 pessoa, a qual poderia ser a mesma responsável pela biomassa.

A equipe básica consistia de 3 a 4 pessoas para testes só de gaseificação e de 5 a 6 pessoas para os ensaios com o motor. De fato, um dos maiores aprendizados deste trabalho e, conseqüentemente, ganho para o laboratório, foi a formação de uma equipe de pesquisas entrosada, capaz de coordenar esforços para trabalhos complexos e capaz de perpetuar o conhecimento prático da operação dos gaseificadores do laboratório.

Foi observado pelo pesquisador e seu orientador que, não obstante haver várias pesquisas e alunos-pesquisadores competentes trabalhando com gaseificação no Laboratório de Combustíveis e Combustão, não havia coordenação de esforços e eficiente transmissão de saber prático (aquele obtido durante o trabalhar e essencial para alcançar o saber teórico, dito o resultado experimental e a tese). Sempre que um novo aluno iniciava sua pesquisa, pouco (com exceção à tese escrita) era aproveitado dos trabalhos anteriores. Não havia método de transmissão da experiência subjetiva de trabalho (como, por exemplo: detalhes construtivos dos equipamentos e solução de pequenos problemas experimentais). Esta experiência, que leva tempo para ser adquirida, é muito cara para ser levada embora no momento em que o aluno conclui sua pesquisa.

A falta de sinergia entre os pesquisadores também resultava em trabalho redundante, dispersão de conhecimentos ou sobrecarga de um dos alunos.

Como o equipamento experimental é basicamente o mesmo, muitas vezes o aluno tinha que gastar meses refazendo cálculos ou montagens que haviam sido feitas a pouco mais que um semestre por outro aluno, mas que não haviam sido devidamente mantidas ou transmitidas. Deve-se ressaltar, entre outros casos, a falta de troca de informação entre os alunos durante a fase de pesquisa bibliográfica/revisão de literatura. Muitas vezes um colega necessita de dados que outro já obteve, mas, por falta de diálogo, tal informação (artigos) não é trocada, diminuindo a velocidade de propagação e desenvolvimento do saber.

Como sobrecarga, um dos alunos poderia gastar meses (ou mesmo um ano inteiro) de sua tese construindo um equipamento que outros alunos também iriam usar depois. Enquanto aquele aluno estava trabalhando sozinho na construção de seu equipamento, os outros apenas cursavam disciplinas ou revisavam a literatura. O aluno que havia começado a construção (geralmente o que havia iniciado sua pesquisa antes dos demais) ficava sobrecarregado e prejudicado em sua revisão de literatura e no tempo hábil para os cálculos experimentais e redação da tese. Os alunos

que iniciaram suas pesquisas depois, apenas esperavam o equipamento ficar pronto e ser testado pelo primeiro aluno. Tinham assim, tempo de sobra para outras atividades.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

#### 5.1.1. Análise Imediata e Análise Elementar

Utilizaram-se as análises apresentadas nas Tabelas 2.7 e 2.8, respectivamente às páginas 35 e 36. A umidade é apresentada em base úmida, ou seja referenciando-se à biomassa com umidade. Os outros três valores são tradicionalmente apresentados referenciando-se à biomassa já seca, totalizando entre si, 100%.

Verifica-se, na Tabela 2.7, um alto teor de cinzas, as quais, sob elevadas temperaturas, podem-se fundir e aglomerar com a alumina, levando ao colapso do leito. Para evitar isto, deve-se controlar a temperatura do experimento, para que não passe dos 900<sup>o</sup>C.

#### 5.1.3. Poder Calorífico

O resultado dos ensaios em bomba calorimétrica é apresentado na tabela 5.1.

	Casca-de-arroz
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	15,7
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	13,5

Tabela 5.1 - Poder calorífico - experimental.

## 5.2. ANÁLISE DE PARÂMETROS E OTIMIZAÇÃO DO GASEIFICADOR

### 5.2.1 Casca-de-arroz

Foram realizados 14 testes com casca-de-arroz, dos quais foram aproveitados 9. Dos outros cinco testes, dois foram testes iniciais com objetivo, respectivamente, de estudar o comportamento do gaseificador e da planta-piloto com o motor; um foi interrompido por operação incorreta do equipamento e os outros dois, por falhas críticas na amostragem de gases (entupimento ou derretimento da sonda de amostragem), as quais não puderam ser sanadas na hora.

Como o equipamento se localiza dentro do prédio da faculdade de engenharia mecânica, para evitar transtornos com a vizinhança (como os citados por FERNANDES [2000]) optou-se por realizar os testes após o horário de expediente. Realizava-se portanto o pré-aquecimento durante o dia e aguardava-se a noite chegar para iniciar os testes de gaseificação propriamente ditos.

Os resultados podem ser vistos nos gráficos a seguir, geralmente apresentados tanto com a dispersão dos pontos amostrais, quanto com o ponto representando a média destes valores em cada seqüência experimental ou condição de operação. Em alguns gráficos, apresenta-se, além da média, a barra indicando o desvio padrão amostral. Apresentam-se também as curvas de tendência obtidas por ajuste linear e polinomial de 2ª ordem.

Das 46 amostras que geraram as 9 médias (uma para cada condição operacional), apenas uma ficou fora do intervalo de dois desvios-padrão, sendo excluída no tratamento estatístico. Duas outras amostras foram eliminadas por problemas técnicos na operação. Isto indica uma boa convergência de dados.

As Figuras 5.1 a 5.6 mostram que o gaseificador opera dentro das condições teóricas esperadas e desenvolvidas experimentalmente por SÁNCHEZ [1994] e ANGULO [2002] em reatores menores, mas de concepção semelhante. Conforme o esperado, para menores valores de FA, obtêm-se as maiores concentrações de CO (Figuras 5.1 a 5.3).

Como pode-se ver nas Figuras 5.4 e 5.5, o PCI manteve-se bem estável na faixa de temperatura e fator de ar estudados. Isto demonstra uma robustez e estabilidade operacional do gaseificador, qualidade recomendável para um equipamento que deverá operar continuamente sob diferentes condições de contorno, fornecendo um gás de qualidade estável, para uso no

motor. O PCI é maior na faixa de FA até 0,35 (Figura 5.4), correspondendo, principalmente, à maior presença de CO, visto que os outros gases combustíveis ( $H_2$  e  $CH_4$ ) não apresentaram grande variação nesta faixa (Figura 5.1 e 5.2).

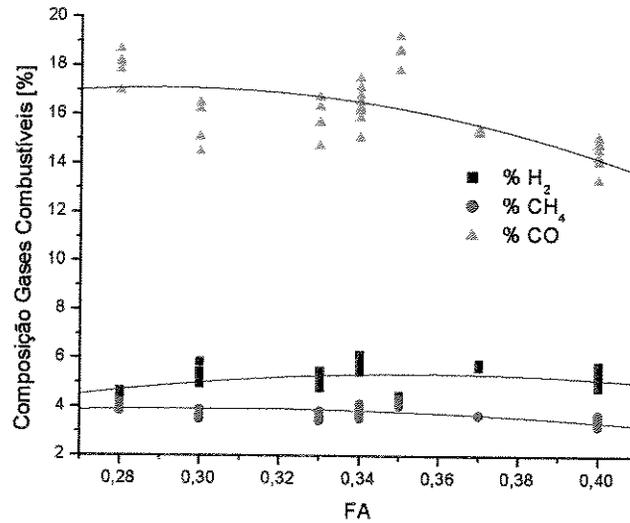


Figura 5.1 – Composição dos gases combustíveis x FA - Dispersão amostral.

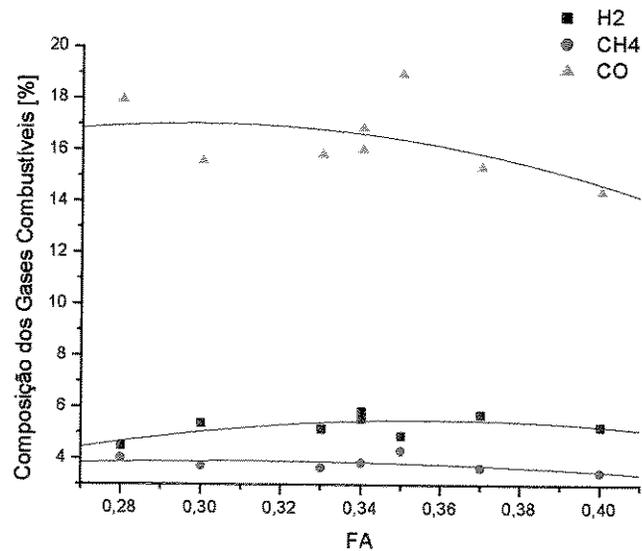


Figura 5.2 – Composição dos gases combustíveis x FA - Médias.

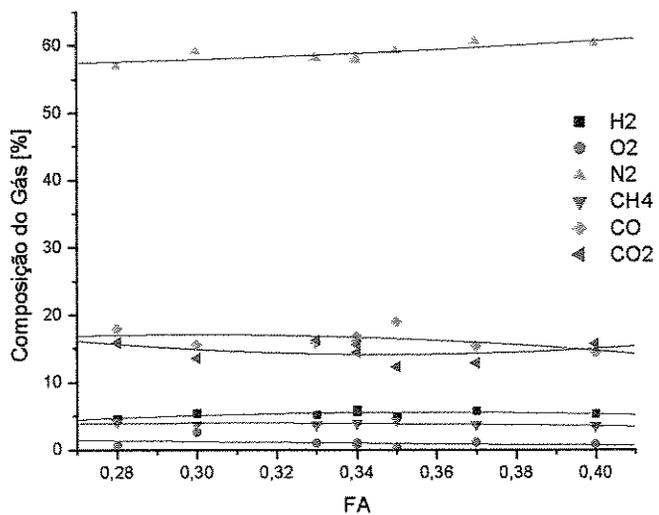


Figura 5.3 – Composição completa dos gases x FA – Médias.

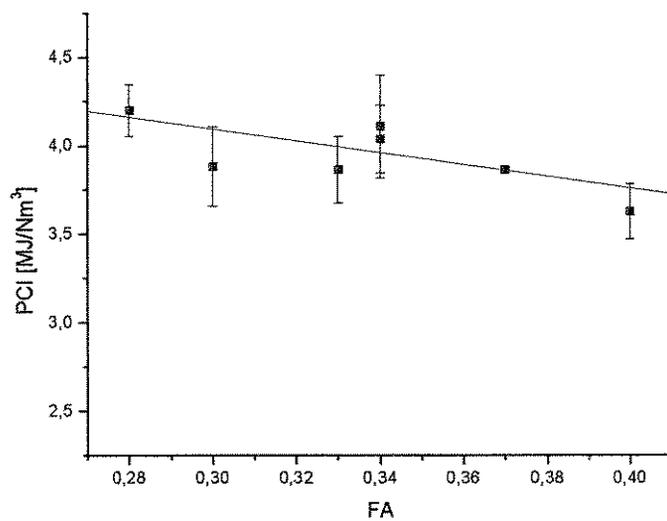


Figura 5.4 – PCI do gás x FA, para altura de leito = 0,6 m – Médias e desvio padrão.

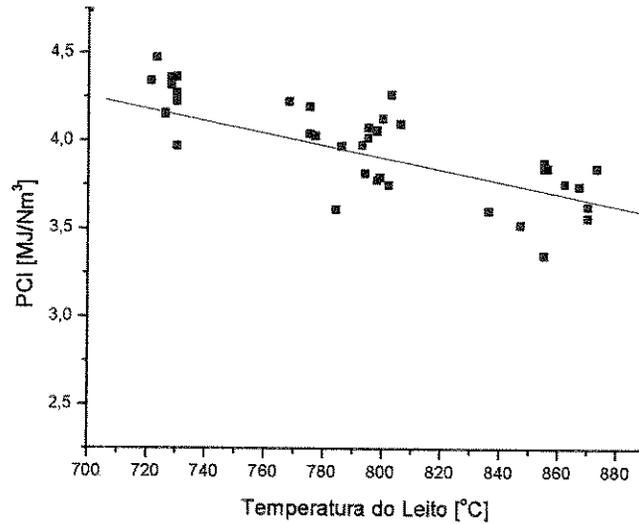


Figura 5.5 – PCI do gás produto x Temperatura do Leito – Dispersão amostral.

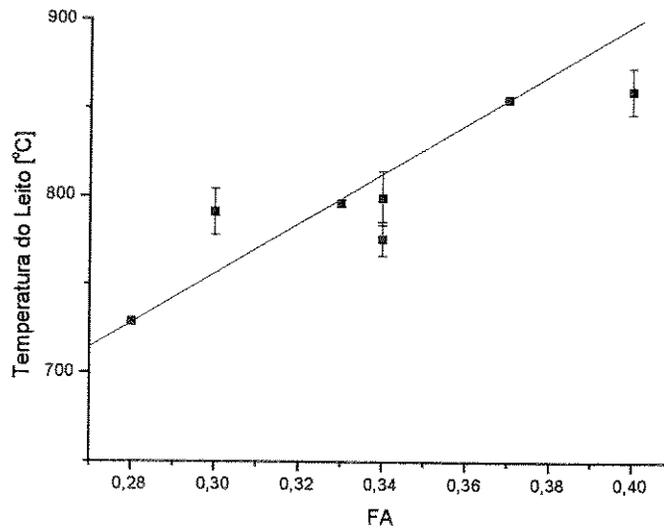


Figura 5.6 – Temperatura do leito x FA, para altura do leito = 0,6m – Média e desvio padrão.

A tendência mostrada na Figura 5.6 é explicada pela maior ocorrência das reações exotérmicas de oxidação. Quanto maior o FA, haverá mais oxigênio disponível para reagir como o carbono da biomassa e, conseqüentemente, haverá mais reações de oxidação do que de redução (ver item 2.3.1 – Reações Químicas).

Quanto menor o FA, menor a temperatura e, conforme a Figura 5.4 e explicação correlata, maior o PCI. Isto justifica a tendência da Figura 5.5, de maior PCI com a diminuição da temperatura. Esta correlação pode ser utilizada para o desenvolvimento de sistema de controle de plantas de gaseificação em leito fluidizado.

### Velocidade de fluidização e tempo de residência

Aproveitou-se o bom desempenho do gaseificador para estudar a influência das variáveis velocidade de fluidização e tempo de residência no poder calorífico do gás produto. Os gráficos apresentados nas Figuras 5.7 a 5.10 tentam elucidar esta dúvida. Na faixa operacional estudada, não se observa influência destas variáveis na qualidade do gás.

A Figura 5.7 mostra que, apesar da leve inclinação da curva de regressão, ela mostra a variação do PCI ainda dentro da faixa de 01 desvio padrão amostral, indicando a não dependência dos fatores. Para confirmar, discretizam-se os dados por tempo de residência (relaciona-se com a velocidade de fluidização pela altura do leito). A Figura 5.8 mostra os resultados de tendências díspares, confirmando a não dependência.

Quanto ao tempo de residência, a curva apresentada na figura 5.10 também mostra-se restrita ao intervalo de 01 desvio padrão do Poder Calorífico, indicando a não dependência.

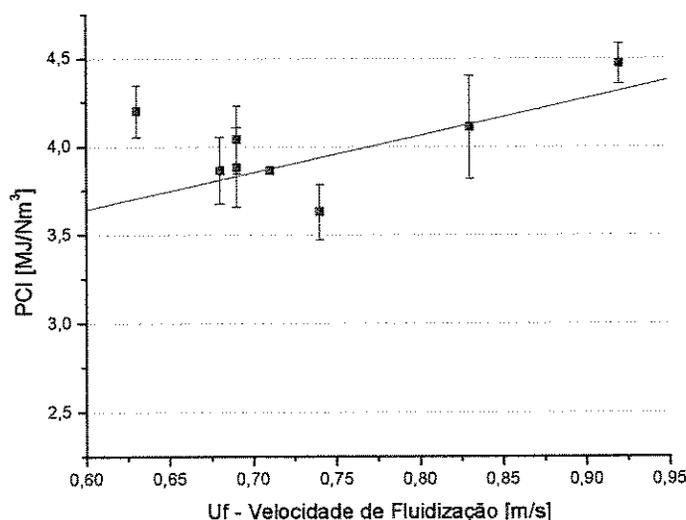


Figura 5.7 – PCI do gás x Velocidade de Fluidização – Média, desvio padrão e tendência.

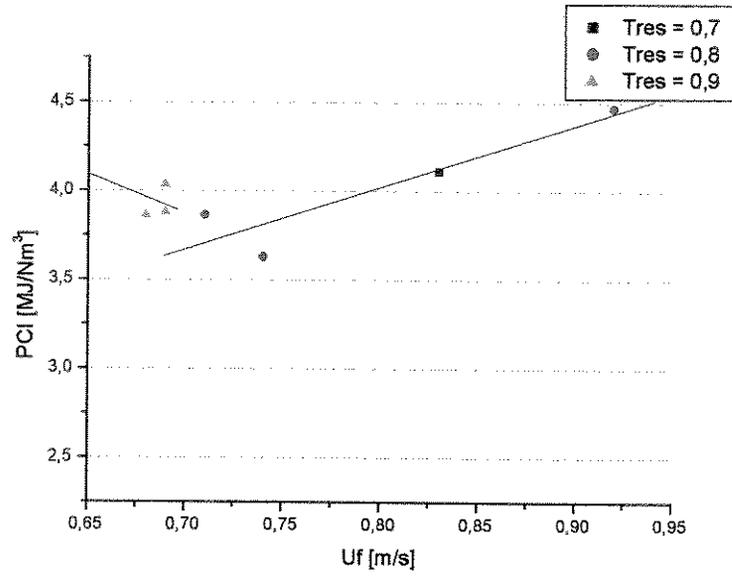


Figura 5.8 – PCI do gás x Velocidade de Fluidização – Média e tendência, discretizadas para diferentes Tempos de Residência.

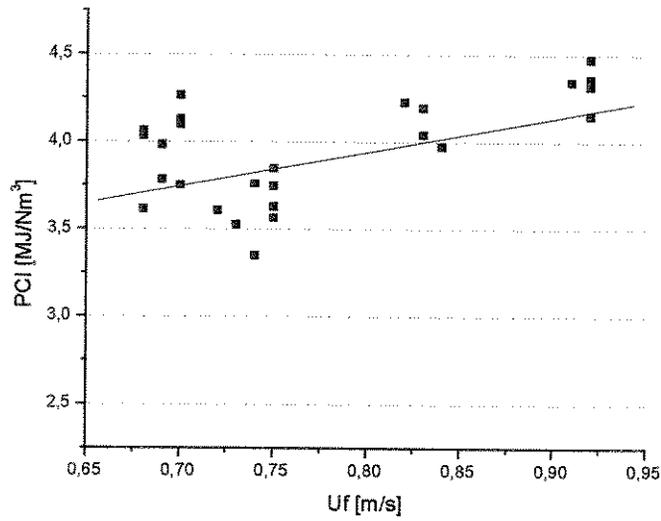


Figura 5.9 – PCI do gás x Velocidade de Fluidização – Dispersão amostral e tendência linear.

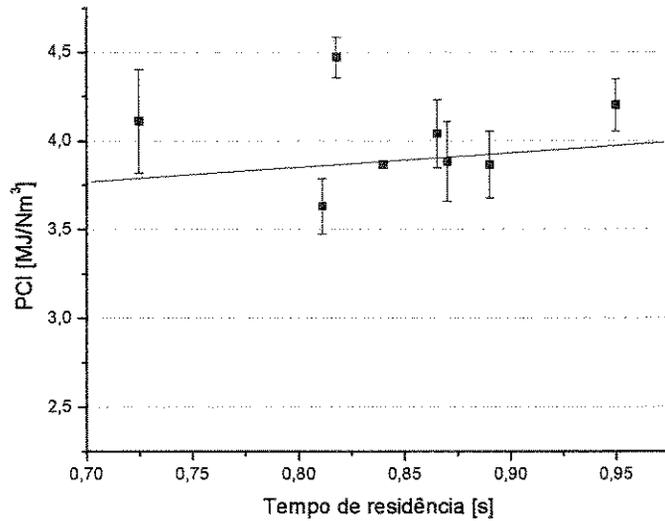


Figura 5.10 – PCI do gás x Tempo de residência – Média, desvio padrão e tendência linear.

As Figuras 5.11 a 5.12 mostram parâmetros de eficiência e potência do gaseificador. Na Figura 5.11, vê-se que as maiores eficiências se concentram na faixa de FA entre 0,28 e 0,35, situando-se por volta dos 40%.

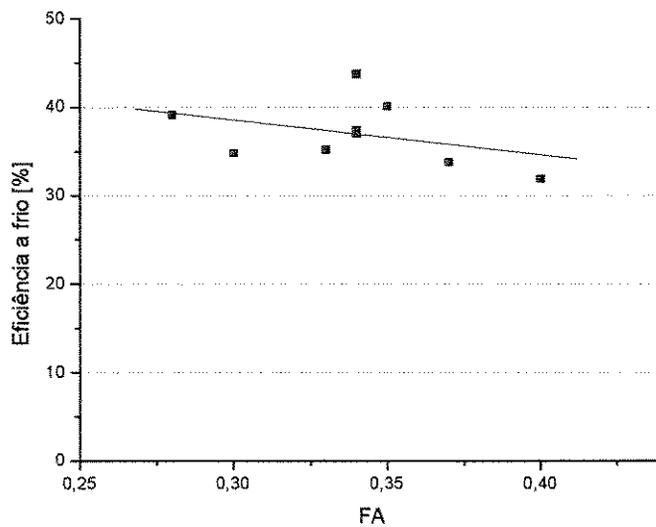


Figura 5.11 – Eficiência a frio do gás x FA – Médias e tendência linear.

A Figura 5.12 confirma a tendência de aumento de potência com aumento da taxa de alimentação de biomassa, mas ressalta um fato importante para este equipamento: não há grandes

divergências na reta, para os diversos FA. Isto corrobora os comentários referentes aos gráficos das Figuras 5.4 e 5.5.

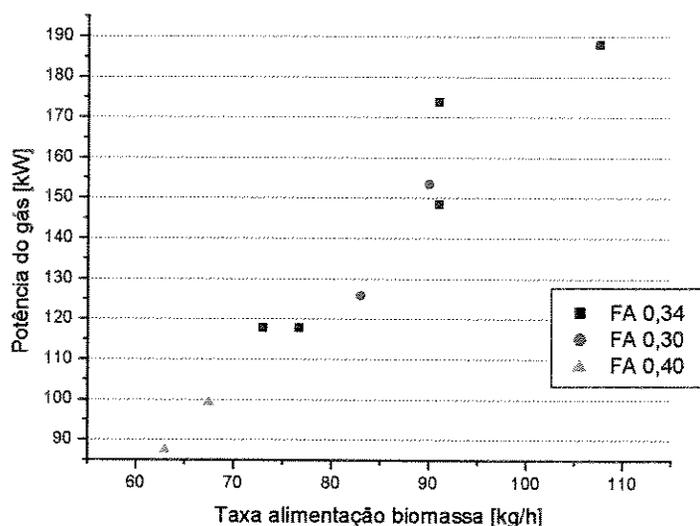


Figura 5.12 – Potência a frio do gás x taxa de alimentação de biomassa – Médias discretizadas por fator de ar.

### 5.2.2 Bagaço de Cana-de-açúcar

Para verificar o comportamento de outras biomassas no gaseificador, experimentou-se gaseificar o bagaço de cana-de-açúcar, resíduo agroindustrial de cunho energético muito importante no Estado de São Paulo e em outros Estados, onde há forte presença da indústria sucro-alcooleira, como Alagoas.

Houve várias tentativas para alimentar o bagaço pelo atual sistema de alimentação. Foram realizadas adaptações no silo para aumentar o escoamento do material e evitar a formação de arcos. Também optou-se por diminuir a granulometria do bagaço, por meio de moagem fina, como feito com o capim-elefante por FERNANDES [2000]. Mesmo assim, o sistema seguiu com dificuldades para alimentação, o que determinou que esta tese utilizasse praticamente apenas casca-de-arroz para determinar os parâmetros de gaseificação e testar o grupo-gerador.

O resultado da gaseificação do bagaço, para três condições experimentais, pode ser visto na Figura 5.13. Repara-se que, por causa do comportamento ascendente da curva, não se pode confiar muito nos dados. A causa mais provável desta irregularidade é uma alimentação

inadequada, mascarando o FA correto. Para os cálculos foram utilizados os dados de composição das páginas 35 e 36, Tabelas 2.7, 2.8 e 2.9.

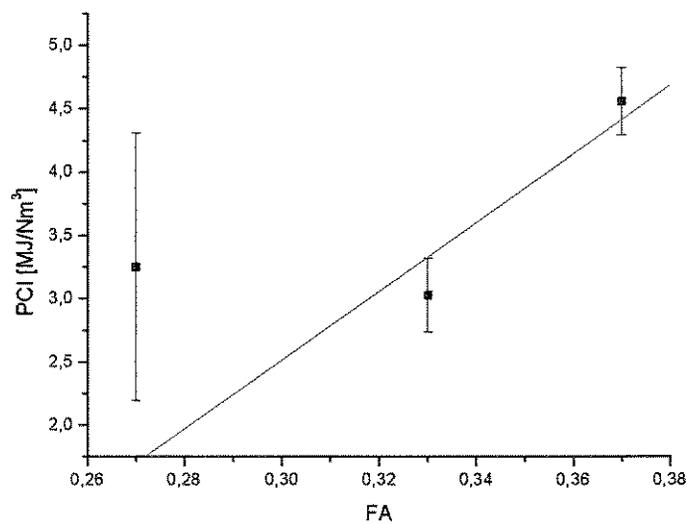


Figura 5.13 – PCI do gás x FA – Médias e desvio padrão para Bagaço.

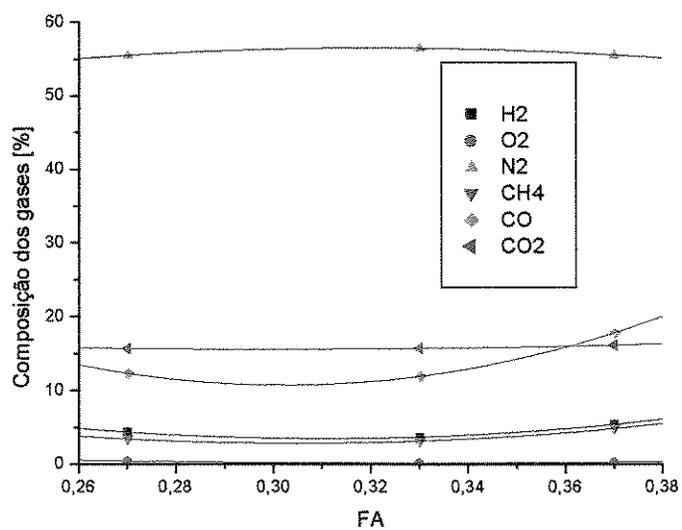


Figura 5.14 – Composição completa dos gases x FA – Médias e ajuste polinomial para Bagaço.

Apesar de apresentar um poder calorífico adequado para a gaseificação do bagaço, com média global de 3,6 MJ/Nm<sup>3</sup>, o sistema de alimentação do gaseificador ainda necessita ser adequado para a operação continuada com gramíneas.

### 5.3 DEMONSTRAÇÃO DA PLANTA-PILOTO: TESTES COM MOTOR

A planta-piloto foi operada três vezes, rodando o motor apenas com o gás produto. Os testes ocorreram nos dias 13/11/2003, 29/1/2004 e 30/1/2004. No primeiro teste, houve entupimento do tubo de gás no filtro de bagaço. Quando caiu a rotação do motor, reduz-se a carga. Por imperícia, isto foi feito rapidamente e o motor aspirou muito gás. Como a entrada do tambor (filtro) de bagaço estava entupida, este implodiu. Interrompe-se o teste para manutenção e, por falta de biomassa e dificuldades de convergir os esforços da equipe no período, retomam-se os testes em janeiro.

Modifica-se o projeto do tambor implodido, para evitar entupimentos. Funcionou bem. Infelizmente, as alterações realizadas no tambor (filtro) de água, acabaram por causar seu entupimento ao longo dos testes. O terceiro teste foi interrompido pela mesma razão, mas agora, os dois tambores foram implodidos. Procederam-se novas alterações, mas não houve tempo hábil para incluir novos resultados neste texto.

Apesar dos poucos resultados registrados, estes foram satisfatórios. Como pode ser visto na Tabela 5.2, foi alcançada uma eficiência de eixo de 26%<sup>12</sup>, adequada ao funcionamento de um motor deste tipo, operando apenas com gás produto. Neste momento a planta operou com uma eficiência global de 11%<sup>13</sup>, valor ainda aquém aos de outras plantas operando com leito fixo e motores de combustão interna, como visto na Tabela 4.6. Isto deve-se ao fato de que os gaseificadores de leito fluidizado possuem eficiência menor do que os de leito fixo, sendo vantajosos pelos fatores enumerados no item 2.2.1. Como visto no item 2.5, segundo CRAIG E MANN [1996], a eficiência média para geração de energia elétrica pela gaseificação da biomassa não tem superado 25%.

---

<sup>12</sup> Eficiência de eixo = Potência de eixo dividida pela potência disponível no gás produto.

<sup>13</sup> Eficiência global = Potência de eixo dividida pela potência disponível na biomassa (taxa de alimentação vezes o PCI).

Rotação	Torque	Potência de eixo		Pot. Gás	Efic. de eixo	Efic. Global	Abertura da Borboleta	Temp. Gás Produto	Temp. Gases Exaust.	$\lambda$
		BHP	kW	kW	%	%	graus	°C	°C	-
1810	10,5	19,0	14,2	174,0	8%	3,6%	30	48	688	1,18
1800	33,6	60,5	45,1	174,0	26%	11,4%	35	55	740	1,00
1650	25,5	41,6	31,0	174,0	18%	7,8%	83	68	754	1,00

Tabela 5.2 – Desempenho do motor, operando 100% com gás pobre (4,6 MJ/Nm<sup>3</sup>).

## **CAPÍTULO 6 - PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO**

### **6.1 ETAPAS DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO**

O Planejamento Estratégico é uma ferramenta utilizada pela alta administração de empresas para análise do ambiente, formulação e implementação de estratégias organizacionais. Esta metodologia não se restringe, porém, a isto. Ela costuma ser utilizada para criação e implementação de projetos de qualquer espécie. Nesta tese ela é proposta para auxiliar a implantação da Gaseificação de Biomassa como tecnologia renovável para geração de eletricidade no Meio Rural.

O processo de Planejamento Estratégico consta das seguintes etapas [CERTO et PETER., 1993]: Análise do ambiente; Estabelecimento das diretrizes da organização; Formulação da estratégia; Implementação da estratégia e Controle estratégico.

A etapa de análise do ambiente é crítica para a correta elaboração das diretrizes e estratégias. É dividida em três etapas: análise do ambiente interno, análise do ambiente operacional e análise do ambiente externo. No ambiente interno analisa-se a empresa (ou projeto) em si, seus processos, funcionários, finanças, etc. Em ambiente operacional enfocam-se a relação da empresa com seus fornecedores, clientes, concorrentes e agências reguladoras. Por fim, os fatores de legislação, política, comportamento, tecnologias e outros são vistos na análise do ambiente externo.

Depois de analisado o ambiente no qual a empresa opera, pode-se definir a razão de ser da empresa (missão) e o rumo que ela pretende tomar (objetivos). Se a empresa já tem a sua missão definida, este processo serve para apoiá-la a olhar mais claro para os objetivos e metas. Os objetivos organizacionais devem refletir o ambiente no qual a organização opera. Devem reconhecer aquelas tendências que estão se formando e que afetarão a futura relevância dos objetivos e impedirão que os mesmos sejam alcançados.

A formulação da estratégia tem por objetivo determinar cursos de ação apropriados para alcançar os objetivos, incluindo as atividades de análise, planejamento e seleção de estratégias que aumentem as chances de que os objetivos possam ser alcançados. Na formulação da estratégia, os planejadores utilizam as ferramentas: Análise de Questões críticas e a Análise dos pontos fortes e fracos, oportunidades e riscos.

Para que uma organização seja bem sucedida, não basta apenas que saiba formular bem sua estratégia; também é necessário que a mesma implemente-a com sucesso. Na etapa de Implementação da Estratégia, é elaborado o modo de implementar a estratégia, incluindo fatores de intensidade e velocidade de mudanças, assim como considerar os padrões comportamentais dentro da empresa.

O Controle Estratégico consiste em definir e aplicar medidores de desempenho para avaliar os resultados da implementação da estratégia.

## **6.2 ANÁLISE DO AMBIENTE**

Esta é a etapa mais importante em todo o processo de administração estratégica e é dividida em três etapas: análise do ambiente interno, análise do ambiente operacional e análise do ambiente externo.

### **6.2.1 Análise do Ambiente Interno**

#### Aspectos do Projeto

A gaseificação da biomassa se apresenta como uma alternativa sustentável para geração de energia, com baixa emissão de poluentes e permitindo, no ciclo global de crescimento e consumo (queima) dos vegetais, um equilíbrio entre consumo e produção de gás carbônico.

Propõe-se gaseificadores de biomassa em leito fluidizado para eletrificação rural dispersa.

O gaseificador foi projetado para operar com 80 a 120 kg/h de biomassa, gerando até 300 kW de potência térmica. Acrescido de um grupo-gerador, pode-se trabalhar gerando cerca de 75 kVA.

O equipamento é constituído por um tubo de 920 mm de diâmetro externo, construído de aço carbono 1020 e revestido internamente por uma camada de tijolos refratários. O diâmetro interno do reator é 400 mm. A altura total do reator é 4.600 mm.

#### Aspectos de Marketing

O projeto pode ser comercializado para geração elétrica descentralizada e/ou reaproveitamento de resíduos. Poderia-se associar a algum programa governamental de eletrificação como o

PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios). A produção dos equipamentos seria feita por encomenda.

Crítico é o tipo da biomassa, pois algumas só conseguem ser gaseificadas adequadamente (casca de arroz e bagaço de cana) em reatores de leito fluidizado, enquanto outras, como lenha, funcionam bem com gaseificadores de leito fixo, cujo mercado já está em processo de expansão, liderado pela equipe do Indian Institute of Science na Índia.

Alguns pontos devem ser levantados na divulgação do projeto:

- A geração de eletricidade a partir da gaseificação da biomassa mostra-se como alternativa na reestruturação do setor elétrico brasileiro;
- Se a tecnologia for implementada em geração descentralizada no meio rural, permitiria maior desenvolvimento agrícola e melhoraria as condições do homem no campo;
- A tecnologia não contribui para o aumento do carbono na atmosfera, podendo ser utilizada no mercado internacional de “certificados-verde” (mecanismo de desenvolvimento limpo – créditos de carbono);
- A tecnologia é boa opção para o aproveitamento energético de resíduos.

#### Aspectos Financeiros

Um primeiro estudo de viabilidade econômica [FERNANDES, 2000], indicou que, para um primeiro protótipo de demonstração, a eletricidade custaria entre R\$ 0,16 e R\$ 0,22/kWh.

#### Aspectos da Produção

Devido à inércia térmica do leito, o gaseificador deve ser pré-aquecido por cerca de cinco horas até a temperatura de operação (750°C). Porém, pela mesma inércia e pelo isolamento térmico, o equipamento pode ficar desligado durante a noite e ser religado pela manhã, tendo sua temperatura caído apenas em 100°C a 200°C. Então é necessária apenas mais uma hora de pré-aquecimento antes de nova alimentação de biomassa e operação do gaseificador. A fonte de calor utilizada nos protótipos é a queima de gás natural. Apesar de permitir um pré-aquecimento adequado, cria dependência de um combustível fóssil para o processo. Uma alternativa seria realizar o aquecimento com a própria combustão da biomassa o que demandaria um suprimento de biomassa suficiente para todo o processo.

### Aspectos de Pessoal

O equipamento pode ser perfeitamente operado com um técnico bem qualificado e um auxiliar não-qualificado, treinado adequadamente para a função. Os momentos mais críticos são os de partida e aquecimento do reator e partida do grupo-gerador. Durante o regime de gaseificação, apenas um monitoramento e alimentação do silo de combustível seriam necessários. Se operado em dois turnos, poder-se-ia contratar mais um auxiliar.

## **6.2.2 Análise do Ambiente Operacional**

### Componente Fornecedor

A biomassa deve ser obtida na própria região a ser instalado o equipamento. Os custos e logística dependerão portanto da situação específica.

Como muitas das vezes a biomassa será resíduo aproveitado, seu custo será baixo e a logística simples.

### Componente Concorrência

Este projeto concorre não apenas com outras tecnologia renováveis, mas principalmente com a geração dispersa por fontes não-renováveis como o óleo diesel.

De fato, a geração dispersa é tradicionalmente atendida, principalmente na região amazônica, por grupos-geradores diesel.

Uma outra tecnologia concorrente, renovável, é o uso de bio-óleos, obtidos pela pirólise de biomassa ou de biodiesel, obtido da esterificação de óleos vegetais (óleo de mamona, por exemplo). A esterificação é a reação do óleo com álcool (etanol), obtendo um éster.

A geração centralizada também pode ser concorrente, computando os custos para construir a linha de transmissão para a localidade remota (há possibilidade em futuro remoto de transmissão de eletricidade com novas tecnologias, incluindo micro-ondas).

Outras fontes renováveis como a solar e a eólica não são totalmente concorrentes por incluírem a necessidade de armazenamento da energia sazonal em baterias. Essas duas tecnologias seriam muito bem aplicadas em conjunto à biomassa, em um sistema otimizado para as condições locais.

O ponto da concorrência entre produtos semelhantes seria a opção pelo modelo de gaseificador, pois a tecnologia de leito fixo já está consagrada para operação na escala abaixo de 1MW, principalmente o modelo de topo aberto do Indian Institute of Science. O ponto que deve-se ter em mente é o tipo de biomassa que pode ser utilizada em cada um dos modelos de gaseificadores e buscar o nicho de mercado adequado (por exemplo para gaseificação de casca de arroz ou biomassa de granulometria polidispersa como o caso de gramíneas: bagaço-de-cana e capim-elefante).

#### Componente Cliente

O cliente deste projeto seria em última instância o homem do campo. Comercialmente falando, seriam pequenas comunidades rurais ou pequenas e médias agroindústrias. Estes clientes devem ter a viabilidade do plantio de biomassa para gerar energia ou da produção suficiente de resíduos orgânicos (de plantio, de processo industrial ou dejetos) que possam ser aproveitados energeticamente.

Outro cliente também é o Governo, em suas instâncias federal, estadual ou municipal e seus representantes institucionais, assim como também Organizações Não-Governamentais (ONG's).

#### Componente Mão-de-obra

A mão-de-obra para a construção do equipamento e coordenação do projeto não precisa ser altamente especializada. Basta uma boa qualificação de nível técnico, facilmente encontrada nos meios urbanos brasileiros, com um treinamento específico na construção, operação e manutenção do equipamento.

Infelizmente, é mais difícil de se encontrar mão-de-obra qualificada justamente onde se necessita: o meio rural. Propõe-se portanto programas de qualificação de mão-de-obra e também incentivos a técnicos se mudarem das grandes metrópoles para pequenos centros urbanos, núcleos de regiões rurais.

#### Componente Internacional

Há vários países e empresas estrangeiras que desenvolvem tecnologias renováveis. No caso da gaseificação de biomassa, o Brasil ainda está muito atrás de outros países já com várias plantas-piloto em desenvolvimento e operação. Apesar de haver pesquisas brasileiras no setor, não seria

de se surpreender se um dia aportasse aqui uma empresa estrangeira, difundindo uma tecnologia que poderia ser de competência tecnológica nacional.

Fatores que estimulam e que desestimulam os investimentos produtivos no Brasil:

A pesquisa “Os principais fatores que estimulam e que desestimulam os investimentos produtivos no Brasil”, realizada pela Simonsen Associados e divulgada no jornal Gazeta Mercantil [ÉBOLI, 2002], avaliou os fatores que estimulam e os que desestimulam os investimentos produtivos no Brasil. O estudo foi elaborado junto aos membros dos Comitês da Câmara Americana de Comércio, com base em 132 respostas e pode ser visto na Tabela 6.1.

Rank	O que atrai	O que espanta
1o.	Potencial de crescimento do mercado. Tamanho da economia.	Impostos.
2o.	Disponibilidade de energia. Inflação sob controle.	Custo Brasil.
3o.	Remuneração do capital.	Corrupção.
4o.	Capacidade de produzir com baixos custos. Mercado aberto. Credibilidade das instituições. Mercado de capitais.	Legislação/regulamentação. Descontrole dos gastos públicos. Custo do capital.
5o.	Ausência de riscos políticos.	Criminalidade/insegurança/seqüestro. Burocracia. Acesso a novas tecnologias.
6o.	Proteção à propriedade intelectual.	Impunidade. Risco Brasil (rating).
7o.	Política externa. País pacífico.	Logística. Inconstância de políticas.
8o.	Demanda reprimida. Demanda por dinheiro. Liderança no Mercosul.	Falta de financiamento de longo prazo. Falta de infra-estrutura. Educação. Ausência de política de desenvolvimento. Legislação trabalhista.
9o.	População. População emergente. Cultura de consumo. Recursos hídricos. Incentivos fiscais.	Dificuldade em abrir capital/ IPO
10o.	Aceitação de estrangeiros.	Interferência do governo no mercado. Sistema portuário. Mão-de-obra desqualificada.

Tabela 6.1. – Estímulos e desestímulos ao investimento no Brasil.

### 6.2.3 Análise do Ambiente Externo

#### Componente Econômico

As taxas de juros continuam altas e dificultam qualquer proposta de financiamento de projeto. Alguns indicadores podem ser vistos na Tabela 6.2, com dados extraídos da Gazeta Mercantil [GZM, 2/2/2004].

Dólar (Ptax)	R\$ 2,9401/2,9409
Salário Mínimo	R\$ 240
IGP-M (FGV) 12 meses	7,17%
Taxa Selic	16,30% aa.
Repasso BNDES <sup>14</sup>	11,00 / 12,50 % aa.

Tabela 6.2 – Indicadores Econômicos em 02/02/2004.

Foi criado o Programa de Ação para incentivo às fontes de energia renováveis:

PROINFRA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

Objetivo: agregar, no máximo, 3,3 GW de potência instalada ao Sistema Elétrico Interligado Nacional. Criado pela medida provisória no. 14 de 21/12/2001 e disciplinado por resolução do Ministério das Minas e Energia. Os valores, para a compra de energia de biomassa, garantidos pela Eletrobrás são os seguintes:

- Cana-de-açúcar: R\$ 93,18 /MWh
- Casca-de-arroz: R\$ 103,20 /MWh
- Sobras de madeira: R\$ 101,35 /MWh

Estes valores inviabilizam a venda da energia, segundo a análise prévia de viabilidade do projeto de uma primeira planta -piloto [FERNANDES, 2000].

#### Componente Tecnológico

A tecnologia empregada na fabricação do produto é basicamente de caldeiraria e moldagem de tijolos refratários. A adaptação do grupo-gerador também não é de grandes dificuldades técnicas.

<sup>14</sup> Inclui TJLP (10%) + spread BNDES 1,0/2,5% deve ser acrescido do spread de risco do negociado entre o cliente e o agente financeiro.

A planta-piloto com grupo-gerador são de manutenção simples, de baixa complexidade tecnológica.

Há grandes possibilidades de difusão da tecnologia de células de combustível. A gaseificação de biomassa poderia ser utilizada na produção de hidrogênio para estas células.

Uma tendência que também deve ser observada é a do motor híbrido, desenvolvido paralelamente pela Honda e Toyota, movido alternadamente por gasolina e por eletricidade. Os carros poluirão menos e ficarão mais inteligentes. Todos os principais fabricantes de carros vão produzir veículos com célula de combustível em 2004. Por volta de 2020, alguns analistas estimam que 25% dos automóveis serão movidos por células de combustível.

A médio prazo há a possibilidade de inovações tecnológicas na geração e distribuição de energia de forma estática, eliminando distâncias e milhares de quilômetros de redes de transmissão. Entre as possibilidades, inclui-se linhas de transmissão mais eficientes ou mesmo transmissão de eletricidade por micro-ondas.

Na área de gestão de produção e processos, deve-se atentar para as vantagens da gestão do conhecimento e de inovações tecnológicas, assim como a disseminação de práticas comerciais por meio da internet.

#### Componente Legal

Há projetos de lei em trâmite que contribuiriam para a implantação de fontes de energia renováveis no Brasil.

Substitutivo do Projeto de Lei 2905/2000 em trâmite no Congresso Nacional

- Criação da Conta de Desenvolvimento Energético por 25 anos;
- Extensão dos benefícios das PCH's (pequenas centrais hidroelétricas) para fontes solar, eólica e biomassa, no tocante à redução da tarifa de uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição e na venda de energia renovável para consumidores livres (acima de 500 kW);
- Obrigação das concessionárias e permissionárias de distribuição e dos agentes comercializadores de contratarem, no prazo de até 20 anos, pelo menos 7% de seu fornecimento a partir de fontes renováveis – eólica, solar, biomassa e PCH;
- Destinação de parte dos recursos da Reserva Global de Reversão (RGR) para financiamento de empreendimentos de fontes solar, eólica, biomassa e PCH;

–Manutenção da Conta de Consumo de Combustível (CCC) para sistemas isolados, por mais 20 anos, e dos seus benefícios para os aproveitamentos que utilizem fontes solar, eólica, biomassa e PCH e gás natural.

Outros projetos de lei em trâmite:

Projeto de Lei 4673/2001 em trâmite no Congresso Nacional

–Cria o Programa Prioritário de Desenvolvimento da Energia Eólica do Nordeste - PRODEENE.

Projeto de Lei 4073/2001 em trâmite no Congresso Nacional

–Amplia a potência das PCH para 50 MW e libera a área do reservatório.

Projeto de Lei 573/1999 em trâmite no Congresso Nacional

–Estende os benefícios das PCH's para os sistemas com potência inferior a 50 MW e que utilizem energia primária solar, eólica, de biomassa e maremotriz.

Projeto de Lei do Senado n. 27/1996, em trâmite no Congresso Nacional

–Cria o Programa de Incentivos a Energias Renováveis (PIER) e dá outras providências.

Conclusão:

Necessidade de aprovação da legislação pelo Congresso e da regulação e execução da mesma.

Necessidade de divulgação da legislação.

#### Componente Linhas de Financiamento

São os seguintes os programas do BNDES que oferecem recurso à implementação de fontes de energia renováveis no Brasil (BNDES, 2002):

Programa de apoio à cogeração de energia elétrica a partir de resíduos de cana de açúcar

–Destinado às usinas de açúcar e álcool que vendam EE excedente às concessionárias de distribuição ou comercialização de EE;

–Participação de até 80% dos itens financiáveis, juros de TJLP com spread básico de 1%aa e spread de risco entre 0,5% e 2,5%aa para operações diretas com o BNDES;

–Prazos determinados em função da capacidade de pagamento do empreendimento, contemplando carência de até 6 meses após conclusão do projeto e amortização de até 12 anos.

Programa de apoio à cogeração de energia elétrica a partir de resíduos de Biomassa

–Destinado a projetos de cogeração que vendam EE excedente a concessionárias de distribuição ou comercialização de EE;

–Mesmas condições de financiamento.

Programa para Investimentos em Conservação e Fontes Alternativas de EE

–Destinado a projetos de racionalização, conservação e fontes alternativas com participação de até 80% dos itens financiáveis;

–Juros TJLP p/ gastos locais ou “cesta de moedas” para máquinas importadas;

–Spread básico de 2,5% ou 1% para áreas abrangidas por Programas Regionais.

–Spread de risco de 0,5% a 2,5%aa para operação direta c/ BNDES;

–Carência e amortização semelhante aos outros programas.

### Componente Político

Há uma tendência, pelo menos gradual, de reconhecimento e incentivo às fontes renováveis de energia.

Apesar do “lobby” das fontes tradicionais de energia possuir bastante peso político, o governo não pode negar a necessidade de implementação das fontes renováveis e da repercussão política positiva que isto traz: internamente nas classes mais esclarecidas (minorias da população), e ainda mais importante o impacto externo pela repercussão positiva perante a comunidade internacional, principalmente Europa e população dos Estados Unidos.

### Componente Social

Embora tenha evoluído no campo econômico, o Brasil não conseguiu superar as desigualdades abissais que separam, em matéria de renda, suas regiões e seus habitantes.

A riqueza, que deveria distribuir-se melhor pela sociedade, concentrou-se ainda mais, prejudicando a qualidade de vida e fomentando a insegurança nos principais centros urbanos.

No meio rural, diminuí o nível de miséria em algumas regiões do país, em contraste com outras regiões onde predominam péssimas condições de vida, com subnutrição, falta de higiene e de educação, apresentando baixíssimos Índices de Desenvolvimento Humano (IDH – metodologia consagrada desenvolvida pela Organização das Nações Unidas para monitorar e comparar os países quanto às condições de vida e desenvolvimento de suas populações).

### **6.3 ESTABELECIMENTO DAS DIRETRIZES**

Segundo Samuel CERTO [1993], “missão” é a proposta para a qual, ou a razão pela qual, uma organização existe. Em geral, contém informações tais como os tipos de produtos ou serviços que produz, quem são seus clientes e que valores importantes possui. A missão é uma declaração ampla da diretriz organizacional, sua “raison d’être”.

Em seguida, os “objetivos organizacionais” são a(s) meta(s) para a(s) qual(is) a organização direciona seus esforços.

Assim, para o objetivo deste trabalho, seriam:

#### Missão:

Implementar a gaseificação de biomassa como alternativa para eletrificação rural dispersa e desenvolvimento sustentável.

#### Objetivos:

O trabalho se compõe de três objetivos específicos:

1. Demonstração da viabilidade técnica da gaseificação de biomassa, com ensaios em planta-piloto.
2. Demonstração da viabilidade econômica do processo de produção e utilização de energia em pequenas comunidades rurais.
3. Difusão do projeto, implementando-o em escala comercial.

## **6.4 FORMULAÇÃO DA ESTRATÉGIA**

Na formulação da estratégia deve-se aproveitar os dados da análise ambiental e as metas do estabelecimento de diretrizes. Existem várias ferramentas que permitem esta reflexão. Uma boa fonte de ferramentas é a revista “Harvard Business Review” [HBS, 2004].

Neste trabalho são apresentadas duas ferramentas: Análise de Questões críticas e a Análise dos Pontos fortes e fracos, oportunidades e riscos [CERTO, 1993].

### **6.4.1. Análise de Questões Críticas**

Fornece reflexão para estudar uma situação atual do projeto/organização e formular estratégias adequadas. Envolve quatro questões:

1. Quais são o(s) propósito(s) e o(s) objetivo(s) da organização?
2. Para onde a organização está indo no momento?
3. Que fatores ambientais críticos a organização está enfrentando atualmente?
4. O que pode ser feito para alcançar os objetivos organizacionais de forma mais efetiva no futuro?

### **6.4.2. Análise dos Fatores Internos e Externos**

Esta é uma ferramenta para se entender a situação global. Esta abordagem tenta confrontar os pontos fortes e fracos internos de um projeto/organização e compará-los com as oportunidades e riscos do ambiente externo. Tabela-se assim quatro campos e, em cada um destes, são listados os fatores (Tabela 6.3).

<b>Pontos Fortes:</b>	<b>Pontos Fracos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geração de eletricidade dispersa;</li> <li>• Geração de energia de forma renovável;</li> <li>• Possibilidade de aproveitamento de ampla variedade de biomassa e resíduos;</li> <li>• Tecnologia simples, de fácil construção e manutenção barata;</li> <li>• Não contribui para o aumento das emissões de carbono para a atmosfera.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnologia do sistema de limpeza de gases pouco eficiente;</li> <li>• Dificuldades do sistema de alimentação para gramíneas (bagaço, capim, etc.);</li> <li>• Necessidade de mão-de-obra treinada para operar o equipamento;</li> <li>• Custo inicial do investimento.</li> <li>• Valor da eletricidade acima do oferecido pelo Proinfa para compra.</li> </ul>
<b>Oportunidades:</b>	<b>Riscos:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM).</li> <li>• Aumento futuro do preço do petróleo;</li> <li>• Créditos Carbono (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo);</li> <li>• Interesse internacional crescente em fontes renováveis;</li> <li>• Pressão internacional pela preservação da Amazônia e redução da emissão de gases efeito estufa.</li> <li>• Uso da tecnologia de gaseificação em leito fluidizado para fontes não-renováveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de investimentos e vontade política;</li> <li>• Risco de outras tecnologias renováveis ganharem mercado mais rápido.</li> </ul>

Tabela 6.3 – Análise de pontos fortes e fracos, oportunidades e riscos.

#### 6.4.3. Formulando a Estratégia

A formulação da estratégia propriamente dita vai depender do nível organizacional ou escopo do projeto.

Para este trabalho, foram elaboradas seis estratégias gerais. Estas estratégias devem ser posteriormente dissecadas em ações táticas e na forma de executá-las (fora do escopo deste trabalho).

1. Formular um plano de negócios com um estudo aprofundado de viabilidade econômico-financeira, considerando o desenvolvimento comercial da tecnologia e apresentando o potencial de mercado.
2. Contactar os agentes interessados no investimento para desenvolvimento e implementação da tecnologia.
3. Contactar o mercado potencial.
4. Realizar um projeto de demonstração da tecnologia.
5. Desenvolver uma rede de pesquisadores e empresas interessados na tecnologia.
6. Iniciar planos de desenvolvimento comercial da tecnologia, visando custos de eletricidade inferiores aos valores normativos do Proinfra.

## 6.5 IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA

A implementação da estratégia entra no escopo da execução do projeto ou no cotidiano da administração executiva. Apesar de existir ampla literatura sobre formulação de estratégia, existe uma lacuna no tocante à prática de sua implementação. De fato, a correta implementação da estratégia vai depender da habilidade de liderança e execução de quem a está implementando.

Samuel CERTO [1993] apresenta passos que podem orientar o ato de implementar a estratégia.

1. Verificar o quanto a organização terá de mudar para a correta implantação da estratégia;
2. Analisar as estruturas formal e informal da organização;
3. Analisar a cultura organizacional;
4. Selecionar uma abordagem apropriada para a implementação;
5. Implementar a estratégia e avaliar os resultados.

### Avaliação

A implementação da estratégia vai depender da situação inicial do grupo interessado em liderar a iniciativa de desenvolvimento. Esta iniciativa está partindo de um grupo de pesquisadores, de uma ONG, de uma grande empresa ou de um órgão governamental? Para alavancar esforços,

seguindo as estratégias número 2 (contactar agentes interessados) e número 5 (formar rede), o ideal seria a união dos esforços dos quatro agentes interessados citados.

A necessidade de uma escala mínima, de cerca de 100 kW, associada à tecnologia de leito fluidizado, inviabiliza projetos para pequenas comunidades isoladas. Por outro lado, o equipamento mostrou-se muito adequado para a gaseificação de casca-de-arroz, indicando claramente um segmento de mercado a ser prospectado: o das beneficiadoras de arroz e o de plantio (há grande necessidade de irrigação para a cultura do arroz). O mercado a ser vislumbrado não se restringe às regiões rizícolas nacionais, mas também inclui a possibilidade da China e o Sudeste Asiático, o qual já implementa projetos de gaseificação de casca-de-arroz [YIN, 2002].

Um segundo segmento de mercado a ser prospectado é o das beneficiadoras de castanha-do-pará e açaí no Norte do Brasil. Há uma possibilidade de aproveitamento da casca da castanha processada em grandes quantidades em Belém do Pará.

O terceiro segmento a ser indicado é o das serrarias e madeireiras. O investimento com gaseificadores, na escala de 100 a 1000 kW, seria menor do que o utilizando caldeiras com ciclo Rankine para produção de potência.

O mercado sucro-alcooleiro, já está consagrado com o investimento em plantas de ciclo Rankine de grande porte. A possibilidade cogitada seria com o desenvolvimento de um projeto de gaseificação integrada a ciclo combinado, mas esbarra não só em barreiras técnicas e econômicas, mas em barreiras culturais como o conservadorismo do setor usineiro e sua demanda simultânea por risco zero (protecionismo do Estado) e altas taxas de retorno.

#### Abordagem de implementação

Após definido o grupo que irá tocar o projeto, sugere-se abordar inicialmente o mercado rizícola, seguindo os passos:

- 1) Prospecção de mercado/ beneficiadoras: quantas beneficiadoras, capacidade e sazonalidade de beneficiamento de arroz, demanda e consumo energéticos, localização geográfica, capacidade financeira e interesse (ou resistência) a mudanças tecnológicas.
- 2) Prospecção de mercado/ plantio: áreas plantadas e potenciais, uso e necessidade potencial de irrigação, capacidade financeira e interesse (ou resistência) a mudanças tecnológicas.
- 3) Escolha de beneficiadoras e fazendas modelo, para servirem de disseminadoras da idéia. Realizar projeto de demonstração, a custos interessantes para o produtor.

- 4) Contactar cooperativas rurais locais e núcleos ou associações comunitárias, assim como administração municipal para aliadas na divulgação da nova tecnologia.
- 5) Com os resultados desta primeira fase, estruturar e definir planejamento para o crescimento e disseminação da tecnologia. Buscar padronização do processo para poder disseminá-lo capilarmente em várias regiões.
- 6) Reavaliar resultados e traçar novas metas.

Após a fase de prospecção de mercado, deve-se concluir o projeto de engenharia e produção do equipamento, que já deve estar sendo tocado paralelamente desde o início do empreendimento. Apenas com a convergência das informações de prospecção de mercado, de desenvolvimento tecnológico e análise econômico-financeira, pode-se partir para a implementação comercial do projeto.

## **6.6 CONTROLE DA ESTRATÉGIA**

Esta etapa é essencial para se obter os resultados desejados da estratégia. O controle é feito seguindo três passos:

1. Medição do desempenho;
2. Comparação do desempenho com os padrões;
3. Ação corretiva.

Para se obter sucesso, deve-se ter informações de procedência e qualidade confiáveis e uma ação corretiva eficaz.

Para a primeira fase de implementação, sugere-se alguns indicadores:

- 1) Demonstrativos contábeis do investimento;
- 2) Número e percentual de beneficiadoras atendidas;
- 3) Taxa de aceitação e satisfação com a tecnologia (pesquisa com o cliente e público de interesse);
- 4) Eficiência energética da planta durante a operação continuada pelo cliente;

- 5) Número de horas de operação por dia (ou corridos por mês) e tempo de paradas para a manutenção;
- 6) Interesse de compradores potenciais em adquirir a tecnologia e por que ainda não a adquiriram.

Um indicativo de preço para a energia são os valores normativos do Proinfra, que no momento da escrita desta tese estavam em R\$ 103,20 /MWh da energia elétrica produzida a partir da casca-de-arroz.

## CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

### 7.1 CONCLUSÕES TÉCNICAS

- 1 - O PCI manteve-se bem estável na faixa de temperatura e fator de ar estudados. O PCI médio, em toda a faixa de FA entre 0,28 e 0,40, foi de  $4,20 \text{ MJ/Nm}^3$ , com desvio padrão de 0,41, ou 9,8%. Isto demonstra uma robustez e estabilidade operacional do gaseificador, qualidade recomendável para um equipamento que deverá operar continuamente sob diferentes condições de contorno, fornecendo um gás de qualidade estável, para uso no motor. Esta estabilidade favorece o desenvolvimento e otimização do motor para uso com o gás produto de biomassa.
- 2 - A eficiência a frio de 40%, apesar de superior às encontradas por SÁNCHEZ [1994] nos primórdios das pesquisas da equipe, estão inferiores às encontradas por ANGULO [2002] (entre 40 e 50%). Isto indica que pode-se otimizar ainda mais a operação do equipamento. De fato, pelas dificuldades técnicas e operacionais discutidas no texto, optou-se por operar o gaseificador com cerca de metade da capacidade de projeto. Isto pode ser uma das causas da menor eficiência. Deve-se seguir com testes de demonstração para verificar o aumento da eficiência.
- 3 – Cruzando os gráficos referentes ao PCI e à Eficiência em função do Fator de Ar (Figuras 5.4 e 5.11), verifica-se que o equipamento é otimizado operando na faixa entre FA 0,28 e 0,35.
- 4 – Verificou-se que as variáveis “velocidade de fluidização” e “tempo de residência” não influenciam o poder calorífico do gás produto, na faixa operacional estudada.
- 5 – O gaseificador operou sem problemas, mostrando-se plenamente adequado para gaseificação de casca-de-arroz. Sua operação é otimizada na faixa de fatores de ar entre 0,28 e 0,35. Os testes indicam que pode-se aumentar a potência do equipamento, mas não foi possível realiza-lo dentro das instalações atuais do laboratório.
- 6 – Apesar de apresentar um poder calorífico adequado para a gaseificação do bagaço, com média global de  $3,6 \text{ MJ/Nm}^3$ , o gaseificador ainda necessita ser adequado para a operação continuada com gramíneas. O fator limitante continua sendo o sistema de alimentação.
- 7 – O motor a gás natural funcionou adequadamente com o gás pobre, produto da gaseificação de biomassa, apresentando uma eficiência de eixo de 26% e demonstrando a viabilidade técnica da Planta-piloto, com uma eficiência global de 11%. Este valor está próximo aos 12% (leito fixo) e

17% (leito fluidizado circulante) encontrado por YIN et al. [2002] na China. Segundo a conclusão nº 2, ainda há margem para aumento na eficiência do gaseificador.

8 – O sistema de limpeza dos gases está em processo de aperfeiçoamento para uma futura planta de demonstração, mas já funciona a contento para os objetivos experimentais iniciais.

9 – Pode-se utilizar correlações de PCI x FA (ver Figura 5.5) no desenvolvimento de sistemas de controle para plantas de gaseificação em leito fluidizado.

10 – O Planejamento Estratégico indica que a tecnologia pode ser desenvolvida inicialmente para aproveitamento energético de resíduos agro-industriais como casca-de-arroz e casca de castanha-do-pará, junto a suas beneficiadoras. Há a possibilidade de se estender o projeto, implementando-o na Ásia, região de forte atividade rizícola.

11 – A tecnologia de gaseificação de biomassa em leito fluidizado mostra-se inadequada para comunidades isoladas, devido a sua maior complexidade operacional e necessidade de operar com capacidades acima de 100 kWe para mostrar-se economicamente viável (maior do que a necessária para estas comunidades).

12 – A tecnologia desenvolvida neste trabalho mostra-se promissora para eletrificação rural e comunidades sustentáveis se forem observados os quesitos:

- Baixo custo de biomassa (incluindo toda a logística de coleta, pré-processamento, armazenagem e alimentação).
- Biomassa polidispersa ou com outras características que a façam mais adequadas ao leito fluidizado do que ao leito fixo.
- Demandas superiores a 50 kWe ou mesmo 100 kWe (o valor correto deve provir de um estudo de viabilidade tecno-econômica mais adequado a cada projeto), correspondendo a comunidades a partir de 500 ou 1000 habitantes.

## 7.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O escopo e aplicação desta tese são amplos, já vislumbrando um objetivo de desenvolvimento tecnológico e aplicação social da tecnologia. Desta forma, algumas das propostas de trabalhos futuros a serem realizados, são:

### **7.2.1. Desenvolvimento de planta-piloto de gaseificação de biomassa e implementação da tecnologia**

- Sistemas de alimentação de biomassa (ponto crítico para gramíneas, como bagaço de cana);
- Tecnologia de projeto e construção do gaseificador de biomassa;
- Sistema de limpeza de gases (ponto crítico, principalmente limpeza de gases quentes);
- Otimização de motores de combustão interna para uso com gás de baixo poder calorífico (gás de biomassa);
- Adaptação, operação e otimização de turbinas a gás para uso com gás de baixo poder calorífico (gás de biomassa);
- Desenvolvimento de planta-piloto de cogeração/ciclo-combinado;
- Desenvolvimento de planta-piloto para produção de hidrogênio para células de combustível.
- Implementação de gaseificador de biomassa em comunidade isolada ou sustentável;
- Implementação de gaseificador de biomassa em leito fluidizado em beneficiadora de arroz, para aproveitamento de resíduo e possível auto-suficiência energética.

### **7.2.2. Pesquisa dos processos na gaseificação de biomassa**

- Dinâmica da fluidização do leito;
- Gaseificação de outras biomassas, como por exemplo: casca de castanha do Pará, semente de açaí e outros resíduos vegetais da região norte, com análise e otimização da operação do gaseificador para cada biomassa;
- Gaseificação de lodo de esgoto;
- Gaseificação de resíduos plásticos;
- Análise Termogravimétrica da gaseificação de biomassa;
- Influência do vapor d'água nos componentes e poder-calorífico do gás-produto;
- Produção de hidrogênio para células de combustível;
- Estudo da combustão do gás-produto (em “co-firing”, em motores de combustão interna e em turbinas a gás);
- Análise de alcatrão e particulados no gás produto.

### **7.2.3. Estudo do processo de produção e desenvolvimento da tecnologia**

- Produção, Colheita e Logística da produção da biomassa (plantação energética ou uso de resíduos);
- Análise econômica de plantas-piloto de gaseificação de biomassa;
- Integração de sistemas energéticos renováveis (por ex.: gaseificação + energia solar + energia eólica);
- Análise termo-econômica (exergo-econômica) da planta-piloto;
- Barreiras (tecnológicas, econômicas e sociais) e soluções para implementação da tecnologia da gaseificação de biomassa;
- Análise das políticas e programas de financiamento para desenvolvimento e implementação da tecnologia e sugestões para tais;
- Estudos e desenvolvimento de comunidades sustentáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, v.57 p.195-204. Elsevier, 2001
- ALDERUCCI, V. et al. Potential biomass resources of Sicily for electric-power generation. **Applied Energy**, v. 45, n.3, p. 219-240, 1993.
- ANGULO, M.B.B. **Experimentos de Gaseificação de Casca de Arroz em Leito Fluidizado**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002. 68p
- BABCOCK and WILCOX Steam, 40<sup>th</sup> ed., Cap. 16: Atmospheric Pressure Fluidized-Bed Boilers. 1992. In: BAIN, R.L., OVEREND, R.P. Biomass-Fired Power Generation. In: **Biomass Usage for Utility and Industrial Power**, Snowbird. April-May, 1996.
- BARNO, J. GIL **Gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante: estudio a escala de pequeña planta piloto de algunos parametros que mejoran la calidad de la gasificación**. Tese de doutorado. Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 1998.
- BARTHELEMY, G. **Le retour des gazogenes**. Paris: Editions Alternatives, 1981. 110p.
- BNDES - **Programa de Apoio Financeiro a Investimentos Prioritários no Setor Elétrico** ; Disponível na internet: <http://www.bndes.gov.br/produtos/financiamento/eletrico.asp>; 05/06/2002
- BEHAINNE, J.J.C. **Diminuição de H<sub>2</sub>S na gaseificação de carvão mineral mediante adição de dolomita em reator de leito fluidizado**. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1999.
- BRASIL, **Constituição da República Federativa do Brasil**. Presidência da República, Casa Civil. Brasília, 1998.

- BRIDGEWATER, A.V. et al. The nature and control of solid, liquid and gaseous emissions from the thermochemical processing of biomass. **Biomass and Bioenergy**, v.9, n.1-5, p.325-341, 1995.
- BROWN, M., WALKER, N. The CDM, carbon credits and decentralized energy. **COSPP – Cogeneration & On-Site Power Production**, v.4, n.4, p.71-79, Jul-Aug 2003.
- CAVALCANTI, C. Desenvolvimento e Respeito à Natureza: uma Introdução Termodinâmica à Economia da Sustentabilidade. In: FERREIRA, L.C., VIOLA, E. (orgs.) **Incertezas de Sustentabilidade na Globalização**. Campinas: Editora da Unicamp, 1996. Cap. XII, p.319-331.
- CAVALIERO, C.K.N, SILVA, E.P. Geração de Energia Elétrica a partir de Fontes Renováveis Alternativas: Algumas Experiências na Região Amazônica. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro. Maio, 2002.
- CERTO, S.C.; PETER, J.P. **Administração Estratégica: Planejamento e Implantação da Estratégia**. São Paulo: Makron Books. 1993.
- CRAIG, K.R., MANN, M.K. Cost and Performance Analysis of Three Integrated Biomass Gasification Combined Cycle Power Systems **U.S.Department of Energy**, August, 1996. Disponível na Internet. <http://www.eren.doe.gov/biopower/technical.html> em 02/jun./1998.
- ÉBOLI, C. **Investidor avalia custo da violência**. In: *Gazeta Mercantil*, p.A-9. 10/4/2002.
- ERGÜDENLER, A. et al. Mathematical modeling of a fluidized bed straw gasifier: part 1-model development. **Energy Sources**, n.19, p.1065-1084, 1997a.
- ERGÜDENLER, A. et al. Mathematical modeling of a fluidized bed straw gasifier: part 2-model sensitivity. **Energy Sources**, n.19, p.1085-1098, 1997b.
- ERGÜDENLER, A. et al. Mathematical modeling of a fluidized bed straw gasifier: part 3-model verification. **Energy Sources**, n.19, p.1099-1121, 1997c.

- ESPERANZA, E., ALEMAN, Y., ARAUZO, J., GEA, G. Fluidized Bed Gasification of Sugar Cane Bagasse. Influence on Gas Composition. **Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Olle Lindström Symposium on Renewable Energy - Bionergy**. Stockholm: Royal Institute of Technology. p.128-133, Jun.1999.
- ESPÍRITO SANTO, D.B. **Metodologias de Avaliação de Sistemas Térmicos de Geração de Eletricidade**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 2001.
- FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G. Economic Viability of a Biomass Gasification Power Plant for Rural Electrification. In: **CleanAir V - fifth international conference on technologies and combustion for a clean environment**, Lisboa, Portugal. July, 1999.
- FERNANDES, M.C. **Análise Tecno-econômica da Gaseificação da Biomassa para Eletrificação Rural**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 2000.
- FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G. Planejamento Estratégico para Implementação da Gaseificação de Biomassa no Meio Rural. In: **AGRENER 2002 - 4º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas. Outubro, 2002.
- FERREIRA, L.C., VIOLA, E. (orgs.) **Incertezas de Sustentabilidade na Globalização**. Campinas: Editora da Unicamp, 1996. 331p.
- FISCHER, R. Acting locally – a rural community goes for green power. **Renewable Energy World**, v.6, n.2, p.104-107, Mar.-Apr.2003
- FOSSUM, M., SVENDSGAARD, O.B., BARRIO, M., HUSTAD, J.E. Emissions and Operational Experiences from a Gas Engine fired with Low Calorific Value Gas and Methane. In: **CleanAir VI - sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment**. O Porto, Portugal. July, 2001.
- FRANGOPOULOS, C.A., CARALIS, Y.C. A method for taking into account environmental impacts in the economic evaluation of energy systems. **Energy Conversion and Management**, v.38,n. 15-17, p.1751-1753, 1997.

- GALLO, W.L.R. et WALTER, A.C.S. **Máquinas Térmicas**, Apostila do Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1986.
- GUPTA, C.K., SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid Bed Technology in Materials Processing**. Boca Raton: CRC Press, 1999. 431p.
- GZM – GAZETA MERCANTIL; **Indicadores Nacionais**; p.A-4 e **Indicadores**; p. B-8 e B-9; São Paulo; 02/02/2004.
- HALL, D.O., ROSILLO-CALLE, F., WILLIAMS, R.H., WOODS, J. Biomass for Energy: supply prospects. In: JOHANSSON, T.B. et al. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1993. Cap.14, p. 593-651
- HBS – HAVARD BUSINESS SCHOOL; **Havard Business Review**. Havard: Havard Business School Publishing Corp. 2004.
- HEMPEL, L.C. Conceptual and Analytical Challenges in Building Sustainable Communities. In: MAZMANIAN, D.A., KRAFT, M.E. **Toward Sustainable Communities – Transition and Transformation in Environmental Policy**. Cambridge: The MIT Press, 1999. Cap.2, p. 43-74.
- HESS, P., ROSS, C. **Economic Development - theories, evidence, and policies**. Fort Worth: The Dryden Press, 1997. 659p.
- HORLOCK, J.H. Combined power plants - past, present, and future. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME**, v.117, n.4, p.608-616, Oct.1995
- HUGUES, J. Wood-fuelled cogeneration – technologies and trends worldwide. **Cogeneration and On-Site Power Production**, v.4, n.4, p.61-70, Jul.-Aug.2003
- HURLEY, J. Energy for Rural Development. In: Auer, P. (ed.) **Energy and the Developing Nations - Proceedings of an Electric Power Research Institute Workshop**, at Hoover Institution, Stanford University. New York: Pergamon Press, March 18-20, 1980. Cap. 13, p. 173-178.

- JANSEN, J.P., KOPPEJAN, J., MEULMAN, P.D.M. Perspectives for Reduction of NO<sub>x</sub> and Dust Emissions in Small-scale Energy Production from Clean Wood. In: **12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection**, Amsterdam, The Netherlands. 17-21 June, 2002.
- JANNUZZI, G.M. **Políticas Públicas para Eficiência Energética e Energia Renovável no Novo Contexto de Mercado**. Campinas: Editora Autores Associados, 2000.
- JOHANSSON, T.B., KELLY, H., REDDY, A.K.N., WILLIAMS, R.H. (ed.) **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1993.
- JURAS, I.A.G. **Créditos de Carbono (financiamento)**. Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados. Janeiro, 2001.
- KAPLAN, S. **Energy Economics - quantitative methods for energy and environmental decisions**. New York: McGraw-Hill, 1983. 352p.
- KEHLHOFER, R. **Combined-cycle Gas & Steam Turbine Power Plants**. Lilburn, EUA: The Fairmont Press, 1991. 388p.
- KINOSHITA, C.M. et al. Power generation potential of biomass gasification systems. **Journal of Energy Engineering**, v. 123, n. 3, p. 88-99, Dec. 1997
- KOSOW, I.L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 3<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Ed. Globo, 1979, 632p.
- LEVIN, L.I. et al. Large coal-fired district power station using combined-cycle technology. **Thermal Engineering** (English translation of Teploenergetika) v. 42, n. 11, p. 906-918, Nov. 1995.
- MANN, M.K., SPATH, P.L., CRAIG, K.R. Economic and life cycle assessment of an integrated biomass gasification combined cycle system. In: 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 96, 1996, Washington,DC.: **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1996. v. 3, p. 2134-2139.
- MARSH, G. Rural Electrification – Learning the Lessons. **REFOCUS – The International Renewable Energy Magazine**, p.36-39, Mar.-Apr.2003

- MAZMANIAN, D.A., KRAFT, M.E. **Toward Sustainable Communities – Transition and Transformation in Environmental Policy.** Cambridge: The MIT Press, 1999. 323p.
- MELO JR., A.C., SOUZA, F.C.R., SOUZA, R.C.R. Avaliação Técnico-Econômica do Suprimento de Eletricidade com Gasogênio na Comunidade Apóstolo Paulo/Manacapuru – AM. In: **IX CBE – IX Congresso Brasileiro de Energia.** Rio de Janeiro. 2002.
- MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 4<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002. 681p.
- MUKUNDA, H.S., DASAPPA, S., SHRINIVASA, U. Open-top Wood Gasifiers. In: JOHANSSON, T.B., et al. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity.** London: Earthscan, 1993. Cap.16, p.699-727.
- NAS – NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES: PANEL ON RENEWABLE ENERGY RESOURCES, HUGHES, W.L., ENGEL, J. *et al.* **Energy for Rural Development- Renewable Resources and Alternative Technologies for Developing Countries.** Washington, D.C.: National Academy of Science, 1977. 318p.
- NEIVA, A.C.B. **Estudo de alimentadores de Bagaço de Cana para Reatores Atmosféricos,** Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1998.
- NYGARD, N. Le gazogène pour les véhicules. In: BARTHELEMY, G. **Le retour des gazogenes.** Paris: Editions Alternatives, 1981. P.65-70.
- PULKRABEK, W.W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine.** Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 411p. 1997.
- DOS REIS, L.B., SILVEIRA, S. (orgs.) **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável.** 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: EdUsp. 284p. 2001.
- SÁNCHEZ, C.G. **Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado,** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1994.
- SCHARF, R. Brasil terá linha de crédito para tecnologias limpas. In: **Gazeta Mercantil,** 02/01/2001, p. A-7.
- SHEPHERD, A. **Sustainable Rural Development.** London: Macmillan Press, 1998. 294p.

- STEINWALL, P.H. Integration of biomass gasification and evaporative gas turbine cycles. **Energy Conversion and Management**, v.38, n.15-17, p.1665-1670, Oct-Nov 1997
- TILLMAN, D.A. **The Combustion of Solid Fuels and Wastes**. San Diego: Academic Press, Inc., 1991. 378p.
- UDAETA, M.E.M., CARVALHO, C.E., GALVÃO, L.C.R. Usos Finais da Energia Elétrica. In: DOS REIS, L.B., SILVEIRA, S. (orgs.) **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável**. 2ª. ed. São Paulo: EdUsp. 2001. Cap.4, p.161-195.
- VALENTE, L.C.G., ALMEIDA, S.C.A. Economic Analysis of a Diesel/Photovoltaic Hybrid System for Decentralized Power Generation in Northern Brazil. **Energy**, v. 23, n. 4, p. 317-323. 1998.
- WALTER, A., SOUZA, M.R., FAAJI, A. "Co-firing" (Biomassa + Gás Natural) como Alternativa para Estimular a Produção de Eletricidade a Partir de Resíduos de Cana de Açúcar. In: **IX CBE – IX Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro. 2002.
- WILLIAMS, R.H., LARSON, E.D. Advanced Gasification-based Biomass Power Generation. In: JOHANSSON, T.B., et al. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1993. Cap.17, p.729-785.
- YIN, X.L., WU, C.Z., ZHENG, S.P., CHEN, Y. Design and Operation of a CFB Gasification and Power Generation System for Rice Husk. **Biomass & Bioenergy** n. 23, p. 181-187, 2002.
- YOSHIDA, R. Clean coal technologies in Japan **Energy Sources** v. 19, n. 9, p. 931-943, Nov. 1997
- ZAPOROWSKI, B., WRÓBLEWSKI, R. Analysis of Energy Conversion Processes in Combined Heat and Power Plants Integrated with Biomass Gasification. In: **CleanAir VII - seventh international conference on technologies and combustion for a clean environment**, Lisboa. July, 2003.

## ANEXO I – ARTIGOS PUBLICADOS

### I.1 PUBLICAÇÕES INTERNACIONAIS

ANGULO, M.B., SÁNCHEZ, C.G., FERNANDES, M.C. Searching Parameters to Improve Efficiency on Fluidized Bed Gasification of Rice-Husk. In: **CleanAir VII - seventh international conference on technologies and combustion for a clean environment**, .Lisboa. July, 2003.

SÁNCHEZ, C.G., FERNANDES, M.C. Research on a Biomass Gasifier for Rural Electrification at State University of Campinas. In: **12th European Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection**, .Amsterdan. June, 2002.

FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G., ANGULO, M.B. Developments on a Biomass Gasifier for Rural Electrification at State University of Campinas. In: **CleanAir VI - sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment**, .Lisboa. July, 2001.

FERNANDES, M.C., ANGULO, M.B., SÁNCHEZ, C.G. Biomass Gasification Projects for Rural Electrification. In: **EURO Conference – New and Renewable Technologies for Sustainable Deveopment**. Ilha da Madeira. June, 2000.

FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G. Economic Viability of a Biomass Gasification Power Plant for Rural Electrification. In: **CleanAir V - fifth international conference on technologies and combustion for a clean environment**, .Lisboa. July, 1999.

## **I.2 PUBLICAÇÕES NACIONAIS**

FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G. Planejamento Estratégico para Implementação da Gaseificação de Biomassa no Meio Rural. In: **AGRENER 2002 - 4º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas. Outubro, 2002.

SÁNCHEZ, C.G., FERNANDES, M.C., ALMEIDA, N., SILVA, D. Inovações didáticas no Laboratório de Sistemas Térmicos no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. In: **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. João Pessoa. Agosto, 2002.

FERNANDES, M.C., SÁNCHEZ, C.G., ANGULO, M.B., PARODI, F.A. A gaseificação da biomassa como projeto para o desenvolvimento rural. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro. Maio, 2002.

## **ANEXO II – DADOS PRIMÁRIOS**

Tabela II.1 – Análise do gás da casca-de-arroz.

Tabela II.2 – Parâmetros da gaseificação da casca-de-arroz.

Tabela II.3 – Resultados da gaseificação do bagaço-de-cana.

CASCA DE ARROZ			PCI_biom		15.7 MJ/kg					PCI_gás
Data	Amostra	Hora	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2		
14/7/03	1	19:38	4.1304	0.0509	65.8142	2.193	10.7584	17.053	2.587	
14/7/03	2	20:50	5.8282	0.0941	58.42	3.7675	15.8958	15.9944	3.981	
14/7/03	3	21:00	5.8342	0.5386	57.2368	3.8864	16.1918	16.3122	4.062	
14/7/03	4	21:15	6.0167	0.641	57.3885	3.9884	16.2728	15.6925	4.128	
14/7/03	5	21:27	6.1354	0.2802	57.1535	4.1422	16.8248	15.4639	4.265	
14/7/03	6	21:52	5.4569	2.1257	59.5297	3.5243	15.0886	14.2749	3.752	
14/7/03	Media	100.00	5.8543	0.7359	57.9457	3.8618	16.0548	15.5476	4.038	
	DVP								0.1906	
15/7/03	7	18:11	5.0888	0.0971	60.5756	3.4046	14.592	16.2419	3.607	
15/7/03	8	18:20	5.009	1.3479	60.9855	3.3722	14.1014	15.184	3.525	
15/7/03	9	18:26	4.8202	2.2058	61.8649	3.2052	13.3591	14.5448	3.351	
15/7/03	10	18:37	5.4225	0.167	59.7466	3.6199	14.9053	16.1387	3.760	
15/7/03	11	18:46	5.465	0.3461	59.9584	3.5987	14.8242	15.8076	3.746	
15/7/03	12	18:52	5.2861	1.5333	61.4677	3.5151	14.2924	13.9054	3.630	
15/7/03	13	18:59	5.3091	0.2486	58.5923	3.3839	14.1308	18.3354	3.565	
15/7/03	14	19:05	5.7236	0.2879	59.9446	3.7012	15.1091	15.2332	3.847	
15/7/03	Media	100.00	5.2655	0.7792	60.3920	3.4751	14.4143	15.6739	3.629	
	DVP		0.2858	0.7998	1.0526	0.1629	0.5644	1.3351	0.1562	
15/7/03	15	20:15	5.4628	2.6045	58.4037	3.8993	16.2459	13.3838	4.033	
15/7/03	16	20:21	4.9653	4.2507	60.5932	3.4969	14.4916	12.2024	3.614	
15/7/03	17	20:29	descartado							
15/7/03	18	20:54	5.2914	2.9983	59.5886	3.6567	15.0983	13.3666	3.783	
15/7/03	19	21:01	5.8386	0.2481	58.371	3.8843	16.4925	15.1656	4.099	
15/7/03	Media	100.00	5.3895	2.5254	59.2391	3.7343	15.5821	13.5296	3.882	
	DVP		0.3636	1.6726	1.0657	0.1933	0.9474	1.2228	0.2248	
1/8/03	20	18:05	5.0993	3.2896	60.4129	3.2606	14.1482	13.7894	3.594	
1/8/03	21	18:13	5.5319	0.7066	58.1504	3.9727	17.5224	14.116	4.227	
1/8/03	22	18:18	5.5368	1.0072	58.3561	3.7893	16.5694	14.7409	4.042	
1/8/03	23	18:23	5.7521	0.5476	57.6436	3.9497	17.1477	14.9593	4.196	
1/8/03	24	18:28	5.4469	1.5669	59.1098	3.7083	16.3365	13.8316	3.974	
1/8/03	Media	100.00	5.5669	0.9571	58.3150	3.8550	16.8940	14.4120	4.110	
	DVP		0.2376	1.1133	1.0761	0.2878	1.3141	0.5344	0.2920	
24/9/03	25	21:03	4.4434	0.0975	56.5966	4.2064	18.7070	15.9491	4.343	
24/9/03	26	21:07	4.4873	0.2708	56.8212	4.3675	19.2488	14.8043	4.474	
24/9/03	27	21:08	4.2454	0.3030	58.4138	4.0308	17.8563	15.1507	4.151	
24/9/03	28	21:10	4.2840	0.3168	57.6538	4.2036	18.6540	14.8879	4.318	
24/9/03	29	21:11	4.4110	0.4327	57.1554	4.2983	18.6125	15.0899	4.360	
24/9/03	Media	100.00	4.9188	0.3119	59.2136	4.3165	18.9827	12.2565	4.468	
	DVP		0.1163	0.1181	0.6957	0.1253	0.4853	0.4071	0.1156	
30/9/03	30	18:29	4.8946	1.929	59.5612	3.5991	15.714	14.3021	3.797	
30/9/03	31	18:38	5.4875	0.1206	57.5716	3.8166	16.3517	16.652	4.019	
30/9/03	32	18:39	5.4945	0.1873	57.4451	3.8432	16.7378	16.2921	4.078	
30/9/03	33	18:42	5.1835	0.3848	58.74	3.5836	15.6963	16.4119	3.820	
30/9/03	34	18:46	4.7817	1.9645	57.9137	3.4376	14.7446	17.158	3.605	
30/9/03	Media	100.00	5.1684	0.9172	58.2463	3.6560	15.8489	16.1632	3.864	
	DVP		0.3290	0.9449	0.8917	0.1710	0.7589	1.0921	0.1894	
30/9/03	35	20:18	4.5717	0.4399	57.4587	4.1418	18.2313	15.1566	4.274	
30/9/03	36	20:27	4.5132	0.2858	56.5355	4.0555	18.1298	16.4802	4.224	
30/9/03	37	20:35	4.6593	0.3518	56.4648	4.2115	18.6967	15.616	4.367	
30/9/03	38	20:42	4.3036	1.6632	58.1064	3.8293	16.969	15.1285	3.974	
30/9/03	39	20:46	4.5387	0.2488	56.4317	3.9729	17.8472	16.9607	4.161	
30/9/03	Media	100.00	4.5173	0.5979	56.9994	4.0422	17.9748	15.8684	4.200	
	DVP		0.1316	0.5999	0.7516	0.1491	0.6401	0.8193	0.1470	
1/10/03	40	16:42	5.7811	0.6033	60.0678	3.6598	15.4353	16.3020	3.879	
1/10/03	41	16:46	5.7961	0.7239	60.2636	3.6677	15.4139	16.2959	3.881	
1/10/03	42	16:52	5.6533	1.5035	61.2901	3.6452	15.3360	15.1793	3.848	
1/10/03	43	16:57	5.6995	1.2558	61.1149	3.6615	15.2593	3.4413	3.849	
1/10/03	Media		5.7325	1.0216	60.6841	3.6585	15.3611	12.8046	3.864	
	DVP		0.0678	0.4284	0.6081	0.0085	0.0802	6.2645	0.0184	
30/1/04	44	14:42	4.5369	0.2223	54.8421	4.5271	20.9677	14.9039	4.753	
30/1/04	45	18:15	4.112276	0.184759	55.50661	4.397364	21.1465	14.65249	4.683	
30/1/04	46	18:26	3.65448	1.212079	57.10465	4.088632	20.03701	13.90315	4.383	
30/1/04	Media		4.1012	0.5397	55.8178	4.3377	20.7171	14.4865	4.606	
	DVP		0.4413	0.5826	1.1629	0.2253	0.5957	0.5206	0.1963	

Tabela II.1 – Análise do gás da casca-de-arroz.

Amostra	T_leito	FA	Uf	Tresid(s)	Mc [kg/h]	Qdisponível [kW]	Hleito [m]
1	763	0.40	0.77	antes-de-ec 0.779224			0.6
2	793	0.34	0.69	0.867052	73	318.36	0.6
3	798	0.34	0.68	0.881057	73	318.36	0.6
4	800	0.34	0.70	0.860832	73	318.36	0.6
5	803	0.34	0.70	0.858615	73	318.36	0.6
6	802	0.34	0.70	início-da-fim 0.859599	73	318.36	0.6
Média	799	0.34	0.69	0.865351	73	318.36	0.6
DVP	15.1976						
7	836	0.40	0.72	0.828729	63	274.75	0.6
8	847	0.40	0.73	0.820793	63	274.75	0.6
9	855	0.40	0.74	0.814111	63	274.75	0.6
10	862	0.40	0.74	0.809717	63	274.75	0.6
11	867	0.40	0.75	0.805369	63	274.75	0.6
12	870	0.40	0.75	0.803213	63	274.75	0.6
13	870	0.40	0.75	0.803213	63	274.75	0.6
14	873	0.40	0.75	0.8	63	274.75	0.6
Média	860	0.40	0.74	0.811	63	274.75	0.6
DVP	13.0494			0.0100			
15	777	0.30	0.68	0.882353	83	361.97	0.6
16	784	0.30	0.68	0.876168	83	361.97	0.6
17		0.30		pode ter tido problema de vazamento ao alimentar no cron			0.6
18	798	0.30	0.69	0.864803	83	361.97	0.6
19	806	0.30	0.70	0.858369	83	361.97	0.6
Média	791	0.30	0.69	0.870	83	361.97	0.6
DVP	13.1498	0.0000	0.0086	0.0108			
20	760	0.34	0.82	ruim 0.735294	94	396.86	0.6
21	768	0.34	0.82	0.729927	91	396.86	0.6
22	775	0.34	0.83	0.725514	91	396.86	0.6
23	775	0.34	0.83	0.725514	91	396.86	0.6
24	786	0.34	0.84	0.717703	91	396.86	0.6
Média	776	0.34	0.83	0.7247	91	396.86	0.6
DVP	9.6281	0.0000	0.0074	0.0065			0
25	721	0.35	0.91	0.875753	107.6	469.26	0.8
26	723	0.35	0.92	0.874317	107.6	469.26	0.8
27	726	0.35	0.92	0.87146	107.6	469.26	0.8
28	728	0.35	0.92	0.870511	107.6	469.26	0.8
29	728	0.35	0.92	0.870511	107.6	469.26	0.8
Média	725	0.35	0.92	0.8728	107.6	469.26	0.8
DVP	2.9269	0.0000	0.0024	0.0023			
30	799	0.33	0.68	0.89	76.7	334.50	0.6
31	795	0.33	0.68	0.89	76.7	334.50	0.6
32	795	0.33	0.68	0.89	76.7	334.50	0.6
33	794	0.33	0.68	0.89	76.7	334.50	0.6
34	794	0.33	0.68	0.89	76.7	334.50	0.6
Média	795	0.33	0.6754	0.8884	76.7	334.50	0.6
DVP	2.0736	0.0000	0.0009	0.0012			
35	730	0.28	0.634	0.95	90	392.50	0.6
36	730	0.28	0.634	0.95	90	392.50	0.6
37	730	0.28	0.634	0.95	90	392.50	0.6
38	730	0.28	0.634	0.95	90	392.50	0.6
39	726	0.28	0.631	0.95	90	392.50	0.6
Média	729	0.28	0.6334	0.9473	90	392.50	0.6
DVP	1.7889	0.0000	0.0013	0.0020			
40	855	0.37	0.71	0.84	67.5	294.38	0.6
41	855	0.37	0.71	0.84	67.5	294.38	0.6
42	855	0.37	0.71	0.84	67.5	294.38	0.6
43	856	0.37	0.71	0.84	67.5	294.38	0.6
Média	855	0.37	0.71	0.84	67.5	294.38	0.6
DVP	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000			
44	700	0.34		0.72	91	396.86	0.6
45	690	0.34		0.72	91	396.86	0.6
46	685	0.34		0.72	91	396.86	0.6
Média	692	0.3400	0.8300	0.72	91	396.86	0.6
DVP	7.6376	0.0000		0.0000			

Tabela II.2 – Parâmetros da gaseificação da casca-de-arroz.

BAGAÇO-DE-CANA		Data: 3/10/03								
Amostra	Hora	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	PCI_gás	FA	
1	11:20	5.7371	0.1219	54.1432	5.0834	18.5636	16.3508	4.778	0.37	
2	11:30	5.4447	0.2788	55.3099	4.926	18.0783	15.9621	4.629	0.37	
3	11:35	5.0189	0.4411	57.223	4.5175	16.7038	16.0958	4.264	0.37	
<b>Media</b>		<b>5.4002</b>	<b>0.2806</b>	<b>55.5587</b>	<b>4.8423</b>	<b>17.7819</b>	<b>16.1362</b>	<b>4.557</b>	<b>0.37</b>	
<b>DVP</b>		<b>0.3612</b>	<b>0.1596</b>	<b>1.5549</b>	<b>0.2921</b>	<b>0.9647</b>	<b>0.1975</b>	<b>0.2647</b>		
4	15:56	2.8694	0.1877	58.7244	2.5938	10.3821	15.4670	2.547	0.33	
5	16:01	3.65	0.10	55.79	3.17	11.69	15.96	3.001	0.33	
6	16:06	4.12	0.22	55.37	3.42	12.82	15.26	3.285	0.33	
7	16:11	3.95	0.26	57.16	3.34	12.79	15.84	3.233	0.33	
8	16:16	3.90	0.12	55.33	3.21	11.92	15.98	3.072	0.33	
<b>Media</b>		<b>3.6989</b>	<b>0.1775</b>	<b>56.4753</b>	<b>3.1452</b>	<b>11.9214</b>	<b>15.7010</b>	<b>3.028</b>	<b>0.33</b>	
<b>DVP</b>		<b>0.4942</b>	<b>0.0664</b>	<b>1.4607</b>	<b>0.3244</b>	<b>0.9987</b>	<b>0.3229</b>	<b>0.2927</b>		
9	16:37	4.57	0.68	54.20	3.58	13.00	15.36	3.413	0.27	
10	16:04	5.91	0.32	48.57	4.73	16.24	15.23	4.380	0.27	
11	16:43	4.51	0.42	55.12	3.58	12.91	15.47	3.395	0.27	
12	16:47	2.45	0.38	64.09	1.84	7.15	16.64	1.824	0.27	
<b>Media</b>		<b>3.5874</b>	<b>0.3714</b>	<b>44.6903</b>	<b>2.8114</b>	<b>10.0592</b>	<b>12.6050</b>	<b>2.661</b>	<b>0.27</b>	
<b>DVP</b>		<b>1.4271</b>	<b>0.1579</b>	<b>6.4197</b>	<b>1.1938</b>	<b>3.7830</b>	<b>0.6534</b>	<b>1.0578</b>		

Tabela II.3 – Resultados da gaseificação do bagaço-de-cana.