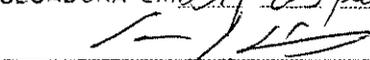


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Marcelo Côrtes Fernandes
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 21/03/2000

ORIENTADOR

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

Avaliação Tecno-econômica da Gaseificação do Capim-elefante para Eletrificação Rural

Autor: Marcelo Côrtes Fernandes

Orientador: Caio Glauco Sánchez

37/00

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

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

Avaliação Tecno-econômica da Gaseificação do Capim-elefante para Eletrificação Rural

Autor: Marcelo Côrtes Fernandes

Orientador: Caio Glauco Sánchez

Curso: Engenharia Mecânica

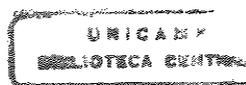
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000

S.P. - Brasil

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**



564270095

UNIDADE B.C.
N.º CHAMADA:
T/UNICAMP
F391a
V. Ex.
TOMBO BC/ 49264
PROC. 16-27810e
C D
PREC. R\$11,00
DATA 22/09/00
N.º CPD

CM-00145888-2

018 10 276974

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

F391a

Fernandes, Marcelo Côrtes

Avaliação tecno-econômica da gaseificação do capim-
elefante para eletrificação rural / Marcelo Côrtes
Fernandes.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Caio Glauco Sánchez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

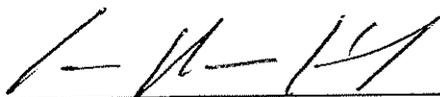
1. Biomassa - Gaseificação. 2. Capim-elefante.
3. Eletrificação rural. 4. Viabilidade econômica. I.
Sánchez, Caio Glauco. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

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

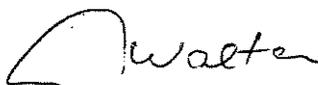
Avaliação Tecno-econômica da Gaseificação do Capim-elefante para Eletrificação Rural

Autor: Marcelo Côrtes Fernandes

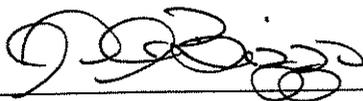
Orientador: Caio Glauco Sánchez



Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez, Presidente



Prof. Dr. Arnaldo C. S. Walter



Prof. Dr. Waldir A. Bizzo

Campinas, 21 de março de 2000.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus falecidos avôs, Milton e Hidelbrando, que despertaram meu interesse pela engenharia. O carinho que eles me deram permanece a me guiar.



Agradecimentos

Um trabalho deste porte é mais do que resultado de uma pesquisa solitária. É resultado de anos de pesquisa e trabalho de várias pessoas, algumas sempre presentes, outras nem tanto. A elas, o meu carinho, respeito e agradecimento:

Aos técnicos do Laboratório de Combustíveis e Combustão, sem os quais o gaseificador nunca seria montado: Luiz Zanaga, Gustavo Couto de Moraes, Luís Gamma, Jefferson de Souza, Luciano Ferreira e Daniel Celente. Mais do que uma ajuda essencial, eles foram grandes companheiros de labuta.

Aos engenheiros e pesquisadores Eduardo Goulart, Jhon Jairo Ramírez Behainne e Antônio Carlos Neiva pela amizade e por mostrarem o "caminho das pedras". Ao breve-engenheiro Guilherme Santos, pela imprescindível colaboração nos experimentos.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas pela idéia do Projeto Integrado de Biomassa, ao Instituto de Zootecnia pelo capim-elefante, à FINEP pelo financiamento do projeto, à CAPES, pela bolsa de mestrado e às minhas avós, Lourdes e Mabel, pelas carinhosas "ajudas". Aos meus pais, pela compreensão do meu crescimento.

Um agradecimento mais que especial vai para o Caio Glauco Sánchez e o Mario Barriga Angulo. Palavras não descrevem a amizade e o carinho que sinto por eles.

Por fim, um agradecimento a todos meus amores e amigo(a)s, quem, entre muitos, fizeram meu cotidiano mais feliz: Veronika, Charly Stallybrass, Fernando Parodi, Cristiano Lenzi, Adalberto Castelo Neto, Patricia Leika, Kilder Barbosa, Martha, Ricardo Sardilli, Ricardo Santos, Ednei Martins, Heitor Gottberg, Diego Grosz, Pablo Hector Riofano, Waldir Bizzo, Gunther, Eder, Gian, Vitor, Janáina, Maria Cláudia e Perla Neuss. À Cibele, um beijo muito especial.

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

A todos meus colegas de bar e de estrada.

A todos os meus adversário(a)s, meu respeito e agradecimento pela oportunidade de crescimento.

*The mark of your ignorance
is the depth
of your belief in
injustice and tragedy.*

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

R. Bach

Resumo

Fernandes, Marcelo Côrtes; AVALIAÇÃO TECNO-ECONÔMICA DA GASEIFICAÇÃO DO CAPIM-ELEFANTE PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL. Campinas: FEM, UNICAMP, 2000. Dissertação (Mestrado).

Objetivando a geração descentralizada de energia elétrica para o meio rural por meio de fontes energéticas renováveis, estudou-se a tecnologia da gaseificação de biomassa. A gaseificação é uma forma de aumentar a eficiência do uso energético da biomassa. Construiu-se um gaseificador de leito fluidizado de 400 mm de diâmetro interno e altura total de 4.600 mm.. O equipamento foi testado para gaseificação do capim-elefante (*pennisetum purpureum*) a uma taxa de 100 kg/h. Esta biomassa é utilizada no meio rural para alimentação de gado. Este estudo é parte de um projeto do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), que vislumbrou a possibilidade de uso energético do capim-elefante. Com os resultados de composição e do poder calorífico do gás obtido, pôde-se calcular a eficiência do processo e dimensionar um grupo-gerador para eletrificação rural. Com os custos de construção do equipamento e seus resultados operacionais, pôde-se analisar a viabilidade econômica da planta-piloto para geração de energia por gaseificação de biomassa em comunidades rurais. Foi estimado o custo anual do investimento. O custo da eletricidade produzida foi calculada em função do custo de capital e em função do preço do diesel. O presente estudo encontrou valores para o custo da eletricidade produzida entre 0,165 e 0,225 R\$/kWh, o que indica a viabilidade do projeto como alternativa para eletrificação rural.

Palavras-chave

biomassa -- gaseificação; capim-elefante; eletrificação rural; viabilidade econômica



Abstract

Fernandes, Marcelo Côrtes; AVALIAÇÃO TECNO-ECONÔMICA DA GASEIFICAÇÃO DO CAPIM-ELEFANTE PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL (THECNO-ECONOMIC ANALYSIS ON ELEPHANT-GRASS GASIFICATION FOR RURAL ELECTRIFICATION). Campinas: FEM, UNICAMP, 2000. Dissertação (Mestrado).

Biomass gasification was studied as a renewable decentralized electricity generation for rural areas. Gasification is a means to increase the efficiency of the energetic use of biomass. A gasifier was built with internal diameter of 400mm and total high of 4600mm . The equipment was tested for gasification of elephant-grass (*Pennisetum purpureum*) at a 100 kg/h rate. In the countryside, this biomass is commonly used for cattle feeding. This study is part of a greater project from IPT (Institute of Technological Researches), which foresaw an energetic use for this grass. With the results from the analysis of the produced gas' contents and its heating value could be calculated the process' efficiency and evaluate an adequate electric-generator to rural electrification. With the construction costs of the equipment and its operational results, could be performed an economic analysis on this biomass-gasification power plant for rural communities. The annual cost of the investment was estimated. The electricity cost was calculated as a function of the capital cost and the cost of diesel. The present study shows that electricity could be produced at a cost between 0,165 and 0,225 R\$/kWh, what turns this project feasible as a means of rural electrification.

Key-words

biomass gasification; elephant-grass; rural electrification; economic feasibility

ÍNDICE

| | |
|--|------------|
| Lista de Figuras..... | ii |
| Lista de Tabelas..... | iii |
| Nomenclatura..... | iv |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Objetivos..... | 9 |
| 3. Revisão de Literatura..... | 10 |
| 4. Equipamento e Metodologia..... | 26 |
| 5. Resultados Experimentais..... | 46 |
| 6. Análise Econômica..... | 51 |
| 7. Conclusões..... | 72 |
| Referências Bibliográficas..... | 74 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| 3.1 - Ilustração da planta de gaseificação do projeto WBT/SIGAME..... | 23 |
| 4.1 - Parte inferior do gaseificador, desmontado..... | 27 |
| 4.2 - Gaseificador, montado..... | 28 |
| 4.3 - Croquí do gaseificador..... | 32 |
| 4.4 - Detalhe do queimador do pré-aquecedor..... | 34 |
| 5.1 - Resultado da análise granulométrica para o capim-elefante..... | 48 |
| 5.2 - Perfil de temperaturas..... | 49 |
| 6.1 - Composição de custos para planta científica..... | 60 |
| 6.2 - Custo da eletricidade em função do custo do diesel [...]...... | 60 |
| 6.3 - Variação do custo da eletricidade em relação ao custo do equipamento..... | 61 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| 3.1 Participação no consumo energético..... | 10 |
| 4.1 - Otimização teórica do gaseificador..... | 33 |
| 4.2 - Planejamento experimental..... | 38 |
| 5.1 - Análise imediata..... | 46 |
| 5.2 - Análise elementar | 47 |
| 5.3 - Poder calorífico..... | 47 |
| 5.4 - Resultados da granulometria do capim-elefante..... | 48 |
| 5.5 - Resultados do teste 2..... | 50 |
| 5.6 - Condições de operação do teste 2..... | 50 |
| 6.1 - Custos de investimento..... | 56 |
| 6.2 - Custos de mão-de-obra para planta rural..... | 58 |
| 6.3 - Custos anuais de produção para planta científica..... | 59 |
| 6.4 - Custos anuais de produção para planta rural..... | 59 |
| 6.5 - Comparação dos resultados econômicos | 61 |
| 6.6 - Evolução da TJLP..... | 65 |

Nomenclatura

- Q_d : energia disponível, MJ/kgcomb;
- Q_{util} : energia útil, MJ/kgcomb;
- Q_g : perda de energia pela entalpia do gás, MJ/kgcomb;
- Q_{cin} : perda de energia com o arraste das cinzas, MJ/kgcomb;
- Q_{amb} : perda de calor para o meio-ambiente, MJ/kgcomb;
- Q_{ar} : energia do ar do compressor, MJ/kgcomb;
- PCI : poder calorífico inferior do combustível, MJ/kgcomb;
- h_{ar} : entalpia do ar na saída do compressor, MJ/kgcomb;
- h_{a1} : entalpia do ar na entrada do compressor, MJ/kgcomb;
- VA : volume de ar estequiométrico, Nm³/s;
- FA : $(V_{ar}/m_c)/VA$, fator de ar;
- C_{pa2} : calor específico do ar na temperatura t_{a2} , MJ/Nm³ °C;
- C_{pa1} : calor específico do ar na temperatura t_{a1} , MJ/Nm³ °C;
- t_{a2} : temperatura do ar na saída do compressor, °C;
- t_{a1} : temperatura do ar na entrada do compressor, °C;
- V_{ar} : vazão de ar, Nm³/s;
- $V_{gás}$: vazão do gás na saída do reator, Nm³/s;
- m_c : vazão de combustível, kg/s;
- PCI_{gás} : poder calorífico inferior do gás combustível, MJ/ Nm³;
- C_{CO} : concentração de CO nos gases, %;
- C_{CH4} : concentração de CH₄ nos gases, %;
- C_{H2} : concentração de H₂ nos gases, %;
- $h_{gás}$: entalpia do gás a t_s , MJ/kgcomb;
- h_{CO} : entalpia do gás CO a t_s , MJ/kgcomb;
- h_{CO2} : entalpia do gás CO₂ a t_s , MJ/kgcomb;
- c_{cin} : calor específico das cinzas, nos gases, MJ/Nm³ °C;
- C_{carb} : concentração de carbono nas cinzas, nos gases, %;
- t_{cin} : temperatura das cinzas, no ciclone, °C;
- PCI_{carb} : poder calorífico inferior do carbono fixo = 32,804 MJ/kg;
- t_s : temperatura do gás antes do ciclone, °C;

t_e : temperatura de entrada do combustível no reator, °C;
 α_i : coeficiente de transferência de calor;
 F_i : área na secção do reator, numa secção i ;
 t_{si} : temperatura externa do reator, numa secção i , °C;
 m_{cin} : vazão de cinzas, kg/s.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade vive um momento crítico em sua história. Para alcançar seu atual padrão de desenvolvimento, nossa civilização exigiu um alto consumo dos recursos energéticos do planeta. A produção de bens e conforto para o ser humano polui intensamente a Terra, prejudicando a qualidade de vida das espécies existentes. Surge então a necessidade de se remodelar o paradigma tecnológico e social da nossa civilização. Firma-se com a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, o conceito de Desenvolvimento Sustentável. As propostas de desenvolvimento sustentável trazem alternativas para o desenvolvimento socio-econômico das populações humanas presentes e futuras, sem que haja um esgotamento de recursos naturais ou queda nos padrões de qualidade de vida devido à degradação ambiental.

Hoje, entre os vários temas da questão, busca-se implementar tecnologias de geração de energia, que sejam baseadas em um padrão de desenvolvimento sustentável. Estas tecnologias são parte de uma busca por alternativas energéticas para o petróleo. Como nem o petróleo nem o carvão mineral são renováveis, buscam-se alternativas para suprir a demanda energética futura de nossa sociedade.

A busca não se focaliza em um único substituto para o petróleo, mas sim na possibilidade de coexistirem várias fontes alternativas, propondo até a mudança do atual paradigma tecnológico e energético. Isto significa que começam a se mostrar economicamente viáveis propostas como: cogeração energética, geração descentralizada de eletricidade, pequenas centrais geradoras, combustíveis renováveis e até mesmo fontes de fornecimento irregular como a energia eólica e a conversão de energia solar por células fotovoltaicas.

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.

A redução da produção de gás carbônico na geração energética é fundamental para controlar a poluição atmosférica e o aquecimento global. Por isto pode se dizer que a própria tecnologia da gaseificação da biomassa é uma forma de controle, ou melhor, de prevenção da poluição.

Atualmente estão em andamento vários projetos visando o desenvolvimento de sistemas de cogeração com gaseificação e turbinas a gás, utilizando a biomassa como combustível. A gaseificação é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido (o carvão, por exemplo), em um gás combustível, por meio da queima parcial da biomassa.

A gaseificação do carvão é uma tecnologia já desenvolvida comercialmente, principalmente em países europeus com boa oferta de carvão e escassez de petróleo. É ainda incipiente o desenvolvimento da gaseificação da biomassa como fonte de geração de eletricidade. Muito da pesquisa em gaseificação da biomassa é feito utilizando-se resultados obtidos da gaseificação do carvão e, a partir disto, fazendo-se as necessárias conversões tecnológicas.

O desenvolvimento da tecnologia da gaseificação teve dois momentos principais: na primeira metade do século, principalmente durante as guerras mundiais, e mais recentemente motivado pela crise do petróleo durante as décadas de 1970 e 1980.

A disseminação da utilização da biomassa como fonte de eletricidade traria várias vantagens. Ela poderia permitir o desenvolvimento rural e o aumento do emprego de mão-de-obra em países sub-desenvolvidos. A geração de energia pela biomassa poderia sustentar o desenvolvimento rural e o aumento de empregos nos países em desenvolvimento, atuando para minimizar ou inverter o êxodo rural. Os locais mais promissores para plantações dedicadas seriam áreas desflorestadas ou degradadas dos países em desenvolvimento ou ainda áreas excedentes de cultivo nos países industrializados.

Muitos dos artigos publicados pesquisam plantas de ciclo combinado para geração de eletricidade pela gaseificação da biomassa. É defendida a viabilidade econômica de tais plantas, mostrando que os custos de produção tenderão a cair ainda mais com o desenvolvimento da tecnologia. Poucos autores defendem ou propõem outros ciclos ou geração descentralizada de eletricidade em pequenas plantas de gaseificação. Ocorre que há

um investimento e interesse reais por parte de grandes empresas do ramo da energia e de governos de países desenvolvidos na pesquisa de grandes centrais de geração por ciclo combinado. As pesquisas em pequenas plantas ocorre em países ditos “periféricos” ou “em desenvolvimento”, financiados muitas vezes por ONG’s ou organismos internos da ONU. Há porém pesquisas em pequenas plantas realizadas em alguns países desenvolvidos como os países escandinavos. Isto pode ser explicado pelo padrão de desenvolvimento sustentável e grau de democratização das decisões políticas por eles alcançados.

A QUESTÃO RURAL

O desenvolvimento rural é parte integrante do desenvolvimento da economia e sociedade de um país e não deve ser posto em segundo plano por não parecer, à primeira vista, um agente modernizador do país. De fato, não se pode relegar o problema agrícola ao preconceito de considerá-lo um problema periférico, de comunidades intelectual e economicamente inferiores, ou mesmo classificá-lo simplesmente como uma questão de país subdesenvolvido.

Na verdade, a consciência do real estágio de desenvolvimento rural de um país, principalmente de uma nação de dimensões continentais e clima favorável como o Brasil, é estratégica para a retomada de um desenvolvimento econômico, de forma sustentável, sustentado por políticas maduras de desenvolvimento social e econômico. Um aumento de produtividade rural gera um excedente que permite o desenvolvimento de outros setores da economia (indústria e serviços) e possibilita, quando voltado para exportações, um aumento das divisas internacionais do país.

Observa-se porém, que as políticas rurais que realmente conseguem se efetivar nos países em desenvolvimento são aquelas a privilegiar as elites dominantes, que conseguem desta forma manter seus privilégios a custa da melhoria de condições de vida e educação da população local, prejudicando o desenvolvimento social do país a médio e longo prazo. A manutenção por longo tempo de grandes distorções sociais gera tensões internas na

sociedade, potencializando convulsões sociais. Estas convulsões poderiam ser evitadas se as elites rurais dominantes permitissem maior desenvolvimento social no meio rural. A grande dificuldade porém, é que esta mesma elite, apesar de sua educação formal (quando ocorre), é tão leiga quanto a média da população do país, sem conseguir discernir as dificuldades futuras de pequenas economias presentes ou mesmo tentativas de manter a “velha ordem”.

Em vários países ainda é muito grande o distanciamento do padrão de desenvolvimento e qualidade de vida entre o meio rural e o urbano. Este gradiente contribui para o fenômeno do êxodo rural e, geralmente, queda também da qualidade de vida nos grandes centros urbanos.

Entre os vários fatores da falta de recursos no campo pode-se citar a baixa qualidade ou mesmo a inexistência de rede elétrica em diversas comunidades rurais de países em desenvolvimento. A energia é um aspecto crítico do processo de desenvolvimento rural [HURLEY, 1981]. 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.

A principal fonte de energia no meio rural é a queima direta da biomassa. Esta forma de conversão energética, conhecida há milhares de anos é de baixa eficiência. Os saltos tecnológicos da humanidade estão relacionados ao padrão de eficiência energética. Hoje, a eletricidade é essencial para a manutenção do padrão de vida atual. Além disto, a eletricidade está permitindo o novo salto tecnológico, baseado na informatização dos processos produtivos e disseminação e intensificação da troca e processamento de informações a distância. A falta de eletricidade ou de meios de conversão energética mais eficientes que a queima direta da biomassa só contribui para perpetuar uma sociedade agrária nos mesmos moldes das existentes até o século dezoito na Europa.

A eletricidade no campo permite melhores condições de vida e desenvolvimento no meio rural. Podem-se citar algumas vantagens dela advindas:

- Instalação de sistemas de telecomunicações, permitindo troca de informações de maneira mais rápida e eficiente do que as comunicações baseadas simplesmente em correio tradicional.
- Fornecimento de energia para bombas hidráulicas, melhorando as condições de abastecimento d'água potável e de saneamento.
- Iluminação, permitindo melhores condições de trabalho em ambientes fechados e possibilitando atividades noturnas de trabalho e lazer para a população.
- Em regiões leiteiras, a eletrificação permite a refrigeração e armazenamento do leite retirado até que este seja recolhido pelo comprador/distribuidor. Permitiria também o manejo leiteiro em melhores condições de higiene e produtividade, utilizando-se bombas d'água para a limpeza diária dos currais e mesmo ordenhadeiras mecânicas.
- Em granjas, pode-se aquecer e iluminar o ambiente das galinhas para aumentar a postura de ovos.
- Na agricultura a eletricidade permite a mecanização do processamento da colheita (picadeiras de cana e capim, debulhadores de milho, descascadores e moinhos para cereais, entre outros).

Tendo-se a eletrificação rural como um desenvolvimento benéfico, passamos a discutir os modos como este poderia ocorrer.

Primeiro, seguindo o modelo tradicional, poder-se-ia buscar grandes centrais conversoras de eletricidade, térmicas, hidroelétricas ou nucleares para permitir alcançar economias de escala, barateando o custo e viabilizando a distribuição de eletricidade para regiões de baixa demanda, como o meio rural. Porém, principalmente depois da descentralização do setor elétrico em várias partes do mundo, tornam-se questionáveis as grandes centrais elétricas. Mais questionável ainda é o problema do direcionamento dos investimentos privados. Sendo o setor elétrico de um país em desenvolvimento privatizado,

qual o mecanismo que poderá incentivar ou direcionar o investimento na eletrificação de áreas pouco desenvolvidas, de retorno mais lento para o capital investido?

Havendo o interesse para a eletrificação rural, de que tipo seria esta? Provavelmente não se mostraria interessante grandes centrais geradoras, principalmente em um país de dimensões continentais como o Brasil. Já foi o tempo em que se mostravam economicamente viáveis projetos de larga escala. Hoje, apesar de ainda serem economicamente factíveis, estes projetos de grande potência instalada esbarram na barreira da viabilidade financeira, ou seja, dificuldade de alocação de recursos para o investimento.

Devido às altas taxas de juros, mostram-se mais viáveis pequenas centrais geradoras de energia, beneficiadas ainda mais pela desregulamentação do setor elétrico brasileiro. Tendo em vista a proposta estratégica de seguirmos um desenvolvimento sustentável, buscando hoje alternativas para a crise energética e ambiental que se deflagra, estas plantas energéticas devem se basear em fontes renováveis.

Partindo então da vontade de eletrificar o meio rural por meio de pequenas ou médias centrais baseadas em fontes renováveis, são levantados a seguir algumas barreiras para a implementação destas novas tecnologias renováveis no meio rural.

As barreiras podem ser de vários tipos: operacionais; comerciais e tecnológicas; econômicas e financeiras; institucionais e sociais [UNDP/FAO, 1988].

As barreiras econômicas mais comuns são: alto custo da energia renovável; altos investimentos iniciais e maior conveniência do uso de energias tradicionais (mais baratas e mais seguras).

Apesar de mostrar-se tecnologicamente viável, a tecnologia da gaseificação da biomassa compete com os preços do petróleo no mercado internacional. Como os preços do petróleo estavam baixos até 1999, surge uma desvantagem comparativa, que obriga os interessados no desenvolvimento desta alternativa energética a criarem iniciativas de desenvolvimento tecnológico ou de racionalização do processo para viabilizá-lo e torná-lo produtivo. Com a alta do petróleo ocorrida no primeiro trimestre de 2000, talvez surjam novas oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias de geração renovável de eletricidade.

O prognóstico econômico é porém favorável. Vários países e grupos privados transnacionais estão apostando no desenvolvimento da tecnologia da gaseificação da biomassa como alternativa para geração de eletricidade ou cogeração térmica e duas grandes plantas de gaseificação de biomassa foram testadas para demonstração de tecnologia, em Värnamo, Suécia e no Havai, EUA [CRAIG et MANN, 1998]. Havia um projeto em conjunto entre a CHESF e a Shell Renováveis, para a construção de uma planta de cogeração por gaseificação de biomassa no Brasil. A Shell defendia esta alternativa como economicamente viável, já para o atual nível tecnológico e de preços de petróleo, mas até o presente momento, o projeto não foi iniciado [SHELL INT. RENEWABLES, 1998].

Uma grande barreira institucional nos países em desenvolvimento é a divergência de setores econômicos e políticos da sociedade quanto ao modelo de desenvolvimento a ser seguido. Muitas vezes se opta por modelos estrategicamente desvantajosos para o país, pelo fato destes favorecerem economicamente algum grupo particular.

As barreiras operacionais se misturam às sociais na baixa qualificação da mão-de-obra rural, principalmente nos países em desenvolvimento, e na desinformação por parte da população dos programas e alternativas para desenvolvimento.

O PROJETO INTEGRADO DE BIOMASSA

O Projeto Integrado de Biomassa (PIB) foi criado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para estudar a viabilidade de utilizar-se o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) como fonte de energia. A idéia surgiu quando pesquisadores do IPT leram um artigo argumentando que a produtividade do capim-elefante seria de 40t de massa seca/ha/ano e estudos comprovando que a energia obtida pela conversão energética do capim seria competitiva com outras formas de energia [KATAYAMA, 1998]. O IPT convidou então outros institutos de pesquisa para desenvolverem projetos paralelos com o capim-elefante. O Instituto de Zootecnia de Nova Odessa foi convidado para otimizar o plantio e fornecer a matéria-prima para os outros grupos. A Embrapa - RJ ficou responsável pelo estudo do plantio com interação bacteriana para fixação do nitrogênio do ar, visando a

reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados. A FINEP, através da Recope - Redes Cooperativas de Pesquisa, está financiando o projeto.

Na Unicamp foram convidadas equipes da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) e da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI). Os subprojetos da FEAGRI são queima-direta, carvoejamento de gramínea e desenvolvimento de uma máquina colhedora específica para o capim.

A FEM ficou responsável pela gaseificação de gramínea, seguindo a linha de pesquisa do prof. Dr. Caio Glauco Sánchez e do Laboratório de Combustíveis e Combustão do Departamento de Térmica e Fluidos desta faculdade.

Deste projeto sai o objeto de estudo da tese aqui apresentada.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar uma alternativa para eletrificação rural. Como alternativa foi escolhida a gaseificação da biomassa em leito fluidizado, especificamente a espécie *Pennisetum purpureum* (capim-elefante), comumente usada no Brasil para a alimentação de gado leiteiro.

O trabalho se compõe de dois objetivos específicos:

1. Estudo da viabilidade técnica da gaseificação de capim-elefante, com ensaios em planta-piloto.
2. Estudo da viabilidade econômica do processo de produção e utilização de energia em pequenas comunidades rurais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A gaseificação é uma forma de aumentar a eficiência do uso energético da biomassa. O uso da biomassa tradicionalmente em fogões, lareiras ou mesmo caldeiras industriais resulta em uma eficiência energética muito baixa, altos níveis de poluição e desmatamento em certas áreas. Dados oficiais da FAO [HALL, 1992] indicam que se queima biomassa na taxa de 20 exajoules/ano (menos de 6% do consumo energético mundial). Pesquisas em vários países mostram, porém, que o consumo de biomassa é bem maior. Hall [1992] apresenta os seguintes dados (tabela 3.1):

| Participação no consumo energético | Mundial | Países Industrializados | Países em Desenvolvimento |
|------------------------------------|---------|-------------------------|---------------------------|
| Petróleo | 34,1% | 38,3% | 25,8% |
| Gás Natural | 17,4% | 22,7% | 7,1% |
| Nuclear | 4,1% | 5,9% | 0,6% |
| Hidroelétrica | 5,5% | 5,7% | 5,1% |
| Biomassa | 14,7% | 2,8% | 38,1% |
| Carvão | 24,1% | 24,5% | 23,4% |

Tabela 3.1 - Participação no consumo energético.

Em algumas indústrias, como a sucro-alcooleira no Brasil, já se costuma utilizar resíduos como fonte energética, apesar de ainda ser energeticamente bastante ineficiente. O real potencial para se utilizar resíduos de biomassa para conversão energética depende da sustentabilidade da produção primária da biomassa e seus impactos ambientais [HALL, 1992].

No estado de São Paulo, a biomassa tem participação proeminente na matriz energética, graças ao desenvolvimento da indústria sucro-alcooleira, da fabricação de papel e

celulose e de alimentos e bebidas [SEESP, 1997]. O excedente do consumo de bagaço costuma ser vendido às agroindústrias, apesar desta venda estar declinando nos últimos anos. O consumo energético de biomassa (não só por queima direta) no estado de São Paulo em 1996 foi de 434×10^{12} kJ, correspondendo a 22% do consumo total [SEESP, 1997].

3.1 O processo da gaseificação

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. A reação pode ocorrer em processo catalítico ou não-catalítico. O processo não-catalítico é o básico e será enfocado neste trabalho. Por ele se obtém um gás de baixo poder calorífico, com resíduos de particulados, alcatrão, cinzas volantes e óxidos de nitrogênio. A gaseificação catalítica utiliza elementos catalizadores (níquel por exemplo) para converter o alcatrão e outros hidrocarbonetos em gás, aumentando a eficiência do processo e o teor de hidrogênio, podendo o gás gerado ser usado para alimentar uma célula de combustível [ALDERUCCI et al., 1993].

A gaseificação não-catalítica é um processo 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]. O processo também gera metano e outros hidrocarbonetos superiores, dependendo do projeto e condições de operação do gaseificador. O gás combustível produzido é composto de 18 a 20% de hidrogênio, 18 a 20% de monóxido de carbono, 2 a 3% de dióxido de carbono e nitrogênio compondo a parcela restante. O gás pode alimentar um motor de combustão interna, substituindo 60% de gasolina ou 75 a 85% de diesel [MUKUNDA, 1992]. Esta aplicação é interessante para países em desenvolvimento, onde é ainda incipiente a eletrificação do meio rural. O gás 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.

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 compararmos à do carvão. 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 [HALL, 1992].

O gás resultante da gaseificação da biomassa, ao contrário do gerado a partir do carvão, tem conteúdo de enxofre insignificante [KINOSHITA, 1997]. Quanto à emissão 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 taxa presente na atmosfera [KINOSHITA, 1997; HALL, 1992]. 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. Os sistemas para controle e limpeza dos gases são tecnicamente viáveis, mas podem se mostrar caros a ponto de inviabilizar economicamente o projeto [BRIDGEWATER, 1995]. Isto depende da aplicação. Se utilizado um grupo-gerador para converter o gás em eletricidade, pode-se utilizar o gás frio. Assim ele passa por resfriamento e limpeza. Se utilizada uma turbina a gás, deve-se considerar a temperatura de entrada dos gases para eficiência térmica do processo. Deve-se desenvolver a tecnologia de limpeza de gases quentes para tornar a geração de energia pela gaseificação da biomassa um processo comercialmente viável [KINOSHITA, 1997]. 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. Baixas temperaturas de operação do gaseificador (800-900°C) reduzem a formação de óxidos de nitrogênio [YOSHIDA, 1997].

Motores de combustão interna aceitam pequenas quantidade de particulados, mas não pode ser excessivo. Gaseificadores produzem partículas finas de carbono e alcatrão, cujos níveis devem ser constantemente monitorados para evitar danos ao motor se trabalhado em condições extremas [MUKUNDA, 1992].

STEINWALL [1997] modelou 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.

ERGÜDENLER et al.[1997a,b,c] desenvolveram um modelo capaz de prever a performance em regime estacionário da gaseificação da biomassa em leito fluidizado. O modelo foi testado [ERGÜDENLER et al.,1997c], mostrando-se eficiente para se 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.

3.2 Tipos de Gaseificadores

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

- quanto ao poder calorífico do gás produzido: gás de baixo poder calorífico (até 5 MJ/ Nm³); gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ/ Nm³); gás de alto poder calorífico (de 10 a 40 MJ/ Nm³).
- quanto ao tipo de agente gaseificador: ar; vapor d'água; oxigênio; hidrogênio.
- quanto à direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação: contracorrente; concorrente; fluxo cruzado; leito fluidizado; leito circulante.
- quanto à pressão de trabalho: atmosférico ou pressurizado (geralmente até 20 atm).
- quanto ao tipo e forma do combustível: carvão; resíduos agrícolas; resíduos industriais; resíduos sólidos urbanos (lixo); biomassa in natura; biomassa peletizada; biomassa pulverizada.

3.3 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 por meio de 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). O equipamento experimental utilizado nesta tese possui um pré-aquecedor queimando GLP.

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.

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 onde 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 elutrir todas as partículas do leito, chegamos 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.

Dois fases podem ser identificadas numa seção transversal do 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.

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. Outros autores corroboram o resultado [BEHAINNE, 1999; ESPERANZA *et al.*, 1999].

3.4 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. 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 [CRAIG E MANN,1996]. Como consequência, tem havido limitações às dimensões das plantas de geração e alto custo da eletricidade gerada.

Por outro lado, vários autores [CRAIG E MANN,1996; LEVIN,1995] 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. 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.

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. Projetos já realizados de pequenas centrais geradoras de energia pela gaseificação da biomassa são expostos e mostrados viáveis por JOHANSSON et al.[1992].

Várias plantas de gaseificação para geração ou cogeração de energia elétrica estão propostas e desenvolvidas no mundo. 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.

3.5. Programas no Exterior

EUA

Em 1991, o Departamento de Energia dos EUA criou o Programa Nacional de Energia da Biomassa “National Biomass Power Program” para ajudar a estabelecer uma alternativa sustentável para gerar energia elétrica.

Este Programa inclui atividades de base como:

- colaboração com a indústria de energia da biomassa para solucionar problemas de adequação de certos tipos de biomassa às caldeiras existentes;

- avaliação e desenvolvimento de tecnologias avançadas como gaseificação e pirólise;
- determinação das características do gás produzido por várias tecnologias de gaseificação;
- desenvolvimento de tecnologia de limpeza de gases quentes;
- apoio à construção de sistemas de pequeno porte;
- análise de sistemas de geração de energia pela biomassa e co-patrocinio com a indústria para estudos de viabilidade destes sistemas.

A iniciativa “Biomass Power for Rural Development”(Energia da Biomassa para o Desenvolvimento Rural) foi lançada em 14 de Dezembro de 1994. Este programa é colaboração entre o Departamento de Energia (U.S. Department of Energy – DOE), o Depto. de Agricultura (U.S.Department of Agriculture – USDA) e a indústria, estruturado sob o macro-programa “Energy partnerships for a Strong Economy” (Parcerias energéticas para uma economia forte), por sua vez financiado pelo “Biomass Power Program”. Esta iniciativa busca demonstrar e desenvolver tecnologias integradas de geração energética a partir da biomassa, que sejam economica e ambientalmente viáveis e sustentáveis, além de trazer benefícios para o meio rural.

É de interesse do DOE e do USDA demonstrar a integração da produção agrícola da biomassa com novas e eficientes tecnologias de conversão energética, gerando energia a custos competitivos, criando empregos (principalmente no meio rural), reduzindo as emissões de gases-estufa e equilibrar os subsidios agrícolas do governo federal norte-americano por meio da geração de produções agrícolas alternativas às atuais.

Os projetos têm participação metade pública, metade privada. Os benefícios que o governo norte-americano pretende são:

- Demonstração da integração entre sistemas de suprimento de matérias-primas com tecnologias avançadas de conversão energética.
- Revitalização econômica do meio rural norte-americano.
- Redução das emissões de gases-estufa.

- Melhora do padrão ecológico e da biodiversidade.
- Criação de um novo setor industrial nos EUA, com um significativo potencial de exportação.

Estavam em desenvolvimento duas plantas de gaseificação da biomassa para geração de energia: uma no Haváí, para produzir mais de 6 MWe para uma usina de açúcar. Houve muito problema para alimentar o bagaço-de-cana (o leito era pressurizado) e o projeto foi cancelado pelos financiadores. A outra é em Vermont, adicionando 15 MWe gerados por uma turbina a gás aos 50 MWe produzidos por uma planta já existente.

ÍNDIA

O governo indiano também tem desenvolvido projetos de implementação e pesquisa de fontes renováveis, principalmente a biomassa, como alternativa energética para um desenvolvimento sustentável.

A Agência Indiana de Desenvolvimento de Energia Renovável (Indian Renewable Energy Development Agency - IREDA) foi criada em 1987 pelo Ministério de Fontes Energéticas Não-convencionais, objetivando:

- promover fontes renováveis de energia;
- estender apoio financeiro para a geração e conservação da energia;
- promover apoio financeiro para fabricantes de equipamentos para sistemas de geração de energia renováveis;
- facilitar *leasing* de equipamentos de geração de energia renováveis;
- viabilizar tecno-economicamente a comercialização da tecnologia de geração de energia por meio da biomassa, provendo assistência financeira e técnica aos participantes.

Um dos focos do programa é a geração de energia elétrica descentralizada para pequenas comunidades rurais, abundantes no país. O programa também prevê a criação de empregos no campo e a redução da importação de petróleo, contribuindo favoravelmente para a balança comercial indiana.

Os interessados tem que participar em pelo menos 25% do investimento. O financiamento do IREDA possui taxa de 16%, carência de 3 anos e deve ser liquidado em 10 anos (incluindo os três de carência). Como incentivo ao desenvolvimento de regiões menos desenvolvidas (nordeste indiano, áreas montanhosas, desertos e ilhas), é previsto uma taxa de apenas 2% a.a..

O programa também incentiva centrais cogeneradoras a partir da biomassa, sob as mesmas condições de financiamento.

H. S. Mukunda [1992] tem trabalhado no desenvolvimento de plantas para conversão energética híbrida com gaseificador de topo aberto e motores diesel para eletrificação de vilas na Índia. Tais sistemas têm capacidade entre 3,7 a 100 kW. Gaseificadores de topo aberto podem substituir o diesel em 70% e são menos dependentes da qualidade, umidade e densidade do material alimentado. MUKUNDA [1992] analisa comparativamente dois sistemas: um na vila de Hosahalli, Karnataka (Índia), gerando 5kW para a estação de força da vila e o outro em Port Blair no arquipélago de Andaman e Nicobar, gerando 100 kW para uma serraria. O custo de capital do sistema maior é de US\$ 1.224,1 por kW (em 1991) com um custo de energia de 0,074 US\$/kWh. O sistema de 3,7 kW apresenta um custo da energia de 0,159 US\$/kWh e um custo de capital de 1.411,7 US\$/kW. Apesar do sistema de geração por gaseificação aumentar os custos fixos de geração de energia, seus custos operacionais baixos conseguem compensar o maior custo fixo.

UNIÃO EUROPÉIA

Em 1986 a ratificação do Ato Único Europeu objetivou a criação de um mercado interno europeu, onde o trânsito de pessoas, capital, bens e serviços ocorreria da forma o mais livre possível. Em 1988, o documento “O Mercado Interno de Energia”, a comissão responsável da União Européia (EU) observou a necessidade da criação de um mercado

energético interno, livre de obstáculos, para aumentar a segurança de suprimento, para reduzir os custos e para fortalecer a competitividade do sistema econômico europeu.

Em 1990, o Conselho Comunitário adotou as seguintes diretrizes para implementar o novo setor energético da EU:

- Realizar medidas adequadas para aumentar a transparência dos preços de gás e eletricidade.
- Instituir procedimentos de mediação para entidades atuando nos chamados “setores excluídos” – água, energia, transporte e telecomunicações.
- Permitir o trânsito de gás e eletricidade para terceiros através de rede de transmissão.

Em 1992, a comissão da EU adotou o conjunto de diretrizes chamado “Regras Comuns para o Mercado Interno de Eletricidade”, promovendo:

- A liberação do setor de geração elétrica.
- A permissão ao acesso à geração terceirizada para certos consumidores.
- Desvelar a contabilidade de estruturas verticalizadas para permitir maior transparência.

Até 1995 não havia-se chegado a uma posição final sobre as propostas levantadas, principalmente por não poder discutir a questão elétrica como foi discutida sobre os outros produtos ordinários, cuja liberação já fora regulada. É impossível impor um único modelo organizacional para todos os membros da EU porque estes países têm cada qual sua concepção particular sobre as obrigações dos serviços públicos.

Em junho de 1996, após muitos anos de discussão, o Conselho de Ministros da EU aprovou uma nova diretriz para a competição no mercado de eletricidade, tornando-a operacional em 1º de janeiro de 1997. Os Estados-membros, com algumas exceções, terão dois anos para aquiescer às leis, regulamentos e provisões administrativas contidas na diretriz.

Os dois elementos principais da diretriz são a possibilidade de escolha de novos fornecedores, competindo com os já existentes; e a possibilidade de escolha para consumidores. Os consumidores elegíveis, como os ditos consumidores livres no Brasil, podem escolher seu fornecedor de eletricidade, realizando os pagamentos, contudo, para o dono da sua rede local, pelo uso da transmissão.

No que diz respeito às oportunidades de geração, os Estados-membros podem escolher entre dois modelos: um procedimento de autorização ou um procedimento de oferta. O primeiro permite o estabelecimento de novos fornecedores, sujeitos à concessão de autorização pelo governo. O procedimento de oferta requer a criação de um único comprador independente para conduzir as ofertas. O comprador único iria controlar a velocidade de entrada de novos fornecedores. Este modelo é preferido pelos que preferem minimizar a competição.

A possibilidade de um modelo mais descentralizado, favorece políticas para disseminação da geração descentralizada para eletrificação rural.

Dentro da EU, vários são os programas em desenvolvimento para o uso da biomassa como fonte energética, entre eles por meio do uso da tecnologia da gaseificação. Em Junho deste ano (1998) foi realizada em Würzburg, Alemanha, a conferência internacional “Biomassa para Energia e Indústria”, patrocinada pela Comissão Europeia, Programa Thermie e pelo Estado-livre da Baviera.

Finlândia

Atualmente, 20% do consumo primário de energia finlandês é obtido por fontes bioenergéticas, principalmente lenha e turfa. É objetivo do governo finlandês elevar esta cota para pelo menos 25% da matriz energética do país, nos próximos dez anos. Isto equivaleria a 1,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo por volta do ano 2005.

Programa de Pesquisa em Bioenergia (Bioenergian Tutkimusohjelma):

O objetivo deste programa é aumentar o uso de fontes bioenergéticas que sejam economicamente lucrativas e saudáveis para o meio-ambiente, buscando aumentar a competitividade do uso da turfa e de lenha.

O programa é custeado pelo Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Finlândia (TEKES), pelo Ministério de Agricultura e Cultura Florestal e pelo Ministério do Comércio e Indústria. Só em 1997 foram financiados 5,5 milhões de ECU's, sendo destes 42% para pesquisa do uso da bioenergia; 34% para produção de combustíveis lenhosos; 13% para produção de turfa; 8% para pesquisa em conversão da biomassa e 3% na pesquisa agrícola da biomassa (plantio e manejo).

Brasil

Projeto WBP/SIGAME- O Sistema Integrado de Gaseificação de Madeira é um projeto desenvolvido pela CHESF em conjunto com Eletrobrás, Shell (esta recentemente desistiu do projeto) e Ministério da Ciência e Tecnologia, para instalação de uma usina de 32MW, na Bahia, que produzirá energia a partir da gaseificação da madeira do eucalipto, com início previsto para o ano 2000.

O custo total do projeto é estimado em US\$ 108 milhões. O suporte financeiro será dado pelo GEF - Global Environment Facility (doação), Banco Mundial (empréstimo) e empresas participantes. A tecnologia é sueca (Thermiska Processer - TPS), também chamada de gaseificador Studsvik. O custo de capital estimado para a primeira planta é aproximadamente 2.800 US\$/kW (em 1996) e projeta-se para o desenvolvimento da tecnologia (enésima planta) um custo de capital de 1.500 US\$/kW e custo de eletricidade em 0,0703 US\$/kWh [CRAIG et al., 1996].

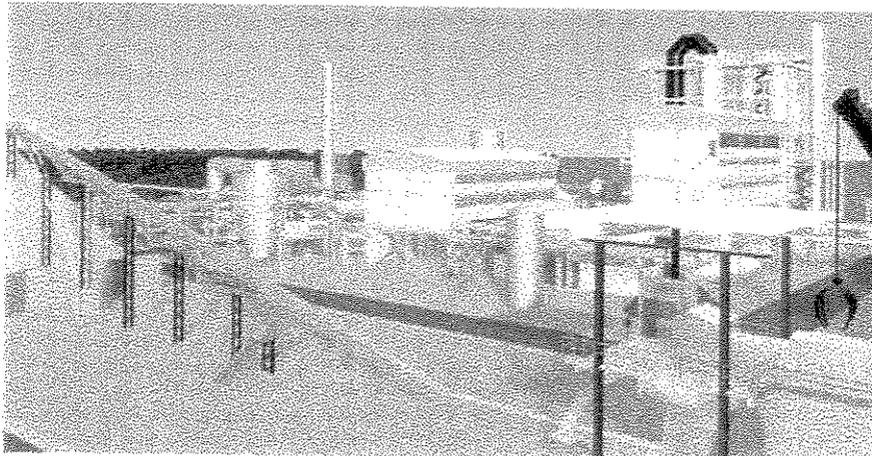


Fig.3.1 - ilustração da planta de gaseificação do projeto WBT/SIGAME

Além dos citados, outros países que estão ativamente desenvolvendo a tecnologia da gaseificação da biomassa são:

- Dinamarca;
- Áustria;
- Grécia;
- Alemanha;
- Espanha;
- Suécia;
- Grã-bretanha;
- Itália;
- China;
- Canadá;
- Cuba.

A Rússia e o Japão atualmente desenvolvem grandes centrais de gaseificação de carvão mineral, como alternativa energética, devido às características de suas matrizes

energéticas e dificuldade de cultivo da biomassa. A Rússia poderia ter optado por um modelo semelhante ao Finlandês, mas ela ainda privilegia o uso do carvão como fonte para gaseificação, principalmente por ser este um setor extrativista de importância dentro do país. O Japão, apesar de importar o carvão, optou por esta fonte por sua grande participação na matriz energética nacional.

3.6 Análise econômica

A literatura diverge sobre custos e eficiências dos processos de conversão energética da biomassa [KINOSHITA, 1997].

Para a viabilidade econômica da utilização da biomassa como fonte energética, deve-se levar em conta os custos de plantio, cultivo, colheita, armazenamento e transporte do vegetal, no caso a ser estudado, o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*). O processo inicia-se com o estudo da disponibilidade e adequabilidade de terra para a cultura da biomassa [ALDERUCCI, V. et al., 1993]. O local deve ter o solo e clima adequados para se ter uma produtividade agrícola tal que viabilize o projeto. Atualmente ainda se utiliza muito resíduos como fonte de biomassa, mas para que a biomassa possa contribuir significativamente na matriz energética mundial, faz-se necessárias plantações energéticas, ou seja plantio de espécies desenvolvidas especialmente para a geração de energia [KINOSHITA, 1997; HALL, 1992]. As plantações energéticas devem ser manejadas intensivamente como as plantações agrícolas normais, mas o ciclo de colheita seria diferente, dependendo da cultura. Para gramíneas, como o capim-elefante, a colheita se daria a cada seis ou doze meses, mas o replantio seria infrequente, talvez a cada dez anos [HALL, 1992].

Para se realizar o balanço energético do plantio da biomassa deve-se levar em conta a energia necessária para produzi-la e a energia necessária para converter a biomassa colhida. HALL [1992] apresenta o balanço energético para o plantio e colheita da biomassa. A partir deste estudo, coletando dados para o plantio do capim-elefante no Brasil, pode ser levantada a planilha de custos da produção da biomassa, necessária para a avaliação econômica proposta nesta tese.

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. MANN et al. [1996] discute a análise de ciclo de vida e os fatores econômicos para um sistema de geração por gaseificação de biomassa. A análise de ciclo de vida é um método sistemático para identificar, avaliar e minimizar os impactos ambientais de emissões e uso de recursos naturais relacionados a um processo específico.

CAPÍTULO 4 - EQUIPAMENTO E METODOLOGIA

4.1 - EQUIPAMENTO

Os experimentos foram realizados no gaseificador projetado e construído pelo Laboratório de Combustíveis e Combustão do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.

O reator foi projetado para gaseificar 100kg/h de biomassa, com altura de leito entre 1,0 e 2,0 m. A velocidade de ar de fluidização foi definida como aproximadamente 1,0 m/s [SOUZA-SANTOS, 1998].

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 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 o equipamento sem o anel de pré-aquecimento e sem a rosca de alimentação. Nesta foto consegue-se perceber o revestimento interno de cimento refratário que isola os anéis inferiores. Já na figura 4.2 vê-se o gaseificador montado.

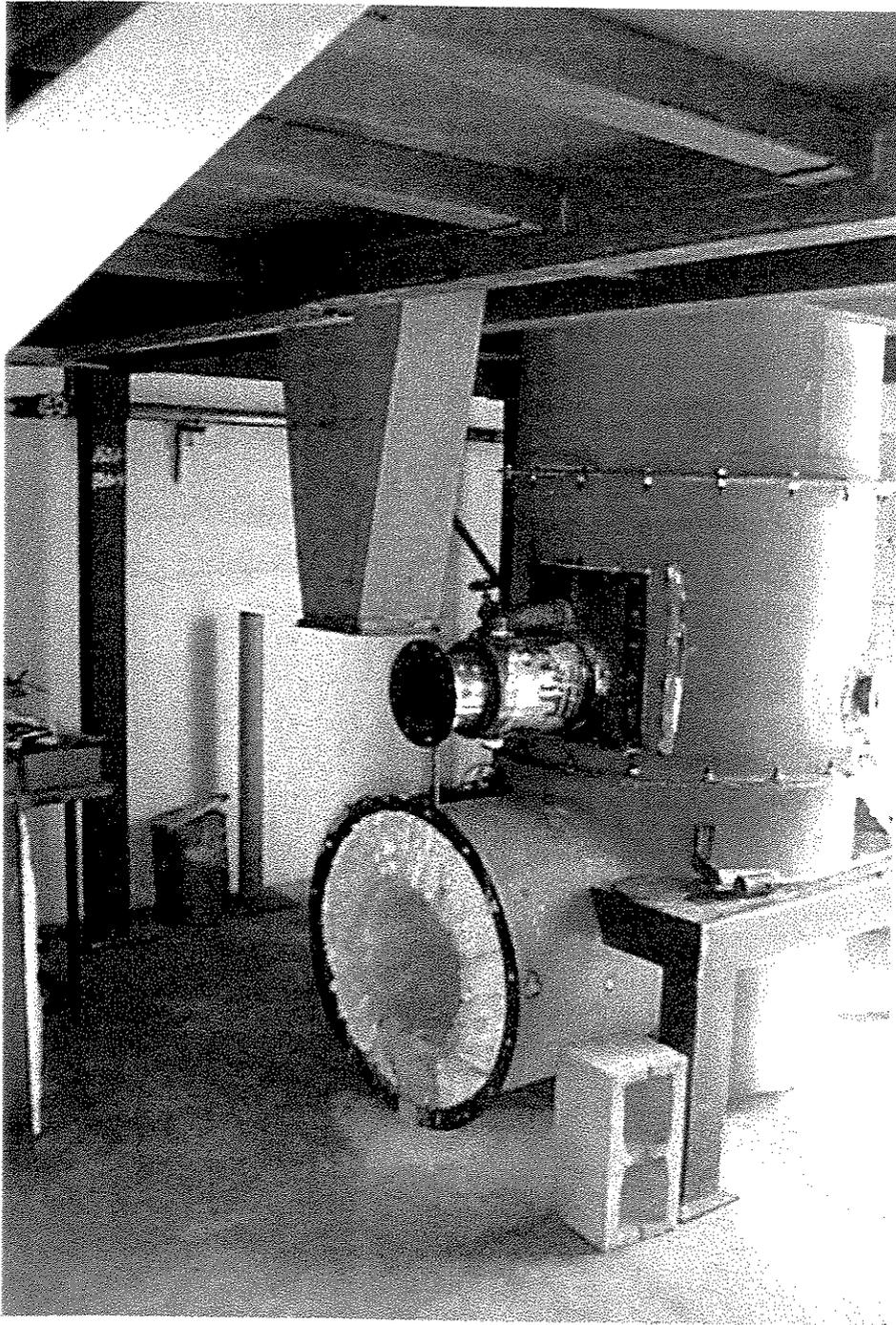


Figura 4.1 - Parte inferior do gaseificador, desmontado.

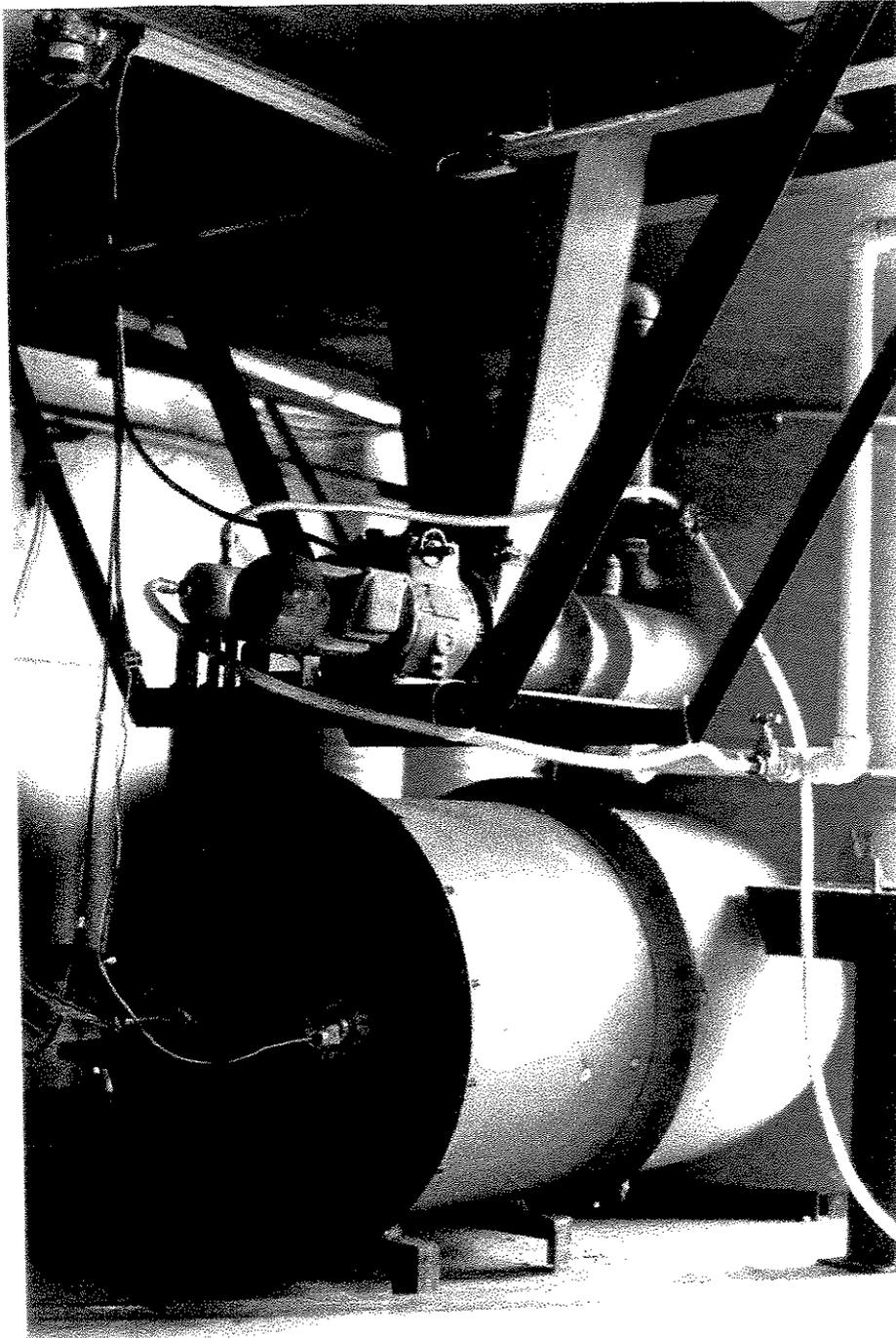


Figura 4.2 - Gaseificador, montado

O diâmetro interno do reator é 400 mm. A altura total do reator é 4.600 mm. Na zona do freeboard 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.

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 27mm 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.

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. O desenvolvimento do silo de alimentação foi objeto de tese, defendida nesta faculdade por Neiva [1998]. 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].

O silo de alimentação tem capacidade suficiente para garantir a operação do reator por 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. Logo após cada recarga - que deve ser feita rapidamente pela razão acima citada -, será necessário esperar a estabilização da temperatura do reator.

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 dois tambores de 200 litros. Entre o ciclone e cada tambor existe válvulas tipo gaveta, permitindo, após cada operação, a retirada dos tambores 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 programa de aquisição de dados Strawberry Tree[®] armazena no micro-computador as condições de temperatura do leito, 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.

Nas figura 4.3 pode ser visto um croquí do equipamento.

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.

Após o ciclone, o gás passa por um sistema de lavagem (*scrubber*) para remover alguns compostos solúveis. Estes compostos são removidos por absorção em contrafluxo de água, no interior da tubulação de saída de gás. O aspersor consiste de dois tubos de cobre,

de 9,5 mm de diâmetro cada, dispostos em cruz, um atrás do outro. Cada tubo tem 7 furos de 1,0 mm de diâmetro para permitir a passagem da água na direção contrária ao escoamento do gás [BEHAINNE, 1999].

Como ainda não foi instalado o grupo-gerador para converter o gás produzido em eletricidade, há necessidade de simplesmente eliminar o gás. Ele é portanto queimado em um *flare* no topo de uma chaminé de 6 metros de altura, sendo então descarregado 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*.

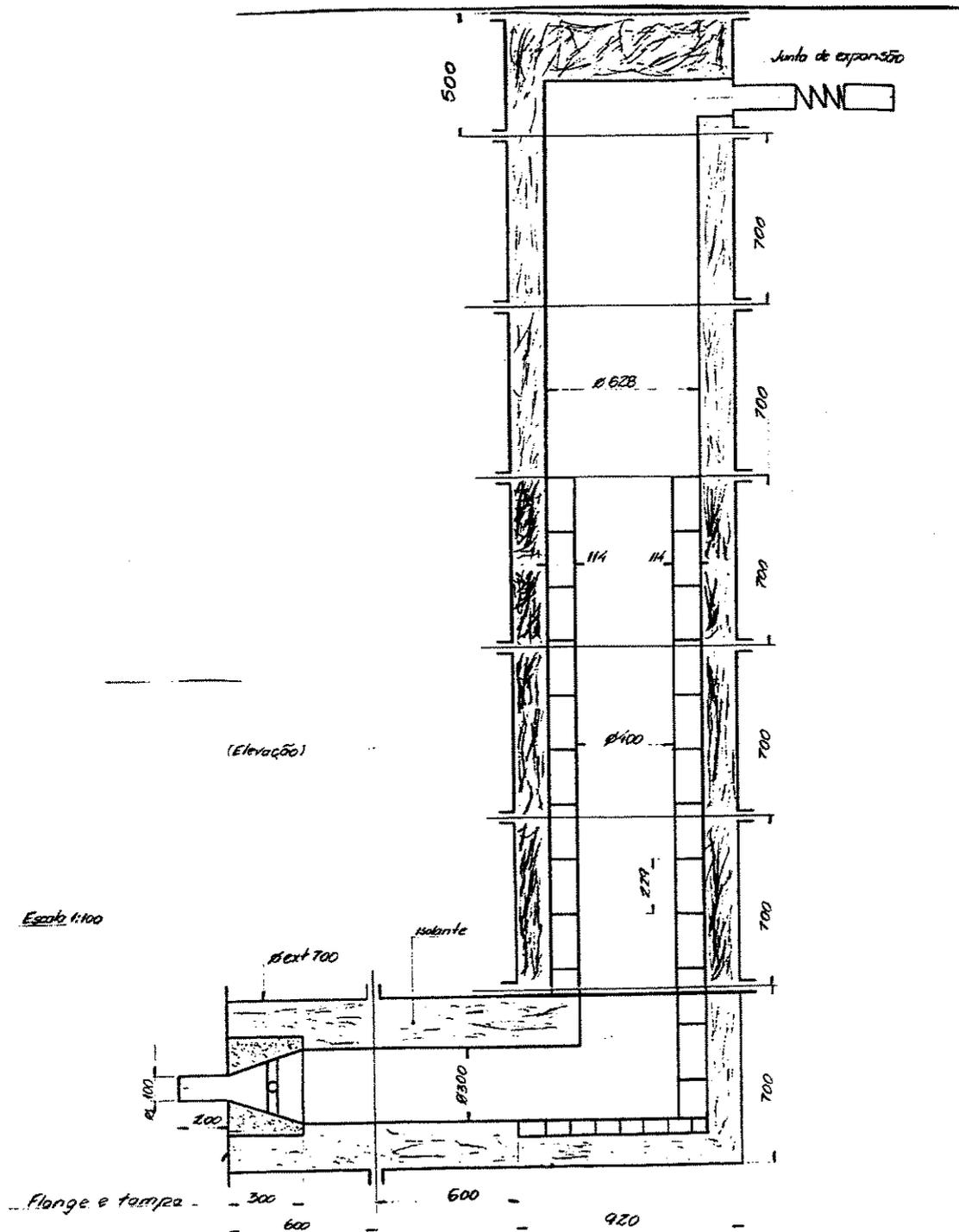


Figura 4.3 - Croquí do gaseificador.

A operação do gaseificador foi simulada por Souza-Santos [1998], para bagaço-de-cana, obtendo os seguintes dados para eficiência máxima teórica:

| | |
|-------------------------------|------------|
| Umidade do bagaço | 35% |
| Alimentação de biomassa | 0,034 kg/s |
| Fluxo de ar | 0,028 kg/s |
| Fator de ar (aproximadamente) | 0,2 |
| Eficiência a quente esperada | 78% |

Tabela 4.1 - Otimização teórica do gaseificador.

Resultados dos gaseificadores precedentes a este em estudo [SÁNCHEZ, 1994; BEHAINNE, 1999] indicam que pode-se esperar uma eficiência a frio de, pelo menos, 40% no processo. Este valor será utilizado na análise econômica.

4.2. PROBLEMAS CONSTRUTIVOS

O gaseificador, devido a suas dimensões, apresentou alguns problemas nas primeiras tentativas de funcionamento. Estes problemas acabaram por prejudicar a coleta de dados para uma desejada otimização das suas condições de operação.

Alguns problemas identificados são:

1. A inércia térmica de 1,0 m de alumina no leito é muito grande. Com 7 horas de aquecimento, a temperatura se estabilizara nos 680 - 700°C, não alcançando a temperatura desejada de 750°C para o início da gaseificação.
2. Tentou-se alimentar a alumina aos poucos, pelo silo de alimentação. Este procedimento não se mostrou muito prático.
3. Outra dificuldade durante o aquecimento da alumina era controlar a temperatura de pré-aquecimento e a pressão de ar, para que o ar - devido ao peso do leito inerte - não se desviasse para algum possível vazamento no corpo do gaseificador (geralmente na junção entre os anéis).

4. Desta forma, era sempre necessário verificar todos os parafusos e vedações a cada operação e durante o próprio aquecimento do leito.
5. Para melhor conservar o eletrodo de ignição, ele deveria ser recolhido após cada ignição. As altas temperaturas do pré-aquecimento (maior que 1.000°C , tendo chegado a 1.200°C) costumavam se deformar por derretimento a ponta da camisa metálica do eletrodo, impossibilitando nova fagulha elétrica no teste seguinte.
6. A instalação do sensor óptico também requer atenção a possíveis vazamentos que possam criar fluxo de ar quente, danificando o sensor. Eventual fuligem de uma combustão incompleta ou qualquer opacidade em uma lente protetora de cristal (ou vidro, colocada entre o sensor e a chama) também interrompe a alimentação de gás (falta luz, o sensor comanda o fechamento da válvula solenóide).
7. São grandes as tensões térmicas e estruturais da operação do gaseificador, pois esta planta-piloto é de dimensões superiores às anteriormente construídas. Sugere-se uma revisão do projeto.
8. O silo de alimentação ainda não funciona a contento. Isto prejudica o correto balanço de massa e avaliação do fator de ar do experimento, além dos próprios dados de gaseificação.

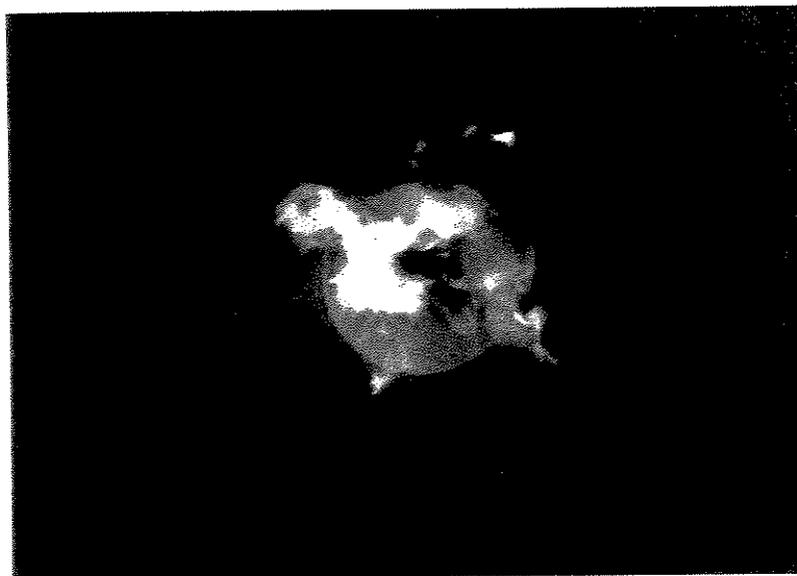
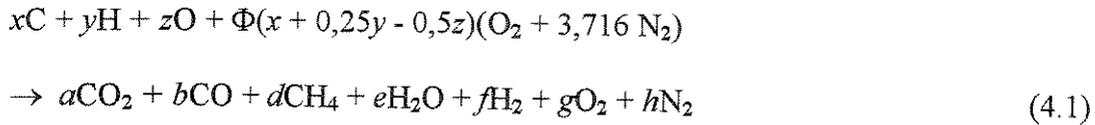


Figura 4.4 - Detalhe do queimador do pré-aquecedor.

4.3. EQUACIONAMENTO TERMODINÂMICO

Equilíbrio químico

O processo de gaseificação pode ser sintetizado na seguinte reação sub-estequiométrica:



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 Φ é a razão entre a razão ar/combustível real e a estequiométrica. Souza-Santos [1998], em simulação computacional, determinou como 0,2 o fator de ar para otimizar a gaseificação do bagaço-de-cana no gaseificador que será utilizado neste experimento.

Balanço de massa

$$m_c + m_{ar} = m_{gás} + m_{cinzas} \quad (4.2)$$

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.

Balanço energético

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

$$Q_d = Q_{util} + Q_g + Q_{cin} + Q_{amb} \quad (4.3)$$

ou

$$Q_d = PCI + Q_{ar} \quad (4.4)$$

$$Q_{ar} = FA \cdot (h_{a2} - h_{a1}) \quad (4.5)$$

$$h_{a2} = VA.Cp_{a2}.t_{a2} \quad (4.6)$$

$$h_{a1} = VA.Cp_{a1}.t_{a1} \quad (4.7)$$

$$Q_{util} = (V_{gás}/m_c).PCI_{gás} \quad (4.8)$$

$$PCI_{gás} = 0,126.C_{CO} + 0,358.C_{CH4} + 0,108.C_{H2} \quad (4.9)$$

$$Q_g = (h_{gás} - FA.h_{a1}) \quad (4.10)$$

$$h_{gás} = [C_{CO}.h_{CO} + \dots + C_{CO2}.h_{CO2}].V_{gás}/m_c \quad (4.11)$$

$$Q_{cin} = (m_{cin}/m_{gás} \cdot 100).[C_{carb}.PCI_{carb} + c_{cin} \cdot (t_s - t_e)] \quad (4.12)$$

$$c_{cin} = 0,832 + 0,00167.t_{cin} \quad (4.13)$$

$$Q_{amb} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i.F_i/m_c).(t_{si} - t_e) \quad (4.14)$$

como o compressor utilizado é superdimensionado e distorceria os resultados de eficiência, optou-se por retirá-lo do volume de controle, ficando a eq. 4.5 da seguinte forma:

$$Q_{ar} = FA.h_{a2} \quad (4.15)$$

Eficiência do gaseificador

Define-se eficiência a frio como:

$$\eta_f = Q_{util}/Q_d ; \quad (4.15)$$

e eficiência a quente como:

$$\eta_q = (Q_{util} + Q_g \cdot 100)/Q_d ; \quad (4.16)$$

4.4. Planejamento experimental

O planejamento experimental permite otimizar o número de ensaios a se realizar. Este número deve ser suficiente para minimizar os erros experimentais, sem exceder-se de forma a realizar experimentos desnecessários.

Definição de variáveis

Os testes visam otimizar a operação do gaseificador, com capim-elefante como combustível, maximizando a sua eficiência e determinando as características do gás produzido.

Um segundo objetivo é qualificar e quantificar a produção de gás para dimensionar um grupo-gerador e realizar a análise de viabilidade econômica da planta-piloto.

As variáveis de resposta que desejamos obter são:

1. Poder Calorífico Inferior (PCI);
2. Potência produzida (de onde tiramos a eficiência);
3. Composição do gás (%CO; % CH₄; %H₂; %CO₂; %N₂).

Pela equação (4.9), relaciona-se PCI e composição do gás. Esta equação é amplamente utilizada na academia e indústria para o cálculo do PCI. 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; % CH₄; %H₂; %CO₂; %N₂) para determinar o PCI. Considerando o objetivo de análise econômica de uma planta piloto, tomamos como variável de resposta o PCI e a potência produzida.

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

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

Como a temperatura do leito se relaciona com o fator de ar [SÁNCHEZ, 1994], podemos descartar uma destas variáveis. Por praticidade de experimento e consonância com a prática de gaseificação do Laboratório de Combustíveis e Combustão, escolhemos 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.

Temos assim, duas variáveis de influência e duas de resposta. Pelo alto custo e tempo exigido de cada ensaio, serão realizados apenas dois ensaios para cada uma das condições de operação. Os resultados do Laboratório de Combustíveis e Combustão [SÁNCHEZ, 1994; BEHAINNE, 1999] têm mostrado que os ensaios dos gaseificadores não apresentam grande desvio padrão. Se algum ensaio necessitar de uma terceira réplica para convalidação, esta será feita posteriormente.

O planejamento experimental e os níveis de cada variável de influência são mostrados na tabela 4.2. A escolha dos níveis segue o projeto do gaseificador e resultados já obtidos para o bagaço-de-cana, cujo comportamento é suposto como semelhante ao do capim-elefante [SÁNCHEZ, 1994; SOUZA-SANTOS, 1998].

| | FATOR DE AR | | | |
|-----------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Altura do leito | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 |
| 1 m | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 2 m | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | 13 | 14 | 15 | 16 |

Obs: números em negrito: seqüência experimental.

Tabela 4.2 - Planejamento experimental

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

1. Vazão de ar de entrada no gaseificador;
2. Vazão de gás obtido;

3. Vazão mássica de biomassa alimentada;
4. Vazão mássica de finos elutriados;
5. Temperatura do leito a diferentes alturas;
6. Temperatura de saída do gás no *free-board*;
7. Temperatura do gás na entrada e na saída do ciclone;
8. Composição do gás produzido;
9. Teor de carbono nas cinzas.

Método de convalidação de dados

Um dos métodos mais comuns de convalidação de dados é o uso de equações de equilíbrio ou conservação de quantidades [SCHENCK, 1961]. No caso em estudo, as quantidades estudadas são massa e energia e, portanto, será utilizado o balanço termodinâmico junto ao equacionamento químico das reações de gaseificação.

Erros no balanceamento podem indicar tanto a inadequação do modelo quanto falhas e vazamentos (térmicos e mássicos) na execução do experimento. Como o equacionamento já foi utilizado por outros pesquisadores [SÁNCHEZ, 1994; BEHAINNE, 1999], os erros não estatísticos indicarão algum defeito na realização do experimento.

Método de análise de dados

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

1. Concentração dos componentes combustíveis (CO ; CH_4 e H_2) no gás produzido, em função do fator de ar;
2. Poder calorífico inferior do gás, em função do fator de ar;
3. Eficiência a frio e a quente, em função do fator de ar;
4. Eficiência a frio e a quente, em função da temperatura do leito;
5. Perdas energéticas em função do fator de ar.

4.5. Procedimento experimental

4.5.1 Cálculos preliminares

Para a operação do gaseificador, alguns parâmetros devem ser inicialmente calculados:

Vazão de ar

$$\dot{V}_{ac} = A_L * U \quad (4.17)$$

onde:

\dot{V}_{ac} : vazão de ar fluidizante à temperatura e pressão no leito (m^3/s);

A_L : área da seção transversal do leito fluidizado (m^2);

U : velocidade superficial do ar (m/s).

e:

$$A_L = \frac{\pi \cdot D_L^2}{4} \quad (4.18)$$

onde:

D_L : diâmetro do leito fluidizado = diâmetro interno do reator (m).

A vazão de ar calculada pela equação (4.17) deve ser corrigida para a condição normal de temperatura e pressão, utilizando-se a equação (4.19):

$$\dot{V}_{ar} = \dot{V}_{ac} \cdot \frac{T_{LN} \cdot P_L}{T_L \cdot P_{LN}} \quad (4.19)$$

onde:

\dot{V}_{ar} : vazão de ar à condição normal de temperatura e pressão (Nm^3 / s);

\dot{V}_{ac} : vazão de ar à condição de temperatura e pressão do leito (m^3 / s);

T_{LN} : temperatura à condição normal (K);

P_{LN} : pressão à condição normal (kPa);

T_L : temperatura à condição de operação do leito (K);

P_L : pressão à condição de operação do leito (kPa);

O valor de U depende da velocidade superficial de mínima fluidização e da velocidade terminal das partículas. Com base nisso, adota-se um fator de segurança que garanta a fluidização do leito e evite a elutriação das partículas. Como o leito consiste de uma mistura de sólidos com propriedades diferentes, costuma-se estabelecer para o cálculo do projeto as condições para a fluidização do material inerte, pois as propriedades deste se mantêm mais ou menos constantes durante a operação do reator.

O reator utilizado nesta pesquisa foi projetado para operar com velocidade $U = 1,0$ m/s.

4.5.2 Preparação da biomassa

A biomassa utilizada foi o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), fornecido pelo Instituto de Zootecnia (IZ), dentro do escopo do PIB¹.

A granulometria inicialmente fornecida pelo IZ não se adequava ao sistema de alimentação já existente, pois o capim se aglomerava em arcos dentro do silo de alimentação, em um processo descrito por Neiva [1998].

A solução encontrada foi moer o capim em um moinho marca Rhone. Por fim, o silo de alimentação foi calibrado para a granulometria do capim moído.

¹ ver Capítulo 1 - Introdução; sub-item "O Projeto Integrado de Biomassa".

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 e hidrogênio. Norma ASTM D-3176.
4. Poder Calorífico - determinado em bomba calorimétrica; norma ASTM D-2015.

4.5.3 Preparação do experimento

O procedimento experimental, desenvolvido por Sánchez [1994] e aperfeiçoado por seus alunos [BEHAINNE, 1999] é descrito sumariamente a seguir:

Antes de cada experimento, deve-se fazer um *check-up* geral na planta-piloto. Verifica-se se há vazamentos no corpo do reator e se todos os parafusos estão bem apertados.

O cromatógrafo deve ter suas colunas regeneradas e ser calibrado e preparado para operação.

O sistema de aquisição de dados deve estar ligado e preparado para a coleta de informações.

A alumina deve ser pesada e alimentada no silo inferior, para ser gradualmente inserida no corpo do reator, durante seu aquecimento (este procedimento minimiza as tensões contra o fluxo de ar, devido ao peso do leito inerte).

A quantidade de alumina desejada depende da altura do leito, sendo calculada pelas seguintes expressões [SÁNCHEZ, 1994]:

- Altura do leito expandido:

$$h_l = 1,25 * h_{lf} \quad (4.20)$$

- Volume do leito expandido:

$$V_l = h_l * \pi * d_i^2 / 4 \quad (4.21)$$

onde:

V_l = volume do leito expandido (m³);

d_i = diâmetro interno do reator (m).

Depois disso, pesa-se também a biomassa e alimenta-se com ela o silo superior.

Verifica-se o funcionamento do sistema de refrigeração à água para não haver vazamentos.

Testam-se os motores de alimentação.

Verifica-se as válvulas de alimentação de ar e gás. Liga-se então o compressor de ar e abre-se o registro de gás. Utiliza-se, aproximadamente, uma pressão de gás na rede de 1,3 kgf/cm².

Antes de proceder à ignição, deve-se abrir totalmente a válvula de ar por, pelo menos, 40 segundos, para certificar-nos de que não haja gás residual no reator, o que poderia acarretar uma explosão. De fato, tomamos isto mais como medida de segurança, pois as condições de operação e a presença de uma válvula solenóide do tipo sempre-fechada, não favorecem a presença de gás residual em quantidades suficientes para uma

explosão mais grave. Geralmente, se há gás residual, a explosão ocorre e apenas impede a correta ignição do pré-aquecedor, tendo então de se repetir o procedimento.

4.5.4 Ignição

Liga-se a força elétrica do sistema de ignição, regulam-se as válvulas de gás e ar para a vazões desejadas.

Para manter acesa a chama do pré-aquecedor durante a etapa inicial do processo e minimizar os riscos na segurança da operação, foi adaptado um mecanismo de ignição com temporizador e monitoramento de chama [BEHAINNE, 1999].

O dispositivo está ligado a um eletrodo de ignição e a um sensor fotoelétrico de chama (modelo QRA2 - ultra-violeta) e a uma válvula solenóide (marca ASCO, modelo 711408). O dispositivo envia o sinal elétrico à válvula solenóide para que esta se abra. O corte no impulso determina o imediato fechamento da válvula. O sinal é determinado pela leitura do sensor de chama. Se há chama, o sensor envia um sinal e a válvula permanece aberta. Ao se extinguir a chama, corta-se o sinal e a válvula se fecha.

Para permitir a ignição, sem a presença de chama, opera-se o temporizador, abrindo a válvula solenóide pelo tempo suficiente para a ignição. Se esta não ocorre após alguns segundos, o fornecimento de gás é cortado pela válvula solenóide.

4.5.5 Método de ensaio

O gaseificador é inicialmente deve ser pré-aquecido até a temperatura de leito de 750 °C. Esta temperatura evita que, com a alimentação da biomassa, a temperatura do leito caia a níveis inferiores a 700 °C, o que prejudicaria a gaseificação. Acende-se o *flare* e se inicia a alimentação da biomassa lentamente até alcançar o fator de ar desejado. 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. O procedimento de coleta de dados se repete por pelo menos seis vezes, para tratamento estatístico.

Findo o ensaio, faz-se a manutenção do equipamento, o que geralmente toma dois dias de trabalho.

Opera-se os ensaios conforme seqüência planejada no ítem 4.4, e segue-se a análise estatística dos dados, o cálculo dos parâmetros e a construção dos gráficos.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Conforme descrito no item 4.2, dificuldades técnicas prejudicaram os testes do gaseificador. Além disso, os testes foram temporariamente proibidos devido a um vazamento ocorrido em um dos ensaios (o que resultou em forte cheiro de alcatrão espalhado pela Faculdade de Engenharia Mecânica). Desta forma, não foi possível realizar a seqüência experimental planejada no item 4.4. Os poucos dados obtidos, contudo, serviram para balizar a análise econômica e a dificuldade de encontrá-los serviu para as conclusões de viabilidade técnica. Conseguiu-se assim o objetivo do estudo, uma primeira análise de viabilidade da planta-piloto.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A caracterização da biomassa independe dos testes de gaseificação e obteve tratamento estatístico adequado.

ANÁLISE IMEDIATA

O capim-elefante obteve a seguinte composição, comparada à da cana-de-açúcar. Os resultados podem ser vistos na tabela 5.1:

| Análise Imediata | Capim-elefante | Bagaço-de-cana [SÁNCHEZ, 1998] |
|----------------------|----------------|--------------------------------|
| Umidade (%b.s.) | 10,8% | - |
| Carbono fixo (%b.s.) | 8,4% | 15,0% |
| Voláteis (%b.s.) | 82,6% | 73,8% |
| Cinzas (%b.s.) | 10,9% | 11,3% |

Tabela 5.1 - Análise imediata.

Verifica-se na tabela um alto teor de cinzas que, sob elevadas temperaturas, pode-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^oC.

ANÁLISE ELEMENTAR

Os resultados fornecidos pela Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP são apresentados abaixo. Pode-se notar que os dados são semelhantes ao do bagaço-de-cana.

| Análise Elementar | Capim-elefante | Bagaço-de-cana [SÁNCHEZ, 1998] | Bagaço-de-cana [MINCOVA, 1999] |
|-------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Carbono | 40,6% | 44,8% | 47,3% |
| Hidrogênio | 5,9% | 5,3% | 6,2% |
| Nitrogênio | 1,5% | 0,4% | 0,3% |
| Oxigênio* | 52,0% | 39,6% | 46,2% |

* por diferença

Tabela 5.2 - Análise elementar.

PODER CALORÍFICO

O resultado é apresentado na tabela 5.3, comparado ao do bagaço-de-cana.

| | Capim-elefante | Bagaço-de-cana [SÁNCHEZ, 1998] |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Poder Calorífico Superior (MJ/kg) | 14,6 | 19,1 |
| Poder Calorífico Inferior (MJ/kg) | 13,4 | 17,9 |

Tabela 5.3 - Poder calorífico.

GRANULOMETRIA

Os resultados da análise granulométrica do capim-elefante utilizado, estão na tabela 5.4. O resultado mostra um diâmetro de partícula concentrado entre 0,25 e 2,00 mm, semelhante aos encontrados por Sánchez [1994, p.45].

| Granulometria | | | |
|---------------------|---------|--------------------------|--------------------|
| Abertura da Peneira | Dp [mm] | Fração Retida (em massa) | Fração acima de Dp |
| | 0,000 | 1,0% | 100,0% |
| | 0,250 | 0,7% | 99,0% |
| | 0,297 | 4,4% | 98,3% |
| | 0,282 | 3,2% | 93,9% |
| | 0,840 | 1,3% | 90,8% |
| | 1,000 | 3,4% | 89,4% |
| | 1,680 | 80,5% | 86,1% |
| | 6,350 | 5,6% | 5,6% |

Tabela 5.4 - Resultados da granulometria do capim-elefante.

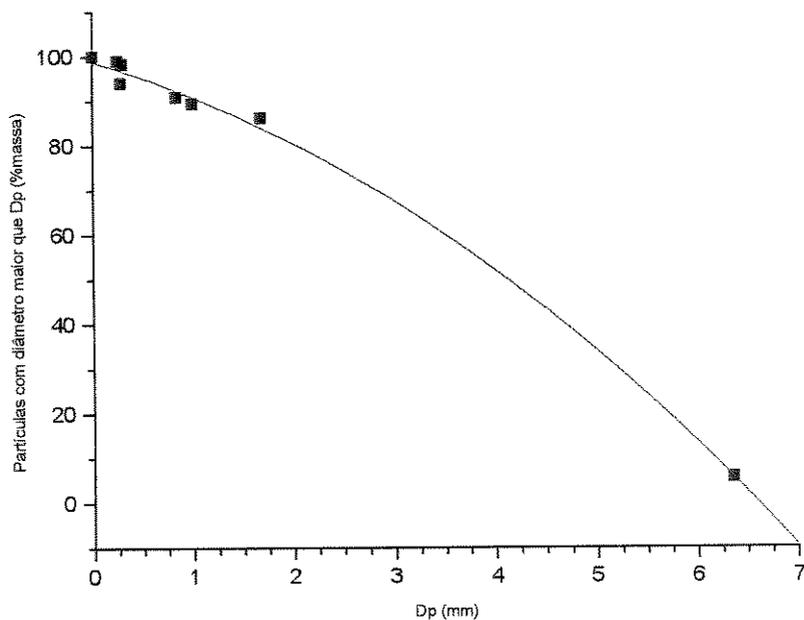


Figura 5.1 - Resultado da análise granulométrica para o capim-elefante.

5.2 PERFIL DE TEMPERATURAS

O perfil de temperaturas do teste pode ser visto na figura 5.2. Percebe-se claramente o longo tempo de aquecimento do reator e a demora para a temperatura do leito (termopares 1 e 3) alcançar a marca de 750 °C. Às 21:50 a chama de pré-aquecimento se apaga e torna-se necessário iniciar a alimentação de capim-elefante para manter a temperatura e conseguir realizar o teste de gaseificação. O último pico de temperaturas (22:56) ocorreu no fim da alimentação, com o início da combustão completa do capim. Com o fim desta queima, a temperatura começa novamente a cair.

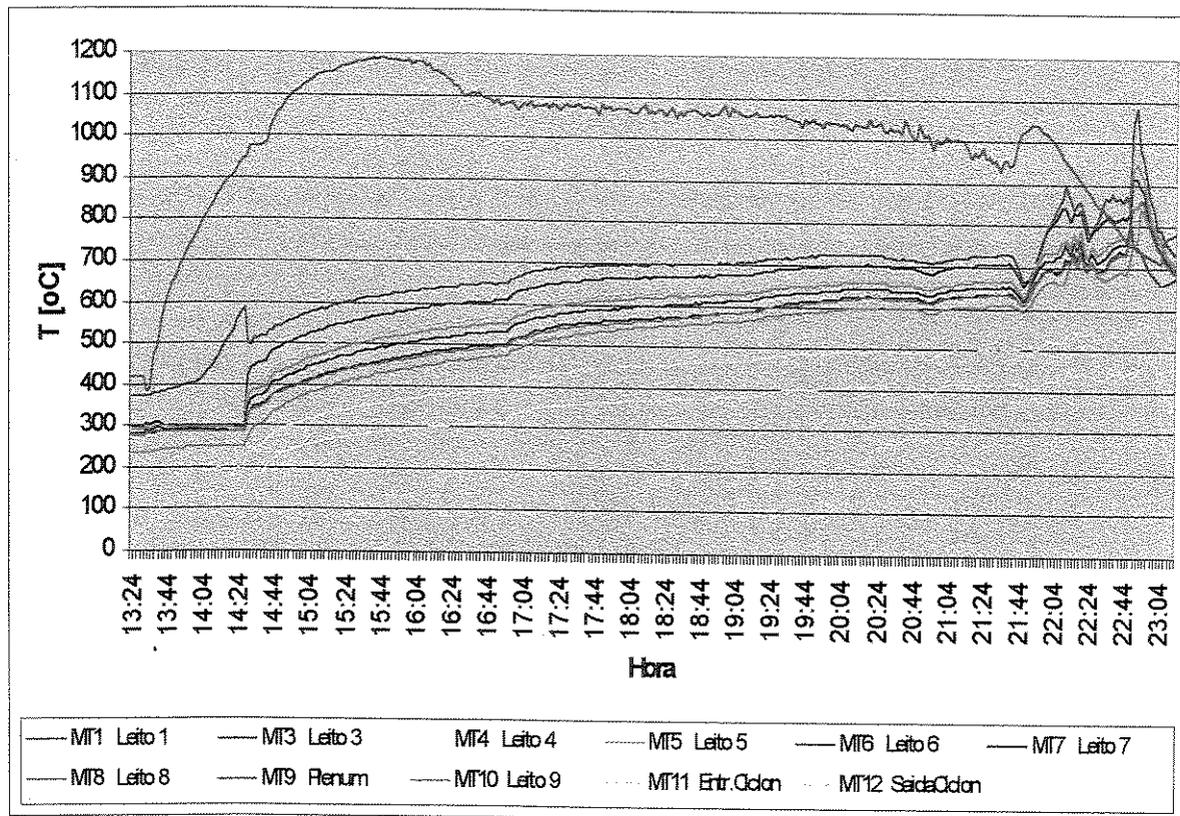


Figura 5.2 - Perfil de temperaturas.

5.3 ANÁLISE DO GÁS

Os resultados de composição de gás do único teste satisfatório são apresentados na tabela 5.5. Os valores destacados foram os selecionados como representativos para o cálculo da média. O poder calorífico foi calculado pela equação 4.9. As condições de operação do teste 2 podem ser vistas na tabela 5.6.

| Hora | H2 | O2 | N2 | CH4 | CO | CO2 | PCI [MJ/Nm3] |
|---------------|------|------|-------|------|-------|-------|--------------|
| 22:30 | 4,59 | 2,64 | 65,14 | 1,93 | 15,14 | 10,56 | 3,09 |
| 22:36 | 4,17 | 2,83 | 65,65 | 0,70 | 18,63 | 8,03 | 3,05 |
| 22:41 | 4,64 | 4,24 | 63,57 | 1,59 | 17,90 | 8,07 | 3,32 |
| Média | 4,46 | 3,24 | 64,78 | 1,41 | 17,22 | 8,89 | 3,16 |
| Desvio Padrão | 0,26 | 0,87 | 1,08 | 0,63 | 1,84 | 1,45 | 0,15 |

Tabela 5.5 - Resultados do teste 2.

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Densidade da biomassa | 94 kg/m ³ |
| Vazão mássica de biomassa | 96,7 kg/h |
| Vazão de Ar | 116,6767 Nm ³ /h |
| Fator de Ar | 0,33 |
| Vazão de Gás | 117,7054 Nm ³ /h |
| Potência Térmica (Q _{util}) | 104,4451 kW |
| PCS da biomassa | 3507,71 cal/g |
| | 14662,23 kJ/kg |
| PCI da biomassa | 13374,54 kJ/kg |
| Eficiência a frio | 28,2 % |

Tabela 5.6 - Condições de operação do teste 2.

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE ECONÔMICA

Este estudo analisa a viabilidade de operar o grupo gerador de maneira híbrida, misturando 70% gás de biomassa e 30% diesel. Para isto, ao grupo gerador seria acoplado um gaseificador de biomassa, utilizando o capim-elefante como matéria-prima. Com os dados obtidos da análise técnica, foi dimensionado um grupo-gerador para ser acoplado ao gaseificador. Os custos da construção, operação e manutenção de tal planta-piloto foram levantados e foi feita uma análise da viabilidade econômica do projeto para diversos cenários.

O uso de um motor diesel, operando de maneira híbrida é apresentado na literatura [MUKUNDA, 1992; FERNANDES *et* SÁNCHEZ, 1999]. Como a energia de ativação dos componentes combustível do gás produto (CH_4 e CO) é alta, torna-se necessária fagulha para ativar a combustão. Tal fagulha é fornecida no ciclo diesel pela ignição do diesel presente na mistura. A opção diesel na literatura ocorre porque, fora do Brasil, são produzidos comercialmente apenas grupo-geradores a diesel. Somente aqui há opção para gasolina e álcool.

6.1 Equacionamento

Valor Temporal do Capital

Em análises econômicas, o investidor (ou consumidor) sempre está diante de opções de como, quando e onde aplicar recursos (dinheiro, mão-de-obra, compra e venda de bens, uso do tempo, uso de recursos naturais, etc.). Uma família pensaria, por exemplo, se deveria alocar seus recursos para comprar uma nova máquina de lavar roupa ou, então, alocá-los em uma poupança ou em fundos de investimento.

Nos meios produtivos, o dinheiro passa a se chamar capital e possui a capacidade de ser alocado para se multiplicar, produzindo mais recursos. Desta forma, uma certa quantia de dinheiro deve ter um valor diferente, se utilizado já no momento presente para produzir mais capital ou se guardado para uso em um momento futuro.

Como o investidor espera um retorno (multiplicação do capital) em um momento futuro, surgiu o conceito de taxa de retorno, custo de capital ou juros (i). O investidor pode emprestar seu capital, esperando o retorno na forma de juros, ou então pode investi-lo no setor produtivo, esperando o retorno na forma de lucros.

Fluxo de Caixa

Construção de uma linha de tempo onde as despesas e investimentos são simbolizados como setas para baixo (valores negativos) e as receitas e economias são simbolizadas como setas para cima (valores positivos). Determina-se desta forma os custos anuais de operação (mão-de-obra + insumos + combustíveis), manutenção e investimento; e as receitas ou economias anuais obtidas. A notação utilizada é de "final-de-período", ou seja, os fluxos de caixa são considerados como ocorrendo no final de cada ano. O investimento inicial ocorre no ano zero.

Valor Presente (VP)

Considerando o valor temporal do dinheiro, tem-se de corrigir os valores futuros (VF) para seu valor presente (VP), distante n períodos de tempo, aplicando uma taxa de retorno de capital (ou custo de capital) i . Reorganizando-se a equação podemos encontrar o valor futuro de um dado valor presente.

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} \quad (6.1)$$

Valor Presente Líquido (VPL)

Somam-se os VP positivos (receitas e economias) e negativos (despesas e investimentos). Desta forma pode-se avaliar se, sob um determinado custo de capital, o investimento presente e as despesas futuras são pagos pelas receitas e economias futuras.

$VPL > 0 \Rightarrow$ investimento vantajoso

$VPL < 0 \Rightarrow$ investimento economicamente desvantajoso

Anualidades constantes (séries anuais uniformes)

Fluxos de caixa que se repetem constantes a cada ano podem ter seu VP calculado por meio da soma de uma progressão geométrica. De outra forma, podemos encontrar as anualidades equivalentes a um determinado investimento inicial, aplicando a mesma fórmula.

$$VP = \frac{A}{(1+i)} + \frac{A}{(1+i)^2} + \dots + \frac{A}{(1+i)^n} = \sum_{t=1}^n \frac{A}{(1+i)^t} \quad (6.2)$$

$$VP = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (6.3)$$

Taxa Interna de Retorno

Pode-se também calcular o i para que $VPL = 0$, ou seja, qual o retorno financeiro sobre o capital investido. Neste caso, costuma-se chamar o i de "Taxa Interna de Retorno".

Ele é calculado, a partir das equações acima, de duas formas:

- método iterativo por tabelas;
- uso de calculadoras/computadores.

Pela praticidade, será utilizada neste estudo uma planilha eletrônica para realizar todos os cálculos econômicos. Como ferramenta auxiliar, dispõe-se de uma calculadora financeira, modelo Casio FC-100.

Tempo de Retorno do Investimento

Seguindo o raciocínio do cálculo da taxa interna de retorno, pode-se calcular o tempo de retorno do investimento inicial para uma esperada taxa i . Este tempo representa o momento quando, sob uma taxa esperada, o $VPL=0$ ou, como se diz na linguagem cotidiana, "paga-se o investimento".

Escolha entre investimentos mutuamente excludentes

- Método VPL: escolha do maior valor (ou menor custo);
- Método dos Equivalentes Anuais (transforma-se o VP do investimento em anualidades)

$$A_{\text{invest}} = \text{VP} \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (6.4)$$

$$\text{Custo Anual: } CA = A_{\text{invest}} + A_{\text{OM}} + A_{\text{amb}} \quad (6.5)$$

Sendo A_{OM} o custo anual de operação e manutenção (incluindo insumos e mão-de-obra) e A_{amb} o custo dos impactos ambientais. O custo ambiental pode ser negativo, caso seja um projeto que comparativamente reduza os danos ambientais.

Opta-se pelo menor Custo Anual.

Custo da eletricidade

$$Y_e = CA/EA \quad (6.6)$$

onde EA = energia produzida por ano.

6.2 Método de análise

1. Levantamento dos custos da planta piloto;
2. Escolha dos cenários (vida útil do equipamento, custo de capital, número de horas em operação, preços do combustível);
3. Cálculo do CA para os cenários escolhidos;
4. Cálculo do custo da eletricidade para os cenários escolhidos;
5. Comparação com o custo de outros energéticos e de plantas de gaseificação de biomassa;
6. Conclusões sobre a viabilidade e possibilidades de desenvolvimento da tecnologia.

6.3 Análise da Viabilidade Econômica

Como alternativa para a geração elétrica por um grupo gerador 100% diesel, foi proposta a utilização de um gaseificador de biomassa para gerar um gás de baixo poder calorífico, substituindo o diesel em 70%.

Apesar dos poucos testes terem indicado uma baixa eficiência para o gaseificador, para estimativa da produção elétrica, foi considerada a eficiência esperada do gaseificador de 40%, eficiência esta encontrada em testes em plantas anteriores.

Os dados obtidos foram postos em planilha Excel. Foi calculado o custo anual do investimento e, por fim, o custo da eletricidade produzida, em função do custo de capital e em função do preço do diesel. Obtivemos assim, uma série de valores representando diversos cenários econômicos, para auxiliar a tomada de decisão.

Custos de investimento

Equipamento

Os dados do gaseificador foram obtidos com o Laboratório de Combustíveis e Combustão da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp [SÁNCHEZ *et al.*, 1994; FINEP, 1998]. O grupo gerador escolhido foi o modelo MWM-8173. Os custos podem ser vistos na tabela 6.1. Pode-se, com os dados levantados, estabelecer dois modelos de equipamento: a planta-piloto científica e a planta-piloto rural. A planta-piloto científica incluiria todos os custos com equipamentos necessários para os testes referentes a esta pesquisa. A planta-piloto rural excluiria itens para caracterização de biomassa e o cromatógrafo, pois consideraria o equipamento já otimizado. Desta forma, se porventura fosse necessário um teste de caracterização de biomassa ou análise do gás, seria contratado serviço de terceiros, incluso na estimativa de manutenção do equipamento.

Vale ainda dizer que os custos da planta-piloto científica não refletem todos os custos de pesquisa e desenvolvimento do gaseificador. Eles refletem apenas os custos do equipamento científico utilizado e, como visto a seguir, uma mão-de-obra mínima necessária para operar o equipamento.

| Custos do Equipamento | |
|---|------------------|
| (valores em R\$, exceto quando discriminado. Para cálculos, 1 US\$ = 1,774 R\$) | |
| Planta Piloto | |
| chapas e tubos | 11.346,34 |
| caldeiraria do gaseificador e soldagem | 9.873,00 |
| revestimento interno (refratários) | 3.020,72 |
| isolamento térmico e vedação | 1.512,50 |
| motovariadores | 5.556,50 |
| sistema de ignição com fotocélula e eletroválvula | 891,20 |
| indicador de vazão de água e de gás | 66,30 |
| compressor de ar | 5.000,00 |
| alumina | 750,00 |
| sub-total | <u>38.016,56</u> |
| Grupo-gerador diesel | |
| MWM-8173 (81/73 kVA) | 18.480,00 |
| Prédio | |
| estrutura metálica | 14.280,00 |
| trolley com talha | 275,90 |
| sub-total | <u>14.555,90</u> |
| Sistema de Aquisição de Dados | |
| mainframe c/ 10 slots | 4.418,79 US\$ |
| conversor A/D | 610,00 US\$ |
| amplificador termopar (16 canais) | 1.326,41 US\$ |
| misturador de sinais (16 canais) | 945,99 US\$ |
| programa de aquisição | 1.039,05 US\$ |
| microcomputador | 4.453,59 US\$ |
| tacômetro magnético | 425,50 US\$ |
| condicionador de sinal do tacômetro | 977,50 US\$ |
| termopares tipo K | 1.464,00 R\$ |
| fluxímetros | 583,00 US\$ |
| pressostato | 1.743,07 R\$ |
| sub-total | <u>29.426,49</u> |
| Total planta-piloto | R\$100.478,95 |
| Capacidade Instalada (estimada) | 1.376,42 R\$/kWe |
| Obs: | |
| custos não otimizados | |
| equipamento científico inclui ainda cromatógrafo estimado em R\$ 30.000,00 | |

Tabela 6.1 - Custos de Investimento

Os custos de operação e manutenção

Insumos

O capim-elefante é normalmente utilizado como complemento na ração dos animais. Para os fins do PIB, o IPT, junto ao Instituto de Zootecnia, estimou o custo da produção do capim em R\$ 16,35 por tonelada de matéria seca. O diesel foi incluído como 30% do consumo do grupo-gerador e um adicional de 10% sobre o total anual de insumos foi considerado, para representar outros insumos não discriminados (lubrificantes, água, etc.).

Mão-de-obra

Durante os testes experimentais da planta-piloto, pode-se perceber qual a necessidade de mão-de-obra para sua operação. O equipamento pode ser perfeitamente operado com um técnico e um auxiliar (estagiário ou operador não-qualificado). 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 seria necessária. Se operado em dois turnos, poder-se-ia contratar mais um auxiliar, pois a presença do técnico seria dispensável nos momentos que o equipamento estivesse em regime. Os custos podem ser vistos na tabela 6.2. Para a planta-piloto científica, não foi considerado o custo de mão-de-obra especializada para desenvolver o projeto.

Devido ao longo tempo necessário para o aquecimento do leito, sugere-se que o gaseificador opere durante o maior número possível de horas por dia, minimizando os custos e o tempo de pré-aquecimento. Os custos de operação foram então calculados para 16 horas diárias de operação, equivalentes a dois turnos de trabalho.

| Custos de Mão-de-obra | | | | |
|------------------------------|--------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | 1 turno | | 2 turnos | |
| | Salário | Encargos | Salário | Encargos |
| Técnico | R\$420,00 | R\$147,00 | R\$420,00 | R\$147,00 |
| Auxiliar 1 | R\$130,00 | R\$45,50 | R\$130,00 | R\$45,50 |
| Auxiliar 2 | R\$0,00 | R\$0,00 | R\$130,00 | R\$45,50 |
| Mensal: | R\$550,00 | R\$192,50 | R\$680,00 | R\$238,00 |
| Anual c/13o.: | R\$7.150,00 | R\$2.502,50 | R\$8.840,00 | R\$3.094,00 |
| Total anual: | <u>R\$9.652,50</u> | | <u>R\$11.934,00</u> | |
| Horas/turno | 8 h | | | |

Tabela 6.2 - Custos de Mão-de-obra para planta rural.

Manutenção

Mukunda [1992] utiliza em seus cálculos um custo de manutenção de 10% do valor do equipamento. Consideramos tal valor adequado e o utilizamos nos cálculos.

Custos ambientais

A substituição parcial do diesel também deve contribuir para economia energética e para a redução do nível de dióxido de carbono na atmosfera. No escopo deste trabalho, contudo, não foram considerados os custos evitados de danos ambiental (não aumento da taxa de emissão de dióxido de carbono), nem de eventuais impactos ambientais da instalação e operação da planta-piloto.

6.4 Resultados Econômicos

Os custos anuais de produção e o custo da eletricidade foram tabelados para seis cenários e são apresentados na tabela 6.3. A composição dos custos da planta científica é vista no gráfico 6.1. Observa-se como o equipamento de análise científica (sistema de aquisição de dados e cromatógrafo) compõem boa parte do custo do projeto. Os custos começam a ser reduzidos ao se construir uma planta mais simples, para operação no meio rural (denominada aqui planta rural).

| Custo de Produção 70% gás -30% diesel - Planta científica | | |
|---|-----|----------------------|
| Custo Total de Capital | R\$ | 130.478,95 |
| Custo Anual de Manutenção | R\$ | 13.047,89 |
| Custo Anual de Mão-de-obra | R\$ | 11.934,00 |
| Custo Anual de Insumos | R\$ | 30.646,27 |
| Custo Anual de Operação | R\$ | 55.628,17 |
| Custo Anual Equivalente (10 anos, valor residual R\$ 0,00) Custo da energia Ye [R\$/kWh] | | |
| i = 5% | R\$ | 72.525,79 0,182 |
| i = 10% | R\$ | 76.863,01 0,193 |
| i = 15% | R\$ | 81.626,36 0,205 |
| Custo Anual Equivalente (20 anos, valor residual R\$ 0,00) | | |
| i = 5% | R\$ | 66.098,13 0,166 |
| i = 10% | R\$ | 70.954,17 0,178 |
| i = 15% | R\$ | 76.473,67 0,192 |

Tabela 6.3 - Custos Anuais de Produção para Planta Científica

| Custo de Produção 70% gás -30% diesel - Planta rural | | |
|---|-----|----------------------|
| Custo Total de Capital | R\$ | 71.052,46 |
| Custo Anual de Manutenção | R\$ | 7.105,25 |
| Custo Anual de Mão-de-obra | R\$ | 11.934,00 |
| Custo Anual de Insumos | R\$ | 30.646,27 |
| Custo Anual de Operação | R\$ | 49.685,52 |
| Custo Anual Equivalente (10 anos, valor residual R\$ 0,00) Custo da energia Ye [R\$/kWh] | | |
| i = 5% | R\$ | 58.887,13 0,148 |
| i = 10% | R\$ | 61.248,98 0,154 |
| i = 15% | R\$ | 63.842,87 0,160 |
| Custo Anual Equivalente (20 anos, valor residual R\$ 0,00) | | |
| i = 5% | R\$ | 55.386,95 0,139 |
| i = 10% | R\$ | 58.031,31 0,146 |
| i = 15% | R\$ | 61.036,96 0,153 |

Tabela 6.4 - Custos Anuais de Produção para Planta Rural

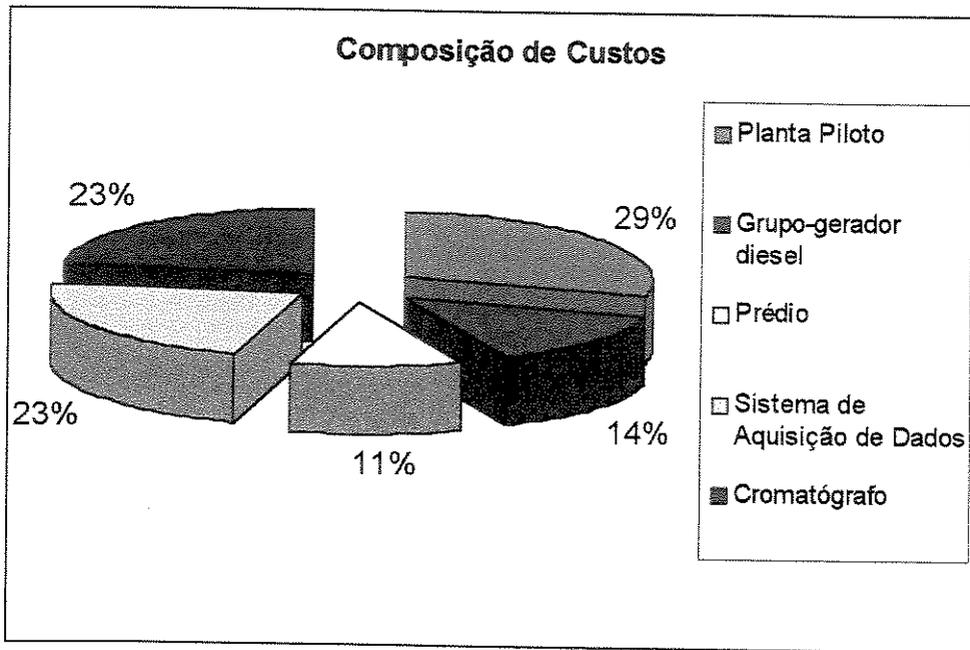


Figura 6.1 - Composição de custos para planta científica

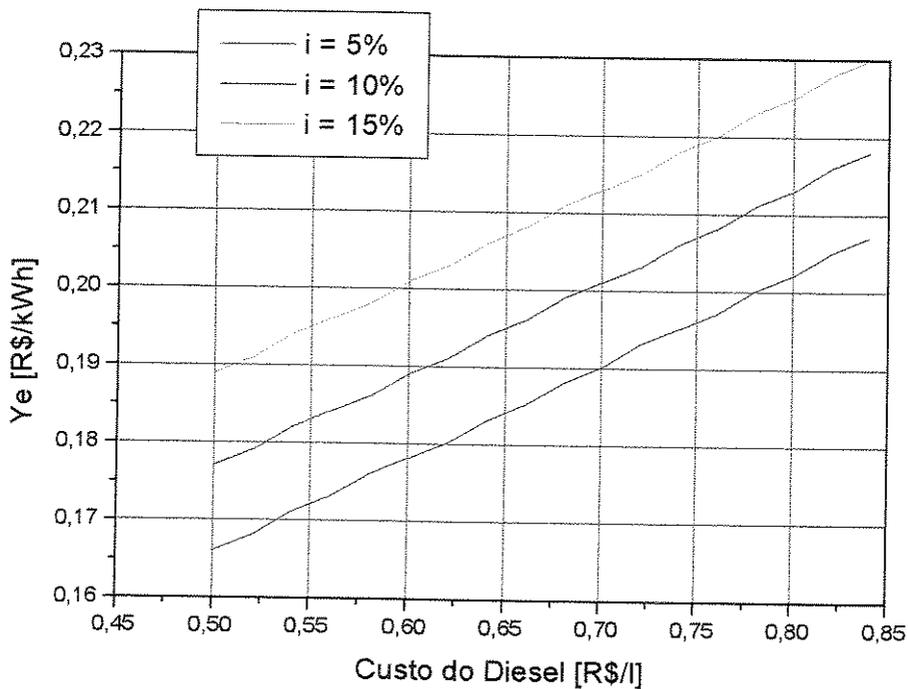


Figura 6.2 - Custo da eletricidade em função do custo do diesel, para 3 taxas internas de retorno.

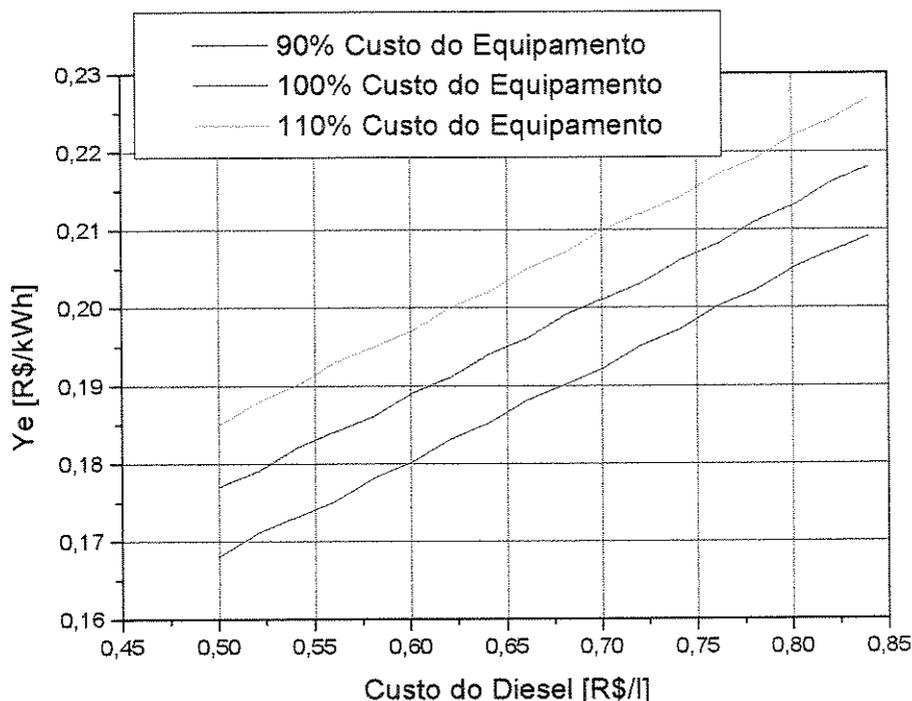


Figura 6.3 - Variação do custo da eletricidade em relação ao custo do equipamento (vida útil 10 anos, $i = 10\%$).

Na tabela 6.5 pode-se comparar os resultados, em US\$, com os de outras plantas da revisão de literatura. Observa-se porém que não foi considerado a variação do valor da moeda americana, ou seja, para uma comparação mais precisa, os dados da revisão devem ser contemporizados para o valor do dólar do 1º trimestre de 2000. Seria basicamente considerar a inflação norte-americana no período, mas não foi possível obter estes dados para o presente estudo.

| Comparação com outras Plantas | | | |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------------|---------------|
| | Capacidade [kW] | Custo de Capital [US\$/kW] | Ye [US\$/kWh] |
| Planta Científica | 73 | 777,64 | 0,101 |
| Planta Rural | 73 | 549,90 | 0,082 |
| Mukunda [1992] | 3,7 | 1411,70 | 0,159 |
| Mukunda [1992] | 100 | 1224,10 | 0,074 |
| Craig et al. [1996] (1a. Planta) | 32.000 | 2800 | nd |
| Craig et al. [1996] (enésima Planta) | 32.000 | 1500 | 0,070 |

Tabela 6.5 - Comparação dos resultados econômicos.

6.5 POSSIBILIDADES DE FINANCIAMENTO

FNMA

A alternativa de financiamento do Fundo Nacional do Meio Ambiente [MMA, 2000] mostra-se possível para organizações (desde que sem fins lucrativos) que estejam interessadas em desenvolver e difundir tecnologias para geração descentralizada baseada na biomassa ou manejo florestal para uso em geração da biomassa. As tecnologias difundidas poderiam mostrar uma alternativa para pequenos ou médios proprietários rurais que desejassem gerar autonomamente sua eletricidade ou mesmo instalar uma pequena planta de cogeração.

O FNMA é o órgão oficial de apoio a projetos ambientais. É o único na esfera federal que tem a possibilidade de chegar a qualquer município do país, interligando as esferas de atuação da administração pública, das ONGs e da sociedade.

O FNMA foi criado em 1989. Seus recursos são provenientes de empréstimos do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), dotações orçamentárias da União, doações, contribuições em dinheiro, bens móveis e imóveis recebidos de pessoas físicas ou jurídicas, rendimentos de qualquer natureza decorrentes de aplicações de seu patrimônio e outros destinados por lei.

Como instrumento viabilizador da Política Nacional do Meio Ambiente, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, seu objetivo principal é a descentralização, mediante o apoio financeiro a projetos de médio e pequeno portes que visem o uso sustentável dos recursos naturais, a preservação ou a recuperação da qualidade ambiental no país.

O apoio do FNMA pode ser destinado tanto a organizações governamentais quanto a não governamentais (desde que não tenham fins lucrativos e sejam de caráter ambientalista). Em vista disto, não é uma alternativa de financiamento para empresas que queiram se tornar geradoras descentralizadas de energia elétrica, mesmo se através de fontes renováveis.

Devido ao grande espectro de problemas ambientais, foram estabelecidas diretrizes contemplando projetos inovadores, dentro das seguintes áreas:

- Extensão Florestal, Manejo Sustentável e Conservação dos Recursos Naturais Renováveis;
- Unidades de Conservação;
- Educação Ambiental e Divulgação;
- Controle Ambiental;
- Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico;
- Fortalecimento e Desenvolvimento Institucional.

BNDES

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social mostra-se como alternativa para financiar o projeto de uma empresa que objective instalar uma planta de gaseificação de biomassa no Brasil.

As duas linhas de financiamento para este caso seriam o FINAME (financiamentos, sem limite de valor, para aquisição de máquinas e equipamentos novos, de fabricação nacional ou importados, e leasing de equipamentos nacional através de instituições financeiras credenciadas) e o FINEM (Financiamento a Empreendimentos; financiamentos superiores a R\$ 7 milhões, inclusive aquisição e leasing de equipamentos, diretamente com o BNDES ou através das instituições financeiras credenciadas).

Para aquisição de equipamentos agrícolas, existe também o FINAME Agrícola (financiamentos realizados através de instituições financeiras credenciadas, sem limite de valor, para aquisição de máquinas e implementos agrícolas novos, de fabricação nacional.). Um produtor rural poderia através desta linha de financiamento adquirir, por exemplo, um grupo gerador (a empresa Stemac Grupos Geradores está cadastrada no BNDES) para converter o gás produzido em um gaseificador de biomassa, ou gerado em biodigestores.

As taxas do BNDES constam basicamente de três parcelas: Custo Financeiro + Spread Básico + Spread do Agente. O custo financeiro consta da taxa de juros de longo prazo do BNDES, cotada em dezembro de 1998 em 18,06%. O Spread Básico Básico está

em 2,5%, podendo ser em 1% para programas qualificados como de desenvolvimento regional. O Spread do agente, se realizado pelo Fundo de Garantia para Promoção da Competitividade-FGPC será no máximo 2,5%; se realizado por outra instituição credenciada, a taxa deverá ser negociada entre esta instituição e o cliente. Estas e outras informações são obtidas no *site* do BNDES [1999].

A TJLP está elevada devido ao atual cenário econômico. Entre junho e agosto de 1998, quando esta análise foi iniciada, a TJLP estava cotada em 10,63% e, em setembro e novembro desse mesmo ano, em 11,68%. Houve uma grande alta em dezembro de 1998, devido à desvalorização do Real. Atualmente (1º trimestre de 2000), a taxa já recuou para valores próximos aos de dois anos atrás, mas ainda se mostra alta, não estimulando novos investimentos produtivos.

A variação da TJLP pode ser vista na tabela 6.6, obtida do *site* do BNDES [BNDES, 1999].

| | |
|-----------------|--------|
| dez/95 a fev/96 | 17,72% |
| mar a mai/96 | 18,34% |
| jun a ago/96 | 15,44% |
| set a nov/96 | 14,97% |
| dez/96 a fev/97 | 11,02% |
| mar a mai/97 | 10,33% |
| jun a ago/97 | 10,15% |
| set a nov/97 | 9,40% |
| dez/97 a fev/98 | 9,89% |
| mar a mai/98 | 11,77% |
| jun a ago/98 | 10,63% |
| set a nov/98 | 11,68% |
| dez/98 | 18,06% |
| jan a mar/99 | 12,84% |
| abr a jun/99 | 13,48% |
| jul a set/99 | 14,05% |
| out a dez/99 | 12,50% |
| jan a mar/00 | 12,00% |

Tabela 6.6 - Evolução da TJLP.

6.6 A GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA COMO PROJETO DE DESENVOLVIMENTO RURAL

A gaseificação da biomassa se apresenta como uma das opções energéticas para o desenvolvimento rural. O progresso do setor agrícola de um país é pré-condição para se estimular o crescimento nos outros setores econômicos, criando assim um superávit de produtos para expandir a população urbana e sustentar o crescimento dos setores industrial e de serviços [HESS *et* ROSS, 1997]. Além disto, na maioria dos países em desenvolvimento, a agricultura é o maior produto de exportação. Desta forma, um aumento da produtividade agrícola criaria um superávit na balança de transações correntes (exportações menos importações) daquele país.

Mais do que números e cifras, o desenvolvimento rural não significa apenas resultados econômicos para o país. Ele resulta também em benefícios sociais e econômicos para a população local e um eventual aumento nos respectivos índices de desenvolvimento humano.

O conceito de desenvolvimento sustentável significa suprir as necessidades das gerações presentes sem comprometer o suprimento das necessidades das gerações futuras. Qualquer tipo de crescimento econômico que diminua a qualidade de vida das gerações presente e futura deveria ser reconsiderado e substituído por tecnologias e alternativas de desenvolvimento mais limpas e saudáveis.

Como o progresso tecnológico e o aumento da produto interno bruto não trazem, por si mesmos, um comportamento saudável em relação aos recursos naturais e ao meio ambiente [HESS *et* ROSS, 1997], devem ser desenvolvidas políticas governamentais mais sábias em relação ao meio-ambiente, assim como desenvolvida também uma política educacional para promover a consciência de desenvolvimento sustentável.

Políticas para um desenvolvimento sustentável deveriam resultar em aumento da eficiência do uso de recursos naturais e prover os meios para satisfazer as necessidades básicas da população. Tais políticas deveriam focar-se nos custos econômicos do desenvolvimento (eletricidade, preços, subsídios, taxas, etc.), nos direitos de usufruto dos recursos, da terra e da propriedade e, finalmente, nas tecnologias necessárias para o

desenvolvimento. Deve-se assim promover pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que conservem os recursos naturais e preservem o meio-ambiente.

As políticas para se desenvolver a tecnologia da gaseificação e para a construção de plantas-piloto para atender comunidades isoladas deveriam considerar os seguintes pontos:

1. Quem deveria se responsabilizar por tal desenvolvimento e implantação? Deveria o projeto ser encabeçado pela iniciativa privada, pública ou um *mix* de atores estatais e privados?
2. Dever-se-ia treinar a mão-de-obra local para construir e operar o maquinário, ou dever-se-ia deslocar mão-de-obra de outras regiões?
3. Utilizando-se a mão-de-obra local, como treiná-la?
4. Como obter o financiamento para o projeto?
5. Quais são os problemas logísticos?
6. Qual seria a melhor opção de biomassa como combustível?

As respostas para estas questões variam de região para região, assim como pela presença de atores com interesses conflitantes.

Um programa nacional de desenvolvimento da gaseificação da biomassa como alternativa para geração descentralizada de energia e eletrificação rural seria estrategicamente interessante para o Brasil.

Precisaria ser definida então uma política para geração de energia a partir do uso da biomassa. Esta política não deve se restringir à tecnologia da gaseificação da biomassa, mas abranger todas as formas de utilização, por ser esta uma questão estratégica não somente para a geração de energia quanto também para a questão do desenvolvimento sustentável.

Uma política para geração de energia pelo uso da biomassa permitiria o desenvolvimento e eletrificação do interior do país, principalmente em pequenas comunidades rurais e geraria empregos no meio rural, evitando o êxodo rural. Empregos também seriam gerados na indústria com a pesquisa, desenvolvimento e produção da

tecnologia. O território nacional permite o desenvolvimento de diversas culturas vegetais e a alta incidência de radiação solar permite uma produção a baixos custos da biomassa.

O desenvolvimento da biomassa como fonte energética permitiria uma menor dependência do petróleo na matriz energética, diminuindo os impactos de um eventual aumento internacional do preço do petróleo e mostrando-se como alternativa sustentável para as limitações da energia hidroelétrica. Seria portanto, uma fonte energética renovável, adequada para países em desenvolvimento e mesmo países já desenvolvidos, com possibilidade de acesso barato e sustentável à biomassa.

Com a descentralização do setor elétrico, haveria uma tendência natural ao uso de pequenas centrais hidrelétricas ou termoelétricas, por serem estas tecnologias já dominadas e de menor custo de investimento, comparado às grandes hidrelétricas.

As PCH's dependeriam da viabilidade hidroelétrica da região, tornando as termoelétricas opção preferencial para muitas regiões. Esta opção aumentaria a dependência brasileira de combustíveis fósseis, não sendo este porém um modelo de desenvolvimento sustentável.

Seria interessante então desenvolver um modelo energético sustentável, baseado em fontes alternativas para geração secundária descentralizada de energia elétrica. A descentralização, se devidamente orientada, permitiria um desenvolvimento mais rápido para regiões mais interiores do país.

Primeiramente, poderia ser criada um órgão para coordenar o programa. Considerando o cenário político atual, o investimento e a responsabilidade pelo desenvolvimento dos gaseificadores acabaria sendo privado. Porém, para coordenar os esforços e investimentos na área, deveria haver a presença estatal. Desta forma, o órgão coordenador seria possivelmente agência estatal. Digamos que seja criada uma comissão para a biomassa, ligada talvez à ANEEL. Uma legislação adequada deveria ser criada então para incentivar a geração de energia por pequenos produtores ou comunidades rurais.

A Comissão deveria direcionar o financiamento. Talvez fosse possível criar uma linha especial de financiamento, pelo BNDES, para o desenvolvimento da tecnologia ou aquisição de equipamentos. Facilidades poderiam ser criadas para o pequeno gerador autônomo rural.

Para evitar o desmatamento para uso da biomassa, os interessados em gerar sua energia pela gaseificação da biomassa seriam cadastrados pela Comissão. Ficaria a cargo desta repassar o cadastro ao IBAMA, para que este fiscalize a exploração vegetal para gaseificação da biomassa. É energeticamente mais eficiente o uso de culturas energéticas especializadas, mas o extrativismo madeireiro é alternativa barata para o proprietário rural, apesar de criar sérios problemas ambientais devido ao desmatamento.

Para desenvolver culturas energéticas mais eficientes, a Comissão poderia mobilizar a EMBRAPA e o meio universitário. Este também poderia ser incentivado a desenvolver projetos para desenvolver a tecnologia dos gaseificadores.

Por fim, a Comissão deveria atuar para demonstrar e difundir a tecnologia no interior do país e, principalmente, criar programas de treinamento de operadores e técnicos para a operação e manutenção das plantas.

As políticas sugeridas podem ser encaminhadas para os órgãos competentes. Na Câmara dos Deputados em Brasília, três comissões poderiam propor projetos para implementação da eletrificação rural descentralizada por meio da gaseificação da biomassa [CÂMARA DOS DEPUTADOS,1998]:

- Comissão de Agricultura e Política Rural - responsável entre outras pela política de eletrificação rural e de organização do setor rural, pela política nacional de cooperativismo e das condições sociais no meio rural;
- Comissão de Minas e Energia - responsável pelo desenvolvimento de fontes alternativas de energia;
- Comissão de Desenvolvimento Urbano e Interior - responsável pelo desenvolvimento e integração de regiões, planos regionais de desenvolvimento econômico e social e incentivos regionais;

Epílogo

A humanidade vem construindo a sua sociedade, a sua civilização, utilizando os recursos naturais oferecidos pelo Planeta. Desde o início, graças a seu intelecto, o Homem foi capaz de explorar e transformar os recursos naturais para sua sobrevivência e conforto.

Infelizmente, o Homem nunca se preocupou em como explorar estes recursos de forma equilibrada, em harmonia com os sistemas biológicos da Terra. Hoje, a questão que nos é colocada de forma brilhante pelo prof. Mohamed [1998] é quando que nós Homens vamos nos comportar como “pais de família perante a Terra” ao invés de só explorar a sua “mesada”. Até quando e como podemos crescer a população humana? Qual a melhor maneira de coordenar os fatores de produção, consumo de recursos e emissão de resíduos? Ocorre um equilíbrio sistêmico na Natureza, equilíbrio este que o Homem ainda não conseguiu reproduzir na sua Sociedade, principalmente no carro-chefe de sua civilização: a grande cidade.

Seria impossível pensar na proliferação do atual modelo de desenvolvimento econômico “ocidental” para todos os países do globo. O planeta não teria capacidade de manter o nível de consumo de recursos naturais (principalmente não-renováveis) de, por exemplo, os EUA, que consomem sozinhos um terço da produção mundial de petróleo [MOHAMED, 1998].

Enquanto vários organismos internacionais tentam buscar soluções para implementar agendas de desenvolvimento sustentáveis, os EUA - devido a pressões da indústria local -, utilizam a força de sua política externa para sustar o avanço de tais programas.

Os programas de desenvolvimento sustentável propõem alternativas para o desenvolvimento sócio-econômico das populações humanas sem que haja um esgotamento de recursos naturais ou queda nos padrões de qualidade de vida devido à degradação ambiental.

Apesar de ser esta uma batalha de Armagedon, alguns passos importantes já estão sendo dados.

Em primeiro lugar, a ONU já começa a reestruturar e democratizar-se. Basta citar que o resultado do debate paralelo das ONG's foi incluído na Carta Oficial da Habitat II, Conferência das Nações Unidas para Estabelecimentos Humanos, realizada em Istambul, 1996.

Mesmo assim, apesar da crescente conscientização da comunidade internacional para a questão do desenvolvimento sustentável, continuam fortes as barreiras impostas pelas forças econômicas produtoras e pela falta de educação e conscientização das diversas populações do globo para o problema do desenvolvimento sustentável. As massas, sejam elas ricas, pobres, desenvolvidas ou de economias mais atrasadas, ainda não tomaram consciência da sua responsabilidade na mudança do paradigma de desenvolvimento da nossa civilização.

Acredito que a mudança deve ocorrer paralelamente no cenário macro e micro-político: as organizações internacionais responsáveis devem continuar e intensificar as agendas de implementação de programas de desenvolvimento sustentável com os diversos governos. Deve ocorrer também, de cima para baixo, uma intensificação no trabalho da Mídia para divulgar os problemas e conscientizar as populações. Os governos devem investir em pesquisa de novas alternativas locais para realizar um desenvolvimento sustentável. Por outro lado, no âmbito das comunidades, as lideranças e pequenas ONG's mais conscientizadas devem desenvolver programas de conscientização e atuação para mudar a modo como as pessoas destas comunidades interagem com o meio-ambiente.

Se tais passos não forem tomados com urgência (e talvez mesmo se os forem), a conscientização provavelmente ocorrerá através da vivência cada vez mais freqüente de catastrófes ambientais, cada vez mais custosas para a civilização humana. O sistema sempre tende ao equilíbrio. Seja com os Homens, ou sem eles.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES TÉCNICAS:

O gaseificador ainda apresenta problemas operacionais. Para torná-lo tecnicamente viável para eletrificação rural, algumas modificações devem ser consideradas:

- Aperfeiçoamento do silo de alimentação de biomassa. O silo deveria conter pás agitadoras para evitar que a biomassa se compacte (formando arcos) e não consiga ser alimentada corretamente ou, pior, entre em pirólise pelo fluxo reverso de gás quente. Uma opção para evitar a pirólise seria colocar um fluxo de ar secundário entrando no silo, aumentando sua pressão em relação à do leito fluidizado e, assim evitando o retorno de gases quentes.
- O silo também deve ser reprojetoado para permitir sua re-alimentação durante a operação, quando todo o capim tiver sido consumido. Uma opção seria construir uma antecâmara (um silo de reserva) com um sistema de comportas entre esta antecâmara e o silo de alimentação. O capim seria alimentado pela antecâmara, com a comporta fechada. Fechando-se a antecâmara, abrir-se-ia a comporta, alimentando o silo.
- O projeto de construção do gaseificador ainda baseia-se na experiência construtiva dos gaseificadores anteriores. Seria interessante um estudo de engenharia de fabricação para otimizar materiais e processos construtivos, permitindo uma otimização técnica e econômica.
- Devido ao longo tempo necessário para o aquecimento do leito, sugere-se que o gaseificador opere durante o maior número possível de horas por dia, minimizando os custos e o tempo de pré-aquecimento. Acredita-se também que, com alguns estudos de engenharia e melhorias técnicas, poder-se-ia reduzir o tempo de pré-aquecimento do leito.
- A eficiência encontrada ainda está aquém da esperada. Devem ser realizados mais testes para permitir a otimização operacional do equipamento.

- Otimizado o equipamento, propõe-se adquirir um grupo-gerador para testes de produção de energia elétrica.

7.2 CONCLUSÕES ECONÔMICAS:

A comparação com outras plantas, em US\$, se mostra muito favorável, principalmente considerando os custos atuais como custos de uma primeira planta. Os resultados econômicos mostram-se também favoráveis quando vistos sob o atual cenário brasileiro. A tarifa residencial da CPFL era de 0,17859 R\$/kWh em fevereiro de 2000. O presente estudo encontrou valores para o custo da eletricidade produzida entre 0,165 e 0,225 R\$/kWh, o que indica a viabilidade do projeto como alternativa para eletrificação rural.

O desenvolvimento dos estudos técnicos e econômicos será necessário para otimizar os custos de construção e operação da planta-piloto, mas os atuais resultados mostram que os estudos são promissores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDERUCCI, V. et al. Potential biomass resources of Sicily for electric-power generation. **Applied Energy**, v. 45, n.3, p. 219-240, 1993.
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) Disponível na Internet. <http://www.bndes.gov.br/> em 02/fev/1999.
- BEHAINNE, J.J.C. **Diminuição de H₂S na gaseificação de carvão mineral mediante adição de dolomita em reator de leito fluidizado.** Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1999.
- BIOENERGIA Bioenergy Research Programme Newsletter, 2/1998. Jyväskylä (FI), 1998.
- BIOENERGIA SUOMESSA (Bioenergy in Finland) Disponível na Internet. <http://www.finbioenergy.fi/> em 16/jun/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.
- CÂMARA DOS DEPUTADOS; REP. FED. DO BRASIL **Comissões Permanentes.** Disponível na Internet. <http://www.brasil.gov.br> em 17/jun/1998.
- 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.
- 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 2nd Olle Lindström Symposium on Renewable Energy - Bionergy.** Stockholm: Royal Institute of Technology. p.128-133, Jun.1999.

- 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.
- FINEP. **Gaseificação de gramínea em leito fluidizado**, Apresentação de Projetos. Rio de Janeiro, 1998.
- 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.
- 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, 1992. Cap.14, p. 593-651
- 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
- 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.
- IREDA - Indian Renewable Energy Development Agency Ltda. Biomass based cogeneration - guidelines for loan assistance. New Delhi. e-mail: gen@ireda1.globemail.com July, 1997a.
- IREDA - Indian Renewable Energy Development Agency Ltda. Biomass power generation - guidelines for loan assistance. New Delhi. e-mail: gen@ireda1.globemail.com July, 1997b.
- JOHANSSON, T.B., KELLY, H., REDDY, A.K.N., WILLIAMS, R.H. **Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan, 1992.
- KAPLAN, S. **Energy Economics - quantitative methods for energy and environmental decisions**. New York: McGraw-Hill, 1983. 352p.
- KATAYAMA, M.T. PIB - Projeto Integrado de Biomassa. **CENBIO Notícias**, Ano 1, n. 2, p. 7, Mar./Abr./Mai. 1998.
- 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

- 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.
- MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE) **FNMA - Fundo Nacional do Meio Ambiente**. Disponível na Internet. <http://www.mma.gov.br/port/FNMA/apres.html> em 15/fev/1999.
- MOHAMED, **Engenharia x Desenvolvimento Sustentável**. Notas da palestra proferida na disciplina IM-400, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas. Mar, 1998.
- MINKOVA, V., MARINOV, S., BUDINOVA, T., STEFANOVA, M., ZANZI, R. BJÖRNBOM, E., LAKOV, L. Pyrolysis of by-products from biomass in stream of water vapour and carbon dioxide. **Proceedings of the 2nd Olle Lindström Symposium on Renewable Energy - Bionergy**. Stockholm: Royal Institute of Technology. p.51-55, Jun. 1999.
- 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, 1992. Cap.16, p.699-727.
- NEIVA, A.C.B. **Estudo de alimentadores de Bagaço de Cana para Reatores Atmosféricos**, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1998.
- OVEREND, R.P.; BAIN, R.L. Technical Support of the U.S. DOE Biomass Power Program in the Development of Biomass to Electricity Technologies. Presented at the 210th American Chemical Society Meeting [Fuel Division]. **U.S.Department of Energy**, contract DE-AC36-83 CH10093, 1994. Disponível na Internet. <http://www.eren.doe.gov/biopower/technical.html> em 02/jun/1998.
- SÁNCHEZ, C.G. **Gaseificação de biomassa**, Apostila do Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1998.
- SÁNCHEZ, C.G. **Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado**, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1994.
- SÁNCHEZ, C.G., SANTOS, M.L.S, LORA, E.S. **Planta piloto de gaseificação de bagaço de cana**, Projeto Temático de Auxílio à Pesquisa, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 1994.
- SCHENCK Jr., H. **Theories of Engineering Experimentation**. New York: McGraw-Hill, 1961. 239p.
- SEESP - **Balço Energético do Estado de São Paulo - 1997, Ano Base: 1996**. São Paulo, 1997.

SHELL INT. RENEWABLES. Site disponível na Internet. http://www.shell.com/b/b1_04.html em 10/jun/1998.

SOUZA-SANTOS, M.L. **Uso de simulação para o estudo da gaseificação em leito fluidizado com bagaço-de-cana**, in Relatório Final FEM-FAPESP, 1998.

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

UNDP/FAO EUROPEAN REGIONAL PROJECT Dissemination of renewable energies in farms and rural villages: barriers and policy measures. 1988.

YOSHIDA, R. Clean coal technologies in Japan **Energy Sources** v. 19, n. 9, p. 931-943, Nov. 1997

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE