

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA E LENHA COMO  
ALTERNATIVAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS  
PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA REGIÃO  
NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Por

PAULO ROBERTO WANDER

Tese de Doutorado para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, setembro de 2001

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA E LENHA  
COMO ALTERNATIVAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS  
PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA REGIÃO  
NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Por

Paulo Roberto Wander

Mestre em Engenharia

Teses de doutorado submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientada por:

Prof. Dr. Anildo Bristot

Aprovada por:

Prof. Dr. Ademar Michels - UFSM

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini - UCS

Prof. Dr. Pedro Mello - UFRGS

Prof. Dr. Alberto Tamagna  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, setembro de 2001.

## **DEDICATÓRIA**

*Esse trabalho é dedicado à minha esposa, Márcia,  
que soube inventar mil coisas pra me deixar trabalhar  
e sempre me apoiou, e ao nosso filho André,  
que tinha todo o direito de ter reclamado e incomodado  
muito mais do que fez!!!*

## AGRADECIMENTOS

*Obviamente eu não poderia ter realizado esse trabalho sem a ajuda de uma enorme lista de pessoas, espero não esquecer muita gente...*

*Aos bolsistas Leandro, Guilherme, Rodrigo e, principalmente, ao Ronaldo.  
Aos colegas do DEMC, Rogério, Luciano, Valdessi e Robson da Oficina,  
Bete e Cris da Secretaria, Gustavo e Luis da Eletrônica e Jader da Química.  
Às empresas: Luftech (Germano, Paulo Alves, Paulinho e Firmino),  
Theodosio Randon (Julio), Hidrover (Fabiano),  
Aço Peças Demore (Rafael), Madeira Gold Martini (Flávio e Aido),  
Fogões Zonta (Nelson), Geofort (Sadi) e Tubos e Conexões Tigre.  
Ao Santo Rodrigues de Souza e Isaias Castilhos, da Prefeitura de Jaquirana.  
Ao Altafini que, no meio da correria, sempre achou um tempinho.  
À Deus, que fez um monte de mistérios pra gente quebrar a cabeça!*

## RESUMO

Para alcançar o desenvolvimento sustentável a energia tem um papel chave, sendo responsável por boa parte da poluição em todas as atividades humanas. O uso de energias renováveis é altamente desejável quando se quer reduzir ou eliminar essa poluição sem perder a oportunidade de desenvolvimento de uma atividade produtiva qualquer.

No presente trabalho delimitou-se a região alvo como sendo o extremo nordeste do estado, conhecida como “Campos de cima da Serra”, a qual possui características comuns que facilitam a aplicação do estudo. Estudou-se duas alternativas que atendem as condições de sustentabilidade, por serem renováveis, e o atendimento em pequena escala, fator predominante para que se possa viabilizar pequenos empreendimentos em locais de difícil acesso e baixa densidade demográfica, características comuns da região em estudo.

A utilização de resíduos em pequenas serrarias tem características e dificuldades peculiares que foram analisadas com cuidado para oferecer a melhor alternativa do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. O conhecimento do porte, do tipo de madeira produzida e, conseqüentemente, do tipo de resíduo gerado, além das necessidades energéticas das empresas, é fundamental para selecionar a melhor alternativa e determinar a tecnologia mais adequada. O presente estudo mostrou que essa tecnologia é a gaseificação do resíduo e a utilização do gás produzido num motor de combustão interna. Obteve-se um gás combustível possível de ser utilizado, desde que sua limpeza seja feita adequadamente.

Nas residências da região é muito comum a utilização do fogão a lenha devido ao clima frio. Ao mesmo tempo se observa que o aquecimento de água para o banho é feito com chuveiro elétrico, equipamento barato, mas de alta demanda de potência. Essa característica prejudica o abastecimento de energia elétrica da região, já com dificuldades por ser ponta de rede. Estudou-se um equipamento auxiliar que pode ser usado em conjunto com o fogão a lenha para aquecer água nas residências, liberando energia elétrica para outras cargas mais nobres e diminuindo os níveis de queda de tensão principalmente no horário de ponta. O estudo determinou a potência útil do equipamento e identificou possíveis dificuldades que devem ser evitadas. A análise das perdas mais significativas permite que se otimize o sistema a partir dos dados levantados.

## **ABSTRACT**

### **UTILIZATION OF WOOD WASTES AND FIREWOOD AS RENEWABLE ENERGIES ALTERNATIVES TO THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF RIO GRANDE DO SUL STATE NORTHEAST REGION**

In order to meet the sustainable development, energy plays a significant role. The majority of pollution in human activities is related to it. Renewable energies use's desired to reduce or even eliminate the pollution without limiting the development of any industrial/business opportunity.

In this work the region studied was the northeast part of Rio Grande do Sul state, known as "Campos de cima da Serra", which has common characteristics that facilitate the study application. Two alternatives were studied that meet the conditions of sustainability, due to their renewability, and small size, important to build small power generations because many places in the region have a difficult access to the grid because of low demographic density, are some common characteristics of this region.

The use of small sawmill wastes have special characteristics and troubles that were carefully analysed in order to offer the best technical, economic and environmental alternative. Knowing the quantity and type of sawed wood produced and, consequently, the type of waste generated, besides the energetic needs of the sawmills, is essential to determine the most suitable technology. This study concludes that the technology is the waste gasification and the use of the produced gas in an internal combustion engine. A gas was obtained which can be burned in an engine, since it is appropriately cleaned.

Using a wood stove is quite common in most of the houses due to the cold climate. At the same time was observed that the electric shower is used for the heating of water, a cheap equipment although demands a high power. This characteristic harms the electric energy supply of the region, because it is located at the end of the grid. A heat exchanger, as an auxiliary equipment, that can be used inside the wood stove was studied to heat the water, leaving electricity to more appropriate loads and reducing the level of low voltage problems, mainly in the high demand period of the day. The study determined the useful power of the device and identified potential problems that must be avoided. The analysis of significant losses allow the optimization of the system from the data recorded.

## ÍNDICE

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>RESUMO</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>ÍNDICE</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2 JUSTIFICATIVA</b> .....	02
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	05
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	07
4.1 ENERGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	07
4.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS .....	10
<b>4.2.1 Utilização de resíduos de madeira</b> .....	11
4.2.1.1 Gaseificação de biomassa .....	18
4.2.1.2 Uso do gás em motores de combustão interna .....	21
4.2.1.3 Gaseificadores equicorrentes de leito fixo para pequenas potências .....	30
4.2.1.4 Aspectos econômicos de projetos de gaseificadores .....	36
<b>4.2.2 Substituição de energéticos</b> .....	37
4.2.2.1 Gerenciamento pelo Lado da Demanda – GLD .....	37
4.2.2.2 A serpentina e o fogão a lenha .....	40
<b>5 ESTUDO DAS INSTALAÇÕES PROPOSTAS</b> .....	42
5.1 GASEIFICADOR DE BIOMASSA .....	42
<b>5.1.1 Características do gaseificador proposto</b> .....	43
5.1.1.1 Formato e dimensões principais do gaseificador .....	43
<b>5.1.2 Balanço de massa do gaseificador</b> .....	44
<b>5.1.3 Balanço de energia do gaseificador</b> .....	47
5.2 SERPENTINA NO FOGÃO A LENHA .....	49
<b>5.2.1 Ganho de calor por radiação</b> .....	51
<b>5.2.2 Ganho de calor por convecção</b> .....	52
<b>5.2.3 Avaliação das estimativas de transferência de calor</b> .....	53
<b>6 METODOLOGIA</b> .....	55
6.1 GASEIFICADOR DE BIOMASSA .....	55
<b>6.1.1 Dados do setor florestal e indústrias da madeira</b> .....	55
<b>6.1.2 Avaliação do gaseificador de biomassa</b> .....	55
6.1.2.1 Caracterização da biomassa .....	56
6.1.2.2 Metodologia para medição de vazão .....	57
6.1.2.3 Metodologia para análise do gás .....	60
6.1.2.4 Medição de alcatrão .....	61
6.1.2.5 Perfil de temperaturas .....	63
6.1.2.6 Balanços de massa e energia .....	63
6.1.2.7 Avaliação individual dos testes .....	64
6.1.2.8 Análise de incertezas .....	65
6.2 SERPENTINA NO FOGÃO A LENHA .....	67
<b>6.2.1 Levantamento de dados para substituição de energéticos</b> .....	67
<b>6.2.2 Avaliação da serpentina instalada</b> .....	67
6.2.2.1 Estimativa das perdas de calor .....	68

<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	70
7.1 RESULTADOS PARA O GASEIFICADOR DE BIOMASSA .....	70
<b>7.1.1 Dados do setor florestal e indústrias da madeira</b> .....	70
<b>7.1.2 Avaliação do gaseificador de biomassa</b> .....	72
7.1.2.1 Caracterização da biomassa .....	72
7.1.2.2 Resultados da medição de vazão .....	73
7.1.2.3 Balanços de massa e energia .....	74
7.1.2.4 Avaliação individual dos testes .....	76
7.2 SERPENTINA PARA A SERPENTINA NO FOGÃO A LENHA .....	87
<b>7.2.1 Resultados da pesquisa para substituição de energéticos</b> .....	88
<b>7.2.2 Avaliação da serpentina instalada</b> .....	88
7.2.2.1 Tempo para aquecimento e eficiências .....	89
7.2.2.2 Capacidade térmica da serpentina .....	91
7.2.2.3 Estimativa das perdas de calor .....	92
7.2.2.4 Análise dos resultados .....	94
<b>7.2.3 Custos</b> .....	95
<b>7.2.4 Estimativa de economia de energia para o município</b> .....	97
7.3 ANÁLISE DO GASEIFICADOR DE BIOMASSA .....	97
7.4 ANÁLISE DA SERPENTINA .....	100
<b>8 BIBLIOGRAFIA BÁSICA</b> .....	102
<b>9 ANEXOS</b> .....	106



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Índices de rendimento para madeira serrada e resíduos, de acordo com o diâmetro das toras .....	13
Tabela 4.2 – Necessidades energéticas na indústria de transformação primária da madeira .....	13
Tabela 4.3 – Resíduos gerados em serrarias .....	15
Tabela 4.4 – Consumo médio de energia nas serrarias .....	16
Tabela 4.5 – Análise do combustível: cavacos de madeira usados na Suécia, b.s.....	19
Tabela 4.6 – Potencial energético anual das fontes de biomassa nos EUA .....	21
Tabela 4.7 – Resumo do desempenho do gaseificador .....	34
Tabela 5.1 – Produtos e temperaturas em diversas regiões do gaseificador .....	46
Tabela 5.2 – Vazões e velocidades nas diversas regiões do gaseificador .....	47
Tabela 5.3 – Estimativa de ganho de calor por radiação .....	52
Tabela 5.4 – Estimativa de ganho de calor por convecção .....	53
Tabela 6.1 – Composição do gás padrão .....	61
Tabela 7.1 – Indústrias do Setor Madeireiro .....	70
Tabela 7.2 – Número de empreendimentos por atividade relacionada .....	71
Tabela 7.3 – Caracterização da biomassa utilizada .....	72
Tabela 7.4 – Análise imediata da biomassa .....	73
Tabela 7.5 – Análise elementar da biomassa utilizada (base seca) .....	73
Tabela 7.6 - Balanço de massa dos testes efetuados.....	74
Tabela 7.7 – Composição do gás produzido .....	75
Tabela 7.8 – Poder calorífico e eficiências .....	76
Tabela 7.9 – Teste de tempo para aquecimento da água .....	89
Tabela 7.10 – Capacidade térmica da serpentina .....	92
Tabela 7.11 – Custos da Instalação .....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Gaseificador contracorrente .....	24
Figura 4.2 – Gaseificador equicorrente .....	25
Figura 5.1 – Conjunto completo para ensaio do gaseificador .....	45
Figura 6.1 – Placa de orifício e aquecedor .....	59
Figura 6.2 – Bocal e manômetros .....	60
Figura 6.3 – Termopares e mostradores .....	63
Figura 7.1 – Perfil de temperaturas do teste GSR1 .....	76
Figura 7.2 – Perfil de temperaturas do teste GSR2 .....	77
Figura 7.3 – Perfil de temperaturas do teste GSR3 .....	78
Figura 7.4 – Perfil de temperaturas do teste GSR4 .....	79
Figura 7.5 – Perfil de temperaturas do teste GSR5 .....	80
Figura 7.6 – Perfil de temperaturas do teste GCR1 .....	81
Figura 7.7 – Perfil de temperaturas do teste GCR2 .....	82
Figura 7.8 – Perfil de temperaturas do teste GCR3 .....	83
Figura 7.9 – Perfil de temperaturas do teste GCR4 .....	84
Figura 7.10 – Perfil de temperaturas do teste GCR5 .....	86
Figura 7.11 – Perfil de temperaturas do teste GCR6 .....	87
Figura 7.12 – Eficiência da gaseificação .....	97
Figura 7.13 – Eficiência de conversão .....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CPL	Custo Presente Líquido
DRNR	Departamento de Recursos Naturais Renováveis
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção ao Meio Ambiente
GCPS	Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis
IBDF	Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RGE	Rio Grande Energia
UCS	Universidade de Caxias do Sul
VPL	Valor Presente Líquido
A	Área [m <sup>2</sup> ]
c	Teor de carbono no combustível [kg/kg]
C	Elemento químico carbono
C <sub>d</sub>	Coefficiente de descarga [adim]
C <sub>p</sub>	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.°C]
d	Diâmetro [m]
D	Diâmetro [m]
F <sub>f</sub>	Fator de forma [adim]
h	Altura [m]
h	Coefficiente de película para transferência de calor [W/m <sup>2</sup> .K]
h	Teor de hidrogênio no combustível [kg/kg]
H	Elemento químico hidrogênio
Hz	Hertz (oscilações por segundo)
J	Joule
kJ	Kilo Joule (10 <sup>3</sup> Joule) - 1 kcal = 4,186 kJ
MJ	Mega Joule (10 <sup>6</sup> Joule)
GJ	Giga Joule (10 <sup>9</sup> Joule)
HJ	Hexa Joule (10 <sup>18</sup> Joule)
k	Condutividade térmica [W/m.°C]
L	Comprimento [m]
m	Massa [kg]
o	Teor de oxigênio no combustível [kg/kg]
O	Elemento químico oxigênio
PCS	Poder calorífico superior da madeira seca [kJ/kg]
PCSúmido	Poder calorífico superior da madeira úmida [kJ/kg]
PCI	Poder calorífico inferior da madeira úmida [kJ/kg]
Q	Quantidade de Calor [kJ]
$\dot{Q}$	Fluxo de Calor ou Potência Térmica [kW] (1kW = 860 kcal/h)
s	Teor de enxofre no combustível [kg/kg]
S	Elemento químico enxofre
st	Stereo (metro cúbico de lenha empilhada)
Mtep	10 <sup>6</sup> tonelada equivalente de petróleo
kV	Kilo volt (10 <sup>3</sup> volt)
w	Teor de umidade [kg/kg]
%W	Percentual de umidade da madeira (base úmida)
MWe	Mega Watt elétrico
kWh	Kilo Watt hora (3,6 x 10 <sup>6</sup> Joule)
MWh	Mega Watt hora (3,6 x 10 <sup>9</sup> Joule)
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico (volume específico na condição de referência)
t	Temperatura [°C]
T	Temperatura absoluta [K]
U	Coefficiente global de transferência de calor [W/m <sup>2</sup> .°C]
UA	Condutância térmica de um trocador de calor [W/°C]
X	Coefficiente de sensibilidade

$\Delta$	Símbolo de diferença
$\varepsilon$	Emissividade do material [adim]
$\varepsilon$	Fator de expansão [adim]
$\eta$	Eficiência [adim]
$\pi$	Número pi = 3,14159265359
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [J/kg.K]
$\beta$	Relação de diâmetros (d/D)
$\Sigma$	Somatório

água	Relativo à água
chama	Relativo a chama do fogão
cobre	Relativo à tubulação de cobre
comb	Combustão
conv	Convecção
CPVC	Relativo à tubulação de CPVC
d	Descarga
ext	Externo
fogão	Relativo ao fogão a lenha
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
int	Interno
isol	Isolamento, isolante
lenha	Relativo a lenha
pirólise	Relativo à pirólise da madeira
rad	Radiação
recup	Recuperação de calor
red	Redução
res	Reservatório
serp	Serpentina
sec	Secagem
sens	Sensível, relativo a calor sensível
sist	Sistema
sup	Superfície
total	Total
útil	Útil

## 1 INTRODUÇÃO

Qualquer trabalho voltado para a energia lida com um dos aspectos mais básicos de infraestrutura da sociedade contemporânea. Por essa razão torna-se imperativo conhecer e planejar o setor da melhor maneira possível de forma a evitar desabastecimento e problemas sócio-econômicos e ambientais.

Devido a esse caráter estratégico, na maioria dos países esse planejamento sempre foi centralizado. Com as mudanças verificadas na economia mundial, dando maior importância e liberdade para a iniciativa privada, esse panorama mudou um pouco, pelo menos no que diz respeito à execução dos projetos de energia. Empresas e municípios têm a possibilidade de atuarem fortemente nesse segmento, seja para consumo próprio – autoprodução, ou para venda de energia – produção independente de energia.

Continua, entretanto, a falta de informações organizadas e confiáveis para realizar uma avaliação correta da viabilidade de empreendimentos. Quando os investimentos saem da esfera pública, diminui o porte e aumenta a necessidade de haver viabilidade econômica do empreendimento. Esses dois fatores exigem que se busque as informações com maior precisão e profundidade do que antes.

A função do Estado continua importante na área do planejamento, identificando as necessidades da sociedade e criando um ambiente favorável para resolver os problemas identificados. Na virada do século duas das principais preocupações de qualquer governo são o desenvolvimento econômico (incluindo emprego) e poluição ambiental.

Na região em estudo, Campos de Cima da Serra, o desenvolvimento econômico passa pela oferta de energia para um grande número de pessoas e empresas sem energia confiável. Essa energia pode servir para fixar o homem no campo e possibilitar um setor agropecuário mais produtivo, e para melhorar a rentabilidade das empresas madeireiras que podem gerar sua própria energia utilizando seus próprios resíduos. Esse último aspecto é fundamental para resolver um grave problema ambiental de indústrias do setor florestal que é a destinação de resíduos.

As energias renováveis devem ser incentivadas por governos de qualquer esfera, municipal, estadual ou federal. Além de não prejudicar o meio ambiente, têm um potencial de geração de empregos e renda locais em função de algumas de suas características, como a geração descentralizada, pequeno ou médio porte e uso racional de recursos naturais.

## 2 JUSTIFICATIVA

Da segunda metade deste século até a década de 80, o Brasil viveu um surto de desenvolvimento e industrialização bastante intenso, tornando-se um dos países mais industrializados da América Latina. Para assegurar a infra-estrutura necessária a esse crescimento fez-se necessário um forte investimento em geração de energia elétrica.

O Estado do Rio Grande do Sul, integrante do Sistema Interligado Sul-Sudeste-Centro-Oeste de geração e transmissão de energia elétrica, não acompanhou os investimentos em geração e atualmente é grande dependente da energia gerada em outras regiões, principalmente Itaipu. Em contrapartida, o setor de distribuição de energia elétrica recebeu grandes investimentos e hoje é um dos estados com maior percentual de atendimento no meio urbano e rural, este com mais de 70% das propriedades atendidas (a média nacional é 30%).

Mesmo assim, esses números significam algo como 140 mil propriedades rurais sem eletricidade, ou seja, às portas do século XXI, mais de meio milhão de pessoas continuam sem acesso ao conforto e desenvolvimento que a energia elétrica pode proporcionar.

Dentro do Estado, uma das regiões com maior carência de redes de distribuição é a região do extremo Nordeste, mais conhecida como os “Campos de Cima da Serra” e “Vacaria dos Pinhais”, composta pelos municípios de Bom Jesus, Cambará do Sul, Jaquirana, São Francisco de Paula e São José dos Ausentes.

A história, o relevo e o clima dessa região ocasionaram uma baixa ocupação demográfica e pouca produtividade do setor agropecuário. A incidência dos campos e as condições climáticas desfavoráveis para agricultura anual levaram a predominância da pecuária extensiva com baixa produtividade.

A prática das queimadas é grandemente utilizada para a renovação das pastagens no final do inverno, e isso tem sido fortemente combatido pelos órgãos e entidades ambientalistas do Estado. Para debater esse e outros problemas da região, foi realizado em junho de 1997, um “Workshop” para o desenvolvimento sustentável e preservação da biodiversidade em São Francisco de Paula, organizado por RICHTER (1998). Essa oficina reuniu diversos agentes, tais como: produtores rurais, prefeitura, entidades ambientalistas, universidades, centros de pesquisa, IBAMA, FEPAM e outros, com o objetivo de congregar os diferentes aspectos dos problemas e buscar soluções de consenso com embasamento técnico e político que as viabilizem.

Gradativamente os pecuaristas têm buscado alternativas para suas terras, entre elas despontam a fruticultura e a silvicultura quando a qualidade das terras permitir. Alternativas às queimadas devem ser pesquisadas para garantir que os produtores não percam seu poder aquisitivo subitamente, por menor que seja, até que as pastagens se recuperem. Enquanto isso, é necessário liberar parcialmente as queimadas com maior fiscalização para que não ocorram queimadas clandestinas com menor controle e, conseqüentemente, maiores riscos.

Pesquisas também são necessárias quanto aos impactos da introdução de (re)florestamentos com Pinus na biodiversidade da região. Qualquer espécie exótica introduz modificações na cadeia alimentar e reprodutiva de um ecossistema, portanto, seu uso indiscriminado deve ser evitado. Da mesma forma, toda monocultura é frágil e prejudicial, e devem ser previstos corredores para manter a diversidade da fauna e da flora, além do controle biológico de pragas e outras doenças.

A fruticultura tem sido vista com receio porque a carga de produtos tóxicos é muito alta e traz prejuízos aos produtores, ao ecossistema e aos consumidores. Mais uma vez, estudos de técnicas de cultivo alternativas mais saudáveis seriam necessárias.

Outra região contígua a essa é a Encosta da Serra do Nordeste, mais precisamente os municípios de Canela e Gramado. Essa região tem características distintas da anterior, principalmente pela forma de ocupação da terra, com maior número de minifúndios e, portanto, menos atividade pecuária e maior diversificação de produtos agrícolas.

Em muitas dessas propriedades rurais a atividade agrícola foi reduzida por diversos fatores. Conforme WANDER (1995), a industrialização das regiões próximas, o crescimento acentuado do turismo e a grande quantidade de áreas impróprias para agricultura seriam as principais causas da diminuição das atividades e da população no meio rural.

Sob alguns aspectos essa situação é benéfica pois permitiu a recuperação de algumas áreas com mata nativa. Por outro lado, esse êxodo rural veio para as áreas urbanas exercer pressão sobre o meio ambiente de outras formas, como atestam as vilas que podem ser observadas nos municípios de Canela, Gramado, São Francisco de Paula, Caxias do Sul e outras cidades do Vale do Sinos e do Paranhana. Além disso, muitas dessas áreas foram transformadas em grandes plantações de Pinus, principalmente na época dos incentivos fiscais ao reflorestamento, de forma contínua, porém, sem muita qualidade e produtividade.

Muitas áreas estão hoje deixadas de lado, formando uma extensão considerável de capoeiras e vegetação secundária subutilizada, geralmente com forte vocação para silvicultura por não serem áreas nobres (declives, banhados e regiões de difícil acesso).

Em termos de eletrificação rural, de um total de mais de 5600 propriedades na região em estudo, estima-se que apenas em torno de 2000 são eletrificadas, conforme dados da Rio Grande Energia – RGE, atual concessionária de distribuição de energia elétrica na região. Além disso, algumas cidades ou regiões sofrem com a má qualidade da energia elétrica fornecida que provoca constantes quedas de tensão e interrupções.

Esse tipo de problema aliado a outros, como a falta de estradas e comunicação, dificultam o desenvolvimento da economia dos municípios e impede as pessoas de usufruir uma parte importante dos benefícios da sociedade moderna, que são o conforto e a saúde proporcionados pela energia elétrica e a possibilidade de manter-se bem informado e ampliar sua cultura através dos meios de comunicação de massa tipo TV e rádio.

A economicidade de projetos de distribuição da energia elétrica produzida em grandes usinas impõe a utilização desta em grandes centros, gerando fatos inusitados como uma moradia ou uma vila isolada sem abastecimento de energia elétrica que, entretanto, está relativamente próxima de uma linha de média ou alta tensão (algumas vezes bem embaixo da mesma).

Diante desse quadro pretende-se avaliar a possibilidade de utilizar a expansão da silvicultura na geração de energia elétrica, viabilizando o atendimento de áreas carentes e melhorando o retorno econômico da atividade florestal, principalmente pelo aproveitamento de resíduos.

Conforme WANDER & MOSSMANN (1997), outras possibilidades de uso de energias renováveis seriam as PCHs - Pequenas Centrais Hidrelétricas, cujo potencial é significativo na região, energia solar fotovoltaica e eólica onde a extensão da rede elétrica da concessionária é inviável e onde não houver quedas d'água próximas, além da substituição de energéticos, como a lenha para água quente em residências.

As concessionárias de geração e distribuição de energia elétrica não se interessam por pequenas gerações (abaixo de 1 MW), devido a dificuldade de operação e manutenção que isso implicaria para essas grandes empresas. Potências ainda menores, abaixo de 100 kW, só serão viáveis com a participação pessoal dos interessados em autoproduzir sua energia para uso isolado ou inserção na rede pública.

### 3 OBJETIVOS

Dentro do contexto já mencionado na justificativa, o objetivo principal é a proposição de alternativas energéticas renováveis baseadas na biomassa para o atendimento descentralizado na região, sem esgotar as possibilidades, mas buscando aquelas mais viáveis.

Os objetivos específicos são baseados nas alternativas propostas, assim, para cada alternativa teríamos o seguinte:

#### UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Nas indústrias de base florestal da região existe a possibilidade de ampliação do uso de resíduos para a geração de energia, tanto térmica para processo, quanto elétrica para uso geral e até exportação. Estudos comprovam que as serrarias são auto-suficientes em energia a partir dos seus próprios resíduos.

Existem práticas tradicionais para essa geração que devem ser questionadas, pois nem sempre as pequenas serrarias necessitam vapor e, portanto, a solução mais utilizada, turbina a vapor ou locomóvel, não é a melhor. Pretendeu-se analisar a viabilidade de integrar o processo de gaseificação de resíduos de madeira a motores de combustão interna estudando a geração de um gás combustível com poder calorífico adequado e limpo.

As premissas para esse tipo de utilização dos resíduos são baseadas no fato de que a gaseificação facilitaria o uso da biomassa por transformar um resíduo sólido, com maiores dificuldades na sua queima, em combustível gasoso, de fácil combustão; e pela integração desse combustível com motores de combustão interna para produção de energia mecânica, que são mais eficientes que motores e turbinas a vapor na faixa de potências típicas das empresas que geram os resíduos.

#### SUBSTITUIÇÃO DE ENERGÉTICOS

O setor elétrico cada vez mais tem se conscientizado da necessidade de conservação e racionalização da energia elétrica para evitar investimentos maiores em geração, obtendo-se sempre vantagens na relação entre o kWh não-gerado (pela conservação) e o kWh consumido em excesso (por desperdício ou perdas).

O instrumento que muitas empresas tem utilizado é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda - GLD, que busca implementar ações junto aos consumidores finais para evitar



demandas excessivas, deslocar o consumo para horários mais adequados, substituir equipamentos inadequados e conscientizar quanto a necessidade de não desperdiçar energia.

Em toda a região os hábitos de aquecimento de água para banho são com o uso de chuveiros elétricos potentes (3,5 a 5,4 kW) devido ao clima frio da região. Ao mesmo tempo, o uso do fogão a lenha é bastante comum, tanto na área rural quanto na urbana, e mesmo no verão. Uma solução aparentemente adequada seria utilizar o próprio fogão a lenha para o aquecimento de água.

A partir de pesquisa prévia feita no Estado, constatou-se a existência de um equipamento para aquecimento de água a partir do fogão a lenha, que consiste de um trocador de calor instalado dentro da fornalha do mesmo. Tomando as devidas precauções de segurança e eficiência, pode-se ter água quente para o banho enquanto se prepara o jantar, ou mesmo, se esquentar a água para o chimarrão.

Foi realizada uma pesquisa da Universidade de Caxias do Sul no município de Jaquirana para avaliar a utilização desse equipamento, cujo custo de instalação deve ser cotejado com os custos necessários para a expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 ENERGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A energia sempre desempenhou um papel fundamental na história dos países e hoje o mundo vive uma situação em que mais de 75% de sua energia provém de combustíveis fósseis, como o petróleo, carvão mineral e gás natural. Segundo a visão de Mao, 1998, ninguém poderia prever as mudanças que ocorreriam no cenário mundial desde a crise do petróleo em 1973. A União Soviética e o Bloco Comunista acabaram e seu consumo e produção de energia caíram vertiginosamente. A guerra fria terminou. O Oriente Médio está mudando sua estrutura política. Novas descobertas de petróleo e gás têm amenizado as preocupações com sua escassez. O aquecimento global tem sido largamente aceito pelos cientistas e considerações acerca do seu efeito a longo prazo estão crescendo. A China reformou seu sistema econômico e cresce num ritmo jamais pensado antes, passando de exportadora para importadora de energia.

Paralelamente a isso, a tecnologia avançou muito, tanto na área dos combustíveis fósseis, quanto na área das energias renováveis, principalmente pela convicção da sociedade de que aqueles não irão durar para sempre. O desenvolvimento das energias renováveis depende, ainda segundo Mao, 1998, de vários fatores, dos quais destacaremos alguns.

Uma característica comum das energias renováveis é sua baixa densidade energética, portanto, para conseguir quantidades razoáveis de energia são necessários grandes espaços, como as fazendas eólicas, painéis solares e reservatórios de hidrelétricas, e correspondentemente, pesados investimentos em equipamentos. Em contrapartida, os energéticos como o sol, o vento e a água dos rios, são praticamente de graça e o custo de operação torna-se baixo. Essas características levam a necessidade de grandes investimentos com longos períodos de retorno. Por essa razão, estabilidade política (aliada a vontade política) é um fator chave no desenvolvimento das energias renováveis.

Outro fator importante é o desenvolvimento de tecnologias de geração em pequena escala com boa eficiência, permitindo a quebra de monopólios e a auto-produção competitiva de pequenos consumidores.

Projetos de longo prazo têm grandes riscos de incertezas devido às freqüentes mudanças nas estruturas de preços ditadas pelas atividades humanas. Assim, o preço da energia gerada em comparação com outras possibilidades de uso determina a viabilidade econômica do

empreendimento. O exemplo citado é o do turismo em oposição a construção de grandes barragens para aproveitamento hidrelétrico, ou seja, se o valor do turismo cresce e o da energia diminui, o valor produzido pela barragem poderá ser menor que o valor criado pela receita do turismo se a barragem não fosse feita.

O último fator a ser ressaltado diz respeito a poluição causada pela geração de energia em geral num mundo globalizado. Desde que a poluição é um efeito externo, os benefícios advindos da geração de energia se dão às custas das pessoas que sofrem a poluição. A solução para isso é a intervenção de governos criando taxas e legislação restritiva, entretanto, a identificação dos custos sociais e das vítimas da poluição é complicada, além da burocracia e problemas de política internacional, já que a poluição cruza fronteiras. Concluindo, considerações éticas de foro íntimo e cooperação entre grupos de pessoas e países parecem ser a única maneira efetiva de garantir a proteção do meio ambiente para as próximas gerações.

Nesse sentido uma metodologia interessante é desenvolvida por Frangopoulos & Caralis, 1997, para estimar custos ambientais na avaliação econômica de sistemas energéticos. Os custos de uma atividade industrial pagos pelo consumidor são ditos “internalizados”, inclusive os relacionados com proteção ambiental, como por exemplo, um ciclone na saída de uma chaminé. Esses custos são chamados “custos ambientais internos”. Outros custos também relacionados com a atividade industrial são pagos pela sociedade em geral, que nem sempre usufrui dos benefícios ou produtos gerados pela indústria, e são chamados “custos ambientais externos”, como por exemplo, a chuva ácida e o efeito estufa.

Os autores dividem as maneiras de abordar os custos ambientais externos em duas: a abordagem regulatória e a abordagem de mercado. A regulação baseia-se na adoção de medidas legais que obrigam as indústrias a instalarem certos equipamentos ou atingirem parâmetros de controle sob pena de sofrerem multas. Geralmente essa abordagem tem pouca consideração com os custos relacionados. Em contra-partida, a abordagem de mercado procura estimular ações voluntárias em resposta a vantagens financeiras, o que permite maior flexibilidade por parte do poluidor. Esta abordagem permite efetivamente a internalização dos custos ambientais externos.

Os principais mecanismos econômicos para proteção ambiental são divididos em quatro:

- *Encargos* – Taxas ou impostos sobre a poluição são tributados. Permitem ao poluidor escolher entre investimento em controle de poluição ou pagamento dos encargos.
- *Criação de Mercado* – Um número fixo de permissões para poluir são emitidas e então, vendidas, comercializadas ou alugadas entre os poluidores.
- *Subsídios* – Têm o objetivo de persuadir os poluidores a modificarem seu comportamento encorajando-os a investirem num sistema específico de controle de

poluição onde parte dos custos é pago por outros. Podem tomar a forma de doações, redução de taxas de juros ou eliminação de impostos.

- *Caução* – Encargos são cobrados na compra de um produto potencialmente poluidor (por exemplo, recipientes de vidro ou alumínio). Quando se provar que a poluição foi evitada (p. ex., no retorno dos recipientes), os encargos são devolvidos.

Na avaliação crítica desses mecanismos observa-se que nenhum deles é ideal. Segundo os autores, o sistema de mercado é muito difícil no momento, principalmente devido a falta de um arcabouço legal apropriado, além de outros fatores como a determinação exata dos níveis de poluição aceitáveis numa determinada região e distorções na operação do mercado na vida real. O sistema de caução também é limitado porque sua utilização não é relevante nos sistemas examinados.

A metodologia mencionada considera então apenas os encargos e subsídios. Um comentário importante é que os dois mecanismos têm condições de reduzir as emissões, porém, os subsídios não reduzem a produção de poluentes. A grande diferença é que no caso dos encargos, o próprio poluidor paga pelos danos causados, enquanto no caso dos subsídios, toda a sociedade paga pelos danos através de impostos gerais.

Na estimativa dos custos externos, é necessária a quantificação das emissões e o correspondente encargo. Outros efeitos adversos ao ambiente devem ser quantificados, tais como ocupação da terra, redução nas oportunidades de lazer e cessão de lucros, para poderem ser introduzidos no método. Os autores ressaltam que não existe metodologia unificada para essas quantificações e, portanto, os valores finais encontrados e, inclusive, a determinação da viabilidade dos projetos podem variar significativamente.

Através de vários cálculos econômicos chega-se ao Custo Presente Líquido – CPL, ou Valor Presente Líquido – VPL, que determina a viabilidade do empreendimento dentro das várias possibilidades de custos. Por exemplo, avaliando um projeto de geração termelétrica com ciclo combinado usando combustível fóssil, pode-se estudar três opções: a instalação de um dessulfurizador com ou sem subsídio, ou o pagamento de encargos pela emissão de SO<sub>2</sub>. A opção que apresentar o maior VPL ou o menor CPL será a melhor. A partir dessa metodologia pode-se estudar valores de subsídios e encargos que viabilizem projetos ambientalmente favoráveis.

Como conclusão pode-se resumir dizendo que adotar encargos e subsídios paralelamente aumentam consideravelmente a viabilidade econômica dos investimentos, mas, ao mesmo tempo

deve-se avaliar cuidadosamente os valores estipulados para não incorrer em custos excessivos à sociedade.

## 4.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Gay et alli, 1998, do Laboratório Nacional de Energias Renováveis Norte Americano (NREL – National Renewable Energy Laboratory), afirma que o mundo pode se beneficiar muito das energias renováveis, começando pela eletrificação rural em larga escala (estima-se que 2 bilhões de pessoas não possuam energia confiável no mundo), a criação de empregos e, obviamente, a preservação do meio ambiente. Portanto, o objetivo de longo prazo daqueles que trabalham com energias renováveis deve ser a inserção dessas energias na rede e os combustíveis para transporte.

Em relação a combustíveis, Gay afirma que o “NREL” está trabalhando na obtenção de álcool a partir de celulose, tais como madeira e gramíneas, usando engenharia genética e processos de fermentação inovadores.

Segundo os dados desse laboratório, o consumo anual de energia dos Estados Unidos é de 95 HJ (1 HexaJoule =  $10^{18}$  J = 22,12 Mtep), sendo que 6,7 HJ a partir de energias renováveis. A geração hidrelétrica é responsável por cerca de metade desse valor, aproximadamente 3,3 HJ (o que significa 8% da potência instalada), enquanto a biomassa responde por 3 HJ.

A perspectiva das energias renováveis depende de cinco fatores segundo GAY et alli (1998):

- *Melhorias Tecnológicas* – Pesquisa e desenvolvimento são essenciais para melhorar a eficiência e reduzir custos permitindo competir com os fósseis.
- *Comercialização Tecnológica* – Além de compreender os conceitos científicos envolvidos, é crucial desenvolver a engenharia e a tecnologia necessárias para levar o produto ao mercado. Parcerias entre a indústria e o governo, através de seus institutos de pesquisa, com compartilhamento de custos, aceleram esse processo e melhoram o retorno do investimento.
- *Mercados de Curto Prazo* – Para produzir e comercializar equipamentos é necessário identificar áreas prioritárias que o mercado necessita. Então, o desenvolvimento de pesquisas tecnológicas deve conhecer essas necessidades do mercado para gerar produtos viáveis.

- *Legislação e Demonstração* – O governo deve incentivar o uso de energias renováveis usando incentivos e subsídios além de dar exemplos, de maneira a ampliar a aceitação dessas tecnologias pelo mercado e os consumidores.
- *Mercados Internacionais* – Os países em desenvolvimento são considerados um grande mercado potencial, principalmente na área de eletrificação rural. O nivelamento das indústrias nacionais com o mercado internacional é fator chave para alcançar a competitividade e obter sucesso de longo prazo tanto domesticamente quanto internacionalmente.

Esse último comentário é voltado à realidade norte americana, mas serve, de maneira geral, para qualquer país.

Por último, o autor coloca que pesquisas de opinião nos Estados Unidos revelaram que a maioria da população apoia o desenvolvimento de fontes renováveis de energia e está disposta a pagar por isso. É indispensável que o governo estabeleça uma política estável de investimento prudente nesse sentido para atingir a viabilidade técnica e econômica dessa indústria emergente.

Nesse estudo serão destacadas dois tipos de energias renováveis, como já mencionado nos objetivos, que são a utilização de resíduos e substituição de energéticos.

#### **4.2.1 Utilização de resíduos de madeira**

Trabalho anterior em município da região em estudo feito por Wander, 1995, comprovou um excedente de resíduos de serrarias incorretamente dispostos e com capacidade de gerar razoável quantidade de energia, entre 750 a 1.800 kW, dependendo da tecnologia empregada, e somente com a serragem não aproveitada. O estudo concentrou-se na quantificação de resíduos produzidos no município e constatou que eram gerados 200.000 st de costaneiras e refilos e 50.000 st de serragem, sendo a maior parte disso aproveitada numa fábrica de papel no próprio município.

Apesar da grande utilização dos resíduos verificada, o restante não utilizado gerava um sério problema ambiental nos arroios e banhados da região. Essa possibilidade de consumo intensivo não é observada em outros municípios, o que torna imprescindível o estudo de variadas formas de aproveitamento. Em relação a isso uma solução atraente abordada no trabalho é a integração de indústrias do setor florestal de forma a criar um ciclo fechado de utilização de matéria-prima e resíduos com produção independente de energia elétrica e vapor de forma centralizada e, portanto, eficiente.

Bhattacharya, 1998, afirma que a capacidade instalada de geração de eletricidade a partir de biomassa nos Estados Unidos é ao redor de 7000 MWe com eficiência entre 20 e 25%. No campo da utilização de resíduos de madeira, já existem equipamentos experimentais com capacidades entre 0,5 e 5 MWe usando combustão pressurizada em leito fluidizado onde espera-se obter eficiências da ordem de 35 a 40%. Devido a dispersão da produção de madeira e custos de transporte envolvidos, o autor não recomenda plantas com capacidade maior que 10 MWe, apesar de considerar que plantações dedicadas à geração de energia poderiam suportar maiores capacidades.

Um programa interessante nesse sentido foi iniciado nas Filipinas onde um projeto de 3 MWe requer 1500 ha no total, sendo 1100 ha somente para as plantações de árvores.

Bhattacharya, 1998, sugere que a utilização de biomassa e outros combustíveis de baixa qualidade para gerações em pequena escala seja realizada em máquinas de combustão externa, como motores Stirling. Na Dinamarca, um motor Stirling desenvolvido com potência de 36 kW foi testado atingindo 35% de eficiência a plena carga.

Estabelecida a viabilidade de aproveitamento de biomassa e seus resíduos, resta quantificar sua produção nas indústrias da madeira típicas da região em estudo. Nesse sentido, Fontes, 1994, cita um trabalho desenvolvido pelo extinto IBDF e a Universidade Federal do Paraná (1982) que dividiu as indústrias do setor de madeira em: Serrarias, Serrarias/Beneficiamento, Beneficiadora e Laminadoras/Fábricas de Compensado. O mesmo estudo classificou os resíduos em três tipos distintos, ou seja:

- a) serragem – resíduo originado da operação de serras, encontrado em todos os tipos de indústria, à exceção das laminadoras. Uma distinção importante é que a serragem pode ser seca ou úmida;
- b) cepilho – conhecido também por maravalha, resíduo gerado pelas plainas nas instalações de serraria/beneficiamento e beneficiadora (indústrias que adquirem a madeira já transformada e a processam em componentes para móveis, esquadrias, pisos, forros, etc.) disponível exclusivamente no estado seco;
- c) lenha – resíduo de maiores dimensões, gerado em todos os tipos de indústria, composto por costaneiras, aparas, refilos, casca e outros.

Em relação à quantidade de cada tipo de resíduo, Borges *et alli*, 1993, correlacionam os índices de rendimento para costaneiras, aparas, serragem e madeira serrada, de acordo com o diâmetro mínimo da tora e os procedimentos de desdobro das mesmas, conforme a tabela abaixo:

Tabela 4.1 – Índices de rendimento para madeira serrada e resíduos, de acordo com o diâmetro das toras.

<b>Madeira e Resíduos</b>	<b>RENDIMENTO [%]</b>			
	<b>15 cm</b>	<b>20 cm</b>	<b>25 cm</b>	<b>30 cm</b>
<b>Madeira serrada</b>	38,98	51,91	53,31	64,87
<b>Costaneiras</b>	20,63	18,71	23,23	14,29
<b>Aparas</b>	30,03	16,43	9,68	6,17
<b>Serragem</b>	10,36	12,95	13,78	14,66

Fonte: BORGES *et alli* (1993).

Convém ressaltar a relação diretamente proporcional existente entre o rendimento na produção de madeira serrada e o diâmetro, e, ao contrário, a pequena variação em números absolutos da geração de costaneiras e serragem com o diâmetro. Essa última relação depende muito do tipo de produto.

Outra tabela importante relaciona a quantidade de energia elétrica e térmica em função da produção de madeira:

Tabela 4.2 – Necessidades energéticas na indústria de transformação primária da madeira

<b>TIPO DE INDÚSTRIA</b>	<b>Energia elétrica (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Energia térmica (GJ/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Combustível para motor (L/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Madeira serrada (seca ao ar)</b>			
de folhosas	30	-	5
de coníferas	20	-	4
<b>Madeira serrada (estufa)</b>			
de folhosas	75	2,5	5
de coníferas	45	1,5	4

Fonte: FAO (1983) e Ekono Oy (1980).

Na tabela acima demonstra-se a variação significativa existente tanto na energia elétrica quanto na energia térmica para empresas que secam ao ar em relação às que secam em estufa. A secagem concentra-se nas empresas que fazem beneficiamento e fábricas de compensados. Essa demanda energética maior implica maiores investimentos e energia confiável, nem sempre encontrada nas regiões próximas aos reflorestamentos. A quantificação das empresas de cada segmento é fundamental para oferecer a melhor solução em termos de energia.

Considerando que a geração de resíduos corresponde a, pelo menos, 50% da tora processada, a busca de soluções para esse problema é necessária. Conforme Fontes, 1994, três caminhos podem ser escolhidos: “a) redução do volume de resíduos; b) eliminação dos resíduos; e c) utilização econômica dos mesmos.

“Com relação à redução do volume, as serrarias têm apresentado soluções variadas: corte seletivo de toras, manutenção correta de discos, fitas, volantes e carros, principalmente afiação e regulagem; utilização de serras-de-fita e serras alternativas de menor espessura possível; e a



transformação dos resíduos (costaneiras, refilos, destopos e aparas) em cavacos durante o desdobro das toras (através de perfiladores-picador ou canteadeiras-picador) ou mesmo fora do processo, por meio de picadores anexos ao sistema de beneficiamento”.

A redução do volume é altamente desejável, mas é uma solução limitada, porque sempre haverá alguma espécie de desdobro das toras e eliminação de partes não utilizáveis.

Ainda conforme Fontes, 1994: “No que se refere à eliminação dos resíduos, o mais utilizado é a sua queima... Quando o resíduo não é queimado pela empresa, é removido para terrenos baldios ou utilizado como material de aterro”. Essa não parece ser a realidade do Rio Grande do Sul, com a maior parte do resíduo sendo eliminado simplesmente pela disposição em lugares impróprios ou no pátio das empresas.

Ainda, conforme Tuset & Duran, 1979, a preocupação com a utilização econômica dos resíduos tem crescido bastante e, por exemplo, “nos países escandinavos, a utilização dos resíduos constitui um requisito econômico prévio para os investimentos em serrarias e fábricas de compensados”.

Um trabalho da FAO/CEPAL/ONUDI (1972) para indústrias florestais da América Latina, mostra para uma serraria de grande porte, produção anual de 60.000 m<sup>3</sup> de madeira serrada de *Pinus*, que o retorno líquido por m<sup>3</sup> poderia ser de US\$ 9,50 sem o aproveitamento de resíduos, e de US\$ 17,50 com a produção e venda de cavacos a partir dos resíduos.

Aqui no Estado do RS, a maior utilização econômica dos resíduos é a venda de maravalha como cama de aviários. Este é um resíduo seco obtido somente nas plainas das indústrias com beneficiamento e fábricas de móveis. Entretanto, a madeira não deve ter tratamento químico nenhum, pelo risco de contaminação das aves. Por esse motivo, a maravalha produzida nas fábricas de móveis não deve ser utilizada, pois usualmente são adicionados conservantes para proteger a madeira.

As serrarias se dividem em 2 grandes grupos: aquelas que serram para móveis e as que serram para construção civil. O mercado para construção civil não exige madeira seca em estufa, portanto, esse tipo de serraria não utiliza energia térmica (vapor). Por outro lado, a indústria de móveis exige madeira seca e as serrarias que fornecem para esse mercado obrigatoriamente têm que secá-la ou vender para outra empresa a madeira serrada para ser beneficiada. Além da secagem, as beneficiadoras também retiram nós, fazem cantos e acertam o formato e a bitola conforme a necessidade da indústria de móveis.

Outros aproveitamentos econômicos citados seriam a produção de matéria orgânica para elaboração de composto (húmus) e fabricação de modulados fenólicos (Tuset & Duran, 1979); produção de pasta refinada termomecânica com serragem (FAO, 1976) e utilização das cascas

para energia (Nock, 1977; Corder *et alli*, 1970 e Corder, 1973) e extração química de taninos, ceras, óleos essenciais, etc. (Harkin & Rowe, 1971).

Em relação a quantificação e caracterização de resíduos, o trabalho de Fontes, 1994, é significativo, tendo estudado detalhadamente a geração de resíduos em três tipos diferentes de serrarias e para três classes de diâmetros.

Como resultado geral obteve-se um rendimento de madeira serrada de 30,5%, variando de 22,37% até 39,38%. O autor ressalta que além da classe de diâmetro das toras o tipo de desdobro das mesmas influenciou no resultado. Observa-se na tabela 4.3 uma grande variação na quantidade de resíduos gerada de acordo com o tipo de resíduo:

Tabela 4.3 – Resíduos gerados em serrarias

TIPO DE RESÍDUO	MÉDIA [%]	MÍNIMO [%]	MÁXIMO [%]
Costaneiras	14,12	6,92	26,60
Refilos	14,24	4,64	19,69
Destopos	5,07	2,85	7,16
Serragem e Casca	34,47	22,64	40,77

Fonte: FONTES (1994).

Convém lembrar que os mínimos e máximos de cada tipo de resíduo não acontecem simultaneamente, portanto, a variação total de rendimento da produção de resíduos não é tão grande (60 a 78%).

Para esse estudo é importante a caracterização energética dos resíduos, que foi realizada dividindo-os em serragem e cavacos, pois eram essas as formas finais dos resíduos nessas indústrias. A densidade média da serragem ficou em 363 kg/m<sup>3</sup> e dos cavacos em 393 kg/m<sup>3</sup>, para uma umidade média de 154,4% base seca (60,7% base úmida) e 136,4% base seca (57,7% base úmida) respectivamente. O poder calorífico superior foi medido em bomba calorimétrica e o inferior calculado em função da umidade, resultando 9,4 MJ/kg e 8,04 MJ/kg para a serragem, e 10,9 MJ/kg e 9,5 MJ/kg para os cavacos.

O consumo médio de energia nas serrarias em função da produção de madeira serrada é um parâmetro importante para dimensionar as necessidades energéticas de cada indústria. No trabalho de Fontes, 1994, esse valor foi considerado alto, em torno de 3,2 GJ/m<sup>3</sup>, elétrica e térmica.

Tabela 4.4 – Consumo médio de energia nas serrarias

Serrarias	Prod. média de madeira serrada		Consumo de Energia Elétrica		Consumo de Energia Térmica		Consumo Total de Energia GJ/m <sup>3</sup>
	m <sup>3</sup> /dia	m <sup>3</sup> /mês	KWh/m <sup>3</sup>	kWh/mês	kWh/m <sup>3</sup>	GJ/m <sup>3</sup>	
1	76	1.600	65	104.160	916	3.3	3.5
2	62	1.300	73	95.260	814	2.9	3.2
3	100	2.100	49	98.000	763	2.7	2.9

Fonte: FONTES (1994).

De acordo com FAO (1991) e Ekono Oy, 1980, nos países desenvolvidos, serrarias com secagem artificial consomem entre 1,0 e 2,85 GJ/m<sup>3</sup>. Para as serrarias estudadas o consumo de energia elétrica médio foi de 60 kWh/m<sup>3</sup> (0,284 GJ/m<sup>3</sup>) e o consumo médio de energia térmica ficou em 2,9 GJ/m<sup>3</sup>. Ou seja, mais de 90% do consumo de energia é na forma de calor. Esse resultado pode evidenciar um problema de eficiência na utilização da energia, principalmente, nas estufas.

Fontes, 1994, afirma que mesmo com um consumo acima do necessário, a análise da possibilidade de geração de energia pelas serrarias a partir dos resíduos provou que elas podem tranquilamente ser auto-suficientes em energia, tanto térmica quanto elétrica.

O cálculo realizado por Fontes, 1994, não é claro em relação a determinação do consumo de energia térmica, e aparentemente, considerou um rendimento global da conversão da energia dos resíduos em térmica e elétrica da ordem de 55%. Esses valores são aceitáveis, mas devem ser melhor analisados. As diferentes configurações possíveis para a geração e utilização de energia dentro de uma serraria podem variar drasticamente, e devem ser analisadas cuidadosamente.

O uso dos resíduos deve necessariamente levar em conta as características particulares de cada tipo no que se refere a combustão, principalmente granulometria ou formato e teor de umidade. Outra questão importante é o valor econômico do resíduo. Por exemplo, já constatou-se que a venda de maravalha seca para camas de aviário é lucrativa, portanto, não compensaria queimar esse resíduo. Outras possibilidades de venda de resíduos seriam os cavacos para celulose, e costaneiras e refilos como lenha. Entretanto, essas demandas não são suficientes para consumir toda a geração desses resíduos. Além disso, a utilização desses resíduos para geração de energia dentro da empresa renderia mais. A serragem verde, produzida no desdobro das toras, é o resíduo mais problemático porque não tem demanda econômica atraente e, por ser úmido e de granulometria muito fina, sua queima é difícil.

Depois de caracterizado e quantificado o resíduo, é importante analisar as alternativas de queima. Essas irão variar em função de vários fatores. Além dos citados no parágrafo anterior teríamos como ponto de partida as necessidades da empresa, já que, em princípio, qualquer

serraria pode ser auto-suficiente em energia elétrica e/ou térmica. Para as empresas que secam a madeira, é importante produzir vapor, enquanto que para as empresas que somente serram as toras ou processam tábuas já secas, a produção de energia elétrica deve ser maximizada. Como essas últimas são, em geral, unidades pequenas, os equipamentos utilizados devem ser simples e de custo (R\$/kW) relativamente baixo.

Dois tipos de equipamentos podem ser utilizados para suprir as necessidades de cada tipo de empresa. Quando há necessidade de energia elétrica e térmica simultaneamente, utiliza-se equipamentos adequados à cogeração. No caso, turbinas a vapor de contrapressão, onde o próprio fluido de trabalho após produzir energia mecânica na turbina, é levado, ainda com uma pressão relativamente alta para as estufas de secagem onde o calor liberado pela sua condensação aquece o ar da estufa. Esse condensado retorna ao sistema sendo novamente vaporizado a alta pressão na caldeira para entrar na turbina e produzir energia mecânica, configurando um ciclo fechado.

A outra possibilidade, onde a cogeração não é necessária, é o motor de combustão interna que utilizaria gás pobre produzido a partir da gaseificação dos resíduos de biomassa. Essa alternativa não é tão comum, mas é a mais adequada porque o motor de combustão interna é o equipamento mais eficiente para pequenas potências. O uso de gás pobre não compromete significativamente essa eficiência desde que se faça os ajustes necessários. O uso da energia térmica dos motores é possível, mas é operacionalmente mais complicado porque existem 4 fontes diferentes de perdas de calor (e conseqüentemente, 4 tipos diferentes de trocadores de calor): o calor sensível do gás na saída do gaseificador, o óleo de lubrificação, a água de arrefecimento e os gases do escapamento. No sistema que utiliza vapor temos somente 2 fontes de calor: os gases quentes da fornalha e a condensação do vapor depois da turbina, conforme já explicado.

Analisando as tecnologias envolvidas, os dois sistemas são bem conhecidos e existem unidades operando em situações parecidas, inclusive na região em estudo, como é o caso da Celulose Cambará, que gera energia elétrica com uma turbina a vapor. O ponto mais crítico nos dois sistemas é a queima eficiente dos resíduos, pois a diversidade dos mesmos implica em alterações nos processos de combustão. A gaseificação de biomassa foi muito utilizada na Segunda Guerra Mundial para movimentação de veículos, entretanto, na bibliografia não se encontram registros de sistemas operando com serragem úmida.

O problema da geração de energia nas indústrias da madeira está atrelado ao uso racional dos resíduos por questões econômicas e ambientais. A questão econômica reside no fato de que o custo da auto-produção de energia com resíduos é vantajosa, representando menores custos de

produção e maior lucratividade. Contudo, a questão ambiental não é tão clara, pois qualquer tipo de resíduo poderia ser utilizado como combustível, mas somente a serragem úmida é que pode gerar impacto ambiental. Ao mesmo tempo, esse é o resíduo mais problemático para ser utilizado, desestimulando os empresários a usá-la no seu processo produtivo já que os outros resíduos são mais fáceis de utilizar.

#### 4.2.1.1 Gaseificação de biomassa

De acordo com o exposto nos parágrafos anteriores, torna-se necessário estudar a gaseificação da serragem para viabilizar seu uso em motores para gerar energia ou fornalhas para geração de vapor, inclusive com a execução de um protótipo, projeto que já está em andamento na UCS - Universidade de Caxias do Sul.

Na área de gaseificação de biomassa encontram-se alguns artigos recentes relacionados ao uso do gás em turbinas para geração de energia em grande escala. Paisley & Anson, 1998, reportam a primeira demonstração comercial de um processo de gaseificação para um sistema energético. A biomassa se caracteriza pelo alto conteúdo de umidade, baixo conteúdo de cinzas, baixa densidade e estrutura fibrosa. Apesar de possuir baixo conteúdo de enxofre e cinzas, são considerados, usualmente, combustíveis de baixa qualidade. Uma grande preocupação é o conteúdo de alkali nas cinzas, que tende a se condensar e provocar corrosão. Essas características exigem preocupações específicas para este tipo de combustível, não sendo possível desenvolver um gaseificador para biomassa com a tecnologia usada para o carvão.

O equipamento descrito em Paisley & Anson, 1998, se destaca por produzir um gás de médio poder calorífico ( $12$  a  $30$  MJ/Nm<sup>3</sup>) sem usar oxigênio, enquanto a gaseificação tradicional produz gás de baixo poder calorífico ( $4$  a  $12$  MJ/Nm<sup>3</sup>) devido a diluição com o ar atmosférico para a oxidação parcial dos produtos sólidos. O diferencial desse processo, chamado Batelle, consiste na utilização de dois reatores em conjunto, onde um recebe a madeira seca (10% de umidade) e através de altas temperaturas e ausência de ar produz o gás de médio poder calorífico mais carvão, enquanto o outro recebe esse carvão produzido no primeiro reator que é queimado com ar para gerar o calor necessário para o primeiro reator. Esse processo já foi testado e demonstrou sua viabilidade num projeto piloto, sendo agora testado em escala comercial.

Outra inovação desse projeto é o desenvolvimento de um catalisador de baixo custo que transforma vapores condensáveis em não-condensáveis, reduzindo os problemas de possibilidade de condensação e formação de fuligem. Assim, obteve-se um gás totalmente livre de alcatrão e

condensáveis ainda eliminando o lavador de gases e substituindo-o por um filtro de gás quente e um resfriador a água.

Os autores comparam os 32% de eficiência na geração de energia elétrica numa unidade de gaseificação integrada a um ciclo combinado, com os 15% de um sistema convencional queimando lenha num ciclo de vapor tradicional (Rankine) às mesmas pressões e temperaturas, para uma potência na faixa de 5 a 15 MW. Para unidades de potência acima de 25 MW espera-se obter um rendimento em torno de 42% com equipamentos disponíveis hoje no mercado. Como exemplo, cálculos econômicos foram realizados para uma planta de 50 MW obtendo-se um custo de instalação de US\$ 1037,00/kW incluindo o gaseificador, sistema de limpeza do gás, turbina a gás, turbina a vapor, caldeira de recuperação, acessórios, etc., e o custo de geração foi estimado em US\$ 46,50/MWh.

Steinwall, 1997, trata sobre gaseificação de biomassa e geração de energia abordando o ciclo evaporativo com turbina a gás (EvGT). Esse ciclo consiste em introduzir vapor d'água nos gases antes da expansão na turbina. Tal artifício aumenta a massa de gases e, conseqüentemente, a potência e a eficiência obtidas, aproximando-se muito de um ciclo combinado. A grande vantagem é a eliminação dos equipamentos que deveriam ser utilizados para gerar energia com o vapor resultando menor custo de capital mantendo a eficiência. A água necessária é conseguida dos próprios gases de exaustão e da umidade do combustível, reduzindo significativamente a água de reposição.

Na concepção do autor esse sistema é adequado para pequenas instalações, da ordem de 50 MW, com uma necessidade de aproximadamente 50 ton/h de madeira a 50% de umidade (base úmida). A madeira considerada é típica da Suécia, em cavacos com a seguinte composição:

Tabela 4.5 – Análise do Combustível:  
Cavacos de Madeira usados na Suécia, base seca.

Carbono	49%
Hidrogênio	6,4%
Enxofre	0,05%
Oxigênio	42,1%
Nitrogênio	0,45%
Cinzas	2,0%
PCI (base seca)	18,5 MJ/kg
Umidade (base úmida)	50%

Fonte: Steinwall (1997).

O gás produzido tem um baixo poder calorífico inferior, da ordem de 4,4 a 4,7 MJ/kg e foi escolhida uma turbina simples, de baixa relação de pressão e temperatura de entrada moderada, mais adequada para o tipo de gás considerado. O processo de limpeza do gás

considerado é com filtro de cerâmica a quente (420°C), mas nenhuma consideração de ordem prática é feita.

Como conclusão os estudos mostram que termodinamicamente é possível integrar a gaseificação de biomassa com o EvGT atingindo eficiência competitiva com os processos atuais de produção de energia usando biomassa. Nenhum estudo econômico é mostrado.

Conforme pode-se observar nos trabalhos citados anteriormente, o conceito de pequenas unidades em grande parte das referências consultadas está bem acima dos valores julgados adequados para estimular a auto-produção de energia com resíduos na região. Uma exceção a essa tendência é um manual publicado pela “Biomass Energy Foundation Press” com a intenção de ser um guia de projeto para pequenos sistemas de gaseificação com potências mecânicas de até 200 kW.

Os autores desse manual, Reed & Das, 1988, afirmam que a gaseificação de biomassa é uma tecnologia comprovada, desde que mais de 1 milhão de veículos rodaram na Europa durante a II Guerra Mundial com esse combustível devido a escassez de gasolina. Contudo, o baixo valor dos combustíveis fósseis logo após a guerra causou a interrupção e desinteresse pela gaseificação de biomassa ao ponto de hoje ser difícil de reproduzir em testes o que era rotina na década de 40.

Os processos térmicos usados na biomassa podem ser divididos em combustão, pirólise e gaseificação. A gaseificação converte 60 a 90% da energia presente na biomassa em energia presente no gás. Essa gaseificação pode ser direta, usando ar ou oxigênio para gerar calor em reações exotérmicas, ou indireta, transferindo somente calor para o reator através de uma fonte externa.

Algumas vantagens do uso da biomassa são apontadas: usualmente é um subproduto de baixo custo na agricultura ou silvicultura, possui baixo conteúdo de cinza e enxofre, e não aumenta o nível de dióxido de carbono na atmosfera, desde que o consumo não exceda a produção. Ou seja, garantindo que a biomassa usada venha de reflorestamentos ou florestas com manejo sustentável, ela candidata-se como ótima fonte renovável de energia para o futuro.

Reed & Das, 1988, afirmam que a biomassa supre 2 a 3% das necessidades de energia dos Estados Unidos, e numa percentagem ainda maior em outros países. A tabela 4.6 mostra o potencial de produção de energia com biomassa nos Estados Unidos da América.

Atualmente tem crescido o interesse em desenvolver novos equipamentos, mas não existe uma quantidade adequada de informações para ajudar pesquisadores a avaliar fatores críticos tais como operação do gaseificador, qualidade do gás, sistemas de limpeza, operação do motor e desgaste do motor. O interesse em pequenas unidades é forte entre as organizações que lidam com países menos desenvolvidos, do tipo Banco Mundial, Agência para o Desenvolvimento

Internacional dos EUA (US-AID) e similares européias, como a Mesa-Redonda de Produtores de Gás (“Producer Gas Roundtable”), do Instituto Beijer, em Estocolmo, Suécia.

Tabela 4.6 – Potencial Energético Anual das Fontes Existentes de Biomassa nos EUA

RESÍDUOS	10 <sup>6</sup> ton secas/ano	HJ/ano
Agrícolas	278,0	4,40
Animais	26,5	0,35
Papel e Celulose	24,1	0,43
Serrarias	83,2	1,50
Lixo Sólido Municipal	130,0	1,73
Florestas	384,0	6,90
Totais	925,8	15,31

Fonte: Reed & Das (1988).

#### 4.2.1.2 Uso do gás em motores de combustão interna

O manual apresentado por Reed & Das, 1988, tem muitos aspectos práticos que serão apresentados sucintamente de modo a dar uma idéia dos tipos de estudos que devem ser desenvolvidos na área. Os itens compreendem a caracterização do combustível biomassa, princípios da gaseificação, tipos de gaseificadores, teste e limpeza do gás, e adaptação e operação do motor.

### **CARACTERIZAÇÃO DO COMBUSTÍVEL BIOMASSA**

A primeira observação feita é que a biomassa pode ocorrer nas mais variadas formas, e uma afirmação de que determinado equipamento pode gaseificar qualquer combustível de biomassa é simplista e deve ser tomado muito cuidado. Alguns projetos pretendem atingir esse objetivo, mas mesmo assim, é muito importante conhecer as propriedades dos combustíveis para determinar condições satisfatórias de operação. Qualquer um que deseje instalar um gaseificador deve obter testes com o(s) tipo(s) de biomassa que serão usados antes de decidir pelo investimento.

Madeira verde contém até 50% de água em massa e suas propriedades podem variar significativamente com a umidade. A composição química da madeira (sem considerar umidade e cinzas) é basicamente carbono – C, oxigênio – O e hidrogênio – H, com proporções muito estáveis de um tipo para outro.

As análises da biomassa podem ser de dois tipos: aproximada e elementar. A análise aproximada determina a umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo (por diferença). Primeiro



aquece-se a amostra de madeira até 110°C para retirar toda a umidade e verifica-se a perda de peso. Depois sobe-se a temperatura para 950°C até que saiam todos os voláteis verificando novamente a perda de peso. Fazendo a combustão total do carvão resultante restarão apenas as cinzas.

A análise elementar fornece o percentual em peso do carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas do combustível em base seca, além do seu poder calorífico superior. O poder calorífico é determinado pela seguinte fórmula a partir dos percentuais dos componentes, Bazzo, 1995:

$$PCS = 33900 \cdot c + 141800 \cdot \left( h - \frac{o}{8} \right) + 9200 \cdot s \quad (1)$$

$$PCS_{úmido} = PCS \cdot (1 - \%W) \quad (2)$$

$$PCI = PCS_{úmido} - 2440 \cdot (9 \cdot h + w) \quad (3)$$

onde: PCS = Poder Calorífico Superior da madeira seca [kJ/kg]  
 PCS<sub>úmido</sub> = Poder Calorífico Superior da madeira úmida [kJ/kg]  
 PCI = Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]  
 c = Teor de carbono [kg carbono/kg comb]  
 h = Teor de hidrogênio [kg hidrogênio/kg comb]  
 s = Teor de enxofre [kg de enxofre/kg comb]  
 o = Teor de oxigênio [kg oxigênio/kg comb]  
 w = Teor de umidade [kg umidade/kg comb]  
 %W = Umidade da madeira [% base úmida]

Em geral os voláteis representam mais de 70% da biomassa seca, o carbono fixo está em torno de 20% e a cinza raramente ultrapassa 2%. Seu poder calorífico superior é da ordem de 20 MJ/kg (desconsiderando as cinzas e a umidade).

Algumas formas de biomassa não são consideradas adequadas para a gaseificação em leito fixo, tais como serragem, tiras finas, palhas e cascas. No entanto, se forem densificadas na forma de pequenos cavacos podem ser ótimos combustíveis e ainda precisarão menos espaço para serem armazenados.

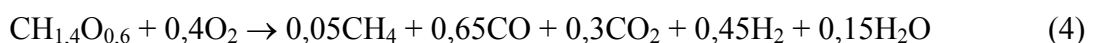
A secagem é fundamental para melhorar a qualidade do gás, aumentar sua produção e reduzir o alcatrão. A umidade pode ser livre, quimicamente combinada e adsorvida do ar atmosférico. O que se chama de umidade da madeira é a umidade livre, aquela que está entre as fibras ou superficialmente. A umidade quimicamente combinada é a que resulta quando os hidrocarbonetos reagem com o próprio oxigênio da madeira para formar água e corresponde a aproximadamente 47% do peso da madeira seca.

A umidade é importante para atingir o máximo poder calorífico possível, entretanto, mesmo a madeira totalmente seca já possui em excesso e a umidade livre diminui ainda mais o poder calorífico. Por essa razão é essencial secar a biomassa para valores inferiores a 25%, de preferência em torno de 10%. A secagem pode ser realizada com o calor perdido pelos gases de exaustão do motor ou do próprio gaseificador, entretanto, sua temperatura não pode ser muito alta porque a superfície externa depois de seca começará a pirolizar-se antes do calor atingir o centro. Para secagem eficiente recomenda-se ar com temperatura de orvalho entre 60 e 80°C.

## **PRINCÍPIOS DA GASEIFICAÇÃO**

Os processos térmicos envolvidos na conversão da biomassa são a pirólise, a gaseificação e a combustão e podem ocorrer simultaneamente dentro do gaseificador. A palavra pirólise significa quebra (lise) pelo calor (piro) e é a primeira etapa da gaseificação. Quando a biomassa é aquecida na ausência de ar, forma-se carvão, gases (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) e vapores de alcatrão. Esses produtos são vapores na temperatura da pirólise (350°C), mas condensam-se ao serem resfriados.

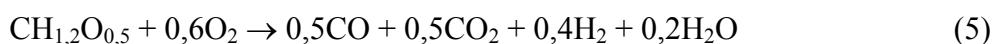
A quantidade estequiométrica de ar para a combustão completa de uma biomassa seca com composição típica (CH<sub>1,4</sub>O<sub>0,6</sub>) é aproximadamente 6 kg ar/kg comb. Para gaseificação existe uma quantidade ideal de oxigênio que produziria somente monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), que é ao redor de 20% da estequiométrica, ou seja, 1,2 kg ar/kg comb. Contudo, essa reação seria endotérmica e seria necessário uma fonte externa de calor para completar a reação. Tipicamente usa-se uma quantidade maior de ar que fornece calor ao queimar-se com a biomassa. A fórmula da reação química de um processo típico de gaseificação é a seguinte:



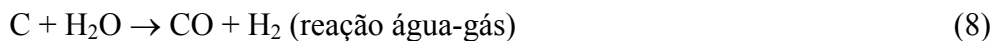
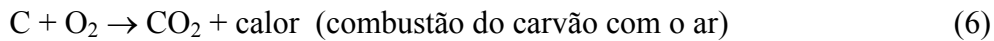
Esse gás teria um poder calorífico aproximado de 5500 kJ/Nm<sup>3</sup> (considerando o nitrogênio presente no ar).

A gaseificação se dá em etapas de acordo com o tipo de gaseificador, como será visto mais adiante. É necessário secar a eventual umidade; destilar os voláteis, que é a etapa da pirólise; reduzir o carbono com o dióxido de carbono e a água para formar monóxido de carbono e hidrogênio e queimar o carvão vegetal que irá fornecer o calor necessário ao processo.

As principais reações químicas que acontecem em cada etapa são mostradas abaixo:



A fórmula CH<sub>1,2</sub>O<sub>0,5</sub> é a provável composição dos voláteis. Essa reação também libera calor.



Vários experimentos e modelos matemáticos têm conseguido prever quais reações irão ocorrer e controlar o processo, porém, na realidade não se conhece exatamente o que acontece dentro de um gaseificador e ainda há muito o que descobrir.

## TIPOS DE GASEIFICADORES

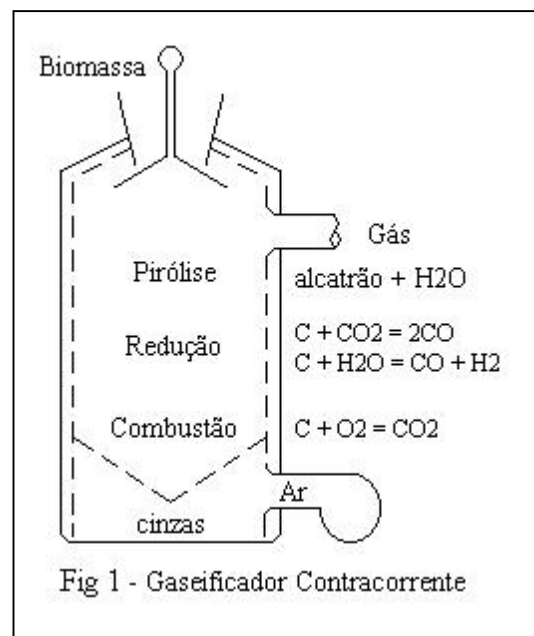
Os gaseificadores de leito fixo são simples e os mais adequados para pequenas unidades. Podem ser de fluxo cruzado, contracorrente, Imbert equicorrente e estratificado. Usualmente divide-se os gaseificadores em contracorrente e equicorrente para ilustrar as diferentes maneiras com que as etapas da gaseificação podem se suceder.

No tipo contracorrente a biomassa geralmente entra por cima enquanto o ar entra por baixo. O gás combustível sai por cima e as cinzas da madeira saem por baixo, caracterizando o fluxo contracorrente. Ao entrar no gaseificador o ar reage com o carvão vegetal formado logo acima, e produz gás carbônico e vapor d'água em altas temperaturas (reação 6). Esses produtos são empurrados para cima e reagem endotermicamente com o carvão para formar CO e H<sub>2</sub> conforme as reações (7), (8) e (9) mostradas acima. Esses gases ainda quentes fornecem o calor necessário para a pirólise e a secagem da biomassa que está entrando. Esses processos podem ser melhor visualizados na figura 4.1.

Os voláteis produzidos na pirólise não atingem altas temperaturas e, portanto, não são craqueados, gerando alcatrão e condensáveis em excesso. Se esse gás for utilizado para

queima direta, sem ser resfriado, não há maiores problemas e seu poder calorífico é um pouco maior pela presença dos voláteis.

Geralmente entre 5 e 20% do alcatrão e condensáveis são carregados juntamente com o gás.



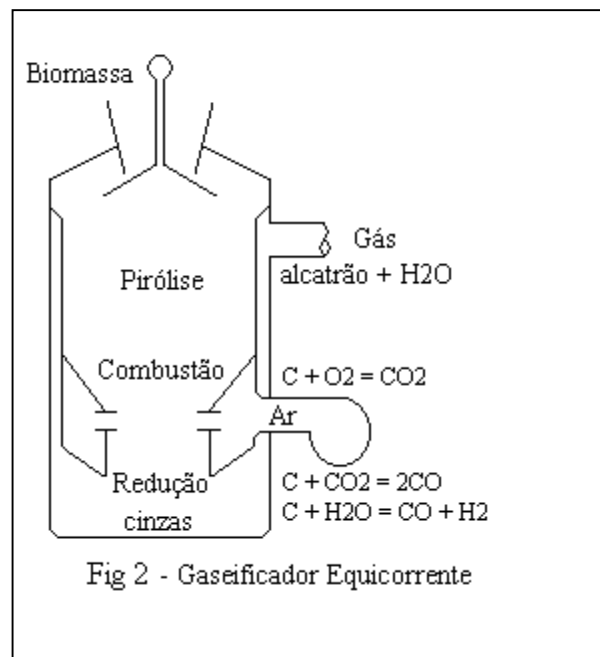
A temperatura da grelha deve ser limitada para não haver problemas de desgaste nem formação de escória pelas altas temperaturas da reação do carbono com o ar.

No gaseificador equicorrente a biomassa também entra por cima, mas o ar entra num ponto intermediário e desce no mesmo sentido da biomassa. Depois de passar pelo processo de redução, o ar sobe sem entrar em contato direto com a biomassa que está entrando, apenas trocando calor para auxiliar o processo de pirólise. Conforme pode ser visto na figura 4.2, parte do ar entra na região de pirólise e produz uma chama com a queima de grande parte dos voláteis (reação (5)). Essa chama é conhecida como combustão pirolítica onde a quantidade limitada de ar produz gases combustíveis além de gás carbônico e água. Quando os voláteis restantes são obrigados a passar pela zona de combustão, atingem temperaturas altas que os transforma em gases não-condensáveis.

Após essa zona de combustão a biomassa se transformou em carvão vegetal, o dióxido de carbono e o vapor d'água que vem da região de combustão reagem com esse carvão para gerar mais monóxido de carbono e hidrogênio (reações (7), (8) e (9)). Esse processo resfria bastante o gás já que as reações de redução são endotérmicas.

Com a queima e aquecimento dos voláteis, o gás produzido elimina 99% do alcatrão e condensáveis sendo, portanto, o tipo mais adequado para integrar-se com motores de combustão interna. O modelo chamado “Imbert” foi fabricado em massa durante a Segunda Guerra Mundial e ainda hoje é usado como modelo para esse tipo de gaseificador.

O gaseificador tipo fluxo cruzado é o mais simples e mais leve. O ar entra em alta velocidade através de um único bocal, induz uma circulação e flui através do leito de gases e carvão. Dessa forma produz-se altas temperaturas num pequeno espaço e um gás com pouco alcatrão, permitindo rápido ajuste à carga do motor. A grande quantidade de combustível e cinzas ao redor dessa zona oferece um ótimo isolamento que diminui a necessidade de aços



especiais. É um projeto sensível a formação de vazios e pontes de biomassa ocasionando problemas operacionais.

O gaseificador do tipo estratificado é muito parecido com o equicorrente. A parte superior é aberta de modo a proporcionar fluxo uniforme de ar. Logo após a primeira região que funciona como um depósito de combustível, começa outra região onde os voláteis reagem com o ar gerando uma combustão pirolítica que gera CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Esses gases atingem a terceira região em que há a redução do carvão com o gás carbônico e o vapor d'água gerando mais monóxido de carbono e hidrogênio. Com o resfriamento ocasionado nessa região pela característica endotérmica da reação não é mais possível haver reações e forma-se a última zona composta de carvão inerte e cinzas.

Essa última zona atua como uma reserva para acomodar variações de carga e proteger a grelha de um aquecimento excessivo. O principal problema desse tipo é a remoção do carvão inerte e das cinzas. Outra grande preocupação também é a formação de vazios e pontes de biomassa que podem surgir dependendo do tipo de biomassa usado. Meios mecânicos para agitar ou mexer com o combustível dentro do gaseificador devem ser previstos.

### *TESTE E LIMPEZA DO GÁS*

Construir e operar um gaseificador é relativamente simples, porém, muitos sistemas têm falhado após menos de 100 horas de operação devido a incrustação com alcatrão, tanto no gaseificador quanto no motor. É necessário testar as propriedades físicas e químicas do gás para determinar sua adequação ao propósito do sistema.

Durante o desenvolvimento do equipamento é necessário medir os seguintes valores:

- Composição do Gás – percentual em volume de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub> e hidrocarbonetos maiores, além de N<sub>2</sub>, para calcular o poder calorífico do gás e analisar a operação do gaseificador.
- Poder Calorífico – pode ser calculado pela composição ou medido calorimetricamente sem necessidade de conhecer a composição. O gás deve possuir poder calorífico maior que 4 MJ/Nm<sup>3</sup> para a maioria das aplicações.
- Quantidade de Alcatrões – a quantidade de condensáveis orgânicos no gás bruto é uma medida do desempenho do gaseificador. Acima de 5000 mg/Nm<sup>3</sup> torna-se difícil limpar o gás. O sistema de limpeza deve reduzir o alcatrão para menos de 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

- Quantidade e Tamanho dos Particulados – o tipo e quantidade dos finos de carvão e fuligem arrastados pelo fluxo de gás podem ajudar a projetar os filtros. Partículas maiores que 10  $\mu\text{m}$  devem ser removidas para um nível abaixo de 10  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  para aplicações em motores.
- Quantidade de Água do Gás – é importante para calcular a capacidade de resfriamento necessária.

A cinza é um elemento importante a ser determinado, apesar de usualmente seu percentual ser inferior a 2%. Acontece que após a pirólise, a cinza e o carbono resultante formam um produto que irá passar pelo processo de redução. A medida que isso ocorre seu tamanho diminui até cair através da grelha ou ser carregado junto com os gases para o ciclone. Esse carvão é abrasivo devido aos minerais presentes na cinza e pode causar desgaste do motor, devendo ser eliminado.

É possível projetar o equipamento para produzir quantidade razoável de carvão vegetal (10%) para ser comercializado como subproduto, e ainda produzir um gás de maior poder calorífico pela redução na quantidade de ar necessária. A desvantagem é o aumento na quantidade de alcatrão.

A biomassa pode produzir até 60% de alcatrão, que poderia ser chamado de óleo de madeira, o qual, entretanto, é craqueado para formar principalmente gás. No processo equicorrente parte do oxigênio é usado para queimar esse alcatrão resultando um gás com 0,1 a 1% desse produto.

O alcatrão ocorre na forma de uma névoa de finas gotículas que se aglomeram em gotas maiores que cobrem partículas sólidas. Se não forem removidas, essas partículas irão entupir as válvulas e partes móveis do motor.

Para efetuar a amostragem é importante que condições de mesma velocidade na câmara e no tubo de amostra sejam obtidas para garantir que a distribuição de partículas seja a mesma quando existirem partículas maiores que 10  $\mu\text{m}$ .

Após retiradas as cinzas e o alcatrão é necessário analisar o gás. Existem vários métodos como a cromatografia gasosa, aparelho de Orsat, absorção de infravermelho, condutividade térmica e espectrômetro de massa.

No que diz respeito à limpeza do gás, o primeiro passo é utilizar um tipo de gaseificador que produza o mínimo de alcatrão e particulados possível, para facilitar o processo. Outro aspecto importante é retirar os contaminantes, particulados, alcatrão e água, na ordem e na

temperatura corretas. Procedendo dessa forma torna-se mais eficiente a limpeza e o manuseio dos contaminantes.

Para retirada dos particulados utiliza-se geralmente ciclones, filtros de tecidos e/ou precipitadores eletrostáticos, sendo importante manter a temperatura acima dos 300°C para evitar a condensação de vapores. O alcatrão é retirado usualmente através de um lavador de gases, apesar de existirem tentativas de obter uma conversão catalítica que transforma os vapores condensáveis em gases não-condensáveis.

O resfriamento posterior até a temperatura ambiente é importante por dois motivos: condensa o vapor d'água presente no gás e melhora o aproveitamento do motor, pela maior densidade do gás e prevenção da pré-ignição.

#### ADAPTAÇÃO E OPERAÇÃO DO MOTOR

O primeiro fator a ser observado é a adequação do tamanho do gaseificador à potência do motor. Usualmente os fabricantes adotam a máxima potência como o tamanho do motor, enquanto o mais interessante para produção de energia elétrica é usar a potência de maior economia.

Para sistemas de pequena potência é possível usar motores fabricados em massa pelas grandes empresas automotivas. Sistemas de grande porte (>7,5 L) podem usar motores a gás natural que são mais adequados, mas também mais caros.

#### CONVERSÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA

A sucção do próprio motor é que faz o ar passar pelo gaseificador, sistema de limpeza, resfriamento e o misturador de gás, que nada mais é que um carburador simplificado, onde se verifica a mistura correta de ar para a combustão no motor. A taxa de mistura ar/gás ideal é aproximadamente 1:1 em volume e variações nessa taxa causam uma variação significativa na potência, devendo ser muito bem controlada. Como a qualidade do gás pode variar, é importante dispor de um comando independente para controlar o ar, o gás e a mistura.

Também devido a essa sensibilidade, não é recomendável o uso de válvulas borboleta, mas sim, válvulas gaveta. Outra válvula deve ser usada para bloquear efetivamente a passagem de gás quando o motor for desligado. É possível acoplar-se sistemas automáticos de controle baseados num sensor colocado na exaustão do motor.

Pode ser providenciado um sistema de duplo combustível, principalmente para a partida e o desligamento, quando o gás tem mais alcatrão que a operação normal. Assim, durante o período de aquecimento queima-se o gás num “flare” e opera-se o motor com gasolina, reduzindo-a gradualmente a medida que o gás atinge as condições ideais.

Como a mistura ar/gás queima mais lentamente que a gasolina, obtém-se uma alta octanagem e o ponto ótimo de operação é com um avanço maior da ignição.

## CONVERSÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

Motores Diesel operam com gás pobre no modo aspirado, ou seja, mistura ar/gás é succionada pelo cilindro e uma pequena quantidade de óleo Diesel é injetada para fazer a ignição. Esse sistema é chamado de “injeção piloto”. Motores de injeção direta são mais adequados que modelos com antecâmara. Na conversão de motores para uso com gás as perdas são menores nos motores Diesel que nos motores a gasolina por três razões. Primeiro, utiliza-se um pouco de óleo Diesel (até 20% com relação ao uso do motor somente c/Diesel); segundo, motores Diesel operam normalmente com taxas de compressão maiores; e terceiro, motores Diesel trabalham com grande excesso de ar, portanto, a quantidade de energia no cilindro não difere tanto. Outra vantagem é a facilidade de operar somente com Diesel quando necessário.

Existem condições em que pode-se operar o motor totalmente com gás, mas a injeção piloto é muito eficiente e confiável, melhor até que ignição por centelha, não justificando investimentos no sentido de eliminar essa pequena quantidade de combustível. Deve-se proporcionar 10 mg de Diesel para cada quilo de mistura ar/gás.

A redução de potência é de cerca de 10% em comparação com motores trabalhando somente com óleo Diesel e 40% de excesso de ar.

A partida é semelhante à descrita nos motores a gasolina, queimando o gás até atingir as condições ideais e operando inicialmente com óleo Diesel até o motor esquentar. O estrangulamento da admissão deve ser efetuado somente na entrada de gás, para evitar mistura ar/gás muito rica que geraria má combustão e maiores contaminantes na exaustão.

## POTÊNCIA

Um certo volume contendo gás de madeira mais a quantidade certa de ar contém 70% da energia contida no mesmo volume contendo gasolina ou propano também misturado corretamente com ar. Isso se deve a presença de oxigênio no monóxido de carbono do gás que reduz a quantidade de ar necessário.

A potência que pode ser desenvolvida por um motor depende fundamentalmente da quantidade de ar e combustível que entra no cilindro para queimar, portanto, para obter-se potências acima de 70% da original com gasolina deve-se superalimentar o motor através de compressores ou turbo-compressores. Outra maneira simples mas nem tão efetiva seria reduzir as perdas de carga na admissão, pela mudança nos dutos e válvulas.



O gás de madeira tem uma octanagem melhor que a gasolina, portanto, é possível aumentar-se a taxa de compressão para um valor entre 11:1 e 14:1, tomando-se cuidado, entretanto, com o uso eventual de gasolina que poderia levar a detonação excessiva.

O desgaste de motores operando com gás de madeira pode ser até menor, desde que se proceda a limpeza constante como já foi descrito anteriormente. As emissões de poluentes também não são maiores que as emissões da queima de combustíveis fósseis, sendo os resíduos da limpeza do gás os principais itens poluidores.

#### 4.2.1.3 Gaseificadores equicorrentes de leito fixo para pequenas potências

Existem diversas bibliografias sobre gaseificadores em geral, entretanto, poucas abordam especificamente pequenos gaseificadores voltados para uso em motores, conforme é o objetivo desse trabalho. Algumas das mais significativas serão descritas a seguir.

Chowdhury *et alli*, 1994, da Índia, apresentam o modelamento e simulação de um gaseificador equicorrente tipo estratificado para casca de arroz desenvolvendo um modelo realístico não baseado no equilíbrio termodinâmico e comparando seus resultados com testes experimentais. O gás produzido foi analisado por um aparelho *Orsat* e confirmado por cromatografia gasosa enquanto a distribuição de temperaturas ao longo do gaseificador foi determinada com a instalação de termopares a cada 50 mm no sentido axial.

O modelo divide o gaseificador em 4 (quatro) zonas distintas: pirólise, oxidação, gaseificação e zona não-reativa.

Algumas das hipóteses assumidas pelo modelo são: processo controlado por cinética química sem dispersão axial; o calor necessário para aquecimento do ar e pirólise é fornecido pela oxidação do carvão formado; produtos gerados pelo craqueamento da casca de arroz e, posteriormente, do alcatrão são fixados de acordo com bibliografia específica; devido a grande presença de  $N_2$  inerte, o reator é considerado de volume constante.

A partir dessas considerações uma série de equações foram determinadas para cada zona do gaseificador envolvendo as reações e suas constantes, as equações de conservação de massa para as espécies químicas envolvidas e as equações para os balanços de energia a cada incremento de comprimento.

As equações foram resolvidas numericamente usando o método de Runge-Kutta de quarta ordem para obter os perfis de concentração e temperatura requeridos.

Os resultados reportados no artigo consideram a variação do coeficiente estequiométrico,  $K$ , (relação entre a quantidade de oxigênio real e a necessária para combustão completa) entre

0,25 a 0,45 com uma velocidade superficial do gás de 0,064 m/s, e a variação da velocidade superficial do gás de 0,032 a 0,099 m/s para um coeficiente estequiométrico constante,  $K = 0,3$ .

Em termos de composição final do gás, no primeiro caso os resultados mostram um pico na formação de CO, monóxido de carbono, junto com um mínimo no CO<sub>2</sub>, dióxido de carbono, ao redor de  $K = 0,3$ . A formação de H<sub>2</sub>, hidrogênio, e CH<sub>4</sub>, metano, também tem comportamento inverso com pico em  $K = 0,37$  para H<sub>2</sub> e mínimo em  $K = 0,32$  para CH<sub>4</sub>. O modelo descreve a tendência de comportamento do gaseificador com boa aproximação. No segundo caso, observa-se que a composição final do gás não é muito afetada pela velocidade do gás, e o modelo obtém uma boa aproximação com a tendência de comportamento do gaseificador, apesar de uma pequena distorção devido ao aparecimento de O<sub>2</sub>, oxigênio, nos experimentos, enquanto o modelo prevê seu consumo total. Esse fato pode ser explicado pelo contato ineficiente dos reagentes e a formação de túneis através do leito.

Quanto ao perfil de temperaturas, no primeiro caso, observa-se em todos os valores de  $K$  um pico de temperatura a uma distância de 40 a 60 mm do topo operacional do reator e um rápido abaixamento da temperatura logo em seguida. O pico de temperatura para um  $K = 0,3$  atingiu 850°C no experimento e 1050°C no modelo baixando até 450°C com pouca diferença entre o modelo e o experimento. Nos outros coeficientes a redução de temperatura não foi tão acentuada, mantendo-se acima de 600°C e corretamente previstos pelo modelo.

No segundo caso, os resultados mostram que com 0,064 m/s foi atingido a mais alta temperatura e que a posição dos picos de temperatura move-se para baixo junto com o aumento da velocidade. Mais uma vez o modelo previu satisfatoriamente o perfil de temperaturas do gaseificador.

Outra informação importante é em relação a eficiência da gaseificação, definida como sendo o produto do poder calorífico do gás pelo fluxo de massa dividido pelo produto do poder calorífico da casca de arroz pelo fluxo de massa. A eficiência atingiu um valor máximo com  $K = 0,4$  e não houve variação significativa da mesma com a velocidade superficial do gás. Nos dois casos o modelo previu satisfatoriamente o comportamento do gaseificador.

No trabalho de Mukunda *et alli*, 1994, também da Índia, os autores inicialmente apontam situações e países onde a biomassa teria sucesso ao ser utilizada como fonte de energia. Essas condições seriam a necessidade de importar petróleo ou carvão para produção de energia, ter sua população espalhada num grande número de pequenas vilas remotas onde o custo de expansão da rede seria alto, e ilhas longe de continentes com poucos recursos além de biomassa. Na lista de países com essas características consta o Brasil, além de Gana, Quênia, Senegal, Tanzânia,

Zâmbia, Índia, Filipinas e Cuba. Um comentário coloca o Brasil como exceção nessa lista e indica que a principal razão para implantar a biomassa como fonte de energia seria a necessidade de importar grandes quantidades de petróleo, tornando importante a busca por fontes alternativas de energia.

Outro questionamento levantado é em relação às dificuldades no uso de equipamentos baseados na biomassa, principalmente nos países em desenvolvimento. Uma razão apontada é a tendência de copiar as soluções apresentadas nos países desenvolvidos, assim, torna-se muito fácil para uma empresa num país em desenvolvimento adquirir um queimador a gás natural ou a óleo (facilmente disponíveis em países desenvolvidos) e ter esse equipamento melhor atendido do que se utilizar equipamentos nacionais utilizando biomassa. Uma segunda razão seria a projeção exagerada de outras fontes de energias renováveis/alternativas. O grau de importância dada a energia eólica, solar fotovoltaica e, em alguns casos, microcentrais hidrelétricas, simplesmente sobrepõe-se de tal maneira à biomassa que muitas pessoas e industriais raramente levam em conta a biomassa como fonte de energia alternativa viável, quando na verdade é a mais barata de todas.

Em relação ao equipamento estudado pelos autores trata-se de um gaseificador equicorrente do tipo estratificado com topo aberto. A parte superior por onde entra a biomassa é composta de dois cilindros concêntricos de forma a permitir que o gás quente produzido possa ceder uma parcela de calor sensível à madeira que está entrando ao circular pelo anel formado entre os dois cilindros. A parte inferior, que perfaz dois terços do comprimento total do reator, e onde a temperatura excede 600°C, é recoberto por um material cerâmico de baixa condutividade térmica. Pouco acima da grelha são colocados seis pontos de injeção de ar para intensificar a combustão e formar um leito de carvão que irá reagir com os gases quentes e gerar gás combustível. Após a grelha a cinza cai num selo d'água e o gás passa por um ciclone para então ser conduzido por um tubo isolado para o anel na parte superior, já mencionado. Todo o corpo do gaseificador é isolado com lã-de-vidro ou similar.

Após o gaseificador, o gás passa por um lavador para ser resfriado e limpo. A água utilizada vai para um leito de areia para filtrar as partículas coletadas e, periodicamente, essa água é lavada. Para a filtragem do gás foram utilizadas várias técnicas, tais como espuma de poliuretano, tecido sintético, fibra de coco e leito de areia com distribuição de granulometria adequada. Ao final a areia foi escolhida como o meio de filtragem mais adequado pelo baixo custo, eficiência e ser reutilizável após lavagem com uma solução detergente.

Em relação ao desempenho do gaseificador foram determinados diversos parâmetros e alguns resultados são os seguintes: a relação entre a vazão de gás frio e a de biomassa é de

2,6±0,1; a composição do gás ficou na faixa de  $H_2 = 18\pm 2\%$ ,  $CO = 19\pm 1\%$ ,  $CH_4 = 1,25\pm 0,5\%$ ,  $CO_2 = 12\pm 2\%$ , e o restante é  $N_2$ ; o poder calorífico manteve-se entre 4 e 4,4 MJ/kg; a quantidade de alcatrão baixou de  $100 \text{ mg/m}^3$  na saída do gaseificador para  $20\pm 10 \text{ mg/m}^3$  depois da filtração; e o particulado baixou de  $700 \text{ mg/m}^3$  para aproximadamente  $50 \text{ mg/m}^3$  após a filtração.

A operação do sistema gaseificador-motor-gerador também foi avaliada e para motores Diesel operando com injeção piloto a quantidade de óleo Diesel substituída foi da ordem de 80 a 93% dependendo da carga e da confiabilidade do sistema. Na maior parte da faixa de operação a substituição de Diesel foi superior a 85% e o consumo de madeira foi da ordem de 0,9 a 1,0 kg/kWh para 100 kWe. A eficiência global, medida como a relação entre a energia elétrica final produzida e a energia do Diesel somada a da madeira, ficou em 27% para 100 kWe.

Quanto a questão de custo, os sistemas para aplicação térmica do gás custam ao redor de US\$ 30,00/kWh, enquanto um sistema com gaseificador-motor-gerador para produção de 90 kW de energia elétrica custa US\$ 34.000,00, ou seja, US\$ 380,00/kWh e a eletricidade gerada teria um custo de aproximadamente 50 a 60 US\$/MWh.

Walawender *et alli*, 1982, estudou um modelo de gaseificador comercialmente disponível, chamado “Buck Rogers Gasafire<sup>®</sup>”, projetado para fornecer 90 a 440 kW (320 – 1600 MJ/h) térmicos e se preocupou principalmente com o balanço de massa ou o desempenho quantitativo desse tipo de gaseificador.

Pela descrição o gaseificador é do tipo estratificado e de topo aberto, consistindo de um cilindro de 0,6 m de diâmetro e não possui garganta ou restrição interna. Um ventilador instalado antes do ciclone succiona o ar através da biomassa e através de um tubo colocado no centro que possui injetores de ar numa altura pouco acima do leito de carvão. Esse tubo gira a uma velocidade de 20 a 30 min por rotação para movimentar e misturar a biomassa dentro do gaseificador. Sobre a grelha foram colocadas bolas de cerâmica para proteger a grelha e manter o carvão mais tempo disponível para as reações de redução antes de cair com as cinzas. A alimentação de biomassa é feita por um fuso de modo a manter o nível dentro do reator aproximadamente constante.

Na medição dos resultados foram tomados alguns cuidados para garantir que sejam confiáveis. Os gases foram analisados por cromatografia gasosa, o carvão e a biomassa foram medidos diretamente em intervalos regulares, tendo sido feita análise elementar da biomassa e determinação de umidade e cinzas do carvão formado, enquanto o alcatrão e condensáveis foram determinados por procedimento específico. A partir de todas medições foi realizado um balanço

de entrada/saída de material. Dos 19 testes, 9 obtiveram fechamento do balanço superior a 95% e o pior resultado foi de 80%. Esses resultados estão listados na tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Resumo do desempenho de gaseificador

M. seca [kg/h]	Umidade [%b.u.]	Balanço [%]	PCS <sub>gs</sub> [MJ/m <sup>3</sup> ]	Prod gás [m <sup>3</sup> /kg <sub>ms</sub> ]	Carvão [kg/10 <sup>2</sup> kg]	Alcatrão [ppm]	Ar seco [kg/kg <sub>ms</sub> ]	Energia [MJ/kg <sub>ms</sub> ]	$\eta_{\text{massa}}$ [%]	$\eta_{\text{gás frio}}$ [%]
26,7	16,52	98,9	5,33	2,22	3,28	1370	1,61	11,82	87,7	70,2
26,7	16,52	98,3	5,18	2,28	3,21	2003	1,69	11,82	87,5	70,2
33,6	6,01	96,6	5,33	2,48	4,06	977	1,85	13,14	94,7	78,1
41,2	8,11	85,4	5,63	2,54	3,08	1180	1,75	14,31	98,1	85,0
47,8	5,75	85,1	5,44	1,43	2,76	1199	1,05	7,76	74,9	46,1
48,7	6,99	98,6	5,59	2,18	3,45	777	1,56	12,19	89,8	72,5
48,8	7,41	99,5	5,63	2,10	3,72	1205	1,52	11,82	88,5	70,2
49,5	7,31	91,6	5,44	2,55	3,94	1607	1,88	13,84	96,1	82,2
52,3	7,95	88,8	5,33	2,73	4,69	1679	2,08	14,52	97,5	86,3
53,7	5,50	91,8	5,66	1,62	2,79	1426	1,13	9,11	80,9	54,2
54,3	6,67	95,4	5,48	1,95	2,18	776	1,42	10,68	86,5	63,5
54,3	14,61	94,2	5,51	1,90	4,27	1594	1,35	10,44	83,0	62,1
63,7	7,72	92,6	5,55	2,61	2,71	989	1,90	14,50	96,2	86,2
68,9	14,27	91,9	5,59	2,85	3,82	1254	2,04	15,89	98,1	94,4
72,5	15,07	80,4	5,63	1,39	3,57	2445	0,99	7,81	70,8	46,5
74,6	16,32	97,3	5,74	2,11	3,96	1567	1,50	12,08	86,0	71,8
85,4	11,26	97,0	5,78	2,30	2,92	830	1,64	13,31	92,2	79,1
119,7	11,56	91,0	5,74	1,79	1,67	1544	1,27	10,23	81,6	60,8
125,5	10,67	98,2	5,44	2,10	3,25	1803	1,61	11,42	87,9	67,9
10,33	MÉDIA	91,8	5,53	2,17	3,33	1380	1,57	11,93	88,3	70,9

Notas: b.u. - “base úmida”; índice “gs” - gás seco; índice “ms” - madeira seca

Fonte: Walawender *et alli* (1982) – Kansas State University, USA.

Nos resultados apresentados chama a atenção a pouca variação do poder calorífico superior do gás seco nas várias condições apresentadas. A eficiência de conversão mássica ( $\eta_{\text{massa}}$ ) é a relação entre a massa de gás produzido e a soma das massas da biomassa e do ar úmido. A eficiência do gás frio ( $\eta_{\text{gás frio}}$ ) é a relação entre o conteúdo energético do gás referenciado a massa de biomassa seca e o poder calorífico da madeira seca, determinado experimentalmente como sendo 16,82 MJ/kg.

A composição do gás seco produzido em valores médios é a seguinte: H<sub>2</sub> = 15,1%; CO = 19,1%; CH<sub>4</sub> = 2,5%; CO<sub>2</sub> = 15,8%; pequenas quantidades de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> e o restante é N<sub>2</sub>.

Observando mais atentamente a tabela dos resultados percebe-se que os melhores valores de eficiência do gás frio são obtidos com maiores valores de relação ar/biomassa, apesar de não serem os que têm o melhor fechamento do balanço de massa. Devido a importância desses parâmetros é importante avaliar para as mesmas cargas de biomassa diferentes quantidades de ar para gaseificação, pois pode estar aí uma das principais preocupações na regulação do reator para obter boa eficiência em várias condições de carga.

Outra conclusão importante diz respeito a flexibilidade de operação do gaseificador, pois foram obtidas eficiências razoáveis numa ampla faixa de potências, possibilitando que o gaseificador suporte a operação de um grupo gerador que opere com grandes variações de carga.

Outros trabalhos que são analisados nesse capítulo são de um grupo espanhol, Bilbao *et alli*, 1990, e Bacaicoa *et alli*, 1994, da Universidade de Zaragoza, tendo desenvolvido um gaseificador não estratificado, ou de topo fechado, diferente dos anteriores. Este grupo construiu dois gaseificadores, um de 50 kg/h e outro de 200 kg/h de biomassa aparentemente com a mesma configuração.

O gaseificador de 50 kg/h consiste de um cilindro com diâmetro interno de 500 mm, com bom isolamento externo, e 1200 mm de altura, em cujo centro existe um tubo que conduz o ar necessário até uma região intermediária, onde se transforma numa pirâmide invertida cheia de furos para garantir uma boa distribuição de ar dentro do gaseificador. Pouco acima do gaseificador há uma garganta com 250 mm de diâmetro que obriga os gases da pirólise a passar por uma região incandescente, gerando as reações necessárias à gaseificação. No fundo está uma grelha vibratória com furos de 10 mm de diâmetro. Os equipamentos acessórios constituem-se de: um depósito que introduz a biomassa por um pistão; um sem-fim abaixo da grelha para a retirada de cinzas; um compressor tipo roots que faz o ar passar por um rotâmetro e um trocador de calor, para aquecer o ar com o calor dos gases produzidos, antes de entrar no gaseificador; um ciclone para retirar os particulados do gás produzido antes de entrar no trocador de calor; um medidor tipo Venturi para determinar a vazão de gás; uma tomada de amostras para verificar a composição do gás por cromatografia gasosa; e finalmente uma tocha para queimar o gás.

A composição média do gás produzido está na seguinte faixa de percentual em volume:  $N_2 = 45$  a 60%;  $CH_4 = 0,25$  a 2,5%;  $H_2 = 10$  a 22%;  $CO = 13$  a 25%;  $CO_2 = 8$  a 19% e traços de  $C_2H_2$  e  $C_2H_4$ . O poder calorífico superior chegou a valores entre 4,2 e 5,4 MJ/Nm<sup>3</sup>.

No equipamento para 200 kg/h a principal diferença está na grelha que é composta de 3 chapas de diâmetros diferentes em três níveis que giram excentricamente e no sistema de alimentação de biomassa e retirada de cinzas que é automático. Em relação a essa grelha, foram estudadas características construtivas diferentes. Numa o espaço entre os níveis era totalmente aberto, para as cinzas passarem livremente, enquanto noutra foi colocado uma chapa de metal com furos de 15 mm de diâmetro para tentar diminuir a quantidade de material sólido nas cinzas.

No balanço de massa dos testes observou-se que a produção de gás é diretamente proporcional a quantidade de ar que se introduz no gaseificador, enquanto o consumo de biomassa depende da operação do sistema de retirada de cinzas (ou sólidos). Vários parâmetros

de desempenho em relação à massa e energia foram analisados para diversas condições de operação. Os parâmetros são os seguintes:

- a) relação ar/biomassa (base seca) [A/F];
- b) relação massa de gás/massa de ar (base seca) [G/A];
- c) relação massa de gás/biomassa (base seca) [G/F];
- d) eficiência de conversão de massa [MCE], definida como a relação entre o gás seco produzido e as quantidades de biomassa úmida e ar;
- e) rendimento de gás frio [CGE], definido como a relação entre a energia contida no gás seco e a energia contida na biomassa seca.

Todos esses parâmetros foram avaliados contra a taxa de equivalência [E/R] que é o percentual da quantidade de ar real em relação à estequiométrica, nas condições de operação para os diferentes tipos de grelhas.

#### 4.2.1.4 Aspectos econômicos de projetos de gaseificadores

Para avaliar-se o aspecto econômico da implantação de um gaseificador devem ser analisados vários custos, como pode-se perceber:

- O custo da biomassa – em alguns casos é praticamente nulo, a menos que seja necessário algum beneficiamento. Geralmente as empresas têm um gasto para livrarem-se do resíduo.
- O custo do sistema de gaseificação e geração de energia elétrica – inclui desde o sistema de alimentação e secagem da biomassa até o quadro de comando.
- O custo do capital – depende das taxas de juros praticadas. Existem algumas linhas de crédito favoráveis a esse tipo de empreendimento.
- O custo da mão-de-obra.
- O custo da revisão e peças de reposição – esta é uma vantagem do uso de motores de combustão interna que são de uso generalizado e bem conhecidos no mercado.
- O tempo de vida útil dos motores – esse tempo deve incluir o custo das reformas que podem ser feitas no motor.
- O valor da potência produzida.
- O custo da disposição das cinzas e do alcatrão retirados no sistema de limpeza.
- O custo da eletricidade comprada pela empresa.
- Os benefícios da utilização de energias renováveis.

Outras considerações devem ser levadas em conta num tipo de projeto como esse devido ao seu poder de desenvolvimento junto a comunidade em que se insere. Por exemplo, a criação de empregos, a geração de renda interna pela compra, beneficiamento e transporte dos resíduos, a manutenção dos equipamentos e a maior competitividade das empresas que geram sua própria energia elétrica.

#### **4.2.2 Substituição de energéticos**

No município de Jaquirana as características são de clima frio devido a altitude, em torno de 1.000 m, e região com razoável cobertura vegetal, que favorecem a utilização de fogão a lenha. Pode-se aproveitar o calor usualmente perdido pela chaminé para aquecer água que pode ser usada nos chuveiros e pias.

O equipamento específico que será estudado não possui nenhuma referência bibliográfica que possa ser utilizada. Contudo, pode ser considerado um trocador de calor inserido na fornalha de um fogão a lenha. Os aspectos mais importantes que serão abordados dizem respeito ao Gerenciamento pelo Lado da Demanda – GLD, e ao fogão a lenha como um todo.

##### **4.2.2.1 Gerenciamento pelo Lado da Demanda - GLD**

Segundo Januzzi et alli, 1995, "a introdução de novas tecnologias e mudança de comportamento junto aos usuários é feita através de novos tipos de investimentos, como os programas de GLD - Gerenciamento pelo Lado da Demanda (em inglês, *DSM - Demand Side Management*). O custo desses programas deve ser cotejado com os custos necessários para a expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição". Para Campos Filho, 1995, "a idéia fundamental é agir no mercado de forma localizada, na área de influência de determinadas subestações, no sentido de influir no consumo de energia e na solicitação de ponta do sistema, promovendo a conservação e racionalização do uso de energia elétrica, e otimizar o uso das instalações da concessionária".

Ainda conforme Campos Filho, 1995, "para o setor elétrico, a ação de racionalização do uso de energia elétrica, atuando do lado da demanda, através de ação no segmento residencial e de forma geograficamente localizada, pode tornar-se um bom negócio, considerando os ganhos financeiros com o retardo da necessidade de novas obras, o aumento da oferta de energia para segmentos de mercado mais rentáveis sem novos investimentos e a racionalização de uso do sistema elétrico".



Analisando a demanda do sistema elétrico brasileiro observa-se que o setor residencial é responsável por 36% do total, e consome 22% da eletricidade produzida, conforme Januzzi et alli, 1995. Essa diferença de mais de 50% entre consumo e demanda é devido ao consumo excessivo no horário de ponta, entre 18 e 21 horas, principalmente para aquecimento de água para banhos e iluminação. Conforme Moreira e Jardini, 1995, a estimativa da Eletrobrás (PROCEL) é de que 88% das residências na região Sul possuem chuveiros elétricos, que são responsáveis por 20 a 26% do consumo da residência e por aproximadamente 50% da demanda residencial no horário entre 19 e 20 horas.

Ainda conforme Moreira e Jardini, 1995, "o chuveiro é um aquecedor de passagem instalado na própria peça de utilização. A resistência elétrica é acionada pela pressão da água do banho. Devido à necessidade de aquecimento imediato do fluido, a potência dos chuveiros precisa ser alta (2 a 4 kW). Apresenta como vantagem o baixo custo (a partir de US\$ 8), a facilidade da instalação hidráulica (sem tubulação de água quente) e de manutenção, e o uso controlado pelo usuário. É o equipamento mais utilizado no Brasil. Para o usuário, as desvantagens são o perigo de choque elétrico (falta do fio terra ou mau isolamento), o desconforto (fluxo de água) e cuidados na instalação elétrica devido a sua potência.

"Para a concessionária, o acréscimo de um único chuveiro elétrico na ponta da carga pode exigir um investimento suplementar, segundo alguns autores, de US\$ 600 a US\$ 900". Ou, baseado em Campos Filho, 1995, pode ser encarado como a necessidade de uma usina de ponta virtual, com fator de capacidade de 8,5%, a um custo em torno de US\$ 600/kW.

Na região em estudo os hábitos de aquecimento de água para banho não são diferentes, provavelmente com uso de chuveiros ainda mais potentes (3,5 a 5,4 kW) devido ao clima frio da região. Por outro lado, também deve ser levado em conta a grande demanda industrial de alguns municípios, que diminui a influência do setor residencial na demanda.

Já existem algumas experiências em concessionárias como a CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, e a CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz, de GLD em relação ao chuveiro elétrico. Em ambas experiências a idéia é pré-aquecer a água que entra no chuveiro através da energia solar, diminuindo assim a potência instalada. No material apresentado pela CEMIG (1993), observa-se um sistema alternativo de aquecimento solar que coloca o reservatório para receber diretamente a radiação, simplificando a instalação e apresentando um custo altamente competitivo em relação aos coletores tradicionais.

Na experiência da CPFL, optou-se por apenas um coletor solar plano, ao invés de cinco ou seis como é o uso normal, acoplado a um chuveiro elétrico de baixa potência (até 2 kW). A

análise econômica desse sistema mostra que o retorno se dá em 2,4 anos, considerando um custo do pré-aquecedor de US\$ 446, Januzzi, 1995.

Tanabe & Oliveira, 1998, fazem uma comparação econômica detalhada de 5 sistemas residenciais de aquecimento de água: coletor solar, aquecedor a gás de passagem, “boiler” elétrico e chuveiros elétricos de 3,6 e 6,4 kW. Usando o método de Valor Presente incluindo custos de capital, manutenção e energia, os valores encontrados foram: coletor solar - R\$ 0,0632/kWh; aquecedor a gás de passagem - 0,0697/kWh; chuveiro elétrico de 3,6 kW - R\$ 0,0746/kWh; 6,4 kW - 0,0907/kWh e “boiler” elétrico - 0,1291/kWh. Outra comparação feita em [6] é em relação a eficiência exergética dos sistemas em que o coletor solar aparece com 6,7% enquanto o chuveiro elétrico atinge apenas 2,5%.

O estudo conclui que subsídios a implantação de coletores solares são atraentes para o sistema elétrico devido a sua maior eficiência exergética e menor valor presente se consideradas a vida útil dos equipamentos e o consumo de eletricidade.

Outro trabalho de comparação de sistemas de aquecimento foi apresentado por BEYER et alli, 1998, que utilizou um condicionador de ar modificado para aquecer a água com o calor de condensação do gás refrigerante, sistema conhecido como bomba de calor. Esse equipamento foi testado durante 1 ano no laboratório simulando-se condições de funcionamento semelhantes a uma casa. As diversas medições permitiram determinar o ciclo de operação do sistema de refrigeração, a temperatura da água no reservatório e as perdas de calor. Contudo, o resultado mais significativo é a comparação com outros 3 sistemas de aquecimento de água: chuveiro elétrico, coletores solares e GLP com acumulação. Tomando o chuveiro elétrico como base e analisando custo de instalação e de operação, o GLP apresentou tempo de retorno igual a 2,3 anos, a bomba de calor 3,3 anos e os coletores solares 6,2 anos. Com uma bomba de calor mais eficiente, o tempo de retorno cai para 2,6 anos.

#### 4.2.2.2 A serpentina e o fogão a lenha

Para o caso específico da região, o aquecimento solar não será a solução mais adequada, pois devido a altitude próxima dos 1000 m, o clima é bastante frio, com alta precipitação pluviométrica, o que diminui a eficiência de sistemas solares. Entretanto, o uso do fogão a lenha é bastante comum, tanto na área rural quanto na urbana, e mesmo no verão. Uma solução aparentemente adequada seria utilizar o próprio fogão a lenha para o aquecimento de água.

A partir de pesquisa prévia feita no Estado, constatou-se a existência de um equipamento para aquecimento de água a partir do fogão a lenha, que consiste de um trocador de calor

instalado dentro da fornalha do mesmo. Esse trocador é conhecido comercialmente como "serpentina" e a água quente gerada é levada até um reservatório isolado para uso posterior. Tomando as devidas precauções de segurança e eficiência, pode-se ter água quente para o banho enquanto se prepara o jantar, ou mesmo, se esquentar a água para o chimarrão.

Macintyre, 1996, fornece alguns elementos importantes para o dimensionamento de instalações de água quente, do tipo consumo por pessoa e por equipamento, diâmetros de tubulação e suas perdas de carga e exemplos de instalações. Também descreve a serpentina, usando o nome de "termo-sifão", para uso em fogões.

A redução da demanda de energia elétrica com a substituição dos chuveiros elétricos pela serpentina traria inegáveis benefícios para consumidores e concessionária. Contudo, o custo desse equipamento é relativamente alto e, conforme Moreira e Jardim, 1995, "a tendência de comportamento dos consumidores é adquirir seus equipamentos pelo menor custo inicial, além do custo operacional ser baixo pelo valor da tarifa elétrica. Dessa forma, a conservação de energia só ocorrerá com uma grande participação do governo (incentivos fiscais, financeiros e legislação), do setor elétrico (economia em investimento em usinas e gerenciamento pelo lado da demanda) e da indústria (investimento, tecnologia)".

No que diz respeito ao fogão a lenha, ele é uma forte preocupação a nível mundial devido ao grande consumo de lenha para cocção nos países subdesenvolvidos, principalmente da Ásia. Bhattacharya, 1998, comenta que programas de implantação de fogões mais eficientes financiados pelo Banco Mundial foram desenvolvidos em 41 países. Os maiores investimentos foram na China, com 129 milhões de fogões melhorados, na Índia, com 15,53 milhões, no Kenya, com 10% das residências, e Tailândia e Sri Lanka, com 5% das residências possuindo fogões mais eficientes.

Apesar da pressão exercida pelo uso da lenha nas florestas nativas, Bhattacharya, 1998, considera os fogões mais eficientes uma boa alternativa aos combustíveis fósseis, muito mais preocupantes do ponto de vista ambiental.

O mesmo autor descreve alguns novos desenvolvimentos de fogões na Índia, Estados Unidos, Holanda, Myanmar e China.

No que diz respeito ao aquecimento de ambientes (que é uma necessidade na região da Serra) ele comenta que a eficiência pode variar de 10% para lareiras a 75% em fogões de alta eficiência modernos. Na China estudos mostraram que projetos de fogões com dupla função: cocção e aquecimento do ambiente, têm uma eficiência superior a 60%. Convém ressaltar que no Rio Grande do Sul o fogão a lenha é usado tanto para aquecer o ambiente quanto para cocção, e

mesmo assim, ainda temos 40% da energia térmica perdida pela chaminé e por combustão deficiente.

Outra importante preocupação revelada por Bhattacharya, 1998, é com a poluição gerada pelos fogões devido a combustão incompleta. Alcatrão, fuligem e particulados são liberados pela chaminé. Nos Estados Unidos já foram introduzidos combustores catalíticos que reduziram os poluentes em 80%. Na Finlândia foi utilizado um catalisador na chaminé que reduziu 70 a 93% do CO, 29 a 77% do CH<sub>4</sub>, 80 a 100% de outros hidrocarbonetos e 56 a 60% do alcatrão.

## 5 ESTUDO DAS INSTALAÇÕES PROPOSTAS

### 5.1 GASEIFICADOR DE BIOMASSA

A partir da análise dos dados contidos no Cadastro Florestal do Estado e contatos com empresários e representantes do setor, chegou-se a conclusão de que para ter boa aceitação, o equipamento deve ser de porte pequeno para instalações desse tipo, mas adequado para suprir as necessidades da maior parte das indústrias.

Mesmo sem uma pesquisa detalhada das necessidades das empresas é possível afirmar algumas características a respeito de boa parte delas:

- Um percentual acima de 90% é de pequenas empresas com poucos funcionários e demanda de energia elétrica entre 100 e 250 kVA;
- A maior parte dessas empresas pequenas não beneficia a madeira, ou seja, não necessita calor para secagem e produz principalmente resíduos úmidos;
- Estão localizadas em regiões com baixa qualidade de energia elétrica;
- Não são empresas capitalizadas e precisam incentivos para investir em novos equipamentos e tecnologia;
- A qualidade da mão-de-obra é baixa.

Baseados nessas informações e de acordo com os resultados encontrados na literatura é possível selecionar a tecnologia mais adequada para essa aplicação. Nesse caso, foi escolhida a geração de energia elétrica por motor de combustão interna, mais eficiente que outras tecnologias nessa escala de potência e o uso da biomassa se dará através da sua gaseificação, pois o gás gerado pode ser usado no motor sem problemas desde que esteja limpo, além de possibilitar uma flexibilidade nas características da biomassa em termos de umidade e granulometria.

Para viabilizar essa opção, é necessário produzir um gás com as características adequadas, quais sejam:

- a) Poder calorífico inferior entre 4 e 6 MJ/Nm<sup>3</sup>, caracterizando-se como gás pobre.
- b) Nível de particulados menor que 10 mg/Nm<sup>3</sup> para partículas maiores que 10 µm.

- c) Nível de alcatrão e gases condensáveis menor que  $100 \text{ mg/Nm}^3$  (100 ppm).
- d) Eficiência de gás frio superior a 70%.
- e) Eficiência da conversão mássica superior a 80%.

Para atingir as características desejadas optou-se por um gaseificador equicorrente estratificado de topo aberto e será estudada a recirculação interna dos gases para diminuir a formação de alcatrão e gases condensáveis. Uma das vantagens do uso de motores de combustão interna ciclo Diesel é a de que necessitam poucas adaptações e propiciam a redução de custo da instalação pelo uso de equipamentos de mercado. Além disso, a operação e manutenção do motor não requer maior especialização de mão-de-obra.

A recuperação de calor nos motores é restrita, como visto anteriormente, mas não é uma necessidade para grande parte das empresas, portanto, a maior eficiência na geração de energia elétrica compensa essa característica negativa.

### **5.1.1 Características do gaseificador proposto**

O gaseificador proposto é de leito fixo, composto por uma grelha de ferro fundido presa a um eixo dotado de movimento de rotação. Acima, no mesmo eixo, hastes são utilizadas para misturar a biomassa sólida na região de redução e favorecer a retirada das cinzas que estão sobre a grelha. No centro do gaseificador desde o topo até uma distância pouco acima da grelha, começa um tubo por onde introduz-se ar que, ao passar por um dispositivo tipo venturi, succiona gases de dentro do gaseificador para queimá-los num tubo de diâmetro maior no final desse dispositivo. Com esse sistema pretende-se aumentar a temperatura interna queimando o alcatrão e outros gases para transformá-los em gases quentes que reagirão com o carvão, formando os gases combustíveis desejados.

O dimensionamento, balanços de massa e de energia do gaseificador serão detalhados nos próximos capítulos. No Anexo I consta um desenho em corte do gaseificador proposto.

#### **5.1.1.1 Formato e dimensões principais do gaseificador**

O equipamento será composto de um corpo cilíndrico interno com a grelha no fundo, ao longo do qual se processarão as principais reações, e outro cilindro externo para conduzir o gás, recolher as cinzas e recuperar parte do calor do gás. A região inferior do cilindro interno está isolada do externo com concreto refratário para manter uma temperatura alta. A região superior,

por onde entra a biomassa, possui um espaço entre o cilindro interno e externo onde foram colocadas divisões (chicanas) para aumentar a velocidade do gás e aletas longitudinais no cilindro interno para aumentar a condução e transferência de calor entre o gás e a biomassa que entra. Todo o cilindro externo está isolado do ambiente com lã-de-rocha para minimizar as perdas de calor.

As dimensões principais são as seguintes:

Diâmetro externo = 0,55 m;

Diâmetro interno = 0,27 m;

Altura total = 1,74 m;

Altura do cilindro interno = 0,926 m;

Grelha: diâmetro = 0,295 m e 240 furos de 10 mm

Espessura do refratário = 0,03 m;

Altura do refratário = 0,522 m;

Espessura lã-de-rocha = 0,05 m;

Diâmetro do tubo de alimentação do ar = 53 mm;

Diâmetro da garganta = 36 mm;

Diâmetro do queimador interno = 0,130 m;

Aletas longitudinais = 8 x 0,276 m x 0,05 m;

A alimentação de biomassa é manual e semi-contínua, colocando-se quantidades fixas que mantêm o nível dentro do gaseificador entre limites previamente estabelecidos e demarcados. A escolha do gaseificador de topo aberto facilita essa forma de alimentação.

Parte do ar é insuflado no queimador interno por meio de um ventilador que fornece uma pequena pressão necessária para realizar a sucção dos gases internos. O restante do ar e os gases formados são succionados através do corpo interno, grelha, espaço entre os cilindros, bocal para medição de vazão e resfriador, por um outro ventilador no final de todo o conjunto. Após esse ventilador, os gases são queimados numa tocha.

Na figura 5.1 é mostrado uma foto do sistema completo conforme está instalado.

### **5.1.2 Balanço de massa do gaseificador**

Para escolher o tamanho do gaseificador, escolheu-se um porte que favorecesse a instrumentação e operação em laboratório, mas também permitisse a observação de algumas características reais de um equipamento a nível industrial. Dessa forma foi previsto um consumo

de 12 kg/h de biomassa, valor que, segundo a literatura, poderia gerar em torno de 10 kW de energia elétrica. Como pode ser visto no capítulo anterior, o equipamento tem um diâmetro de 0,55 m e uma altura menor que 1,8 m.

Figura 5.1 - Conjunto completo para ensaio do gaseificador



O parâmetro relação ar/biomassa é fundamental no desempenho do gaseificador, conforme mostrado no capítulo 4. Os valores que mostraram-se mais eficientes situam-se na faixa entre 2,0 a 2,4 kg ar/kg biomassa, que permite obter-se energia suficiente aos processos de pirólise, combustão e redução e ainda produzir um gás com poder calorífico dentro da faixa estabelecida. Pouca quantidade de ar poderá gerar muito alcatrão e gases condensáveis, enquanto grande quantidade de ar reduz o poder calorífico e dilui o gás com muito nitrogênio e gás carbônico.

Com os valores estabelecidos a vazão de ar deverá se situar entre 24 e 28,8 kg/h, enquanto a vazão de gás será de 36 a 40,8 kg/h, incluindo os sólidos (particulados e carbono não-queimado) e condensáveis (alcatrão e outros) que são arrastados ou depositam-se ao longo das partes internas. A partir dos dados construtivos pode-se calcular as velocidades e vazões volumétricas que se pode obter no equipamento.

Calculando a massa específica do ar para uma pressão atmosférica de 92,7 kPa, temperatura de 20°C e umidade relativa igual a 60%, obtém-se aproximadamente 1,08 kg/m<sup>3</sup>. Com isso, a vazão de ar irá oscilar entre 22,2 m<sup>3</sup>/h e 26,7 m<sup>3</sup>/h. Arbitrando, inicialmente, que



50% do ar passará pelo corpo principal do gaseificador e 50% pelo tubo interno, tem-se uma velocidade máxima do ar passando pela biomassa na região inicial de 0,136 m/s. A velocidade do ar dentro do tubo interno é de 1,68 m/s. No caso de haver aquecimento do ar que entra no queimador pela recuperação do calor sensível do gás, a temperatura pode chegar a 80°C, e a massa específica cai para 0,9 kg/m<sup>3</sup>. Com isso a velocidade dentro do tubo interno subiria para 2,02 m/s.

Para conhecer as velocidades e operação do gaseificador é preciso determinar um perfil de temperatura, pois a medida que o ar reage com a biomassa, a temperatura aumenta, começa a pirólise e sobra o carbono fixo, ou carvão. Os gases e vapores formados representam a maior parcela da biomassa e aumentam o volume total dos gases. Segundo a literatura, a composição genérica provável dos produtos da pirólise é CH<sub>3,41</sub>O<sub>1,58</sub>. A queima desses produtos gera CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O com um poder calorífico inferior próximo de 9 MJ/kg. Supondo uma composição de hidrocarbonetos oxigenados com média de 5 carbonos, obtém-se C<sub>5</sub>H<sub>17,05</sub>O<sub>7,9</sub> e chega-se a uma massa molecular de 203,45 kg/kmol. Parte desses gases será succionada pelo venturi interno e irá queimar com ar no queimador, localizado na região de redução.

Com a queima interna dos gases será obtido uma região de alta temperatura a qual decrescerá rapidamente com as reações de redução dos gases quentes com o carvão. Adaptando-se o perfil de temperaturas encontrado na literatura pode-se montar a seguinte tabela:

Tabela 5.1 – Produtos e temperaturas em diversas regiões do gaseificador

SEÇÃO	Altura [mm]*	Diâmetro [mm]**	Produtos	Temperatura [°C]	M. Esp. [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0 – 250	60 a 270	Biomassa úmida + Ar	50 a 300	1,97
2	0 – 250	0 a 53	Ar atmosférico	20 ou 80	1,08 ou 0,9
3	250 – 500	114 a 270	Carvão + Prod. pirólise	300 a 700	0,706
4	250 – 350	60 a 105	Produtos da pirólise	500	2,934
5	280 – 500	0 a 56,5	Ar + Produtos da pirólise	200	0,839
6	500 – 700	140 a 270	Carvão + Gases	700 a 1000	0,477
7	500 – 700	0 a 130	Gases queimados	1200	0,228
8	700 – 850	48 a 270	Carvão + Gases queim.	1100 a 750	0,301
9	850 – 926	48 a 270	Carvão + Gases comb.	750	0,37

\* A altura é contada a partir do topo.

\*\* Os diâmetros são concêntricos com o eixo no centro do gaseificador.

As vazões esperadas dependem da operação do equipamento através das regulagens que foram previstas e nas reações que devem ocorrer entre o ar, a biomassa e os produtos da pirólise. Para as mesmas seções da tabela anterior pode-se estipular as vazões em massa desejadas. O cálculo das vazões em volume foi feito separadamente para cada componente, de acordo com sua densidade, para então somar-se os componentes da região correspondente e calcular as velocidades dos fluidos.

TABELA 5.2 – Vazões e velocidades nas diversas regiões do gaseificador

SEÇÃO	Área [m <sup>2</sup> ]	Vazão [kg/h]	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Relação Ar/biomassa	Velocidades [m/s]	Tempo resid [s]
1	0,0544	26,4	13,43	1,2	0,0686	3,64
2	0,00212	14,4	13,33	-	1,747	0,14
3	0,0470	26,4	37,40	1,2	0,221	1,13
4	0,00588	4,0	1,363	-	0,064	1,56
5	0,00251	18,4	21,94	3,6	2,428	0,09
6	0,0419	22,4	46,955	1,8	0,311	0,64
7	0,0133	18,4	80,690	3,6	1,685	0,12
8	0,05545	40,8	135,68	2,4	0,680	0,22
9	0,05545	40,8	110,30	2,4	0,552	0,14

Para chegar às densidades, considerou-se que a serragem tem densidade aparente de 130 kg/m<sup>3</sup> e o carvão 180 kg/m<sup>3</sup>. Por simplicidade, o ar e os produtos da pirólise foram considerados como gases perfeitos com constantes de gás iguais a 287,1 J/kg.K e 40,87 J/kg.K respectivamente. A densidade das misturas foi obtida dividindo a vazão em massa pela vazão em volume em cada seção. Outros parâmetros foram determinados de acordo com as reações esperadas. A pressão atmosférica foi determinada como 92,7 kPa. Em termos de velocidade, ainda temos alguns pontos localizados como o bocal do tubo interno, onde o ar passa com velocidade de 73,66 m/s, e a garganta do venturi onde a velocidade é de 7,50 m/s.

Com os fluxos de massa estimados aqui pode-se calcular os fluxos de energia esperados e as eficiências na conversão de massa e de energia.

### 5.1.3 Balanço de energia do gaseificador

O processo de gaseificação é composto de diversas reações que ocorrem nas diferentes regiões do equipamento desde que satisfeitas as condições necessárias. Um dos principais parâmetros que devem ser controlados é a temperatura. Em vista disso, foram colocados 10 termopares ao longo do corpo do gaseificador sobre a grelha, 1 termopar abaixo da grelha, 1 termopar na saída do gaseificador e 1 termopar após o resfriador para determinar o perfil de temperaturas em cada teste.

Dentro do gaseificador a secagem, a pirólise e a redução são processos endotérmicos, ou seja, necessitam calor para ocorrerem. A redução, que consiste na reação do carvão com gás carbônico e vapor d'água para formar monóxido de carbono e hidrogênio, tem sua velocidade consideravelmente reduzida abaixo de 800°C. Os processos exotérmicos são a combustão do carvão e dos produtos da pirólise, os quais são muito instáveis entre 700 e 800°C, craqueando-se

para formar H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub>. Um balanço de energia mostra que a diminuição de temperatura do processo de redução prejudica a quebra dos produtos da pirólise e, portanto, é necessário atingir maiores temperaturas internas e/ou meios de craquear o alcatrão e condensáveis de forma mais efetiva.

Um dado importante encontrado na literatura é que o calor necessário para ocorrer a pirólise e aumentar a temperatura da biomassa para 600°C é de 1,6 a 2,2 MJ/kg, portanto, o equipamento em estudo necessitará até 7,3 kW nessa fase.

$$Q_{\text{pirólise}} = (12/3600).(2200) = 7,3333 \text{ kW} \quad (10)$$

O sinal positivo significa que é um processo endotérmico.

Na região inicial haverá recuperação de calor dos gases quentes que passam pelo anel entre os cilindros interno e externo. Estimando um calor específico de 1,1 kJ/kg.K e uma redução de temperatura de 200°C dos gases formados, obtém-se aproximadamente 30% do calor necessário para a pirólise:

$$Q_{\text{recup}} = (40,8/3600).1,1.(-200) = -2,493 \text{ kW} \quad (11)$$

Como a biomassa entra com umidade, irá consumir energia para a secagem. Considerando 10% de umidade e calor latente de 2500 kJ/kg, obtém-se:

$$Q_{\text{sec}} = (12*0,1/3600).(2500) = 0,833 \text{ kW} \quad (12)$$

O restante do calor necessário será obtido através dos processos exotérmicos que ocorrem no interior do gaseificador. O principal deles é a queima de parte dos produtos da pirólise no queimador interno resultando na transformação do alcatrão e condensáveis em gases com calor sensível e temperatura suficientes para permitir a ocorrência das reações endotérmicas de redução.

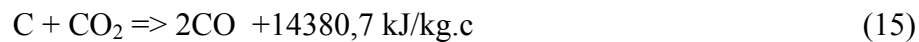
Através da composição esperada dos produtos da pirólise pode-se estimar um poder calorífico inferior de 9031,5 kJ/kg. Com a combustão completa de 4 kg/h que é esperado no queimador interno, a liberação de energia será de 10 kW.

$$Q_{\text{comb}} = (4/3600).(-9031,5) = -10,035 \text{ kW} \quad (13)$$

O calor sensível dos gases quentes que saem do queimador pode fornecer outros 1,7 kW, considerando um calor específico de 1,1 kJ/kg.K e uma variação de temperatura em torno de 300°C.

$$Q_{\text{sens}} = (18,4/3600).1,1.(-300) = -1,687 \text{ kW} \quad (14)$$

As reações de redução podem ter sua necessidade de energia quantificada, chegando-se a um valor aproximado de 12 kW.



De acordo com as reações esperadas pode-se estimar uma quantidade de 3,475 kg/h de carvão, 1,552 para a primeira reação e 1,923 para a segunda reação.

$$Q_{\text{red}} = (1,552/3600).14380,7 + (1,923/3600).10857,4 = 12 \text{ kW} \quad (17)$$

Por último ainda temos uma pequena quantidade de gás liquefeito de petróleo – GLP, usado como piloto para garantir a combustão do gás no queimador. Essa quantidade deverá se situar na faixa de 100 gramas por hora. O poder calorífico inferior do GLP pode ser tomado como 45000 kJ/kg.

$$Q_{\text{GLP}} = (0,1/3600).(-45000) = -1,25 \text{ kW} \quad (18)$$

Para finalizar esse balanço de energia simplificado, soma-se todos os valores, arredondando-os para facilitar a análise, e deve-se chegar a um valor próximo de zero:

$$Q_{\text{recup}} + Q_{\text{comb}} + Q_{\text{sens}} + Q_{\text{GLP}} + Q_{\text{pirol}} + Q_{\text{sec}} + Q_{\text{red}} = \Delta Q \quad (19)$$

$$(-2,5) + (-10) + (-1,7) + (-1,3) + 7,3 + 0,8 + 12 = 4,6 \text{ kW} \quad (20)$$

O significado desse valor é que será preciso obter maior geração de calor internamente e isso poderá ocorrer queimando parte do carvão ou dos produtos da pirólise. Monitorando-se as temperaturas pretende-se variar as quantidades de ar e carvão para manter a geração de gás de forma adequada.

## 5.2 SERPENTINA NO FOGÃO A LENHA

O estudo desse equipamento foi dividido em duas etapas: realização de enquete na área urbana do município a respeito de utilização de equipamentos elétricos, fogão a lenha e outros itens do setor de energia e sócio-econômicos; e a instalação, testes e acompanhamento de um sistema completo de aquecimento por serpentina no fogão a lenha de uma residência do município.

Após selecionada a residência onde seria montado o equipamento, foi realizado um estudo para definir a configuração mais adequada. Estipulou-se que seria utilizada uma serpentina comercial e adotou-se o critério de custo como o mais importante para o público alvo do projeto. Em função disso optou-se por usar um reservatório comum de cimento amianto isolado com mantas de polipropileno, simples de instalar, e majoritariamente tubulação de CPVC, plástico resistente a água quente, mais barato e fácil de instalar que tubulação de cobre. Os dados e principais características são os seguintes:

- a) Fogão a lenha nº2 com serpentina de aço galvanizado, diâmetro nominal de 1 polegada e comprimento aproximado de 2 metros;
- b) Reservatório de cimento-amianto isolado com capacidade para 250 litros. Dimensões principais:  $d_{ext} = 750$  mm,  $d_{int} = 730$  mm,  $h_{total} = 560$  mm,  $h_{útil}$  (até a válvula bóia) = 440 mm (que equivale a uma capacidade de 184 litros),  $esp_{isol} = 28$  mm;
- c) Antes e depois das conexões de entrada e saída da serpentina foram utilizados 1,5 metros de comprimento de tubos de cobre com diâmetro de 22 mm;
- d) Cada ligação entre o reservatório e os tubos de cobre antes e depois da serpentina é feita através de 7 m de tubo CPVC (aquatherm), de 22 mm. Na ligação da água quente (do fogão para o reservatório) 5 m são isolados;
- e) Foram instalados 2 (dois) pontos de água quente: a torneira da cozinha e o chuveiro do banheiro, sendo que a tubulação para a cozinha vem de uma derivação na alimentação de água quente para o reservatório a uma distância de 2,5 metros antes do mesmo e parte dessa tubulação passa pelo lado externo da casa. Da saída de água quente do reservatório até o chuveiro são 4 metros de tubulação.

No Anexo II mostra-se um esquema genérico da montagem da serpentina num fogão.

A serpentina propriamente dita é constituída de tubos de aço galvanizado e conexões que são dispostos de modo a ocupar as paredes laterais e o fundo da fornalha de um fogão a lenha comum. Os tubos são de diâmetro nominal 1 polegada, ou seja, um diâmetro externo de 33,7 mm e interno de 27,2 mm. São dois tubos em cada uma das duas laterais com aproximadamente 400 mm de comprimento cada, um tubo no fundo ligando as laterais com aproximadamente 300 mm de comprimento, duas conexões tipo curva de retorno ( $180^\circ$ ) ligando os dois tubos de cada lateral e dois cotovelos ligando as laterais através do tubo no fundo. As paredes de argamassa do fogão são recolocadas em volta dos tubos deixando aparente uma parte dos mesmos no lado de dentro da fornalha.

### 5.2.1 Ganho de calor por radiação

A área de tubos exposta a radiação é composta por toda a metade superior de um dos tubos na direção da saída dos gases queimados, mais aproximadamente um terço do lado de dentro dos tubos das laterais e do fundo. Fazendo os cálculos obtém-se aproximadamente 0,05 m<sup>2</sup> de área recebendo radiação.

$$A_{\text{rad}} = \pi * d_{\text{ext}} * L_{\text{total}} * 0,25 = 0,053 \text{ m}^2 \quad (21)$$

Nessa fórmula o fator 0,25 foi determinado por medição na instalação em questão, mas pode ser diferente em outras instalações.

Outros valores necessários para determinar o ganho de calor por radiação são a emissividade do aço ( $\epsilon$ ) e o fator de forma ( $F_f$ ). Considerando que os tubos nessa situação ficam recobertos por uma camada de cinza e alcatrão de cor marrom, a literatura sugere um valor em torno de 0,9. Quanto ao fator de forma, aproxima-se a chama para uma semi-esfera e a área total das paredes da fornalha, cujas dimensões são de 420 x 220 x 110 mm, é de 0,209 m<sup>2</sup>. Dividindo a área obtida anteriormente pela área da fornalha e considerando essa relação como o fator de forma tem-se que  $F_f = 0,254$ .

O calor transmitido por radiação torna-se dessa forma passível de ser estimado através da fórmula para transferência de calor por radiação:

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon * A_{\text{rad}} * F_f * \sigma * (T_{\text{chama}}^4 - T_{\text{sup}}^4) \text{ Watts} \quad (22)$$

Onde,  $\epsilon$  é a emissividade já comentada, adimensional;

$\sigma$  é a cte de Stefan-Boltzmann, que vale  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;

$T_{\text{chama}}$  é a temperatura da chama dentro da fornalha, em [K];

$T_{\text{sup}}$  é a temperatura da superfície da serpentina dentro da fornalha, em [K];

Colocando os valores encontrados na fórmula acima, obtém-se:

$$Q_{\text{rad}} = 6,87 \times 10^{-10} * (T_{\text{chama}}^4 - T_{\text{sup}}^4) \text{ Watts} \quad (23)$$

Para se ter uma idéia da possibilidade de ganho de calor por radiação arbitrou-se à temperatura da chama valores de 600 a 800°C com intervalos de 50°C e fixou-se a temperatura da superfície em 60 e 110°C:

TABELA 5.3 – Estimativa de ganho de calor por radiação

Temp da Chama [°C]	600	650	700	750	800
Superfície = 60°C: $Q_{rad}$ [W]	390,75	490,35	607,51	744,20	902,47
Superfície = 110°C: $Q_{rad}$ [W]	384,41	484,00	601,17	737,86	896,13

Fonte: Elaboração própria

Pelos resultados da tabela percebe-se que a maior influência está na temperatura da chama, onde um aumento de 50°C gera aumento de transferência de calor da ordem de 23%, enquanto uma redução do mesmo valor na temperatura da superfície gera aumentos de apenas 1,1% na transferência de calor.

### 5.2.2 Ganho de calor por convecção

O ganho de calor por convecção acontece pelo fluxo dos gases queimados em direção à chaminé que passam sobre uma parte dos tubos, conforme já mencionado, e em contato com a pequena parte exposta dos tubos do fundo e na parede oposta a de saída dos gases. Quanto à condução, existe um ganho de calor pela temperatura das paredes internas da fornalha ser superior à da água dentro dos tubos, porém, será desconsiderado.

Para determinar aproximadamente essa transferência de calor precisa-se estimar os coeficientes de película dos gases queimados e da água dentro dos tubos. Valores usuais encontrados na literatura especializada para as condições encontradas são  $h_{gases} = 30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  e  $h_{\text{água}} = 200 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Nas regiões de tubo exposto pode-se desconsiderar a resistência térmica da parede do tubo. O cálculo de áreas pode ser simplificado considerando-se que a área sujeita a convecção representa 30% da área total. Usando esses valores encontra-se o seguinte coeficiente global de transferência de calor:

$$A_{ext} = \pi * d_{ext} * L * 0,3 = 0,0635 \text{ m}^2; \quad (24)$$

$$A_{int} = \pi * d_{int} * L * 0,3 = 0,0513 \text{ m}^2; \quad (25)$$

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_{gases} * A_{ext}} + \frac{1}{h_{\text{água}} * A_{int}}} = \frac{1}{\frac{1}{30 * 0,0635} + \frac{1}{200 * 0,0513}} = 1,607 \frac{W}{^\circ\text{C}} \quad (26)$$

Similarmente ao cálculo para ganho de calor por radiação deve-se arbitrar valores para a temperatura dos gases e da água. Na realidade esses valores estão variando devido à transferência de calor e o correto é usar a média logarítmica das diferenças de temperatura. Por ser apenas uma estimativa, será utilizada média simples. A temperatura de utilização da água não deve ultrapassar os 60°C, portanto, é razoável adotar uma média constante de 50°C. Quanto aos

gases, a temperatura média deverá estar situada entre 350 e 600°C, considerando uma variação desde 800 até 200°C ao passar em contato com a serpentina. Calculando a transferência de calor em intervalos de 50°C para a temperatura dos gases, monta-se a seguinte tabela:

TABELA 5.4 – Estimativa de ganho de calor por convecção

Dif temperatura [°C]	300	350	400	450	500	550
Q <sub>conv</sub> [W]	482,1	562,5	642,8	723,2	803,5	883,9

Fonte: Elaboração própria

Um processo de transferência de calor dos gases para a serpentina mais eficiente irá gerar uma variação maior na temperatura e menor média. Em função disso não é de se esperar que a média da temperatura dos gases se situe em valores altos, entretanto, essa situação representará uma capacidade maior pelo aumento no coeficiente global de transferência de calor.

### 5.2.3 Avaliação das estimativas de transferência de calor

Somando os dois modos de transferência de calor a estimativa de capacidade total da serpentina varia de 873 a 1786 Watts.

Analisando os parâmetros para transferência de calor, observa-se que os mais importantes são as temperaturas dos gases e da chama e as áreas e coeficientes de transferência de calor.

Para obter temperaturas internas elevadas é necessário que a combustão dentro da fornalha seja eficiente (para o mesmo consumo de lenha). Muito ou pouco excesso de ar e contato deficiente do ar com a superfície da lenha provocará uma combustão incompleta e/ou baixa temperatura interna, prejudicando a transferência de calor.

Outros parâmetros importantes como a área exposta à convecção e radiação e coeficientes de transferência de calor dependem da disposição e tamanho da serpentina. Deve-se tomar cuidado com a exposição à radiação pois pode haver danos aos tubos, principalmente no contato direto com a chama. Um aumento de área de tubos em contato com o fluxo de gases que sai da fornalha teria um efeito positivo na capacidade da serpentina. Para melhorar os coeficientes é necessário aumentar as velocidades de passagem dos gases e da água, entretanto, o espaço para a passagem dos gases já é exíguo e o diâmetro do tubo não pode ser muito reduzido pois implicaria num aumento excessivo no comprimento para manter a área.

Analisando a teoria da transferência de calor, a técnica mais adequada nesse tipo de instalação é através do uso de aletas, pois deve-se aumentar a área de troca do lado dos gases para compensar que o coeficiente de transferência de calor é inferior ao da água. Contudo, o uso



de aletas traz dois complicadores de ordem prática. Em primeiro lugar, como a tiragem dos gases num fogão a lenha se dá naturalmente, deve-se evitar a colocação de obstáculos que irão gerar maior perda de carga. Em segundo lugar a espessura das aletas é reduzida e a temperatura e composição dos gases podem gerar corrosão e desgaste excessivo dessas superfícies.

## **6 METODOLOGIA**

A metodologia proposta para atingir os objetivos parte da tentativa de se conhecer a realidade da região no que diz respeito a disponibilidade de resíduos, necessidades das empresas e desempenho do equipamento proposto para substituição de energéticos.

### **6.1 GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

O setor florestal do estado foi avaliado por LOSS (1998) através da Secretaria de Coordenação e Planejamento, Fundação de Economia e Estatística e Secretaria de Agricultura e Abastecimento resultando no Cadastro Florestal do Rio Grande do Sul 1997.

Foi construído um equipamento para gaseificação da madeira, em parceria com uma empresa interessada no projeto, a partir dos estudos efetuados. Os testes estão voltados principalmente para a qualidade e limpeza do gás que está sendo gerado e a eficiência do processo de gaseificação, baseada na relação entre o poder calorífico do gás obtido e a energia térmica contida na biomassa.

#### **6.1.1 Dados do setor florestal e indústrias da madeira**

No cadastro mencionado, entre outras informações aparecem o número de empreendimentos por atividade relacionadas à produção florestal cadastrada, área plantada das espécies florestais cadastradas por estrato de idade e produtos e subprodutos das espécies florestais cadastradas. O Estado do Rio Grande do Sul foi dividido em 7 Mesorregiões e 35 Microrregiões, nas quais existem 1638 serrarias, 960 beneficiadoras de madeira, 1173 fábricas de móveis, 34 empresas que fabricam compensados e 386 fábricas de estruturas de madeira (aberturas).

#### **6.1.2 Avaliação do gaseificador de biomassa**

O gaseificador desenvolvido e descrito no capítulo 5.1 foi testado e avaliado para verificar a viabilidade de sua utilização como equipamento para geração de energia elétrica através de resíduos de biomassa.

Para avaliar o gaseificador foram necessários levantar vários parâmetros e os instrumentos e configurações utilizados serão descritos nos próximos sub-capítulos.

#### 6.1.2.1 Caracterização da biomassa

Para conhecer a biomassa que se está utilizando foram feitas medições de densidade aparente, massa específica, análise imediata e análise elementar.

#### DENSIDADE APARENTE E MASSA ESPECÍFICA

A densidade aparente é a massa do produto encontrada num determinado volume contabilizando os espaços vazios entre os pedaços de madeira. Depende fundamentalmente do formato e tamanho médio dos pedaços. A massa específica é a densidade real da madeira obtida dividindo-se a massa pelo volume real somente de madeira. Os instrumentos utilizados foram:

- Recipiente graduado com 1 litro, resolução de 50 ml;
- Balança mecânica de precisão para 500 g, resolução de 0,001 gramas;

As medições foram realizadas em lascas de madeira secadas naturalmente. Foram feitas medições com umidade natural e também secados ao forno, conforme norma específica.

A madeira utilizada foi de *Pinus Elliotis* coletada numa serraria. Outras espécies de madeira podem ter valores diferentes, mas a espécie utilizada é a mais comum nas serrarias da região.

#### ANÁLISE IMEDIATA

A análise imediata ou aproximada permite conhecer os constituintes da madeira sem detalhar seus elementos químicos específicos, dividindo-se entre: umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas. Os instrumentos e equipamentos necessários são:

- Forno para tratamento térmico (mufla) com controle de temperatura;
- Dessecador para resfriamento sem absorção de umidade;
- Cadinho;
- Balança de precisão para 500 gramas, resolução de 0,001 g.

Foram realizadas 3 análises imediatas, uma na Universidade de Caxias do Sul e outras duas na Fundação Estadual de Ciência e Tecnologia - CIENTEC.

Além das análises imediatas mencionadas, em cada teste foi determinada a umidade da serragem para se conhecer a massa de biomassa seca utilizada.

## ANÁLISE ELEMENTAR

Para saber quais os elementos químicos que compõem a biomassa e seus respectivos percentuais, é necessário realizar-se uma análise elementar. Entretanto, são necessários equipamentos específicos para efetuar essas análises, portanto, foram feitas duas solicitações para a CIENTEC – Fundação Estadual de Ciência e Tecnologia, nas datas de setembro de 1999 e agosto de 2001. A partir dos percentuais dos elementos pode-se calcular o poder calorífico superior e inferior da biomassa.

### 6.1.2.2 Metodologia para medição de vazão

Para realizar o balanço de massa é imprescindível medir-se as vazões dos materiais e fluidos utilizados, quais sejam: serragem, ar, gás, carvão e cinzas. Em função das características de cada medição os produtos foram divididos em sólidos e gases.

## MEDIÇÃO DA VAZÃO DE SÓLIDOS

A metodologia escolhida para medir a vazão de sólidos é a pesagem em balança eletrônica da serragem prevista para ser usada em cada teste. Depois do teste efetuado pesa-se o que sobrou de serragem e divide-se o consumo real pelo tempo total de teste. Além disso, a forma de alimentação do gaseificador consistiu em manter um nível aproximado de serragem dentro do equipamento.

Outros sólidos medidos foram o carvão e as cinzas retirados no fundo do gaseificador. O objetivo é converter todo o carbono fixo em gás, porém, sempre há uma certa quantidade de sólidos combustíveis junto às cinzas. As medições feitas em balança eletrônica têm uma incerteza que varia de 0,1% a 0,5% para as quantidades de massa pesadas.

## MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR E GÁS

Para medir a vazão de ar e gás foi utilizada a metodologia encontrada em Martins, 1996, que publicou um manual sobre a medição de vazão em venturis, bocais e placas de orifício. De acordo com o manual, para gases com baixa vazão o melhor dispositivo é a placa de orifício, a qual foi utilizada para medir a vazão de ar. Para altas temperaturas e possibilidade de haver depósito de condensáveis, o dispositivo mais indicado é o bocal, portanto, esse foi utilizado para a medida de vazão do gás produzido.

O fluxo de ar pode ser dividido em dois: o ar que entra pelo tubo do queimador interno, o qual é insuflado por um ventilador, e o ar succionado pelo topo aberto do gaseificador, o qual é difícil de medir diretamente. Apenas o primeiro fluxo de ar é medido através da placa de orifício, o segundo fluxo de ar é determinado indiretamente pelo balanço de massa.

A equação básica para o cálculo de vazão através desses dispositivos é:

$$\dot{m} = \frac{C_{desc}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (27)$$

onde  $C_{desc}$  é o coeficiente de descarga para corrigir a vazão teórica calculada;  $d$  é o diâmetro da placa de orifício ou do bocal;  $D$  é o diâmetro do tubo;  $\varepsilon$  é o fator de expansão devido a variação de pressão (aproximadamente igual a 1,0);  $\Delta P$  é a queda de pressão através do dispositivo; e  $\rho$  é a massa específica do fluido.

O principal fator de incerteza na medição com dispositivos deprimogênios é o coeficiente de descarga, que por sua vez é função do número de Reynolds do escoamento. Por ser baseado em correlações com medições de vários dispositivos similares, é um valor empírico e é necessário reproduzir com todo o cuidado as condições estipuladas por normas e padrões. As características principais dos dispositivos utilizados são as seguintes:

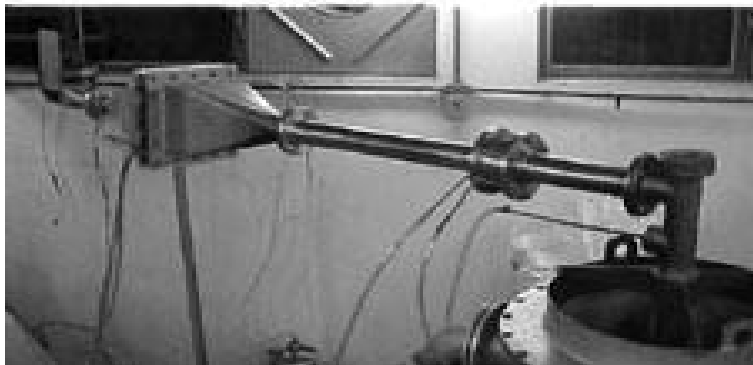
### PLACA DE ORIFÍCIO

Esse dispositivo e o aquecedor de ar, montados na entrada do gaseificador são mostrados na figura 6.1. As principais características da placa de orifício são:

- a) diâmetro interno do tubo  $D = 60,5$  mm;
- b) diâmetro da placa de orifício  $d = 24,050$  mm ( $\beta = d/D = 0,4$ );
- c) orifício concêntrico de cantos vivos;

- d) material do tubo e da placa: aço inox 304;
- e) comprimento reto a montante e jusante: 550 mm (9D) e 250 mm (4,1D) respectivamente;
- f) tomada da diferença de pressão através de anel piezométrico;
- g) manômetro de coluna inclinada com ângulo de 3 graus e régua metálica em mm;
- h) coeficiente de descarga aproximado  $C_d = 0,62$ ;
- i) incerteza esperada: 1,06% + 0,5% por acidentes a montante e + 0,3% pela dificuldade de centralização = 1,86%.

Figura 6.1 - Placa de orifício e aquecedor



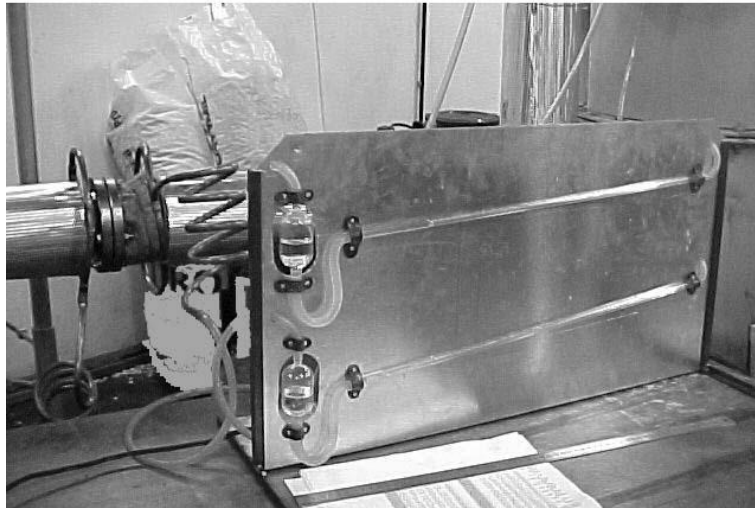
#### BOCAL tipo ASME

O bocal utilizado é do tipo ASME e uma foto da flange onde o mesmo está montado com as tomadas de pressão a montante e a jusante e os manômetros de coluna inclinada tanto para o bocal quanto para a placa de orifício estão mostrados na figura 6.2. Suas principais características são as seguintes:

- a) diâmetro interno do tubo  $D = 70,2$  mm;
- b) diâmetro do bocal  $d = 35,975$  mm ( $\beta = d/D = 0,51$ );
- c) curvatura do bocal de forma elíptica com trecho reto de  $0,6D$ ;
- d) material do tubo: aço inox; material do bocal: alumínio naval;
- e) comprimento reto a montante e jusante: 700 mm (10D) e 300 mm (4,3D) respectivamente;
- f) tomadas da diferença de pressão em 3 pontos igualmente espaçados do tipo  $D - D/2$ ;
- g) manômetro de coluna inclinada com ângulo de 5,2 graus e régua metálica em mm;
- h) coeficiente de descarga aproximado  $C_d = 0,93$ ;
- i) incerteza esperada: 0,62% + 0,5% por acidentes a montante e 0,3% pela dificuldade de centralização = 1,42%.

As medições foram efetuadas a cada 10 minutos anotando-se a queda de pressão e a temperatura medida num termopar a montante da placa de orifício e a jusante do bocal. O cálculo do coeficiente de descarga é feito iterativamente corrigindo-se o Reynolds em função da vazão e recalculando o coeficiente de descarga até convergirem os valores de vazão.

Figura 6.2 - Bocal e manômetros



### 6.1.2.3 Metodologia para análise do gás

Após a estabilização do processo de gaseificação, procedeu-se à coleta do gás a cada 20 minutos, o qual foi analisado por cromatografia gasosa num equipamento CG-35 com detecção por condutividade térmica, usando colunas Porapak Q e Peneira Molecular 5A°. A composição de cada amostra foi determinada pela comparação do seu cromatograma com o de um padrão externo. As amostras foram coletadas numa tomada de gás localizada após o bocal de medição de vazão e antes do resfriador em balões contendo uma solução não reagente.

Para análise cromatográfica devem ser respeitadas algumas condições de operação, tais como vazão de gás de arraste, temperatura de coluna, temperatura do detector, pressão de injeção e volume de gás injetado. Estas condições são determinadas analisando-se um gás padrão com a composição esperada na gaseificação até obter valores que produzam picos independentes e com boa resolução. A amostra é analisada nessas mesmas condições.

De acordo com o fabricante, a incerteza do cromatógrafo é da ordem de 2%.

A composição do gás padrão adquirido para quantificar as amostras de gás produzidas no gaseificador consta na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Composição do gás padrão

Componente	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Total
Concentração [%]	22,0	15,3	2,7	46,9	12,2	0,60	0,3	100,0

Fonte: Cilindro fornecido (com garantia) pela White Martins S.A.

As condições encontradas para o padrão utilizado foram:

- Temperatura da coluna = 60°C;
- Temperatura do detector = 130°C;
- Vaporizador – desligado;
- Volume injetado = 1 ml;
- Pressão de injeção = atmosférica;
- Gás de arraste = Nitrogênio (N<sub>2</sub>) para análise de Hidrogênio (H<sub>2</sub>) da amostra, e Hélio (He) ou Hidrogênio (H<sub>2</sub>) para os demais gases;
- Corrente = 130 mA para N<sub>2</sub> e 250 mA p/H<sub>2</sub> ou He;
- Coluna cromatográfica Porapak Q com 2 m de comprimento e diâmetro interno de 2 mm;
- Coluna cromatográfica Peneira Molecular com 2 m de comprimento e diâmetro interno de 2 mm.

#### 6.1.2.4 Medição de alcatrão

Nos 3 últimos testes começou-se a medir as quantidades de umidade e alcatrão de 2 formas diferentes.

No teste GCR4 obrigou-se o gás coletado a passar primeiro por um filtro de lã-de-vidro e depois por um balão com carvão ativado através da sucção de uma bomba de vácuo elétrica. Após a bomba de vácuo foi instalado um tubo de vidro com sílica-gel e um rotâmetro para medir a vazão. A metodologia de medição consiste em colocar parte do carvão em um erlenmeyer com tampa e pesar. Cobrir o carvão com diclorometano (Cl<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>), levar ao ultrassom e deixar por 40 minutos. Depois, filtrar com papel filtro e lavar com Cl<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>.

Para medir a umidade deve-se colocar sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) anidro, devidamente pesado, na solução, mexer, filtrar e deixar secar ao ambiente. Pesa-se o filtrado e a massa de água é a diferença entre a massa do filtrado e a massa de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Considera-se que a umidade da amostra de carvão é representativa da média e que toda a umidade do gás ficou retida no carvão. O percentual de umidade é determinado pela relação entre a massa de umidade absorvida por todo o carvão e a massa total de gás que passou pelo carvão.



Para a medida de alcatrão leve pega-se um balão de fundo redondo e pesa-se. Enche-se até a metade com a solução devidamente pesada e leva-se ao rotavapor com banho de aproximadamente 35°C. Repetir o procedimento até concentrar todo o alcatrão e pesar. Subtraindo a massa do balão obtém-se a massa de alcatrão. Extrapolando-se para toda a massa de carvão e o percentual de alcatrão é a relação entre a massa total de alcatrão e a massa de gás.

A avaliação desse método revelou que não houve absorção de toda a umidade e alcatrão, sendo os resultados provavelmente menores que os reais. Essa metodologia foi descartada.

Nos testes GCR5 e GCR6 procedeu-se da seguinte maneira: uma bomba de vácuo elétrica succiona o gás que passa por três condensadores de vidro com água corrente em contra-fluxo na superfície externa. No fim de cada condensador e da serpentina um balão é instalado para permitir a redução de velocidade do gás e a coleta da umidade e do alcatrão. Depois dos condensadores o gás passa por uma serpentina de vidro com 8 metros de comprimento colocada dentro de um banho de gelo. Antes da bomba de vácuo tem-se um balão com carvão ativado.

A medição é feita em duas etapas. Na primeira usa-se o material retido nos balões na base dos condensadores e na saída da serpentina, que é uma mistura de água, alcatrão e sólidos. Este material será filtrado com papel filtro, resultando numa solução de alcatrão e água que é colocada numa proveta graduada. O volume de água na solução será admitido como sendo o próprio volume da solução já que a concentração de alcatrão é desprezível em relação à água. A massa de água na solução será a massa de água pura com mesmo volume da solução, e a massa de alcatrão será a diferença entre a massa da solução e a massa de água.

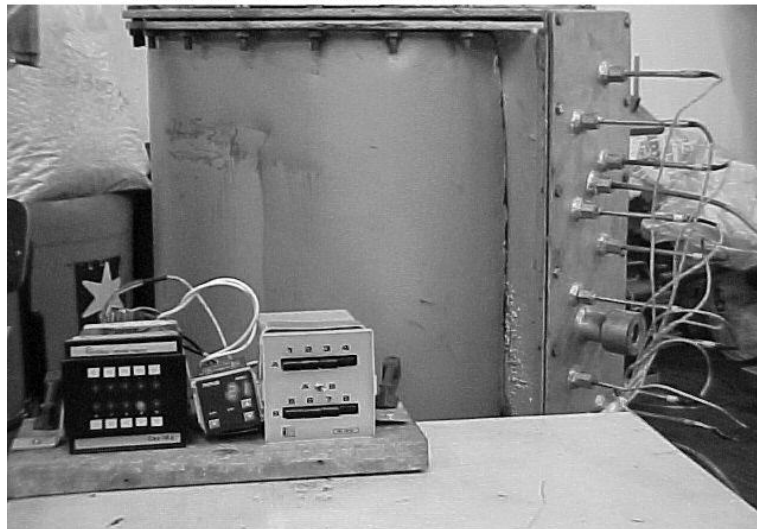
Na Segunda etapa lava-se os condensadores e a serpentina com solvente, diclorometano ( $\text{Cl}_2\text{CH}_2$ ), onde obtém-se uma mistura de alcatrão, água, diclorometano e sólidos. Filtra-se primeiro com papel filtro para retirar os sólidos e depois filtra-se numa coluna com sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) anidro, previamente pesado, para retirar a água. Determina-se a massa de água como sendo a diferença de massa entre o sulfato de sódio com água retida e o sulfato de sódio anidro. O filtrado será uma solução de diclorometano e alcatrão e, como o solvente tem baixo ponto de ebulição (~39°C) separa-se por evaporação num rotavapor. O que sobrar no balão do rotavapor é a massa de alcatrão.

A massa total de umidade e alcatrão será a soma das duas etapas. Dividindo-se esses valores pela massa de gás medida tem-se os percentuais desejados.

#### 6.1.2.5 Perfil de temperaturas

Um parâmetro importante para compreender-se as reações que ocorrem no interior do gaseificador é a temperatura. Através dela pode-se estimar em qual região está ocorrendo a pirólise, onde há combustão e as reações de redução. Foram dispostos 10 termopares tipo K (Chromel-Alumel) ao longo da altura a partir dos 450 mm de profundidade até 900 mm, ou seja, 25 mm acima da grelha, com distância de 50 mm entre si, conforme mostrado na figura 6.3. Os termopares tem 6 mm de diâmetro e prolongam-se em média 60 mm para dentro do equipamento garantindo que toda parte sensível fique imersa no ambiente que está sendo medido. O queimador auxiliar de GLP central é montado de modo tal a não permitir que a radiação da chama atinja diretamente os termopares e mascare a leitura de temperaturas. Na avaliação dos testes será mostrado um perfil de temperaturas representativo de cada teste.

Figura 6.3 - Termopares e mostradores



#### 6.1.2.6 Balanços de massa e energia

Durante os meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro de 2001 foram realizados os testes e medições no gaseificador conforme descrito nos capítulos anteriores. Os resultados permitiram determinar os balanços de massa e energia.

Os valores medidos são a quantidade de serragem seca, a vazão de gás (média ao longo do teste), o carvão e as cinzas (pesados após o teste), a quantidade de GLP e o ar secundário (média ao longo do teste). A vazão total de ar seco é determinada pelo balanço de massa e a

quantidade de água é determinada pelas umidades da serragem e do ar. A fórmula utilizada é a seguinte:

$$m_{\text{ar}} = m_{\text{gás}} + m_{\text{carv}} - (m_{\text{biom}} + m_{\text{GLP}} + m_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (28)$$

Conforme descrito no capítulo anterior as amostras de gás foram analisadas e determinada a média das composições encontradas nas amostras de cada teste.

Com a composição do gás pode-se calcular seu poder calorífico superior a partir do calor padrão de combustão dos componentes do gás de cada teste e seus respectivos percentuais. Não é levada em conta a provável presença de outros compostos tais como fuligem, alcatrão e condensáveis.

A fórmula para determinar o poder calorífico do gás é a seguinte:

$$PCS = \frac{\rho_N * \sum_1^n (y_i * -\Delta H^o_i)}{\bar{M} * 1000} \quad (29)$$

onde  $\rho_N$  é a massa específica nas condições normais ( $p = 101325 \text{ Pa}$  e  $t = 25^\circ\text{C}$ ) em  $[\text{kg}/\text{Nm}^3]$  considerando o gás como gás perfeito;  $y_i$  é a fração molar do  $i$ -ésimo componente e  $\Delta H^o_i$  é seu calor padrão de combustão em  $[\text{kJ}/\text{kmol}]$ ;  $n$  é o número de componentes na amostra de gás;  $M$  é a massa molecular em  $[\text{kg}/\text{kmol}]$  e  $1000$  é o fator de conversão de  $[\text{kJ}]$  para  $[\text{MJ}]$ . A massa molecular do gás é calculada pelo somatório do produto da fração molar pela massa molecular de cada componente.

#### 6.1.2.7 Avaliação individual dos testes

Os testes realizados foram descritos e avaliados diversos parâmetros, tais como as relações ar/biomassa e índice de sólidos, o tipo de chama produzida, o perfil de temperaturas obtido e características das amostras coletadas, de forma a obter-se uma visão da evolução dos resultados e das características operacionais.

### 6.1.2.8 Análise de incertezas

A principal dificuldade encontrada na avaliação das incertezas é a grande quantidade de variáveis medidas e as diferentes condições de operação que ocorreram devido à característica inerente ao equipamento.

Os principais valores a serem analisados são as massas de serragem, GLP, gás e carvão, bem como a composição do gás. A determinação da massa molecular, da densidade e do poder calorífico do gás, utilizados no cálculo de eficiência, considera o gás como perfeito, que é uma suposição razoável pelas baixas pressões utilizadas, e não será avaliada a incerteza decorrente disso. A incerteza na composição do gás e suas frações molares é dada como 2% pelo fabricante. As massas de serragem, GLP e carvão são simplesmente pesadas na balança, portanto, a incerteza é baixa.

A serragem e o carvão são normalmente medidos num recipiente de aproximadamente 10 litros, onde cabe aproximadamente 0,7 e 2 kg respectivamente, numa balança de 3 kg com divisão de 1 grama. Como não se possui dados da precisão da balança, utilizou-se o dobro da menor divisão como a incerteza resultando em valores de 0,29% ( $2/700*100$ ) e 0,1% ( $2/2000*100$ ). A massa de GLP foi determinada pesando-se o botijão antes e depois de cada teste numa balança de 15 kg com divisão de 5 gramas. Da mesma forma que no cálculo anterior, como a massa do botijão é aproximadamente 5 kg, resultou numa incerteza de 0,4% [ $2*(10/5000*100)$ ].

A massa de gás é determinada usando-se a equação (27) e possui vários termos que devem ser analisados. Nesse tipo de cálculo utiliza-se o coeficiente de sensibilidade, “X”, de cada termo que é resultado da diferenciação da equação que combina as incertezas das diversas variáveis que entram no cálculo da vazão. Considerando que as variáveis sejam independentes entre si, obtém-se a seguinte fórmula:

$$\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}} = \pm \sqrt{\left(X_{Cd} \frac{\delta Cd}{Cd}\right)^2 + \left(X_{\varepsilon} \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(X_d \frac{\delta d}{d}\right)^2 + \left(X_D \frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(X_{\Delta P} \frac{\delta \Delta P}{\Delta P}\right)^2 + \left(X_{\rho} \frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2} \quad (30)$$

onde  $X_{Cd}$ ,  $X_{\varepsilon}$ , etc. são os coeficientes de sensibilidade e  $\delta Cd/Cd$ ,  $\delta \varepsilon/\varepsilon$ , etc. são as incertezas associadas a cada variável.  $Cd$  é o coeficiente de descarga,  $\varepsilon$  é o fator de expansão e  $\Delta P$  é a diferença de pressão através do bocal.

Os coeficientes de sensibilidade foram determinados e tem os seguintes valores:

$$X_C = 1 \quad (31)$$

$$X_{\varepsilon} = 1 \quad (32)$$

$$X_d = \frac{2}{1 - \beta^4} = 2,1482 \quad (33)$$

$$X_D = \frac{2\beta^4}{1 - \beta^4} = 0,1482 \quad (34)$$

$$X_{\Delta P} = 0,5 \quad (35)$$

$$X_{\rho} = 0,5 \quad (36)$$

Na determinação das incertezas de cada variável é necessário ter as informações do fabricante ou calibrar os instrumentos individualmente. Como isso não foi possível, fez-se uma estimativa das incertezas obtendo-se os seguintes resultados:

$$\delta C_d / C_d = 1,5\%$$

$$\delta \varepsilon / \varepsilon = 0,003\%$$

$$\delta d / d = 0,03\%$$

$$\delta D / D = 0,14\%$$

$$\delta \Delta P / P = 2\%$$

$$\delta \rho / \rho = 2\%$$

Aplicando os valores na fórmula (31) chega-se a uma incerteza na medição de vazão pelo bocal igual a  $\pm 2,06\%$ .

Contudo, deve-se fazer uma ressalva em relação ao diâmetro do bocal. Esse diâmetro, por possuir o maior coeficiente de sensibilidade e, portanto, a maior influência no cálculo da incerteza, foi medido com micrômetro em 4 pontos, permitindo um baixo valor de incerteza associado a essa variável. Apesar desse cuidado, após os testes percebe-se que sua superfície e a do tubo onde está instalado ficam recobertos por uma fina camada de alcatrão e fuligem, gerando uma variação nos diâmetros e no coeficiente de descarga. Estimando novas incertezas associadas a essas variáveis obtém-se:

$$\delta C_d / C_d = 2\%$$

$$\delta d / d = 3\% \text{ (considerando que a espessura da camada pode chegar a } 0,5 \text{ mm)}$$

$$\delta D / D = 1,4\% \text{ (idem)}$$

Com esses novos valores, a incerteza na medição da vazão de gás sobe para  $\pm 6,9\%$ . Para analisar o desempenho do equipamento essa incerteza é satisfatória, pois a avaliação qualitativa é tão importante quanto a quantitativa no desenvolvimento de um equipamento dessa natureza.

## 6.2 SERPENTINA NO FOGÃO A LENHA

O trabalho de avaliação da substituição do chuveiro elétrico por serpentina no fogão a lenha foi desenvolvido no município de Jaquirana, estado do Rio Grande do Sul, e a primeira etapa realizada foi uma pesquisa nos domicílios.

Em relação aos testes efetuados, além de verificar o aquecimento da água, foram avaliados outros aspectos práticos tais como: tempo necessário para o aquecimento, eficiência do equipamento e do isolamento (manter a água aquecida de um dia para o outro), segurança, vazamentos e outros quesitos que deverão ser analisados para garantir a aceitação do equipamento pelos usuários. O aspecto econômico foi analisado para propor alguma espécie de auxílio da concessionária de energia elétrica.

### 6.2.1 Levantamento de dados para substituição de energéticos

Elaborou-se um questionário, anexo III, que consistiu de 32 perguntas e foi aplicado em 163 residências, tendo sido descartados 9 questionários. Os 154 restantes perfazem 20 a 25% do total de residências urbanas. As perguntas dizem respeito ao consumo de energéticos e utilização de equipamentos (eletricidade: eletrodomésticos; lenha: fogão e lareira; carvão: churrasqueira e fogão; gás: fogão; combustíveis líquidos: veículos), o tamanho das famílias, grau de escolaridade, renda e perguntas específicas sobre a utilização da serpentina.

A aplicação dos questionários foi realizada por 2 (duas) duplas de bolsistas do município no período de abril a junho de 1998, após um treinamento para conhecer os objetivos da pesquisa, compreensão das perguntas e correto preenchimento das alternativas.

Os questionários respondidos foram digitados e tratados estatisticamente pelo programa SPHINX<sup>®</sup> e analisados de acordo com os interesses da pesquisa.

### 6.2.2 Avaliação da serpentina instalada

Os testes realizados na operação da serpentina foram para medir sua capacidade térmica, tempo necessário para aquecimento e eficiência da serpentina e do sistema completo. Os instrumentos de medição usados foram:

- Termômetros de mercúrio nas faixas de 10 a 30°C e 30 a 50°C, com resolução de 0,1°C;
- Termopar tipo J (chromel-alumel), de -18 a 1300°C, com resolução de 1°C;

- Recipiente graduado com 1800 ml, resolução de 100 ml;
- Balança mecânica comum para 10 kg, com resolução de 50 g.

O tempo necessário para aquecimento foi determinado medindo-se a temperatura da água dentro do reservatório a intervalos regulares mantendo a chama no fogão a lenha e sem consumir água quente. Foram tomados os cuidados necessários para misturar a água no reservatório, de modo a mantê-la homogênea, e pesada a lenha utilizada no fogão para se estimar a capacidade térmica introduzida.

A medição da capacidade térmica foi realizada através de um balanço de energia, medindo-se a vazão na torneira da cozinha com o recipiente graduado, a temperatura da água quente na torneira e a temperatura da água fria que sai do reservatório para a serpentina. A entrada de água quente no reservatório foi obstruída para garantir que toda água passe pela serpentina. Usou-se o termopar para medir temperaturas dentro da fornalha, próximo aos tubos da serpentina, na base da chaminé e sobre a chapa do fogão.

As eficiências foram obtidas calculando-se as relações entre o ganho de calor somente pela serpentina e a energia introduzida pela lenha, e o ganho de calor da água no reservatório e a energia introduzida pela lenha. As perdas foram estimadas através de cálculos de transferência de calor.

#### 6.2.2.1 Estimativa das perdas de calor

As perdas de calor pela tubulação e pelo reservatório são importantes para se ter uma noção exata do que acontece dentro da serpentina no fogão a lenha, já que todas as medições foram realizadas longe da mesma. Assim pode-se comparar duas instalações com reservatório e tubulações diferentes, porém, com serpentina similar.

Usou-se um cálculo teórico a partir de equações de transferência de calor tradicionais e valores práticos encontrados na literatura. A principal referência utilizada foi o livro da “ASHRAE” (1997) nos capítulos sobre transferência de calor e propriedades dos materiais.

A equação básica utilizada foi:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (37)$$

O termo UA é o inverso da soma de resistências térmicas para cada trecho de tubo e reservatório, composta basicamente das resistências por convecção interna e externa e a condução pelos tubos, paredes e isolamento, como segue:

$$U * A = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext} * A_{ext}} + \frac{\ln(d_{ext} / d_{int})}{2 * \pi * k * L} + \frac{1}{h_{int} * A_{int}}} \quad (38)$$

As áreas, diâmetros e comprimentos necessários foram obtidas usando as dimensões fornecidas no capítulo 5.2. Os coeficientes de convecção do ar (externo) foram considerados 15 W/m<sup>2</sup>.K para ar no interior da residência e 25 W/m<sup>2</sup>.K para um trecho de tubulação externa. O coeficiente de convecção da água (interno) foi calculado a partir da vazão e das propriedades da água, usando equações de transferência de calor por convecção no interior de tubos.



## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a metodologia proposta no capítulo anterior obteve-se os resultados que serão apresentados a seguir. Posteriormente faz-se uma análise desses resultados e de futuras ações e trabalhos para aprimorar os equipamentos propostos.

Os resultados dos levantamentos de dados e do desempenho dos equipamentos serão divididos conforme a alternativa energética em questão pois cada uma tem suas peculiaridades e não é possível adotar regras semelhantes para ambas.

### 7.1 RESULTADOS PARA O GASEIFICADOR DE BIOMASSA

#### 7.1.1 Dados do setor florestal e indústrias da madeira

A partir das regiões determinadas no Cadastro Florestal do Rio Grande do Sul 1997, montou-se a tabela 7.1 abaixo, mostrando a quantidade de empresas por atividade nos municípios da Mesorregião 02 – Nordeste Rio-Grandense, composta pelas Microrregiões 014, 015 e 016 - respectivamente Guaporé, Vacaria e Caxias do Sul. A Microrregião 015, dos “Campos de Cima da Serra”, é a que concentra isoladamente o maior número de serrarias de todas microrregiões do Estado. Nos demais tipos de indústria da tabela, a Microrregião 016, onde estão Bento Gonçalves, Caxias do Sul e Flores da Cunha, se destaca, principalmente pela quantidade de indústrias de móveis.

Tabela 7.1 – Indústrias do Setor Madeireiro

REGIÃO	Serrarias	Beneficiam.	Movelarias	Compensado	Aberturas
Microrregião 014	66	61	38	2	13
Microrregião 015	181	52	36	4	16
Microrregião 016	112	102	236	8	63
<b>MESORREGIÃO 02</b>	<b>359</b>	<b>215</b>	<b>310</b>	<b>14</b>	<b>92</b>

Fonte: Cadastro Florestal do Rio Grande do Sul 1997 – Secr. Coordenação e Planejamento

O Sindicato representante dessas empresas, SINDIMADEIRA, estima que 96% delas são micro ou pequenas empresas. Os tipos de indústrias mencionadas formam uma cadeia, onde a serraria desdobra a tora e fornece madeira serrada para a construção civil e as beneficiadoras, que por sua vez, fornecem a madeira seca e já nos tamanhos e formatos necessários para as fábricas de móveis e de aberturas. As fábricas de compensados serram e beneficiam a madeira com uma

tecnologia diferenciada fornecendo principalmente para fábricas de móveis. Cabe ressaltar que muitas serrarias também possuem beneficiamento.

Uma avaliação detalhada das informações apresentadas mostra uma grande deficiência, principalmente no que diz respeito a área florestada e produtos das espécies florestais. O próprio texto do cadastro afirma que sua representatividade é relativa, correspondendo às informações existentes no banco de dados do DRNR. Estão previstos ajustes para os próximos anos que irão melhorar significativamente a qualidade e confiabilidade das informações prestadas. De todo modo, a importância de um documento como este está na organização e sistematização dos dados, classificando as atividades e os produtos de forma coerente.

O número de empresas por atividades relacionadas nos municípios de interesse são mostrados na tabela 7.2.

A tabela 7.2 mostra o baixo nível de beneficiamento das indústrias do setor, sendo o principal tipo de empresa a serraria (total de 133 unidades), onde geralmente não há secagem nem outro tipo de desdobramento da tora. Na maioria dos casos são pequenas empresas, com capacidade de produção menor que 300 m<sup>3</sup> de madeira serrada por mês e voltada para a construção civil, que não é tão exigente quanto o setor moveleiro.

Tabela 7.2 – Número de empreendimentos por atividade relacionada

Atividade Relacionada	Bom Jesus	Cambará do Sul	Jaquirana	S. Franc. De Paula	S. José Ausentes
106 – Silvicultor	1	4	2	21	-
201 – Serrarias	21	21	29	49	13
203 – Fábrica de papel, etc.	-	3	-	1	-
207 – Fábrica de cavacos, etc.	-	-	2	1	-
301 – Benef. de madeira	4	1	13	10	-
302 – Fábrica de móveis	-	-	-	2	-
306 – Fábrica de compensados	-	-	-	1	-
308 – Fábrica de estruturas	4	-	-	1	-
309 – Indústria de constr. civil	-	-	-	1	-
312 – Comerciante	6	11	5	12	2
313 – Importador e/ou export.	4	2	-	1	1

Fonte: Cadastro Florestal do Rio Grande do Sul 1997

De acordo com o SINDIMADEIRA, sindicato responsável pelas indústrias madeireiras do Estado do RS, é urgente a busca de soluções para o destino de 300.000 toneladas de serragem estocadas em ambiente aberto causando poluição ambiental em áreas que poderiam ser aproveitadas para agricultura ou outra atividade econômica.

Em pesquisa realizada pela empresa International Investments em 200 serrarias, as quais utilizam uma superfície florestal de 50.000 ha (municípios de Gramado, Canela, São Francisco

de Paula, Cambará do Sul e Jaquirana), são gerados por dia 450 toneladas de serragem, 260 toneladas de costaneira e 390 toneladas de chips de costaneira.

Diante destas constatações, entende-se importante a busca de soluções para o uso da serragem como energético, que devido ao alto grau de umidade e pequena granulometria necessita passar por algum processo especial para depois ser utilizada como fonte de energia.

### 7.1.2 Avaliação do gaseificador de biomassa

O gaseificador desenvolvido e descrito no capítulo 5.1 foi testado e avaliado para verificar a viabilidade de sua utilização como equipamento para geração de energia elétrica através de resíduos de biomassa.

Os resultados obtidos serão mostrados nos próximos subcapítulos.

#### 7.1.2.1 Caracterização da biomassa

Para conhecer a biomassa que se está utilizando foram feitas medições de densidade aparente, massa específica, análise imediata e análise elementar.

Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Caracterização da biomassa utilizada

BIOMASSA	Densidade Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ]
Lascas secas	68	-
Lascas c/15% umidade (b.u.)	80	-
Cavacos secos	142	-
Cavacos c/11% umidade (b.u.)	160	-

Fonte: Medições efetuadas em julho de 2001.

A densidade aparente das lascas pode ser diferente de acordo com o formato e tamanho médio das mesmas. Toras recém cortadas podem ter umidade acima de 50%, portanto, é grande a influência da umidade no peso da madeira, resultando daí a vantagem de secar a madeira antes de transportá-la.

Foram realizadas 3 análises imediatas da biomassa, uma na Universidade de Caxias do Sul e outras duas na Fundação Estadual de Ciência e Tecnologia - CIENTEC. Os resultados das análises estão mostrados na tabela 7.4.

Além das análises imediatas mencionadas, em cada teste foi determinada a umidade da serragem para se conhecer a massa de biomassa seca utilizada.

Tabela 7.4 – Análise imediata da biomassa

COMPONENTE	UCS 1 [%]		CIENTEC 1 [%]		CIENTEC 2 [%]	
	b.s.	b.u.	b.s.	b.u.	b.s.	b.u.
Umidade [%]	N/A	10,66	N/A	10,63	N/A	12,93
Voláteis [%]	82,54	73,74	86,40	77,22	86,48	75,30
Carbono Fixo [%]	17,13	15,30	13,50	12,06	12,93	11,26
Cinzas [%]	0,34	0,30	0,10	0,09	0,59	0,51
PCS [kJ/kg]	21001		20407		20100	

b.s. – base seca; b.u. – base úmida

Fonte: Testes realizados cfe. Normas ASTM E871, D1102, E872

Quanto a análise elementar, os resultados encontrados são apresentados na tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Análise elementar da biomassa utilizada (base seca)

ELEMENTO	Setembro/1999	Agosto/2001
	[%]	[%]
Carbono – c	52,00	50,91
Oxigênio – o (por diferença)	41,55	42,14
Nitrogênio – n	0,28	0,23
Hidrogênio – h	6,07	6,13
Enxofre – s	n.d.	n.d.
Cinzas – cz	0,10	0,59
PCS – Poder Calorífico Superior [MJ/kg]	20,407	20,100
PCI – Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]	19,074	18,877

Fonte: Testes realizados na CIENTEC – Normas ASTM D-5373 e D-1989

Os resultados coincidem com os valores encontrados na literatura e confirmam o que é mencionado a respeito de uma uniformidade nos percentuais de carbono, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio mesmo para espécies bem diferentes de madeira.

#### 7.1.2.2 Resultados da medição de vazão

Para realizar o balanço de massa é imprescindível medir-se as vazões dos materiais e fluidos utilizados, quais sejam: serragem, ar, gás, carvão e cinzas.

Para manter um nível aproximado de serragem dentro do equipamento utilizou-se um recipiente de 7 litros (0,007 m<sup>3</sup>) que corresponde a 0,55 a 1,2 kg de biomassa úmida por vez, dependendo do tipo de material e da umidade. A variação de nível a cada enchimento é de aproximadamente 50 mm.

Em relação ao carvão e as cinzas retirados no fundo do gaseificador, o objetivo é converter todo o carbono fixo em gás, porém, sempre há uma certa quantidade de sólidos combustíveis junto às cinzas. Não foi realizada a separação entre o carvão e as cinzas, pois, conforme pode ser visto na tabela 7.4, o percentual dessas na madeira é muito pequeno. Considerou-se que todo o resíduo sólido era composto de carvão e, portanto, uma perda na conversão mássica. A qualidade do resíduo sólido pode ser estimada visualmente através da sua cor, ou seja, quanto mais clara, menor o percentual de combustível não reagido. A granulometria do carvão retirado também é uma medida da qualidade da gaseificação, pois quanto mais próximo da forma de pó, mais houve redução do carvão com os gases de combustão. Também é comum a presença de pedaços de carvão com dimensão característica em torno de 5 mm.

O gás foi medido através da queda de pressão num bocal, conforme descrito no capítulo 6, e como não mediu-se a quantidade de umidade e alcatrão, usou-se um índice constante de 3% desses produtos no cálculo de eficiência.

Os resultados dessas medições são apresentados na tabela 7.6.

### 7.1.2.3 Balanços de massa e energia

Durante os meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro de 2001 foram realizados os testes e medições no gaseificador conforme descrito nos capítulos anteriores. Os resultados permitiram determinar os balanços de massa e energia que serão mostrados nas tabelas a seguir:

Tabela 7.6 - Balanço de massa dos testes efetuados

TESTE	ENTRADA [kg/h]					SAÍDA [kg/h]		Ar/Biom <sup>d</sup>	Sol/Biom <sup>d</sup>
	Biomassa	GLP	Ar sec.	Ar prim <sup>a</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>b</sup>	Gás	Carvão <sup>c</sup>	[adim]	[%]
GSR1	8,13	0,6	11,27	12,15	1,45	33,36	0,23	2,88	2,84
GSR2	16,37	-	11,05	4,06	2,60	31,68	2,41	0,92	14,71
GSR3	15,07	0,326	8,16	18,84	2,33	44,34	0,39	1,79	2,60
GSR4	10,96	-	9,85	15,87	1,74	37,77	0,66	2,35	6,04
GSR5	15,12	0,209	7,00	7,15	2,01	30,49	1,00	0,94	6,62
GCR1	10,23	0,114	2,51	14,51	1,31	27,73	0,95	1,66	9,31
GCR2	9,73	-	7,04	7,24	1,56	25,38	0,21	1,49	2,13
GCR3	8,15	-	7,62	15,04	1,35	31,53	0,63	2,80	7,68
GCR4	8,67	-	8,02	8,74	1,38	26,23	0,58	1,87	6,68
GCR5	12,50	-	9,54	6,45	1,55	28,96	1,08	1,28	8,61
GCR6	13,98	-	7,30	8,16	1,72	30,32	0,84	1,11	6,00

a – Calculado indiretamente para fechar o balanço de massa.

b – Soma da umidade da biomassa com a do ar.

c – Quantidade total de sólidos, inclui as cinzas e biomassa não convertida.

d – Calculados em relação a biomassa seca.

Conforme descrito na metodologia as amostras de gás foram analisadas e a média das composições encontradas em cada teste consta na tabela 7.7. Na realidade este é o gás que se obtém após a limpeza e que será usado num motor de combustão interna.

Tabela 7.7 – Composição do gás produzido (% em volume)

TESTE	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Total
GSR1 (3 amostras)	16,00	10,93	2,58	56,71	13,22	0,50	0,06	100,0
GSR2 (2 amostras)	18,69	10,63	3,41	52,25	14,10	0,76	0,16	100,0
GSR3 (3 amostras)	22,71	13,01	2,91	45,91	14,57	0,79	0,10	100,0
GSR4 (3 amostras)	20,84	10,27	1,08	55,98	11,43	0,26	0,14	100,0
GSR5 (2 amostras)	20,32	15,64	3,65	47,61	11,81	0,80	0,17	100,0
GCR1 (3 amostras)	20,95	14,38	2,38	51,63	9,73	0,67	0,26	100,0
GCR2 (3 amostras)	20,20	17,38	2,18	46,85	12,79	0,51	0,09	100,0
GCR3 (3 amostras)	15,77	10,27	2,05	60,92	10,29	0,59	0,11	100,0
GCR4 (3 amostras)	19,54	13,13	2,40	52,23	11,98	0,59	0,13	100,0
GCR5 (0 amostras)	-	-	-	-	-	-	-	-
GCR6 (1 amostra)	19,48	18,89	3,96	44,95	12,01	0,61	0,10	100,0

Fonte: Análise de amostras coletadas nos ensaios.

Com essas informações pode-se calcular a eficiência térmica do gás frio pela seguinte fórmula:

$$\eta_{\text{gásfrio}} = \frac{m_{\text{gás}} * 0,97 * PCS_{\text{gás}}}{\rho_N * (m_{\text{biom}} * PCS_{\text{biom}} + m_{\text{GLP}} * PCS_{\text{GLP}})} \quad (39)$$

onde  $m_{\text{gás}}$  é a massa de gás produzida obtida na tabela 7.6; 0,97 é um fator para considerar a presença de alcatrão e condensáveis na massa de gás medida;  $PCS_{\text{gás}}$  é o poder calorífico superior do gás encontrado na tabela 7.8;  $m_{\text{biom}}$  é a massa de biomassa seca introduzida no teste e obtida na tabela 7.6;  $PCS_{\text{biom}}$  é o poder calorífico superior da biomassa que foi considerado 20,100 MJ/kg (tabela 6.5);  $m_{\text{GLP}}$  é a massa de GLP introduzida no teste e também obtida na tabela 7.6; e  $PCS_{\text{GLP}}$  é o poder calorífico superior do GLP que foi considerado 49,186 MJ/kg, conforme dados do Balanço Energético Consolidado do Estado do Rio Grande do Sul, anos 97/98.

Esses resultados e os cálculos de eficiência estão mostrados na tabela 7.8.

A eficiência global, que inclui o carvão e seu conteúdo energético foi calculada somando-se o termo  $m_{\text{carvão}} * PCS_{\text{carvão}}$  no numerador da equação (30), onde  $m_{\text{carvão}}$  é a massa de carvão vegetal reportada na tabela 7.6 e  $PCS_{\text{carvão}}$  é o poder calorífico do carvão vegetal considerado igual a 29,7 MJ/kg, conforme dados do Balanço Energético Consolidado do Estado do Rio Grande do Sul, anos 97/98.

Tabela 7.8 – Poder calorífico e eficiências

TESTE	M. Molec [kg/kmol]	Densidade [kg/Nm <sup>3</sup> ]	PCS [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	Prod gás [Nm <sup>3</sup> /bs <sup>a</sup> ]	$\eta_{conv}^b$ [%]	$\eta_{gás\ frio}$ [%]	$\eta_{global}$ [%]
GSR1	26,9790	1,1028	4,3938	3,61	97,16	66,85	70,41
GSR2	27,1005	1,1078	5,1858	1,69	85,29	43,71	65,45
GSR3	26,6151	1,0879	5,7253	2,62	97,40	70,97	74,61
GSR4	27,0452	1,1055	4,2430	3,02	93,96	63,80	72,73
GSR5	25,4031	1,0384	6,0766	1,88	93,38	55,08	64,55
GCR1	25,5546	1,0446	5,5281	2,52	90,69	67,37	80,76
GCR2	25,2817	1,0334	5,5125	2,45	97,87	67,11	70,25
GCR3	26,7466	1,0933	4,1786	3,43	92,32	71,35	82,70
GCR4	26,2322	1,0723	5,0940	2,74	93,32	69,39	79,27
GCR5	-	-	-	2,10	91,39	-	-
GCR6	24,5515	1,0036	6,3206	2,10	94,00	65,90	74,76

Fonte: Elaboração própria

a – biomassa seca.

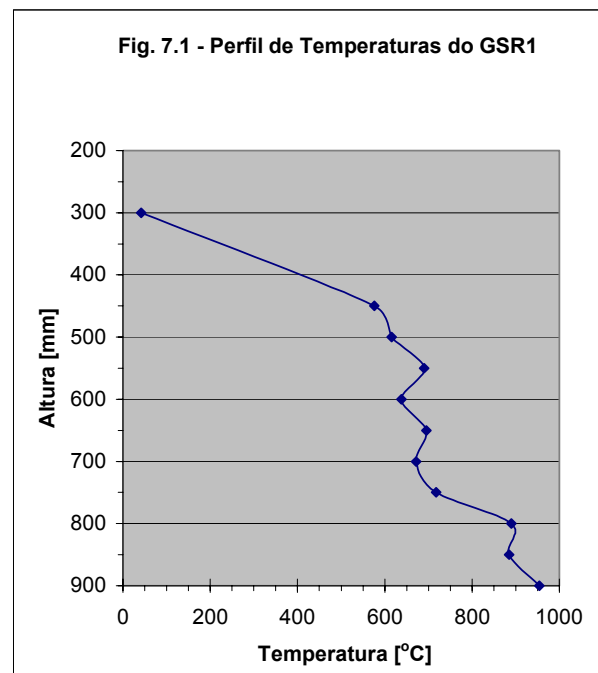
b – considerando somente os sólidos como perdas (100 – sol/biom).

#### 7.1.2.4 Avaliação individual dos testes

O equipamento que está sendo testado vem sofrendo ajustes e sendo avaliado cuidadosamente para que se determine o melhor procedimento operacional e os parâmetros que produzam o gás com a qualidade desejada. Os testes realizados serão descritos e avaliados para oferecer uma visão da evolução dos resultados e das características operacionais.

#### Teste GSR1 – Gaseificador sem recirculação de gases

O gás produzido no teste GSR1 comprovou o aparecimento dos compostos esperados. Os valores medidos não são exatos porque o controle das condições de teste foi prejudicado devido a quebra do redutor que movimenta a grelha e uma parte da serragem introduzida ser estimada. Detectou-se um percentual médio de 1,9% de oxigênio que supõe-se ser referente a infiltrações de ar e, conforme encontrado na literatura, pode ser descontado, porém, não é descartada a hipótese de que uma parte seja de oxigênio não reagido, já que foram observados vazios e caminhos preferenciais no interior do gaseificador. Visualmente percebeu-se pouca presença de alcatrão e



condensáveis, fato que se atribui às altas temperaturas obtidas, especialmente na região de redução próxima à grelha, como pode ser visto na Figura 7.1.

A chama produzida era amarelo-alaranjada e eventualmente azulada, estável sem necessidade de chama piloto por boa parte do teste. As amostras coletadas estavam limpas, sem condensáveis nem fumaça.

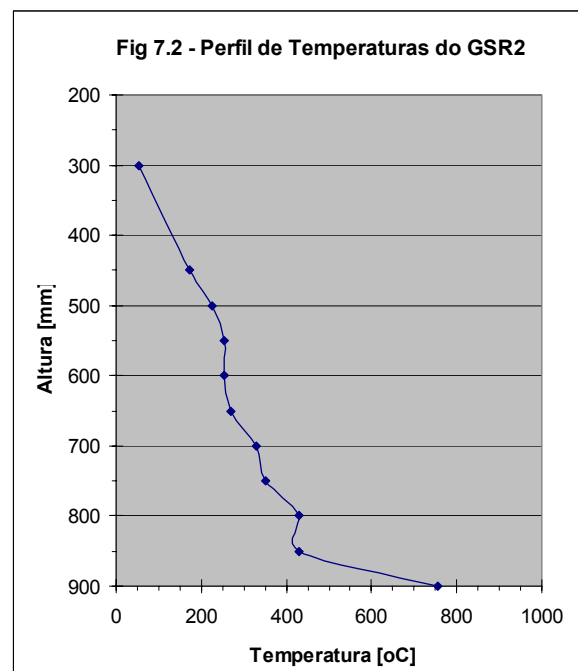
A relação ar/biomassa de 2,88 é um pouco alta, enquanto a faixa ideal é entre 2,0 e 2,4. Parte desse ar reagiu com o GLP e poderia ser descontado. O índice de sólidos: 2,84% está bom pois, na prática, dificilmente se obtém índices menores que 2%, porque não há oxigênio para reagir completamente com o carvão. Percebe-se que há um excesso de ar pela grande quantidade de nitrogênio presente na amostra, mesmo depois de descontado o ar que considerou-se como infiltração.

De acordo com o perfil de temperaturas, a pirólise começa rapidamente, pois antes da metade da altura já tem-se temperaturas acima de 600°C, e há uma camada com temperaturas acima de 800°C (provavelmente carvão incandescente) com mais de 150 mm de espessura acima da grelha capaz de craquear os condensáveis e reduzir o carvão, formando gás combustível.

#### Teste GSR2 – Gaseificador sem recirculação de gases

Nesse teste o consumo de biomassa foi muito alto e, devido às baixas temperaturas obtidas, que pode ser observado na figura 7.2, gerou-se muito carvão, fuligem e alcatrão. A pequena granulometria do carvão (pó) provocou entupimento de alguns pontos do sistema e causou problemas operacionais. Também detectou-se 2% de oxigênio, que foi considerado infiltração e descartado junto com o nitrogênio na composição do gás.

A chama produzida era longa, porém instável, de cor alaranjada, com fagulhas, condensáveis e umidade. As amostras coletadas estavam turvas, indicando contaminação com alcatrão.



A relação ar/biomassa de 0,92 é muito baixa, bem abaixo da faixa ideal, e a causa provável da alta produção de carvão, alcatrão e condensáveis, como pode ser comprovado no



alto índice de sólidos retirados – 14,71%. É possível recalcular-se a relação ar/biomassa com apenas a biomassa que realmente reagiu e obtém-se  $16,37/(17,74-2,61) = 1,08$ .

Através do perfil de temperaturas percebe-se que obteve-se combustão somente logo acima da grelha (ou mesmo abaixo) enquanto no resto do equipamento a temperatura estava baixa, mas suficiente para a ocorrência de pirólise ( $>300^{\circ}\text{C}$ ).

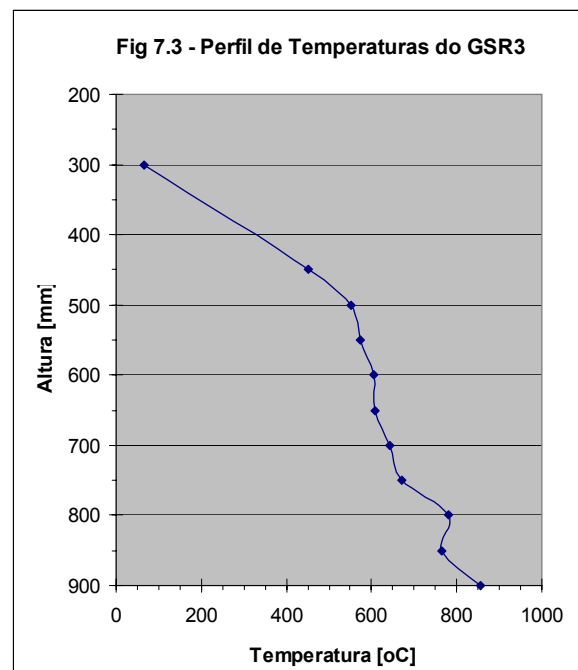
Com os problemas encontrados nesse teste estabeleceu-se um procedimento adequado para se atingir as condições necessárias a uma boa gaseificação. Depois do aquecimento prévio com GLP até em torno de  $300^{\circ}\text{C}$ , começa-se a colocar serragem tomando-se o cuidado para que haja combustão completa. Dessa forma, o calor liberado irá aumentar a temperatura interna e dos acessórios sem haver contaminação com alcatrão e fuligem. Eleva-se o nível de serragem a medida que as temperaturas desejadas são atingidas e diminui-se a vazão de ar até que a proporção de ar e biomassa desejada se estabeleça e inicie a formação de gás combustível.

#### Teste GSR3 – Gaseificador sem recirculação de gases

As medições efetuadas nesse teste foram bem controladas e, portanto, seu resultado é mais preciso. A composição do gás obtido ficou muito próxima do esperado, se for comparada com a composição do gás padrão na tabela 6.3. O percentual médio de oxigênio detectado foi de 1,11%, menor que nos outros testes e foi descartado junto com o nitrogênio. As temperaturas atingidas foram razoavelmente altas como pode ser visto na figura 7.3, porém, somente uma pequena camada acima da grelha estava acima de  $800^{\circ}\text{C}$ .

A chama estava amarelada na maior parte do tempo e com um pouco de fumaça branca no centro. Praticamente não se percebeu umidade e alcatrão na chama e por uma boa parte do ensaio não foi necessário a chama piloto. As amostras coletadas não estavam muito sujas.

A relação ar/biomassa estava pouco abaixo da faixa ideal: 1,79 e os sólidos gerados abaixo de 3%. Quanto a relação ar/biomassa cabe uma ressalva. Pode ser observado no balanço de massa que foi introduzida uma pequena quantidade de gás liquefeito de petróleo. Pela

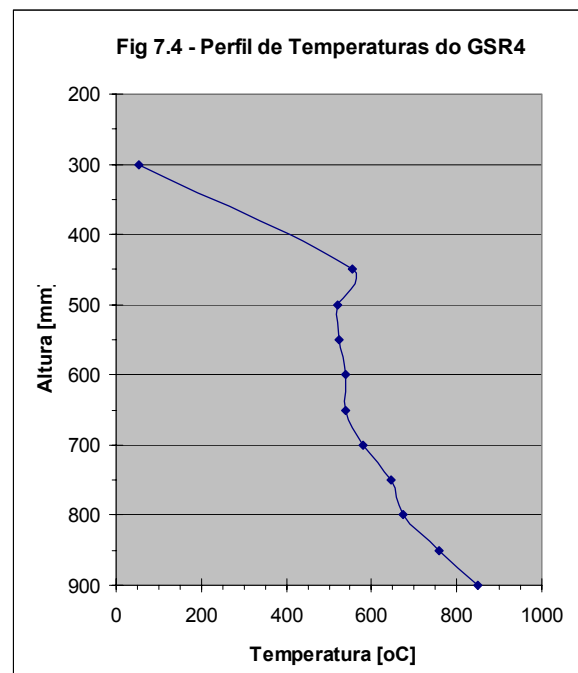


montagem do queimador, este gás tende a queimar completamente, portanto, pode-se diminuir a quantidade de ar efetivamente usada para gaseificação. Calculando a quantidade estequiométrica de ar para queimar completamente o GLP introduzido no teste, seriam necessários 3,825 kg. Corrigindo-se o valor da relação ar/biomassa chega-se a 1,47. Pode-se concluir que a energia liberada na combustão do GLP favoreceu as reações necessárias mesmo com a baixa relação ar/biomassa. No capítulo 4.2.1.2, no item sobre princípios da gaseificação é mencionado que a reação ideal é aproximadamente 1,2 kg de ar por kg de biomassa, entretanto, essa reação é endotérmica e só se sustentaria com um aporte externo de calor. No teste realizado, obteve-se isso através da queima de GLP.

#### Teste GSR4 – Gaseificador sem recirculação de gases

Nesse teste alguns problemas operacionais não permitiram que se obtivesse um processo estável. Apesar disso, pode-se coletar amostras e observar algumas características importantes da gaseificação. Conseguiu-se controlar melhor o consumo de biomassa e a relação ar/biomassa. O perfil de temperaturas mostra que não se atingiu valores muito altos, conforme pode ser observado na figura 7.4, apesar de ter ocorrido um aumento no final do teste. A composição do gás variou significativamente de uma amostra para outra, comprovando a instabilidade do teste.

A chama produzida mudou de avermelhada e longa para alaranjada e curta ao longo do teste até haver engolimento de chama. As amostras não estavam muito turvas e durante parte do teste percebeu-se uma coloração cinza no gás que saía da tocha.



A relação ar/biomassa ficou dentro da faixa ideal: 2,35 e os sólidos um pouco acima de 6%. Uma situação atípica ocorrida foi o aumento, sem razões aparentes, da vazão do ar que é insuflado no tubo central por um ventilador. Analisando a perda de carga na região central do gaseificador percebe-se um aumento da mesma concomitante com o aumento da vazão. Como o ventilador fornece uma pequena pressão ao ar e sua saída é no centro do gaseificador, supõe-se que tenha havido uma espécie de sucção desse ar devido ao aumento da diferença de pressão, aumentando sua vazão, provavelmente favorecida pelo aparecimento de vazios e caminhos

preferenciais abaixo da massa de serragem superficial que são difíceis de serem observados. Esses caminhos preferenciais dificultam o contato do ar com a biomassa e podem justificar o elevado valor de sólidos.

A instabilidade do teste prejudicou a homogeneidade da composição das amostras que variaram significativamente. Em duas amostras percebe-se aumento do percentual de nitrogênio mas, em contrapartida, não houve aumento do percentual de oxigênio. Imagina-se que o oxigênio reagiu com os compostos do gás dificultando a interpretação dos resultados. Para que ocorram as reações do ar com outros compostos, provavelmente ele entrou no sistema pelo corpo do gaseificador onde encontra-se altas temperaturas. Deve-se prever meios de impedir esse tipo de ocorrência, principalmente eliminando vazios e caminhos preferenciais.

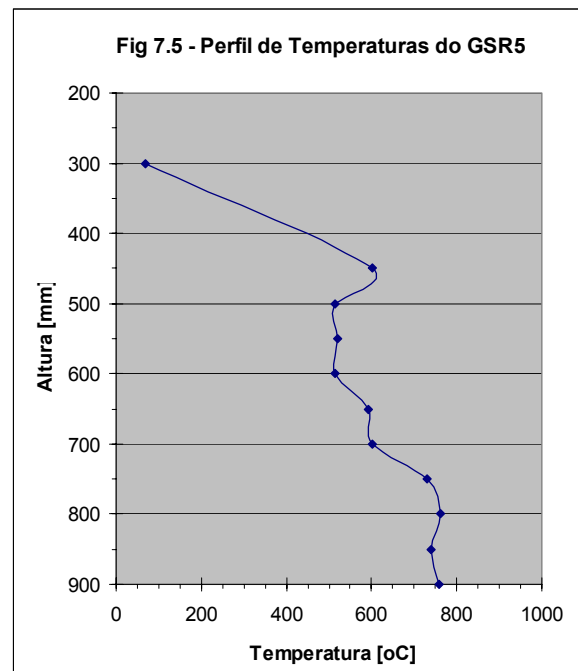
#### Teste GSR5 – Gaseificador sem recirculação de gases

Diferentemente do teste anterior, esse foi um teste estável, com pouca variação nas vazões e características de chama. A vazão de biomassa foi bem controlada, porém, algum entupimento na grelha impediu a obtenção da vazão de ar adequada. As temperaturas ficaram altas na parte central do reator, contudo, não se atingiu temperaturas mais altas próximo à grelha, conforme pode ser visualizado na figura 7.5.

A chama conservou-se sempre estável, com comprimento médio e uma coloração alaranjada forte e transparente em alguns pontos. Na maior parte do teste ocorreram fagulhas e logo na saída da tocha, o gás tinha um aspecto cinza escuro. As amostras estavam turvas indicando contaminação com alcatrão e/ou fuligem.

A relação ar/biomassa de 0,94 ficou bem abaixo da ideal e o índice de sólidos de 6,62%, que pode ser considerado alto, tem uma estreita relação com a baixa vazão de ar. A dificuldade em se obter vazões mais altas de ar, apesar da possibilidade de regulagem da rotação do ventilador, devido a um provável entupimento da grelha, revela a importância do projeto da grelha e da agitação do leito.

Pelo perfil de temperaturas observa-se que logo no início se atinge temperaturas próximas de 600°C, indicando a presença de combustão pirolítica e formação de alcatrão e gases



condensáveis. Porém, esses produtos consomem energia para serem craqueados, bem como a redução do carvão. Com as temperaturas encontradas na região de redução abaixo de 800°C, percebe-se que não houve condições para craquear todo o alcatrão e para as reações de redução do carvão, resultando na formação de alcatrão e no elevado índice de sólidos já mencionado.

Deve ser considerado também o consumo de GLP, que foi de 0,23 kg e, portanto, consumiu 3,45 kg de ar. Essa quantidade gera um aporte de calor de 2,7 kW ( $m_{GLP} \cdot PCS_{GLP} / \text{tempo}$ ) e reduz a relação ar/biomassa para 0,73  $[(15,57 - 3,45) / 16,63]$ . Mesmo considerando o calor obtido com o GLP, pode-se afirmar que não foram atingidas as condições para que as reações necessárias se realizassem.

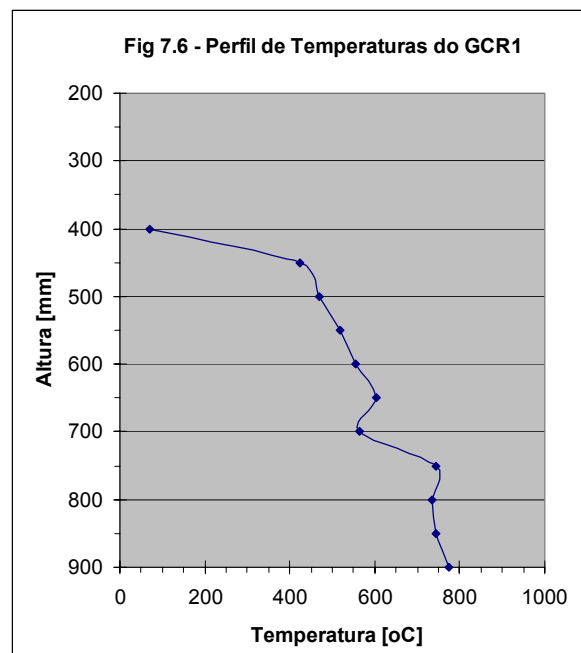
#### Teste GCR1 – Gaseificador com recirculação de gases

Na montagem do equipamento para esse teste introduziu-se uma peça no tubo de entrada do ar para realizar a sucção dos gases da pirólise e queimá-los internamente. A vazão de ar reduziu-se muito e a velocidade do ar na seção mais estreita chegou somente a 14,7 m/s. Será necessário trocar o ventilador para que a sucção seja mais efetiva.

O teste manteve-se estável, porém, com vazão reduzida. As temperaturas não foram elevadas, conforme pode ser visto na figura 7.6, e o nível da serragem dentro do equipamento ficou abaixo da metade com a intenção de minimizar a perda de carga interna e melhorar as vazões de ar. Por essa razão o ponto inicial de temperaturas está a 400 mm, ou seja, pouco acima da metade.

A chama produzida manteve-se igual na maior parte do teste, melhorando no final. Seu aspecto estava sujo devido a grande quantidade de fagulhas e presença de alcatrão. A coloração estava alaranjada com algumas franjas transparentes. As amostras coletadas estavam turvas, indicando contaminação com alcatrão.

A relação ar/biomassa de 1,66 ficou abaixo da ideal e o índice de sólidos de 9,31% é alto. Comparando com os dois testes anteriores verifica-se que a relação ar/biomassa variou bastante: de 2,35 para 0,94 e depois 1,66, enquanto o índice de sólidos manteve-se alto. O aspecto de maior similaridade entre os testes é o perfil de temperaturas com valores entre 500 e 600°C no



início e valores abaixo de 800°C próximo a grelha. Outra comparação é do teste GSR2 com o GSR5, onde a relação ar/biomassa foi praticamente a mesma, porém, o índice de sólidos do GSR2 foi mais que o dobro que o do GSR5 e a temperatura no GSR2 só chegou próxima dos 400°C perto da grelha.

Essa análise é importante porque revela que o parâmetro mais significativo na formação de sólidos, provavelmente, seja o perfil de temperaturas e não a relação ar/biomassa.

O GLP não foi consumido durante todo o teste, mas considerando o consumo e o tempo total de teste, obtém-se 1,51 kW de potência com sua queima. Essa energia foi considerada na determinação da eficiência, porém, só atuou em parte do teste.

#### Teste GCR2 – Gaseificador com recirculação de gases

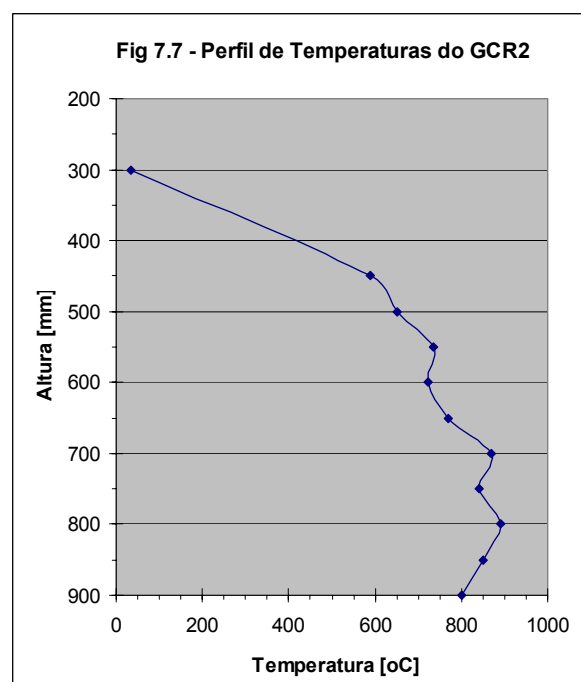
Para a realização desse teste foi trocado o ventilador de alimentação do ar que não tinha capacidade de fornecer a vazão necessária conforme mencionado na avaliação do teste anterior. Com esse novo ventilador atingiu-se uma velocidade de 37,4 m/s na seção mais estreita e houve uma significativa melhora nas condições do teste. Outra modificação foi no procedimento operacional, onde colocou-se um leito de carvão vegetal sobre a grelha para fornecer calor sem formação excessiva de alcatrão e condensáveis.

As temperaturas atingidas nesse teste foram bem superiores aos testes anteriores e, como pode ser visto na figura 7.7, o perfil assumiu características próximas do esperado em relação as regiões internas do equipamento e suas respectivas reações.

A chama produzida foi estável, sem fagulhas e sem necessidade de piloto na maior parte do teste. Um problema na movimentação da grelha levou ao entupimento da mesma e provocou, aparentemente, instabilidade da chama no final do teste. O comprimento da chama era médio e sua coloração estava alaranjada e azul com partes transparentes. As amostras coletadas não estavam muito sujas, com uma névoa clara que pode ser vapor d'água.

A relação ar/biomassa de 1,47 ficou abaixo da ideal, porém, o índice de sólidos foi o mais baixo obtido até agora: 2,12%. Esse

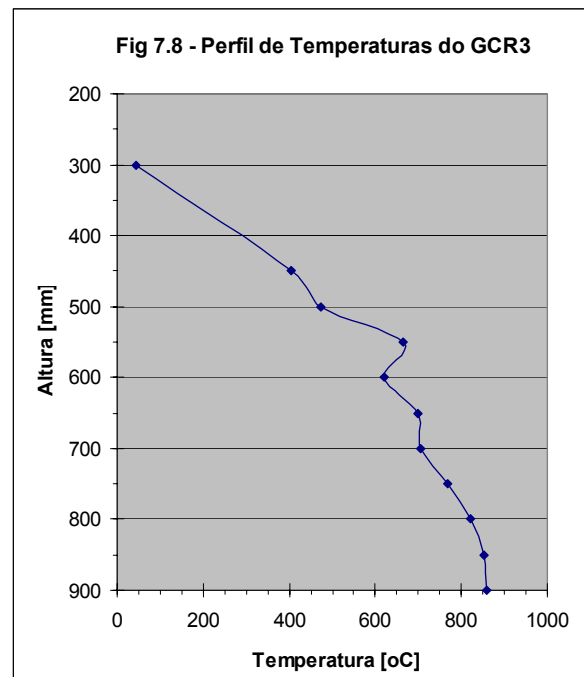
resultado reforça a tese de que a temperatura é o principal fator na formação de sólidos.



No perfil de temperaturas mostrado, percebe-se que a biomassa rapidamente atinge temperaturas acima de 700°C, na região logo abaixo do queimador interno aparecem vários pontos com temperatura acima de 800°C e depois diminuem um pouco logo acima da grelha. A região de temperaturas mais altas coincide com a região onde espera-se que esteja ocorrendo a combustão interna do alcatrão e condensáveis devido à recirculação interna. Durante todo o teste percebeu-se um ruído semelhante ao da queima do GLP, reforçando a idéia da ocorrência de recirculação interna dos gases. Além disso, um visor colocado entre 700 e 750 mm de altura permitia a visualização de uma chama amarela e a parede incandescente do queimador. A redução da temperatura próxima a grelha era esperada pela característica endotérmica das reações de redução do carvão.

#### Teste GCR3 – Gaseificador com recirculação de gases

Nesse teste procurou-se reproduzir as condições do teste anterior, porém, com maior relação ar/biomassa reduzindo-se a vazão de serragem. A velocidade do ar na seção de sucção foi um pouco superior à do teste anterior, 41,9 m/s, permitindo a recirculação interna de gases. O perfil de temperaturas mostra que atingiu-se temperaturas altas durante o teste. Contudo, deve-se ressaltar que durante o procedimento operacional de estabilização das condições de teste a temperatura interna do reator não subiu rapidamente, gerando problemas de formação de sólidos e alcatrão. Mesmo no tempo normal de teste houve grande variação das temperaturas centrais do reator e os primeiros dois termopares ficavam eventualmente expostos. Na figura 7.8 percebe-se que as temperaturas acima da grelha ficaram sempre acima de 800°C, e na parte central a média ficou acima de 600°C. O percentual de oxigênio nos gases foi dentro do esperado, em torno de 1,5%, e o de nitrogênio ficou bem alto, acima de 60%, comprovando a relação ar/biomassa mais alta.



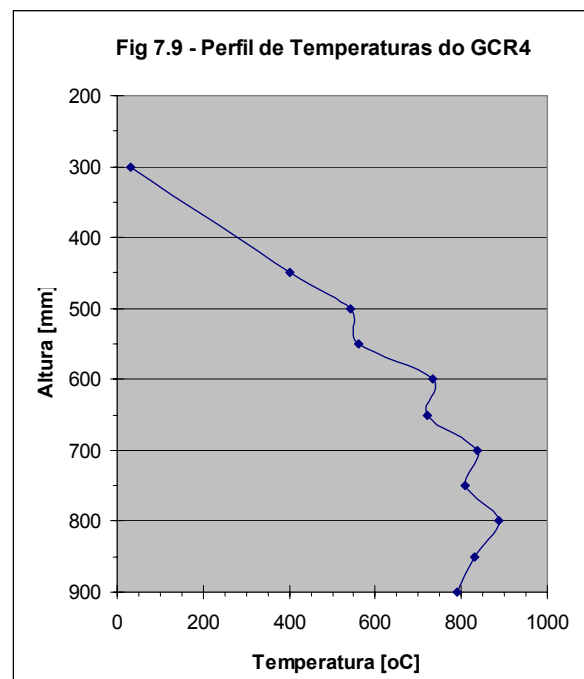
Produziu-se uma chama estável, sem necessidade de piloto durante todo o teste, com comprimento médio, de cor amarelo-alaranjada forte com fumaça escura no centro. Houve presença de fagulhas apenas no início do teste. A amostra estava turva acinzentada, evidenciando a presença de alcatrão.

Conforme mencionado obteve-se uma relação ar/biomassa maior que no teste anterior. O valor de 2,78 é considerado um pouco acima do ideal e o índice de sólidos de 7,68% é um valor alto, gerado principalmente pela variação das condições do teste. Estima-se que essa variação tenha sido originada na formação de caminhos preferenciais e vazios no interior do reator percebida durante o teste. Na realidade o percentual de sólidos foi um pouco maior, porém, desconsiderou-se a geração inicial que descaracterizaria o que ocorreu durante o teste.

Quanto à recirculação também observou-se o ruído da queima interna de gases como no teste anterior, porém, instavelmente. As temperaturas próximas ao queimador (altura de 650 mm do topo) variaram de 513°C até 837°C ao longo do teste de forma cíclica. Analisando a variação de temperaturas dos termopares acima do queimador observa-se uma relação direta, ou seja, quando a temperatura estava baixa acima do queimador (pouca formação de produtos de pirólise) também estava baixa na região do queimador. A mesma relação não se observa para os três termopares acima da grelha, que mantiveram as temperaturas estáveis e acima de 800°C, provavelmente graças a presença de carvão incandescente, o qual é mais estável.

#### Teste GCR4 – Gaseificador com recirculação de gases

Nesse teste voltou-se a repetir bons resultados de eficiência e temperaturas, apenas com geração excessiva de sólidos. A velocidade do ar na região de sucção ficou em 42,6 m/s e percebeu-se a queima interna de gases. O período de estabilização com serragem foi bem mais rápido e obteve-se temperaturas altas desde o início com menor variação que no teste anterior. O perfil de temperaturas da figura 7.9 mostra que as temperaturas mais altas (próximas a 900°C) foram obtidas 100 mm acima da grelha e próximo ao queimador, com redução para 795°C exatamente sobre a grelha, que é o comportamento esperado. O nível normal de operação ficou pouco acima do termopar superior, gerando uma temperatura mais baixa (<400°C) neste. Os termopares seguintes já apresentam temperaturas bem mais altas (>500°C) evidenciando que a combustão pirolítica provavelmente estava ocorrendo nessa região.



A chama produzida foi estável grande parte do teste, só se instabilizando um pouco no final, quando houve retorno de chama e foi necessário a chama piloto. O comprimento era médio curto com coloração alaranjada e franjas azuladas sem fagulhas. No centro havia um pouco de fumaça cinzenta. As amostras estavam pouco turvas.

A relação ar/biomassa de 1,93 é um valor bom, dentro da faixa onde se verifica boas eficiências. Nesse teste o valor da eficiência de gás frio de 69%, foi um dos melhores obtidos até agora. Os melhores resultados são de 71%, com relações ar/biomassa de 1,79 e 2,78. Quanto ao excessivo índice de sólidos obtido: 6,68%, revela que não são só as condições iniciais e a temperatura interna que favorecem sua formação. Estima-se que um fator que influenciou a geração de sólidos dos dois últimos testes seja o tamanho das lascas de madeira, com dimensão característica menor que 5 mm e grande quantidade de pó.

A recirculação continuou fornecendo um bom aporte de calor que observa-se pela temperatura alta na região dos 700 mm que é a região do queimador. Outro indicativo da combustão graças à recirculação é a retirada de uma chapa, que servia para tapar o fundo do queimador, apresentando pequenos furos e uma espessura bem menor que a original. Essa chapa ficou nesse estado após apenas quatro testes e foi substituída por outra de aço inoxidável.

Uma novidade nesse teste foi a análise quantitativa do alcatrão presente no gás. Montou-se um sistema de coleta, conforme descrito na metodologia, e obteve-se uma massa de alcatrão leve de 0,1748 gramas para uma massa de gás succionada pelo compressor de 621 gramas. Com esses valores obtém-se 0,0281% ou 281 ppm que é um ótimo nível de contaminantes. A parcela de alcatrão pesado (massa molecular > 200) não foi possível quantificar, mas estima-se que não seja muito grande. Para o próximo teste serão feitas modificações para medir-se todo o alcatrão e a umidade do gás.

#### Teste GCR5 – Gaseificador com recirculação de gases

Apesar de ter sido um bom teste, um problema ocorrido na coleta das amostras de gases impediu que se fizesse a cromatografia gasosa e, portanto, não foi possível determinar o poder calorífico do gás, a eficiência do gás frio e global. Optou-se por manter o relato desse teste para analisar o balanço de massa, perfil de temperaturas e outras análises que podem ser realizadas. Uma característica importante observada é que a vazão de ar pela recirculação foi quase 40% maior que o ar succionado pelo corpo do reator, atingindo uma velocidade máxima de 50,6 m/s. Em função disso, observou-se certa instabilidade na combustão dos gases recirculados e menor temperatura inicial conforme pode ser observado na figura 7.10 abaixo. O nível de serragem foi mantido mais alto para garantir que houvesse mais espaço para a combustão pirolítica.



A chama produzida foi estável durante todo o teste com comprimento médio e coloração alaranjada sem fagulhas. No centro havia um pouco de fumaça cinzenta. Conforme observado anteriormente, perdeu-se as amostras recolhidas devido a instalação do sistema de análise de alcatrão e umidade.

A relação ar/biomassa de 1,28 é um valor baixo, indicando a dificuldade operacional em função das limitações do ventilador utilizado e a vazão alta de biomassa determinada pela operação da grelha. A baixa relação ar/biomassa associada à grande vazão de recirculação

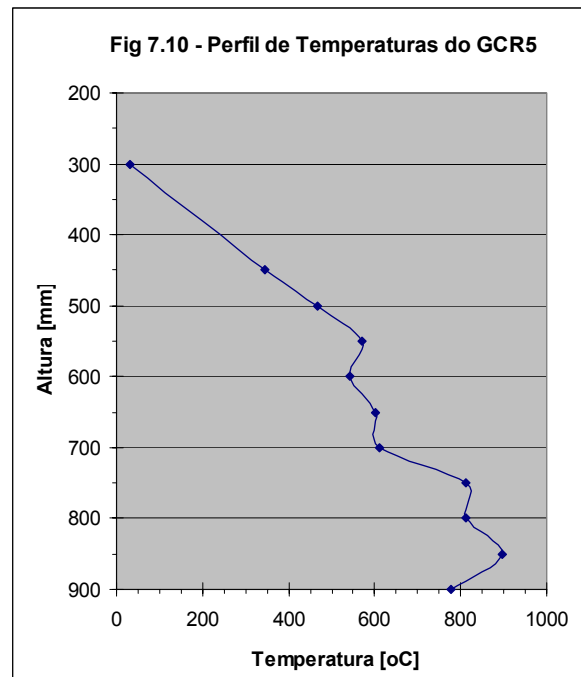
mencionada acima ocasionou baixa combustão pirolítica pela ausência de ar para oxidar a serragem na região inicial do equipamento. O alto índice de sólidos obtido: 8,61%, com um material pouco maior que nos testes anteriores pode indicar que há outro fator gerador desse alto índice. Um fato coincidente nos 3 últimos testes, que pode ser uma das causas, é a utilização de carvão vegetal para o aquecimento inicial do sistema.

Apesar da instabilidade da recirculação observa-se um perfil adequado com temperaturas acima de 800°C reduzindo-se logo acima da grelha, como é o esperado. Entretanto, as baixas temperaturas logo no início evidenciam problemas nessa região. A elevação de temperatura na altura de 850 mm, onde deve haver carvão reagente, indica que pode estar havendo uma entrada de ar não queimado que passa através do queimador, cuja principal saída é na altura de 750 mm.

A medição de alcatrão e umidade foi modificada e utilizou-se a metodologia descrita no capítulo 6.1.2.5. Dessa forma obteve-se uma vazão de 935,1 g de gás, 86,941 gramas de água e 2,511 gramas de alcatrão. Esses valores correspondem a 91,27% de gás seco, 8,49% de umidade no gás e 2451 ppm de alcatrão.

#### Teste GCR6 – Gaseificador com recirculação de gases

Nesse teste também ocorreu um problema que limitou a análise do gás a apenas uma amostra, porém, as condições estáveis do teste e da chama permitem afirmar que a amostra é representativa do ensaio. A recirculação ocorreu durante todo o teste, pois procurou-se manter a vazão de ar pela recirculação menor que a succionada pelo corpo do reator e a velocidade máxima na recirculação não ultrapassou 40 m/s.



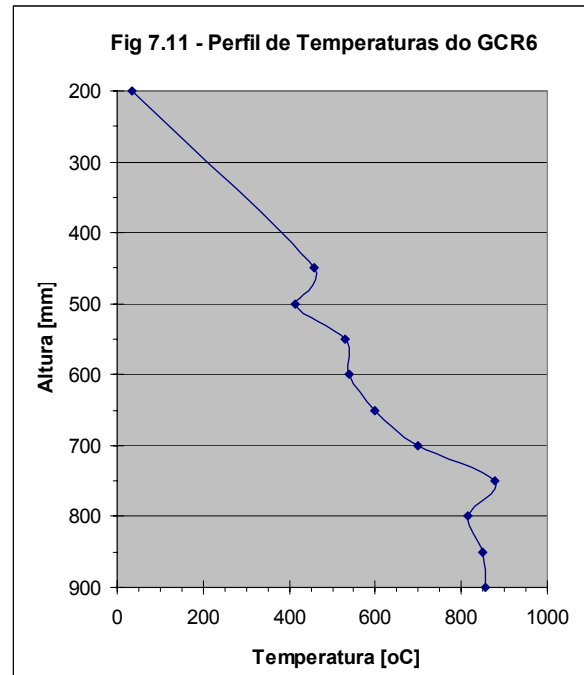
A chama produzida foi estável durante todo o teste com comprimento médio e coloração inicialmente amarela, passando para alaranjada, sem fagulhas. No centro havia um pouco de fumaça cinzenta. Percebeu-se infiltração de ar em duas amostras descaracterizando-as e, portanto, utilizou-se apenas a terceira amostra. Operou-se sem chama piloto durante todo o teste.

O valor da relação ar/biomassa foi muito baixo, 1,11, e o índice de sólidos manteve-se alto, da ordem de 6%. Nesse último teste também foi utilizado carvão vegetal para a fase de aquecimento do reator. Mesmo com a menor

relação ar/biomassa atingiu-se temperaturas mais altas na região inicial, provavelmente graças à maior quantidade de ar para as reações de pirólise.

Com o perfil de temperaturas mostrado percebe-se um aumento de temperatura (quase 900°C) na altura da principal saída dos gases quentes do queimador e, logo após, as temperaturas permanecem altas, próximas a 850°C, indicando redução dos gases com o carvão, porém, com menor intensidade.

A medição de umidade e alcatrão indicou respectivamente 143,298 g e 2,724 g, para uma massa de gás igual a 1088,4 g. Com esses valores chega-se a um percentual de 11,61% de água, 2207 ppm de alcatrão e 88,17% de gás seco. A umidade medida nos 2 últimos testes está um pouco acima do esperado, maior que o encontrado nas bibliografias consultadas, porém, assim como os valores de alcatrão também altos, mas dentro do esperado, podem ser devido a baixa relação ar/biomassa dos 2 testes.



## 7.2 RESULTADOS PARA A SERPENTINA NO FOGÃO A LENHA

Os resultados da avaliação da substituição de chuveiro elétrico por serpentina no fogão a lenha desenvolvido no município de Jaquirana, estado do Rio Grande do Sul, serão divididos em duas etapas: pesquisa nos domicílios e testes de desempenho.

Os aspectos práticos do tipo segurança, vazamentos e outros, foram avaliados informalmente através de consulta pelos usuários. O aspecto econômico foi analisado de forma

simplificada pois o tipo de investimento necessário em cada instalação é de baixo valor, não justificando cálculos financeiros complexos.

### **7.2.1 Resultados da pesquisa para substituição de energéticos**

Os principais resultados da pesquisa mostram que 95% das residências possuem fogão a lenha e 92% utilizam chuveiro elétrico. A média de consumo de lenha é de 7,8 st de lenha por ano, para um desvio padrão de 3,5 st, com 40% das residências consumindo o ano inteiro. O valor significativo do desvio padrão mostra que o consumo de lenha não é regular. Contudo, as informações sobre o consumo de lenha não são exatas, pois são uma estimativa feita a partir da memória dos entrevistados. A principal origem da lenha é de resíduos industriais (46%) seguida pela comprada (37%). A média de consumo de eletricidade é 130 kWh por mês, e o desvio padrão é de 77,3 kWh. No consumo de eletricidade o desvio padrão também é alto, mostrando a diversidade de equipamentos e hábitos de uso. As informações de consumo de eletricidade tendem a ser mais confiáveis, uma vez que os entrevistadores foram instruídos a solicitar a última conta de energia elétrica e verificar a média. Cruzando os dados de consumo de lenha e eletricidade, pode-se observar que os estratos que consomem menos de 97 kWh e entre 97 e 188 kWh por mês (82%), coincidem com a maior utilização de lenha, onde 76% dos entrevistados consomem de 4 a 13 estéreos por ano.

Outro resultado importante é em relação a qualidade da energia elétrica, que resultou em 87% dos entrevistados considerando-a de regular (53%) a péssimo (34%). A principal reclamação foi em relação a queda de tensão (89%) e problemas de queima de aparelhos elétricos (27%).

Nenhum entrevistado utiliza, e grande parte dos entrevistados (73%) não conhecem a serpentina no fogão a lenha para aquecimento, enquanto somente 1% já a utilizou. Um percentual de 54% estariam dispostos a usar a serpentina em suas casas, inclusive com aumento de pontos de água quente.

Em relação a renda, 88% dos entrevistados recebe até 5 salários mínimos, mostrando o baixo poder aquisitivo da população.

### **7.2.2 Avaliação da serpentina instalada**

Com relação a instalação, deve ser ressaltado que alguns problemas de montagem afetam a operação do sistema. Isso foi devido à inexperiência do instalador com a tubulação de cobre e

sua preferência na utilização de tubos de PVC. A principal dificuldade diz respeito a entrada de ar nas conexões que prejudica a transferência de calor na serpentina e diminui a vazão, principalmente no chuveiro.

Outra grande dificuldade é inerente ao próprio equipamento, que é fabricado em aço galvanizado e, portanto, está sujeito a corrosão ao ficar em contato com água quente. Observou-se grande quantidade de material oxidado nas torneiras e no chuveiro. Essa incrustação também dificulta a transferência de calor e pode gerar entupimentos e vazamentos. Provavelmente, a sucessão de tubos de cobre com aço galvanizado intensificou a corrosão pela formação de uma ponte galvânica.

Outras informações foram obtidas em relação ao funcionamento do equipamento através de declarações dos moradores e observações próprias.

#### 7.2.2.1 Tempo para aquecimento e eficiências

O teste de tempo para aquecimento de água foi realizado medindo-se a temperatura da água 5 (cinco) vezes entre 8 horas e 45 minutos e 11 horas da manhã, utilizando-se 4,2 kg de lenha (cascas de pinheiro e ripas de Pinus). Esta quantidade não é exata, pois não se pode precisar que proporção da lenha introduzida já havia queimado ao final das medições.

O nível de água dentro do reservatório era de 415 mm. Como o diâmetro interno é 730 mm, obtém-se um volume de água de  $0,1737 \text{ m}^3$ . Adotando-se uma densidade média de  $997 \text{ kg/m}^3$  e um calor específico de  $4,183 \text{ kJ/kg.K}$ , resulta uma capacidade térmica do reservatório igual a  $724,4 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$ .

As medições foram feitas em fevereiro de 2001 e os resultados obtidos são mostrados na tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Teste de tempo para aquecimento da água

HORA	$t_{\text{água}}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Aquec. [kJ]	POT útil [W]	Perdas [W]	POT serp [W]	Cons de lenha médio [kg]
8h45min	21,7	-	-	-	-	-
9h15min	23,8	1521,26	845	123	968	0,933
09h55min	26,6	2028,34	845	152	997	1,245
10h30min	29,4	2028,34	966	194	1160	1,089
11h00min	31,6	1593,70	885	229	1114	0,933
TOTAL	9,9	7171,63	885	174	1059	4,2

Fonte: Elaboração própria

Na tabela acima, as perdas foram estimadas considerando uma temperatura ambiente de  $21^\circ\text{C}$  e usando as propriedades dos materiais dos tubos e do reservatório, conforme será descrito

adiante. É importante entender que as perdas aumentam devido ao aumento da temperatura da água, mas ao mesmo tempo, reduz a viscosidade e favorece a circulação da água pela serpentina, aumentando sua capacidade (POT serp), principalmente no inverno. Nas condições de utilização, a temperatura da água deverá estar maior, aumentando a influência das perdas. Por exemplo, se a temperatura da água no reservatório for 50°C, as perdas podem chegar a 440 W, entretanto, ao desligar a serpentina o fluxo é interrompido e as perdas da tubulação cessam. Nessa condição a perda pelo reservatório é de somente 175 W.

Dividindo-se o consumo de lenha pelo tempo de teste tem-se a taxa de consumo que é de 4,2/2h15m = 1,867 kg/h. Considerando um poder calorífico inferior da lenha, com uma umidade estimada em 10%, igual a 14800 kJ/kg, a quantidade de calor liberada é de 62160 kJ. Dividindo-se a energia recebida pela água por essa quantidade liberada pela lenha obtém-se uma eficiência do sistema de 11,5%, como mostrado abaixo:

$$\eta_{sist} = \frac{7171,63}{62160} = 0,1154 \quad (40)$$

Note-se que nessa eficiência estão incluídas as perdas pela tubulação e pelas paredes do reservatório. Considerando a capacidade da serpentina, a partir da estimativa de perdas, a eficiência aumenta para 13,8%, que é a relação entre a quantidade de energia absorvida pela água na serpentina dentro do fogão e a energia contida na lenha.

$$POT_{fogão} = \frac{ENERGIA}{tempo} = \frac{62160 * 1000}{135 * 60} = 7674,1Watts \quad (41)$$

$$\eta_{serp} = \frac{Q_{serp}}{Q_{fogão}} = \frac{1059}{7674,1} = 0,138 \quad (42)$$

Para se atingir uma temperatura final da água de 38°C, adequada para um bom banho, na instalação em questão precisaríamos mais 4636 kJ, conforme segue:

$$Q = m * C_p * \Delta t = 173,7 * 997 * 4,183 * (38 - 31,6) = 4636,16 \quad (43)$$

Admitindo que as perdas aumentem para 270 W (maior diferença de temperatura), teria-se uma potência útil de 1059 – 270 = 789 W. Para chegar a 4636,16 kJ precisa-se:

$$t = 4636,16 * 1000 / 789 = 5876 \text{ s} = 1,63 \text{ horas} \quad (44)$$

Mantendo-se a mesma taxa de consumo de lenha, chega-se a 3,04 kg, ou seja, um total de 7,24 kg de lenha. Somando-se os tempos (2h15min + 1h38min) tem-se 3 horas e 53 minutos. Na prática, com pouco mais de 7 kg e 4 horas de fogo, aquece-se água suficiente para uma família de 4 pessoas no verão.

Fazendo uma analogia para o inverno, conforme a referência [7] uma família de 4 pessoas utiliza 240 litros de água quente por dia e, como a água está mais fria, estima-se um aumento de 35°C na temperatura. O cálculo é o seguinte:

$$Q = 0,24 * 997 * 4,183 * 35 = 35032 \text{ kJ} \quad (45)$$

Estimando uma eficiência de 10%, considerando um poder calorífico inferior, para lenha com 20% de umidade, igual a 13200 kJ/kg e um consumo de 2 kg/h, obtém-se:

$$m_{lenha} = \frac{35032}{0,1 * 13200} = 26,54 \text{ kg} \therefore tempo = \frac{26,54}{2} = 13,27 \text{ horas} \quad (46)$$

Segundo depoimento dos moradores, no inverno o fogão passa a maior parte do dia aceso, portanto, 13 horas não é um valor excessivo, considerando que os cálculos são para uma situação crítica. As quantidades mensais de lenha para verão e inverno seriam respectivamente 217 e 796 kg. Considerando que 1 estéreo possui 400 kg de lenha, o consumo seria de 0,5 a 2 st por mês. Os resultados da pesquisa mostraram um consumo médio de 7,8 st/ano, ou 0,65 st/mês, porém, a maioria não consome o ano inteiro. Considerando que haverá consumo de lenha nos meses de verão (1,5 st a mais por ano), e um aumento de aproximadamente 0,28 st nos meses restantes, o consumo anual médio aumentará 4 st por ano.

#### 7.2.2.2 Capacidade térmica da serpentina

Os resultados da medição de capacidade térmica com fluxo forçado são apresentados na tabela 7.10.

A média dos valores de capacidade ficou em 1270 Watts, valor 19,9% superior ao encontrado nas medições sem fluxo forçado (1059 Watts), usando apenas a convecção natural pelo aquecimento de água na serpentina. Esse aumento de capacidade se explica pela diminuição na resistência térmica da água, apesar dos valores calculados terem uma incerteza maior devido as condições das medições não serem totalmente controladas. A principal incerteza é a medida

da água fria, que tinha que ser realizada dentro do reservatório, na saída de água para a serpentina, algum tempo depois de medir a vazão e a temperatura da água quente.

Tabela 7.10 – Capacidade térmica da serpentina

VAZÃO [l/min]	$t_f$ [°C]	$t_q$ [°C]	CAPAC [W]	PERDAS [W]	POT serp [W]
1,080	32,8	47,2	1072	269	1341
1,662	31	39,8	1011	187	1198
2,143	33	41	1186	208	1394
3,273	29,5	34	1021	126	1147

Observa-se que a capacidade é um pouco maior naqueles experimentos onde a temperatura da água atingiu valores mais elevados (acima de 40°C), indicando que pode haver ganho de capacidade com temperaturas maiores.

A temperatura no interior da fornalha foi medida resultando em valores de 640 a 805°C dependendo do ponto de medida: mais quente junto às brasas da lenha e menos quente dentro de chamas longas. A temperatura dos gases saindo da fornalha e passando sobre os tubos expostos variou de 350 a 550°C. Na base da chaminé a temperatura variou de 200 a 350°C e sobre a chapa do fogão ficou entre 110 e 175°C. Vale ressaltar que essas medições têm uma incerteza maior pois as condições não estavam fixas e observou-se variações das temperaturas com pequenos deslocamentos do termopar. Seria necessário um monitoramento completo das temperaturas com sensores em vários pontos para determinar um perfil e chegar-se a uma média nas regiões de interesse. De qualquer modo as temperaturas encontradas servem como indicativo das temperaturas possíveis de serem encontradas em equipamentos desse tipo.

### 7.2.2.3 Estimativa das perdas de calor

O termo UA foi calculado utilizando as áreas, diâmetros e comprimentos que constam no capítulo 5.2. Os coeficientes de convecção do ar (externo) foram considerados 15 W/m<sup>2</sup>.K para ar no interior da residência e 25 W/m<sup>2</sup>.K para um trecho de tubulação externa. O coeficiente de convecção da água (interno) foi calculado a partir da vazão e das propriedades da água, usando equações de transferência de calor por convecção no interior de tubos. A condutibilidade térmica dos materiais envolvidos foi obtida na literatura e são as seguintes:

$$k_{\text{cobre}} = 396 \text{ W/m.K}; k_{\text{CPVC}} = 1 \text{ W/m.K}; k_{\text{isol}} = 0,046 \text{ W/m.K}; k_{\text{res}} = 0,4 \text{ W/m.K.}$$

A equação utilizada, já mencionada no capítulo 6, é a seguinte:

$$U \cdot A = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext} \cdot A_{ext}} + \frac{\ln(d_{ext}/d_{int})}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_{int} \cdot A_{int}}} \quad (47)$$

Devido a variação das condições de operação, os valores não podem ser fixados, mas sua variação não é significativa. Alguns dos valores encontrados foram os seguintes:

$U \cdot A_{res} = 5,72 \text{ W/}^\circ\text{C}$  - reservatório;

$U \cdot A_{cobre} = 1,5 \text{ W/}^\circ\text{C}$  – tubos de cobre antes e depois da serpentina;

$U \cdot A_{CPVCisol} = 2,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$  – tubulação isolada entre a serpentina e o reservatório;

$U \cdot A_{CPVCExt} = 4,7 \text{ W/}^\circ\text{C}$  tubulação externa que vai para a torneira da cozinha;

$U \cdot A_{CPVCre} = 1,8 \text{ W/}^\circ\text{C}$  – tubulação não isolada entre a saída p/cozinha e o reservatório;

$U \cdot A_{CPVCFria} = 6,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$  – entre o reservatório e a serpentina.

Sobressaem-se os valores da tubulação que vai para a torneira da cozinha pelo lado de fora da casa e a tubulação que leva água do reservatório para a serpentina, onde a temperatura da água é menor e, portanto, a diferença de temperatura não é significativa. Numa condição de temperatura alta dentro do reservatório a perda de calor por essa tubulação pode ser significativa, portanto, é recomendável isolá-la. O valor alto do reservatório é devido a sua grande área e como a massa de água também é alta, não há grande variação de temperatura.

De uma forma geral o isolamento poderia ser maior. Há muitos trechos de tubos sem isolamento porque em instalações típicas julga-se que o tubo de CPVC já tem uma parede grossa que não justifica o isolamento. Analisando instalações residenciais com aquecedores a gás de pequeno porte, verifica-se que a potência útil dos aquecedores situa-se na faixa de 9 a 20 kW. Nessas situações uma perda de 0,2 a 0,4 kW nem será percebida, mas quando a potência não passa de 1,2 kW como é o caso da serpentina, perdas dessa ordem terão grande influência no desempenho da instalação.

A recomendação para instalações novas é utilizar grande isolamento principalmente na ligação entre o reservatório e a serpentina, e no próprio reservatório. Temperaturas de água quente mais alta diminuem o consumo pois há necessidade de misturar água fria e, portanto, permitem um reservatório menor ou mais autonomia de água quente. Para que o custo não aumente muito, deve-se buscar minimizar os comprimentos de tubulação.



#### 7.2.2.4 Análise dos resultados

Comparando-se os resultados obtidos com as estimativas efetuadas nos capítulos 5.2.1 e 5.2.2 observa-se uma boa aproximação.

Adotando como temperatura da chama e dos gases a média das medições feitas na fornalha e sobre os tubos, obtém-se os valores de 722,5°C e 450°C respectivamente. Aplicando esses valores nas equações 5.x e 5.y encontra-se as seguintes capacidades:

$$Q_{\text{rad}} = 6,87 \times 10^{-10} * [(722,5+273,15)^4 - (110+273,15)^4] = 660,3 \text{ Watts} \quad (48)$$

$$Q_{\text{conv}} = 1,607 * (450 - 50) = 642,8 \text{ Watts} \quad (49)$$

Somando os dois modos de transferência de calor chega-se a um valor de  $Q_{\text{tot}} = 1303,1$  Watts, resultado bem próximo do encontrado nos testes. A partir dessa constatação pode-se analisar meios de melhorar a capacidade e otimizar o sistema de aquecimento de água através da serpentina.

Analisando os resultados das medições de temperatura percebe-se que não se pode esperar valores maiores para a temperatura da chama, pois o valor medido não é baixo e para aumentá-lo ainda mais seria necessário alterar o fogão a lenha e sua câmara de combustão, o que foge ao escopo desse trabalho. A área de exposição à radiação pode ser aumentada, mas deve-se ter cuidado no contato com a chama que pode danificar o tubo.

Quanto a transferência de calor por convecção, a primeira medida que deve ser tomada num projeto novo é minimizar as perdas de carga entre o reservatório e a serpentina para aumentar o fluxo de água por convecção natural quando não houver consumo de água quente. Com essa medida o coeficiente de transferência de calor da água aumenta e tem-se um ganho de custo se forem minimizados os comprimentos de tubo. Aliás, sendo a resistência térmica dos gases dominante na transferência de calor por convecção, não há grandes vantagens em buscar meios para aumentar o coeficiente de película da água se houver aumento de custo.

Voltando-se, então, para o lado dos gases, a medida mais adequada seria aumentar sua velocidade de passagem e aumentar a área de contato da serpentina com os gases. É possível obter-se esse efeito alterando a configuração da serpentina fazendo os dois tubos da lateral de saída dos gases ficarem numa posição mais alta e com maior distância entre eles, obrigando os gases a passar entre os tubos.

Uma estimativa dessa alteração aumentaria a área exposta à convecção em 35%, passando para 0,0857 m<sup>2</sup>, e o coeficiente de transferência de calor passaria para 36 W/m<sup>2</sup>.°C (ganho de 20% pela maior velocidade dos gases). Sem considerar variação na parte interna, tem-se um ganho de 48% no coeficiente global de transferência de calor por convecção que passaria para 2,35 W/°C, conforme abaixo:

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_{gases} * A_{ext}} + \frac{1}{h_{água} * A_{int}}} = \frac{1}{\frac{1}{36 * 0,0857} + \frac{1}{200 * 0,049}} = 2,35 \frac{W}{°C} \quad (50)$$

Com esse valor a capacidade total da serpentina aumentaria para 1608,3 Watts, um ganho de 23%, praticamente só com alterações de montagem e disposição dos tubos. Nessa sugestão também haveria aumento de área exposta a radiação, porém, não foi estimada, porque a temperatura interna tende a diminuir, prejudicando a transferência de calor por radiação.

### 7.2.3 Custos

Segundo a pesquisa efetuada com os moradores, a grande maioria das famílias têm uma renda entre 1 e 5 salários mínimos, portanto, sem condições de arcar com os valores elevados de sistemas tradicionais de aquecimento.

A média de consumo de energia elétrica ficou em 130 kWh. Considerando que em torno de 67,5 kWh seja do chuveiro elétrico (30 minutos por dia e 4500 Watts), a uma tarifa de R\$ 0,24/kWh, o gasto mensal com banho ficará em média por 16,00 reais.

Procurou-se então uma solução de baixo custo e que oferecesse o mínimo de conforto para os usuários desse sistema. A principal redução de custo foi obtida no reservatório, que usualmente é de aço inoxidável instalado sob pressão. Usando reservatório de cimento-amianto com bóia controladora de nível e isolamento de mantas de polipropileno ou lã de vidro, e/ou vermiculita numa caixa de madeira obteve-se quase 50% de redução no custo da instalação.

Os valores obtidos no mercado para uma instalação típica separando os componentes em grandes grupos, podem ser comparados na tabela 7.11.

Os acessórios incluem válvula bóia ou de retenção e flanges para as opções 2 e 3, registros, uniões para facilitar desmontagem, conexões especiais para mudanças de tipos de tubos e torneira simples com bica móvel, sem misturador, para a cozinha.

Tabela 7.11 – Custos da Instalação

COMPONENTE	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Serpentina	85,00	85,00	85,00
Reservatório/Isolante	450,00	70,00	110,00
Tubulação	120,00	130,00	130,00
Acessórios	90,00	120,00	120,00
Mão-de-obra	70,00	70,00	70,00
<b>TOTAL</b>	<b>815,00</b>	<b>475,00</b>	<b>515,00</b>

Opção 1: Reservatório de INOX – os custos de tubulação e acessórios são menores porque pode-se colocar o reservatório acima do fogão, sob o forro, diminuindo as tubulações metálicas, e as flanges e conexões para água já vem instalados.

Opção 2: Reservatório de cimento-amianto

Opção 3: Reservatório de fibra de vidro – existem algumas restrições ao uso de cimento amianto, portanto, devem ser previstos novos materiais.

Fonte: elaboração própria com preços do segundo semestre de 1999.

Convém destacar que os sistemas são para utilização de água quente em três pontos. Na comparação com a instalação usando eletricidade, deveria-se prever torneiras elétricas para os dois pontos, além do chuveiro. Os preços são de aproximadamente R\$ 20,00 para o chuveiro elétrico e R\$ 40,00 para uma torneira elétrica, portanto, sem considerar a instalação elétrica, o custo total chegaria próximo a R\$ 100,00. O consumo de energia elétrica para aquecer a água aumentaria pelo menos 2 vezes e, conseqüentemente, a conta de energia elétrica para aquecer água aumentaria para R\$ 32,00 por mês.

Considerando a opção com reservatório de fibra de vidro e um aumento de gastos com lenha em torno de R\$ 60,00 por ano (R\$ 15,00/st), podemos avaliar de modo simplificado duas situações: a primeira com instalação elétrica equivalente, ou seja, um chuveiro e duas torneiras, e a segunda somente com o chuveiro elétrico.

Comparando com a primeira situação, o aumento de custo da instalação é de R\$ 415,00 e a redução nos gastos anuais é de R\$ 324,00 (R\$ 32,00 x 12 meses – R\$ 60,00), o tempo de retorno do investimento se daria em 1,28 anos (415/324).

Comparando com a segunda situação, o aumento de custo da instalação é de R\$ 495,00 e a redução nos gastos anuais é de R\$ 132,00 (R\$ 16,00 x 12 meses – R\$ 60,00), o tempo de retorno do investimento se daria em 3,75 anos (495/132).

A opção com torneiras elétricas, apesar de ser uma comparação mais justa, deve ser desconsiderada já que, segundo a pesquisa, apenas 6% das casas têm esse equipamento, e não é provável que venham a instalar esses equipamentos. A opção de comparar os custos da instalação da serpentina com apenas 1 ponto de água quente seria válida, porém, não foi realizada porque grande parte dos entrevistados desejam aumentar os pontos de água quente.

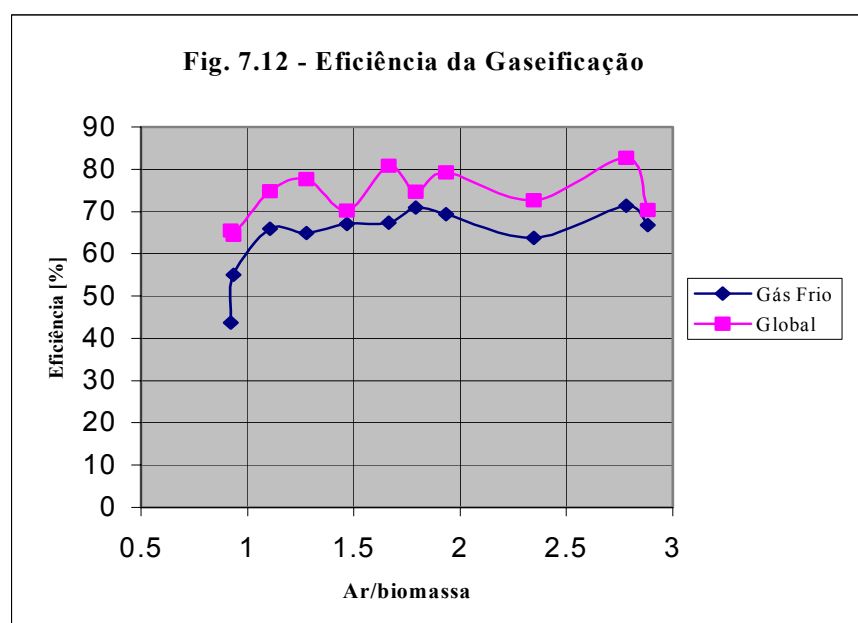
### 7.2.4 Estimativa de economia de energia para o município

O município possui entre 600 e 700 residências na área urbana que consomem em média 68 kWh por mês com o chuveiro elétrico. Considerando os 56% que desejam usar a serpentina, teria-se uma economia de 24752 kWh/mês ( $0,56 \cdot 650 \cdot 68$ ) ou quase 300 MWh por ano. Em termos de demanda, adotando um fator de concomitância no uso do chuveiro de 0,3, haveria uma redução de 491,4 kW ( $0,56 \cdot 650 \cdot 0,3 \cdot 4,5$  kW).

### 7.3 ANÁLISE DO GASEIFICADOR DE BIOMASSA

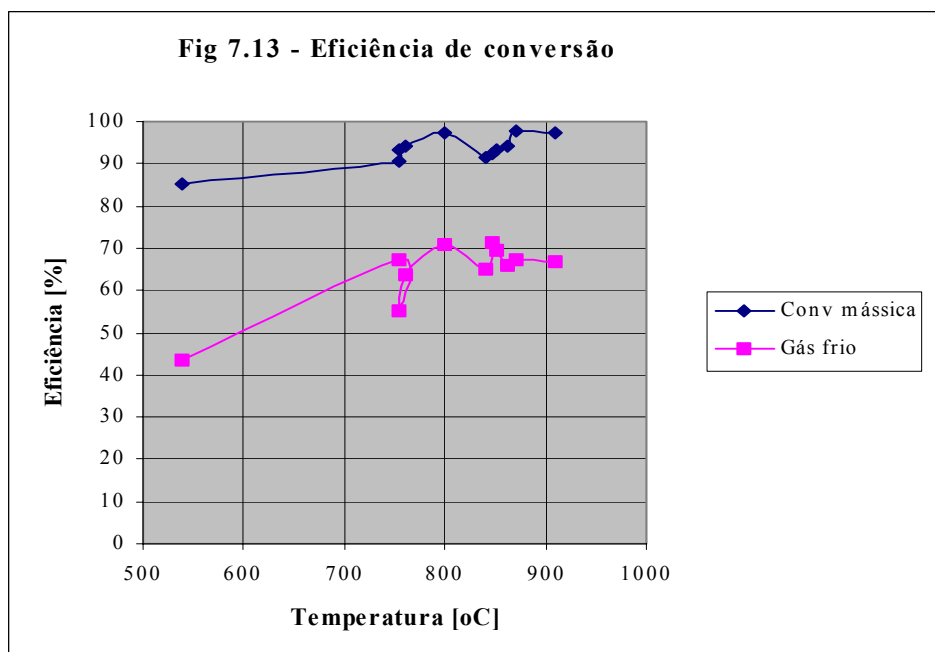
As dificuldades encontradas para ajustar o equipamento permitiram a constatação de diversos pontos importantes para a viabilização da tecnologia de gaseificação de madeira obtendo-se um gás com eficiência e qualidade. Além de parâmetros operacionais, aspectos de fabricação devem ser observados para se obter bons resultados.

No gráfico da figura 7.12 percebe-se as características de eficiência em relação a um dos parâmetros importantes que é a relação ar/biomassa, a qual deve ser mantida acima de 1,5 kg de ar por kg de biomassa para garantir as reações esperadas com eficiência, porém, constatou-se que com relação ar/biomassa acima de 2, houve menor contaminação do gás com alcatrão e manteve-se uma boa eficiência. Utilizou-se uma composição média de dois testes com características semelhantes ao teste GCR5 (GCR2 e GCR6) para permitir a montagem dos gráficos abaixo.



Na entrada do gaseificador a biomassa eleva sua temperatura rapidamente devido ao processo de pirólise, ocorrendo uma chama curta (combustão pirolítica) praticamente na superfície do leito. Esse fato pode gerar uma perda de calor pelo topo aberto. Deve-se prever uma cobertura que permita o livre acesso do ar e evite perda excessiva de calor e gases. É imprescindível a obtenção de temperaturas elevadas para evitar alta formação de sólidos e alcatrão devido às características necessárias para que ocorram as reações de craqueamento do alcatrão e redução dos gases com o carvão.

No gráfico da figura 7.13 fez-se uma média das 3 maiores temperaturas encontradas e plotou-se contra as eficiências de conversão mássica e de gás frio. Observa-se que para temperaturas abaixo de 800°C a eficiência de conversão mássica diminui e acima desse valor obteve-se eficiências relativamente baixas quando utilizou-se carvão vegetal para o aquecimento (temperaturas de 840, 848, 852 e 862°C). Também se observa que a eficiência da gaseificação aumenta com a temperatura, mas não diretamente. O ponto de temperatura 754°C e eficiência 55,1% possui relação ar/biomassa de 0,94, comprovando a necessidade de observar os dois parâmetros para atingir boa eficiência. Outra constatação é de que a maior temperatura é obtida no teste com maior relação ar/biomassa: 2,88.



As principais dificuldades operacionais encontradas foram o controle da vazão de biomassa através da grelha e a agitação do leito para evitar caminhos preferenciais e/ou entupimento da grelha. Segundo as avaliações feitas, os principais problemas de instabilidade e variações da chama ocorreram quando houve problemas de operação da grelha e formação de vazios e caminhos preferenciais.

A tentativa de utilizar um dispositivo que faça uma recirculação e combustão dos gases produzidos internamente foi satisfatória. Para comprovar essa tese seriam necessários mais testes, mas uma avaliação das evidências, como o perfil de temperaturas, o ruído de combustão e a visão do queimador incandescente, favorecem a afirmação da adequação do dispositivo. A aparente baixa formação de alcatrão também é outra evidência, porém, não há dados para fazer essa afirmação. Nos testes onde a recirculação funcionou, a temperatura média ficou acima de 840°C e as eficiências de gás frio foram sempre acima de 65%, inclusive a maior delas, 71,35%.

Em todos os testes houve a formação de alcatrão que provoca depósitos difíceis de serem retirados. Deve-se prever meios de limpá-lo freqüentemente, principalmente se o gás for usado em motores de combustão interna. Durante o aquecimento do equipamento não deve ser utilizada serragem ou deve-se prever um queimador logo após a grelha para que as baixas temperaturas iniciais não condensem o alcatrão formado em excesso e contamine o sistema antes de chegar nos equipamentos de limpeza. Uma operação que atinja relação ar/biomassa acima de 2 e temperaturas em torno de 900°C acima da grelha minimizam esse problema.

Quanto aos problemas de fabricação, já era esperado que as peças internas de aço se deteriorassem, sendo necessário a utilização de materiais mais resistentes à temperatura. As partes rotativas devem ter estrutura reforçada para evitar empenamentos e desalinhamentos. Pelo fato de trabalhar em depressão é importante prever meios de reduzir a infiltração pelo corpo externo e pelas flanges que devem ser minimizadas. A importância da temperatura alta internamente sugere que se use grande isolamento nas paredes internas. O uso de recuperação de calor gerou problemas operacionais devido as baixas temperaturas do gás na saída do equipamento. O controle de um gaseificador deve ser realizado através do monitoramento de temperaturas em locais estratégicos (600°C na região de pirólise, 900°C na região do queimador ou do carvão e 700°C abaixo da grelha) e da perda de carga logo após a grelha para identificar entupimentos. Outra constatação de ordem prática é em relação à retirada de sólidos, que foi tentada com um selo d'água. Como a maior parte dos sólidos é de carvão que é mais leve que a água, ocorre um bloqueio da saída dos sólidos pelo acúmulo de carvão flutuando na superfície do selo. Deve-se prever outra forma de retirada ou algum dispositivo que retire o carvão da superfície do selo.

Como sugestões de continuidade é importante que sejam realizados mais testes repetindo-se as condições encontradas e usando-se outros parâmetros para confirmar as conclusões apresentadas. A geração de umidade e alcatrão deve ser quantificada através de procedimento específico para que se possa comparar sua produção com diversos parâmetros de operação. O procedimento utilizado em 2 testes apresentou valores muito altos para a umidade, contrariando

as expectativas para gaseificação com baixa relação ar/biomassa onde se esperaria menores percentuais de umidade. É necessário rever os procedimentos utilizados.

Também deve-se prever a utilização de diferentes resíduos de madeira (granulometria, umidade, etc.) e mesmo outros combustíveis (resíduos agrícolas, resíduos sólidos em geral e outros).

A continuação mais importante do trabalho seria a adequação e teste do gás num grupo gerador de energia elétrica utilizando motor de combustão interna, para comprovar a viabilidade de utilização de um energético renovável como os resíduos de madeira para o suprimento de energia das empresas do setor madeireiro.

Outra sugestão seria a modificação do equipamento para produzir gás combustível num queimador que venha a substituir o uso de óleo combustível e lenha em caldeiras e aquecedores em indústrias de cerâmicas, beneficiadoras de madeira e outras.

#### 7.4 ANÁLISE DA SERPENTINA

Os dados da pesquisa mostram claramente que existem condições básicas para instalação desse tipo de equipamento pela grande quantidade de residências que já possuem o fogão a lenha e a disposição de usá-lo para aquecimento da água. Ao mesmo tempo, os baixos níveis de renda indicam a necessidade de subsídios e/ou incentivos por parte de empresas, concessionária, governo estadual ou prefeitura.

Os resultados de desempenho indicam que apesar da eficiência não ser alta, é viável o uso do equipamento nas condições normais de uma residência urbana, principalmente no inverno em regiões de clima frio, quando o fogão funciona mais de 10 horas por dia.

Alguns aspectos práticos da instalação mostraram-se com uma importância além do esperado, como por exemplo: o isolamento da tubulação, se essa for relativamente longa, é essencial, pois as perdas podem significar em torno de 20% da potência da serpentina; a estanqueidade da tubulação e cuidados para não permitir entrada de ar vão assegurar uma operação contínua e sem inconvenientes; a tubulação de alimentação da serpentina deve ser de aço galvanizado ou inerte, pois o uso do cobre potencializa a corrosão galvânica; apesar da dificuldade de medição, constatou-se a estratificação da água no reservatório, portanto, deve-se prever meios para a retirada de água quente para o consumo pela metade superior e entrada de água fria o mais baixo possível. Outra medida é colocar uma superfície interna ao reservatório

separando a parte inferior da superior com pequenos furos de comunicação, intensificando a estratificação.

O isolamento do reservatório otimiza a utilização de água quente, mantendo-a aquecida durante a noite e permitindo atingir temperaturas mais altas, o que gera utilização de menor volume de água quente.

O aumento de capacidade da serpentina quando existe fluxo de água já era esperado e, aliado aos grandes valores encontrados para as perdas pela tubulação, sugere que se busque a minimização dos comprimentos e/ou aumento de diâmetro das tubulações, para gerar maior vazão por convecção natural e, portanto, maior capacidade, com menores perdas e menor custo. Essas vantagens e os aspectos práticos mencionados acima devem ser observadas quando do estabelecimento de um manual ou guia para instalação.

Duas importantes áreas de estudo para continuidade dos trabalhos são a de materiais, para evitar a corrosão, e a de projeto da serpentina, para aumentar sua capacidade.

A melhor opção para evitar a corrosão, seria fabricar a própria serpentina em cobre, tomando cuidado para que a superfície externa não atinja temperaturas muito altas, que também provoca corrosão e reduz a resistência mecânica. Além de ser mais resistente à corrosão, o cobre tem maior condutibilidade térmica, melhorando a transferência de calor. Outra vantagem seria a simplificação da instalação, que usaria apenas tubos de cobre e CPVC, respectivamente soldados e colados, com algumas conexões rosqueadas que se encontra no mercado.

Quanto à capacidade da serpentina, poderia-se estudar meios de intensificar a transferência de calor através de uma disposição diferente dos tubos dentro da fornalha do fogão para aumentar a turbulência e a convecção forçada entre os gases queimados e a superfície da serpentina, conforme demonstrado no capítulo 7.2.2.4. A própria área superficial pode ser aumentada, tendo um reflexo direto no aumento da transferência de calor.

Outro item importante para a continuidade dos estudos é o próprio fogão a lenha. O aumento na eficiência da combustão do fogão a lenha gerará maior liberação de energia na fornalha e, conseqüentemente, para a serpentina, podendo conseguir ainda menor consumo de lenha.



## 8 BIBLIOGRAFIA BÁSICA

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1997, “**Fundamentals**”, publicação periódica, Atlanta, GA, EUA.

BACAICOA, P. G.; ARAUZO, J.; BILBAO, R. & SALVADOR, M. L., 1994. “**Scale-up of downdraft moving bed gasifiers (25-300 kg/h) – Design, Experimental Aspects and Results**”, in *Bioresource Technology*, 48, 229 – 235, Elsevier Science Limited.

BAZZO, E., 1995, “**Geração de Vapor**”, Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BEYER, P.O.; COLLESEL, M.F.; ANTON, M.L., 1998, “**Aquecimento de água através de um condicionador de ar**”, anais do Mercofrio 98 – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Porto Alegre, RS.

BHATTACHARYA, S.C., 1998, “**State of the Art of Biomass Combustion**”, revista *Energy Sources*, 20: 113 – 135, Taylor & Francis.

BILBAO, R. *et alli*, 1990, “**Desarrollo de gasificación de lecho móvil en corrientes descendentes para residuos lignocelulosicos**” – Revista *Ingeniería Química*, pp 231 – 235, Espanha, Mayo.

BORGES, A. S. *et alli*, 1993, “**Considerações Energéticas e Econômicas sobre Resíduos de Madeira Processada em Serraria**” – in: Anais do 1º Congresso Florestal Pan-americano e 7º Congresso Florestal Brasileiro (1993). Curitiba, PR: SBS – SBEF, 603-606p.

CAMPOS FILHO, M. M. (CPFL), 1995, “**Administração de energia por subestações: o gerenciamento da demanda**”, trabalho apresentado no XIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriú, SC.

CARDOSO, A. F.; FLEURY, M. E. V.; LAGE, W. F. (CEMIG), 1995, “**Perdas de Energia: totais, técnicas e não-técnicas**” trabalho apresentado no XIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriú, SC.

CHOWDHURY, R.; BHATTACHARYA, P.; CHAKRAVARTY, M., 1994, “**Modelling and simulation of a downdraft rice husk gasifier**” *international Journal of Energy Research*, Vol. 18, pp 581-594.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG), 1993, “**Energia solar para aquecimento de água, sistema simplificado de fácil construção**”, material do

Departamento de Utilização de Energia distribuído pela Superintendência Comercial da CEMIG, Belo Horizonte.

CORDER, S.E.; *et alli*, 1970, **“Wood and Bark residue disposal in wigwam Burners”** forest Research Laboratory, Oregon State University. Research Bulletin n° 11. Oregon, USA.

CORDER, S.E., 1973, **“Wood and Bark as Fuel”**, Forest Research Laboratory. Oregon State University, School of Forestry, Research Bulletin n° 14, Corvallis, USA.

EKONO OY, 1980, **“Power and Heat Plants”**, (study prepared for FAO portfolio of small-scale forest industries for developing countries). Helsinki, Finlândia, 88 p.

FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, 1976, **“Wood Chips – Production, Handling, Transport”**, second (updated) edition. Rome, Italy.

FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, 1983, **“Recursos de Madera y su Utilizacion como Materias Primas”**, (Estudio Sectorial) – Viena, ONUDI.

FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, 1991, **“Conservacion de Energia en las Industrias Mecânicas Florestales**, estudio FAO: Montes 93. Roma, 129 p.

FAO/CEPAL/ONUDI, 1972. Uruguay: **“Proyecto de Desarrollo Florestal de Olypa, Perspectivas para la Utilizacion Industrial de la Madera”**, grupo asesor en indústrias forestales para América Latina, Santiago, Chile.

FRANGOPOULOS, C.A.; CARALIS, Y.C., 1997, **“A Method for Taking in Account Environmental Impacts in the Economic Evaluation of Energy Systems”**, International Journal of Energy Conversion & Management, Vol 38, N° 15-17, p. 1751 a 1763, Elsevier Science Ltd., Out-Nov.

FONTES, P. J. P., 1994, **“Auto-Suficiência Energética em Serraria de *Pinus* e Aproveitamento dos Resíduos”**, dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GAY, C.F.; MOON, S.; BROWN, H., 1998, **“Momentum at Last: Perspectives on the U.S. Renewable Energy Industry”**, Revista Energy Sources, 20: 97 - 102, Taylor & Francis.

HARKIN, J.M.; ROWE, J.W., 1971, **“Bark and its Possible Uses”**, Forest Products Laboratory, Research Note FPL-91. Madison, Wisconsin.

JANUZZI, G.M. *et alli* (UNICAMP), 1995, **“Programas de administração da demanda para o setor residencial brasileiro”**, trabalho apresentado no XIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriú, SC, outubro.

LOSS, J.E., 1998, **“Cadastro florestal do Rio Grande do Sul 1997”**, Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser; Secretaria da Agricultura e Abastecimento, Departamento de Recursos Naturais Renováveis.

MACINTYRE, A. J., 1996, **“Instalações Hidráulicas, Prediais e Industriais”**, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro RJ. 3ª Edição.

MAO, Y., 1998, **“Energy and Beyond”**, Revista Energy Sources, 20: 103 – 106, Taylor & Francis.

MOREIRA, J. G. S. (IEE); JARDINI, J. A. (USP), 1995, **“Efeitos dos chuveiros no sistema e alternativas para sua substituição”**, trabalho apresentado no XIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriú, SC, outubro.

MUKUNDA, H. S. *et alli*, 1994, **“Gasifiers and combustors for biomass – technology and field studies”**, Energy for Sustainable Development, Volume I, N° 3, September.

NOCK, H.P., 1977, **“Possibilidade de Utilização da Casca”**, Informe Técnico. Brasil Madeira. 1 (7): 19-21, Curitiba, PR.

PAISLEY, M.A.; ANSON, D., 1998, **“Biomass Gasification for Gas Turbine-Based Power Generation”**, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol 120, n° 2, pp. 284-288, abril.

REED, T.B.; DAS, A., 1988, **“Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems”**, publicado pela “Biomass Energy Foundation Press”, entidade sem fins lucrativos, Golden, Colorado, USA.

RICHTER, M., 1998, **“Conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável de São Francisco de Paula: um plano de ação preliminar”**, Porto Alegre: EDIPUCRS.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M; 2000, **“Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química”**, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Tradução da 5ª edição norte-americana por Eduardo M. Queiroz e Fernando L. P. Pessoa.

STEINWALL, P.H., 1997, **“Integration of Biomass Gasification and Evaporative Gas Turbine Cycles”**, International Journal of Energy Conversion & Management, vol 38, n° 15-17, pp. 1665 a 1670, Elsevier Science Ltd., Out-Nov.

TANABE, C. S. (UNICAMP), OLIVEIRA F<sup>o</sup>, D. (UFV), 1998, **“The residential water heating systems and the consequences for customer, society and electric energy utilities in Minas Gerais, Brasil”**, Anais do Mercofrio 98 – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Porto Alegre, RS, setembro.

TUSET, A.; DURAN, F., 1979, **“Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Procesos de Utilizaciones”** Uruguai, Editorial Hemisfério Sul.

WALAWENDER, W. P.; CHERN, S. M.; FAN, L. T., 1982, **“Wood chip gasification in a commercial downdraft gasifier”** in International Conference on Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion, ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, pp 911 – 921, Estes Park, Colorado, USA.

WANDER, P.R., 1995, **“Subsídios para o Planejamento Energético-Ambiental do Município de Canela e Contribuições para uma Metodologia de Coleta de Dados”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia (Energia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, janeiro.

WANDER, P.R.; MOSSMANN, V.L.F., 1997, **“O Papel das Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs na Inserção de Energia Elétrica por Produtores Independentes”**, cadernos de Pesquisa da Universidade de Caxias do Sul, Vol. 5 (6), pp 199-240.

# **ANEXOS**

## **ANEXO II**

Esquema genérico de montagem de uma serpentina em fogão a lenha

## ANEXO IV

Fotos de 2 tipos de chamas obtidas na queima do gás gerado no equipamento (vide fig. 5.1).

