

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E INTEGRAÇÃO DE
UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
POR GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA PARA
COMUNIDADES ISOLADAS.**

RICARDO DA SILVA RIBEIRO

**ORIENTADOR: CARLOS ALBERTO GURGEL VERAS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIA MECÂNICA**

PUBLICAÇÃO: ENM. DM-112/07

BRASÍLIA/DF: 7 DE AGOSTO – 2007

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E INTEGRAÇÃO DE UM
SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR
GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA PARA
COMUNIDADES ISOLADAS.**

RICARDO DA SILVA RIBEIRO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:

**Prof.^o Carlos Alberto Gurgel Veras, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof.^o Marco Antônio Rosa do Nascimento (UNIFEI)
(Examinador Externo)**

**Prof.^o Ailton Teixeira do Vale (EFL-UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 07 DE AGOSTO DE 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, RICARDO DA SILVA.

Investigação Experimental e Integração de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por Gaseificação de Biomassa para Comunidades Isoladas. [Distrito Federal] 2007.

xiv, 92p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2007).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Gaseificação de Biomassa

2. Ciclo Diesel

3. Resíduos Florestais

4. Geração Elétrica

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, R. S. (2007). Investigação Experimental e Integração de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por Gaseificação de Biomassa para Comunidades Isoladas. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM. DM-112/07, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ricardo da Silva Ribeiro.

TÍTULO: Investigação Experimental e Integração de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por Gaseificação de Biomassa para Comunidades Isoladas.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Eng.º Ricardo da Silva Ribeiro

Qno 18 conjunto 09 casa 02.

72260-809 Brasília - DF Brasil.

Email: ribeiro_enm@yahoo.com.br

ricardo.ribeiro@eln.gov.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que permitiram a concretização dessa etapa na minha vida, principalmente aos meus pais, Francisco e Maria, a Kelly e a minha namorada Marina.

Agradeço também aos engenheiros e colaboradores do departamento de engenharia mecânica que me auxiliaram na execução deste trabalho, dentre eles:

- Técnicos e Colaboradores do ENM: Eurípides, Felipe, Marco Lopes, Arthur, Marcão, Carlos, Pereira, Xavier, Oziel, Denise, Neuza, Isabel.
- Engenheiros: Lúcio Salomon, Rafael Davidson, Carlos Gurgel, Marina Frossard, Janaina, Eurípides Danesi, Aldo João, Marcos Noletto, Arthur Bertold e o pessoal do mestrado.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA PARA COMUNIDADES ISOLADAS.

Este trabalho tem por objetivo o estudo da gaseificação de biomassa em plantas de leito fixo com tecnologia “downdraft” estratificado. O desempenho de unidades de gaseificação é dependente do tipo de biomassa principalmente no que concerne a composição química, forma, tamanho e teor de umidade. Os níveis de alcatrão e o poder calorífico do gás produzido, por exemplo, são parâmetros importantes que garantem a operação da planta em níveis satisfatórios por períodos de tempo preestabelecidos. Neste estudo, a qualidade energética do gás foi estimada por meio de um conjunto moto gerador e um sistema de dissipação de energia (banco de resistências). As curvas de desempenho do sistema de geração como um todo foi obtida variando-se a carga no motor de combustão interna em regime de rotação constante. Investigou-se, também, o nível de substituição do combustível original (diesel) por gás de biomassa, sem a ocorrência de detonação, através da análise das curvas de pressão dinâmica no cilindro do motor, mantendo níveis satisfatórios nas emissões.

Palavras chaves: Gaseificação de biomassa, Resíduos florestais, Motores Diesel.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND INTEGRATION OF ELECTRIC ENERGY GENERATION SYSTEM THROUGH BIOMASS GASIFICATION FOR ISOLATED COMMUNITIES

The main objective of this work was to study biomass gasification in fixed bed plants with downdraft technology. The performance of gasification units depend on the type of the biomass, mainly with respect to chemical composition, shape, size and humidity. The tar levels and the energy content of the producer gas, for example, are important parameters for a reliable plant operation for long periods of time. In this study, the gas efficiency was estimated using a generator set coupled to a dissipation energy system. The performance characteristic of the generation system was obtained by varying the load of the internal combustion engine in constant rotation regime. The substitution level of the original fuel (diesel) by producer gas without detonation was also investigated through the analyses of the dynamic pressure curves in the cylinder engine and keeping satisfactory emissions levels.

Keywords: Biomass gasification, Forest residues, Diesel engines.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – POTENCIAL ENERGETICO DA BIOMASSA E O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	3
1.2 – ESTADO DA ARTE DA GASEIFICAÇÃO “DOWNDRAFT” DE PEQUENO PORTE	5
1.3 – OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 - BIOMASSA	14
2.1.1 – Justificativas para a implantação da tecnologia de biomassa moderna	15
2.1.1.1-Conceitos e aspectos de sustentabilidade ecológica.....	15
2.1.1.2-Aspectos econômicos e financeiros	18
2.1.1.3-Aspectos políticos e institucionais	18
2.1.1.4-Aspectos sócio-econômicos	19
2.1.2 – Caracterização da Biomassa para Gaseificação	20
2.1.2.1-Pré-processamentos dos recursos dendroenergéticos: Granulometria, Secagem e Densificação.....	22
2.2 – ABORDAGEM TECNOLÓGICA	25
2.2.1 – Gaseificadores de Leito Fluidizado	27
2.2.2 – Gaseificadores de Leito Fixo	28
2.2.2.1-Leito em movimento à contrafluxo do gás (contracorrente).....	30
2.2.2.2-Leito em movimento perpendicular ao fluxo do gás (fluxo cruzado).....	31
2.2.3 – Alternativa Tecnologia: Gaseificador “Downdraft” Estratificado	32
2.2.3.1-Zonas de Queima no Gaseificador	34
2.2.4 – Vantagens e Desvantagens da Alternativa Desenvolvida	35
3 – BANCADA EXPERIMENTAL E MÉTODOS	37
3.1 –Sistema de Gaseificação de Biomassa	37
3.1.1 – Reator de queima	38
3.1.2 – Sistema de Limpeza de Gases	40

3.2 – Motor Diesel Utilizado	41
3.2.1 – Instrumentação do motor	42
3.2.1.1-Bancada Dinamométrica	42
3.2.1.2-Sistema de monitoração da Pressão dinâmica no Cilindro	44
3.2.1.3-Sistema de Análise de Gases.....	45
3.3 – Grupo Gerador	46
3.3.1 – Instrumentação do Grupo Gerador.....	47
3.3.1.1-Banco de resistência.....	48
3.4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	48
3.4.1 – Sistema de Alimentação de Biomassa no Reator.....	48
3.4.2 – Suprimento de ar	50
3.4.3 – Medição do Campo de Temperatura.....	51
3.4.4 – Ensaio Grupo Gerador	52
3.4.5 – Ensaio Motor Diesel	52
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	54
4.2 – DIMENSIONAMENTO DO REATOR	54
4.3 – PERFIL DE TEMPERATURA DO REATOR	56
4.4 – DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR.....	58
4.4.1 – Taxa de substituição do Consumo de Diesel por Gás de síntese.....	58
4.4.2 – Análise de Emissões.....	60
4.5 – DESEMPENHO DO MOTOR DIESEL –DÉBITO ORIGINAL	63
4.5.1 – Curvas Características de Potência e Torque.....	64
4.5.2 – Consumo específico de combustível.....	65
4.5.3 – Curvas de Pressão no Cilindro.....	66
4.6 – DESEMPENHO DO MOTOR DIESEL –DÉBITO REDUZIDO	71
4.6.1 –Curvas Características de Potência e Torque.....	72
4.6.2 – Consumo específico de combustível e taxa de substituição de diesel.....	73
4.6.3 – Curvas de Pressão no Cilindro.....	74
4.7 – ANÁLISE DO FILTRO SECO	76
4.8 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	77
5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....84

APÊNDICE

A – DESENHOS TÉCNICOS.....88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Balanço energético Nacional de 2005 de oferta e demanda de petróleo. Os valores reais estão em uma escala de 10^3 m^3 (Atlas de energia elétrica, 2005) ..	02
Tabela 1.2 - Comparação da emissões no motor Diesel operando com carga de 40KW com apenas diesel e no modo duplo combustível.	10
Tabela 2.1 - Dados referentes à característica de diferentes biomassas brasileiras. Fonte Universidade Federal do Pará.	22
Tabela 2.2 - Tipos de Sistema de utilização da Biomassa (Nogueira, 2000).	23
Tabela 2.3 – Comparação entre prensa de pistão e de extrusão (Nogueira, 2000).....	25
Tabela 2.4 - Poder Calorífico para diferentes Sistemas de Gaseificação	26
Tabela 2.5 - Proporções na composição dos gases resultantes da gaseificação	35
Tabela 3.1 - Características dos principais componentes do sistema de limpeza.	40
Tabela 3.2 - Dados principais do motor diesel Yanmar BT33	42
Tabela 3.3 - Escalas de medições do analisador multigás ECO 6010.....	45
Tabela 3.4 - Especificações do grupo gerador.....	46
Tabela 3.5 - Poder Calorífico e Analise imediata das amostras. Fonte: Ibama.....	49
Tabela 4.1 - Dados dos ensaios de bancada no dinamômetro a 1800 rpm.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Processos de conversão energética da biomassa. Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil. MME (2005).....	4
Figura 1.2 - Número de citações no Chemical Abstracts referente à gaseificação de biomassa. Fonte FAO (1986).....	6
Figura 1.3 - Variação da Razão de Equivalência em relação à composição do gás combustível e o poder calorífico. Fonte: Biomass and Energy (2002).....	9
Figura 2.1 - Distribuição da radiação solar total e do potencial de produtividade primária em função da latitude. Fonte Cia Vale do Rio Doce (1990).....	16
Figura 2.2 - Valores relativos do índice de área foliar (IAF), produtividade bruta (ou fotossíntese total), transpiração ou produtividade líquida (diferença entre produtividade bruta e respiração, segundo a idade de floresta perene). Fonte Cia Vale do Rio Doce (1990).....	17
Figura 2.3 - Esquema do Gaseificador Updraft.....	30
Figura 2.4 - Esquema do Gaseificador de Fluxo cruzado.....	32
Figura 2.5 - Gaseificador “Downdraft” Estratificado.....	33
Figura 2.6 - Interações propostas por Brandini.	35
Figura 3.1 - (a) Esquema do Sistema de Gaseificação, (b) Sistema de Gaseificação construído.....	37
Figura 3.2 - Esquema do Reator R2 e R1 de leito fixo concorrente, respectivamente.....	39
Figura 3.3 - Reator R1 e sistema de movimentação da grelha.	39
Figura 3.4 - Separador Ciclônico utilizado.....	41
Figura 3.5 - Motor Diesel na Bancada do dinamômetro.	43
Figura 3.6 - Bancada do dinamômetro e equipamentos de coleta de dados.....	44
Figura 3.7 - Grupo Gerador Yanmar 20kVA.	47
Figura 3.8 - Equipamentos de coleta de dados utilizado no Grupo Gerador.....	47
Figura 3.9 - Componentes do Banco de resistência.....	48
Figura 3.10 - Biomassa do tipo cedrinho (<i>Erismia uncinatum</i> Warm).....	50
Figura 3.11 - Válvula de regulação da saída do gás.....	51
Figura 3.12 - Termopares tipo K ao longo do corpo do Reator.....	51
Figura 4.1 - Diâmetro do reator em função da velocidade superficial.	55
Figura 4.2 - Perfil de Temperatura do Reator.....	56

Figura 4.3 - Valores teóricos de fração mássica na saída do reator para diferentes temperaturas da zona de gaseificação	57
Figura 4.4 - Consumo de diesel para as três condições de ensaio: Diesel , Duplo combustível 1 (R1) com reator de 300 mm e Duplo Combustível (R2) com reator de 200 mm.	59
Figura 4.5 - Percentual de substituição de diesel para o sistema utilizando gás de biomassa no Grupo Gerador.	60
Figura 4.6 - Emissão de NOx para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.....	61
Figura 4.7 - Emissão de CO para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.....	61
Figura 4.8 - Emissão de CO2 para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.....	62
Figura 4.9 - Emissão de hidrocarbonetos não queimados para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.....	63
Figura 4.10 - Torque versus rotação, a plena carga nas com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.....	64
Figura 4.11 - Potência versus rotação, a plena carga nas com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.....	65
Figura 4.12 - Consumo específico versus rotação a plena carga nas com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.....	66
Figura 4.13 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1400 rpm e plena carga	67
Figura 4.14 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1500 rpm e plena carga.....	68
Figura 4.15 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1600 rpm e plena carga.....	69
Figura 4.16 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1700 rpm e plena carga.....	70
Figura 4.17 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1800 rpm e plena carga	70
Figura 4.18 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1900 rpm e plena carga.....	71

Figura 4.19 - Torque do motor Diesel versus rotação, a plena carga. Débito mínimo da bomba injetora	72
Figura 4.20 - Potência do motor Diesel versus rotação, a plena carga. Débito mínimo da bomba injetora.	73
Figura 4.21 - Consumo específico de combustível – débito original e reduzido.	74
Figura 4.22 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1800 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.....	75
Figura 4.23 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1700 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.....	75
Figura 4.24 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1900 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.....	76
Figura 4.25 - Filtro seco após realização dos ensaios.....	77
Figura 4.26 - Simulador de consumo de energia mensal de uma residência. Fonte: CEB (2007).....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Lista de símbolos

CO	monóxido de carbono
H ₂	hidrogênio
H ₂ O	água
C ₆ H ₁₂ O ₆	glicose
O ₂	oxigênio
C	carbono
CH ₄	metano
C _n H _m	composição genérica de hidrocarboneto
n	número de átomos de carbono
m	número de átomos de hidrogênio
N ₂	nitrogênio
PCI	poder calorífico inferior
CC	cilindrada do motor
NO _x	óxidos nítricos
CEC	consumo específico de combustível
PMS	ponto morto superior
d _{diesel}	densidade do diesel
m _{diesel}	vazão em massa de diesel
Q _{diesel}	quantidade de energia
Q _{diesel efetivo}	quantidade de energia disponível
m _{bio}	vazão em massa de biomassa
Q _{bio. disponível}	quantidade energia disponível na biomassa
η	rendimento
X _{diesel}	fração de energia do diesel
X _{gás}	fração de energia do gás

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

A geração e o uso eficiente da energia se apresentam como um dos grandes desafios sociais deste século. Uma das principais alternativas tem sido o estudo de fontes renováveis, que venham a substituir, no decorrer do tempo, o consumo de combustíveis fósseis e assim minimizar os danos ambientais associados com a sua extensa utilização, principalmente após a revolução industrial.

A biomassa, dentre as alternativas de fontes energéticas, destaca-se no panorama brasileiro pelo seu enorme potencial de aproveitamento para a matriz energética. As condições climáticas regionais favorecem a produção deste insumo de modo a satisfazer consideráveis níveis de demanda. Esse é um dos principais fatores que justifica o interesse na pesquisa referente à produção de biocombustíveis a partir deste insumo. Conseqüentemente é oportuno o desenvolvimento de tecnologias e processos aperfeiçoados de conversão térmica aplicados a estes materiais, visto que parte considerável do potencial dos biocombustíveis no Brasil não está sendo aproveitada do ponto de vista energético.

O aprimoramento das técnicas de utilização dos insumos energéticos remonta à história do homem. Inicialmente, a biomassa foi empregada como lenha e posteriormente, em função da escassez desta e do seu baixo poder calorífico, passou-se a empregar o carvão mineral. Como conseqüência, verificou-se o desenvolvimento mais acentuado da indústria metalúrgica e o surgimento de máquinas a vapor, que por fim, caracterizaram o desenvolvimento da Revolução Industrial.

Com a descoberta do petróleo, como insumo energético, uma nova revolução ocorreu nos países industrializados, modificando a matriz energética mundial, que já há algum tempo é quase toda fundamentada nesta fonte de energia não renovável. Contudo, as estimativas com base na taxa de consumo bem como nas tecnologias existentes para a extração do petróleo, indicam um esgotamento desta fonte de energia. As reservas européias, que

somaram 18,6 bilhões de barris, diminuíram 2,6%. No continente americano, as reservas dos países norte-americanos reduziram 1,4% em relação ao ano de 2003, a Colômbia apresentou uma queda de 10,0% em relação ao ano anterior. No Brasil, tal fato torna-se perceptível ao analisar a Tabela 1.1, referentes ao Balanço energético Nacional de 2005 de oferta e demanda de petróleo, onde mostra que a sua produção sofreu uma redução de 1% tendo em contrapartida um aumento no consumo de 5,6% e um aumento de 31,56% nas importações desse produto o que resulta numa maior dependência externa à este insumo.

Tabela. 1.1 - Balanço energético Nacional de 2005 de oferta e demanda de petróleo. Os valores reais estão em uma escala de 10^3 m^3 . (Atlas de energia elétrica, 2005).

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Produção	48.832	56.587	63.921	71.844	75.014	84.434	87.024	86.197
Importação	33.341	31.933	27.289	23.109	24.243	22.165	19.885	26.162
Exportação	-148	0	-34	-1.084	-6.428	-13.635	-14.030	-14.030
Consumo Total	81.790	88.098	91.750	92.437	95.484	93.565	93.014	98.225
Transformação	81.790	88.098	91.750	92.437	95.484	93.565	93.014	98.225

O consumo em massa de combustíveis fósseis tem contribuído para o aumento preocupante da concentração de gases que contribuem para o efeito estufa, na formação da chuva ácida e a liberação de material particulado na atmosfera causando problemas aos recursos naturais e a saúde humana. Diversos processos de obtenção de biocombustíveis alternativos a partir de biomassa vêm sendo testados nos últimos anos. Busca-se, com isto, obter novas fontes de energia que venham a substituir o petróleo ou reduzir, em termos relativos, a sua utilização. Tais processos são fortemente baseados em conceitos de desenvolvimento sustentável, que preza pelo crescimento sócio-econômico das gerações presentes, levando em consideração a preservação do meio ambiente para as gerações futuras.

Uma importante justificativa para o emprego de fontes energéticas renováveis refere-se à possível utilização de resíduos dos diversos setores sociais. O nível de produção de resíduos tem aumentado de forma constante, principalmente a partir do crescimento do setor industrial. Assim a atenção volta-se para a necessidade de se minimizar a produção de resíduos, bem como eliminá-los de forma adequada evitando danos ao meio ambiente. Considerando uma alta geração de resíduos sólidos no Brasil, da ordem de 21×10^6

toneladas anuais (Nogueira & Trossero, 2000) , aproveitá-los para geração de energia é uma alternativa inteligente, pois se resolve dois problemas simultaneamente, um de ordem ambiental e outro de natureza energética. Nos itens seguintes examinam-se o potencial energético da biomassa, os principais processos de conversão e, especificamente, detalha-se a tecnologia de gaseificação com o seu atual estado da arte.

1.1-POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA E O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A biomassa compreende toda matéria orgânica vegetal que é produzida através da fotossíntese, tais como: culturas e resíduos agro florestais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais. A energia desses materiais tem origem nas transformações energéticas a partir da radiação solar. Essa energia intrínseca (química) pode ser liberada diretamente através da queima por combustão ou processada gerando outras fontes energéticas mais adequadas como o álcool e o carvão vegetal.

Segundo Nogueira & Trossero (2000) aproveitando aproximadamente 0,02% do total da radiação solar incidente sobre a Terra, estima-se que, anualmente, seja produzido por fotossíntese cerca de 220×10^9 toneladas de biomassa seca, o que equivale a 2×10^{15} MJ de energia. Segundo estimativas atuais este valor corresponde a mais do que 10 vezes a energia global consumida por ano no mundo. Para se ter idéia da importância do potencial energético da biomassa, o total de energia existente na cobertura vegetal da Terra é estimado como sendo cerca de 100 vezes o consumo mundial de energia ao longo de um ano.

O aproveitamento energético de toda essa biomassa pode ser feito por meio da combustão direta, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). A Figura 1.1 apresenta os principais processos de conversão energética da biomassa.

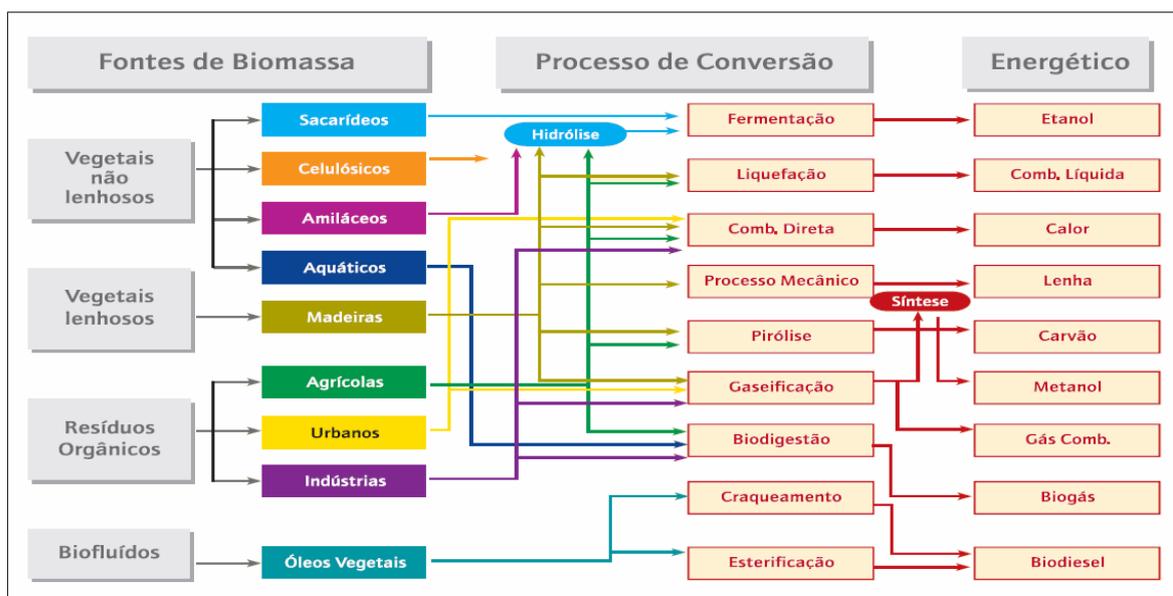


Figura 1.1. - Processos de conversão energética da biomassa. Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil. MME (2005).

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, carvão, por exemplo, em um gás combustível, por meio da queima parcial do sólido. A gaseificação da biomassa se apresenta como uma alternativa sustentável para geração de energia com baixa emissão de poluentes e permitindo, no ciclo global de crescimento dos vegetais, equilíbrio entre consumo e produção de gás carbônico. A gaseificação do carvão é uma tecnologia já desenvolvida comercialmente, principalmente em países europeus que possuem reservas consideráveis de carvão e escassez de petróleo. Atualmente, estão em andamento vários projetos visando o desenvolvimento de sistemas de cogeração com gaseificação de biomassa e ciclos de turbinas a gás. Apesar disso, o desenvolvimento da gaseificação da biomassa como fonte de geração de energia é ainda incipiente. Muito da pesquisa em gaseificação da biomassa tem como base resultados obtidos da gaseificação do carvão e, a partir disto, fazendo-se as necessárias conversões tecnológicas.

A disseminação do emprego da biomassa como fonte de energia pelo processo de gaseificação é uma opção tecnológica com inúmeras vantagens frente à outras alternativas. A geração de energia pela biomassa poderia contribuir para o desenvolvimento sustentável do país, em particular com a utilização de mão-de-obra local, principalmente na zona rural, atuando como fator minimizador e até mesmo de inversor do êxodo rural. Em países agro-industrializados, a conversão de biomassa pode servir para consumir o excedente agrícola,

evitando o excesso de oferta, o desperdício de colheita e conseqüentemente o prejuízo agrícola.

A geração elétrica por meio de gaseificação de biomassa, particularmente em pequena escala, diversifica a matriz energética brasileira. Tal tecnologia pode ser uma alternativa a geração elétrica descentralizada em comunidades em zonas rurais isoladas, principalmente na região Norte. Quando oportuno, tais sistemas poderiam minimizar ou mesmo eliminar a queima de combustíveis fósseis, com vantagem ambientais em termos de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa, colaborando com os mecanismos sugeridos pelo Protocolo de Kyoto.

1.2 – ESTADO DA ARTE DA GASEIFICAÇÃO “DOWNDRAFT” DE PEQUENO PORTE

Segundo o trabalho de Larson, 1998, as primeiras patentes com respeito à gaseificação foram emitidas a Robert Gardner e John Barber pelo ano 1788 e 1791. A patente de John Barber já mencionava o uso de gás de síntese para ser utilizado num motor de combustão interna. Entretanto, o primeiro uso do gás proveniente do carvão só foi confirmado em 1792.

Experiências de gaseificação de madeira começaram surpreendentemente cedo, no ano 1798, quando Lebon tentou gaseificar madeira e fazer uso dos seus gases. Em 1819, foi patenteado na Inglaterra um protótipo de gaseificador portátil, mas só em 1840, foi desenvolvido na França o primeiro gaseificador comercial.

O primeiro motor elaborado para queimar os gases gerados a partir de gaseificadores foi desenvolvido na Bélgica, em 1860, utilizando gás proveniente da queima do carvão como combustível. O desenvolvimento técnico dos gaseificadores foi muito limitado até o ano de 1900. Somente em 1912, James Willian e Graham J. Parker patentearam, na Inglaterra, um sistema melhorado para veículos onde o carvão vegetal era usado como combustível.

No início da primeira guerra mundial, em 1914, os veículos equipados com unidades de gaseificação ainda não haviam alcançado um estágio de desenvolvimento confiável o

suficiente para substituir a gasolina. No período de 1914-1918, muitos testes foram realizados com caminhões em Paris e Lion, sem resultados significativos. Durante o período pós-guerra alguns engenheiros continuaram as pesquisas com veículos movidos a gás. Mais tarde em 1920, foi desenvolvido na Suécia o primeiro gaseificador de carvão com o design “downdraft”, para o uso em tratores, ônibus e carros. Apesar de todos os esforços, em 1929, na França, haviam apenas 880 veículos movidos a gás e, em 1932, o número caiu para 770. Os testes com veículo foram conduzidos principalmente na Suécia, Suíça, Alemanha, Inglaterra e Rússia. (Larson, 1998).

Na década de 1930 houve maior interesse no uso de gaseificadores, especialmente em países com extensas florestas. Nessa década a França começou a promover o uso de gaseificadores devido ao aumento dos custos da importação de petróleo. Em 1938 já existiam 7.800 veículos movidos a gás e cerca de 1.500 estações que supriam os veículos com madeira ou carvão vegetal (França). A Suécia e Alemanha seguiram o exemplo da França. Na Suécia, em 1942, cerca de 80.000 veículos e mais de 20.000 tratores foram convertidos para o uso do gás, (Larson, 1998).

Os avanços nessa área, de certa forma estacionaram durante a Segunda Guerra Mundial a despeito do número expressivo de unidades em operação neste período, particularmente devido a escassez de petróleo. Ao final da guerra, a produção de petróleo foi normalizada gradualmente e o interesse por gás combustível diminuiu significativamente. Na década de 1950, com a abundância de petróleo os gaseificadores foram praticamente esquecidos como fonte de energia alternativa.

No fim da década de 1970, a tecnologia da gaseificação passou a ser estudada novamente com maior intensidade, devido a uma nova crise de derivados do petróleo, com a paralisação da produção iraniana, em consequência da revolução Islâmica. Diante desse panorama, a Figura 1.2 apresenta o número de citações no Chemical Abstracts onde a gaseificação era o objeto de estudo.

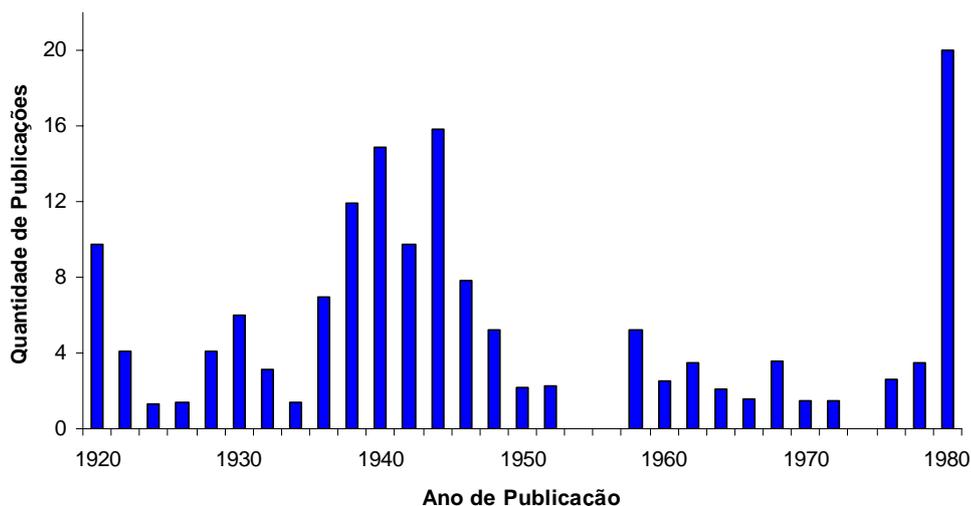


Figura 1.2. Número de citações no Chemical Abstracts referente à gaseificação de biomassa. Fonte: FAO (1986)

Mais recentemente, contudo, o interesse na gaseificação de biomassa, como suprimento de gás combustível se dá por motivos econômicos, sociais e ambientais. Dentre as diversas opções tecnológicas os sistemas do tipo *downdraft* estratificado, se destaca entre os leitos fixo, pois produz um gás relativamente mais limpo, notadamente no que se refere às concentrações de alcatrão. Neste sistema, tanto o ar de processo quanto a biomassa entram no reator pela parte de cima e o gás é retirado na parte inferior do mesmo.

Para melhor situar o objeto de estudo, uma extensa revisão bibliográfica foi realizada e algumas publicações de destaque são apresentadas. A geração de potência pelo processo de gaseificação de biomassa, em reatores de leito fixo do tipo *downdraft* estratificado tem sido objeto de pesquisa de diferentes grupos, com aplicações das mais variadas. Os estudos são, via de regra, experimentais e numéricos, sendo alguns bastante inovadores.

Warren et al. (1995) mostraram a viabilidade de plantas de gaseificação para utilização em escala rural empregando tecnologia *downdraft*. Para tal, foi testada uma planta capaz de gerar 30 kWe (eletricidade) e 60 kW na forma de calor, empregando lascas de biomassa como combustível e um motor de ignição por centelha na geração de potência.

Lin et al. (1998) desenvolveram um processo de gaseificação de para casca de arroz. Eles concluíram que, para uma potência de 10 kW, 28 kg/h de casca de arroz deve ser

consumida pela planta de gaseificação. Os experimentos foram realizados num leito fixo, de escala laboratorial, do tipo *downdraft*.

O trabalho de Peres (1999) relata os resultados de experimentos de gaseificação de bagaço de cana, utilizando calor indireto, em temperaturas entre 800 e 1000°C. Foi constatada uma produção de 0,65 m³ de gás combustível por quilo de bagaço, com poder calorífico de 12,84 MJ/m³. Além disso, ele demonstra a viabilidade da implantação da tecnologia, uma vez que a safra do nordeste brasileiro no biênio 95/96, foi de 47.957.667 toneladas de cana, produzindo 14.387.300 toneladas de bagaço. Se todo este bagaço fosse gaseificado, poder-se-ia gerar 4.675.872.500 m³ de gás de bagaço, com uma energia de 60.038.202.900 MJ. Esta quantidade é energeticamente equivalente à produzida por 1.774.178.573 m³ de gás natural, que corresponde a 41,2 % da produção Nordestina e 17% da produção nacional.

Barrio et al. (2000), testaram um gaseificador *downdraft* de pequena escala, no laboratório da Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega. O gaseificador possuía 100 mm de diâmetro e uma altura de 500 mm. Uma das singularidades do gaseificador em estudo são os vários pontos de entrada de ar o que permitia o pré-aquecimento do ar. Foi utilizado um motor diesel modificado com a inserção de uma ignição por centelha para a qualificação do sistema que funcionará no modo duplo combustível juntamente com gás natural. Os experimentos foram executados com a gaseificação de pellets de madeira. A taxa de alimentação do gaseificador era aproximadamente 5 kg/h, para a produção de uma potência de entrada de 30 kW. A quantidade de gás de produto obtida é aproximadamente 12.5 Nm³/h e o seu poder calorífico de 4.9 MJ/Nm³. Tais dados associados à composição do gás de síntese de aproximadamente 20% de CO e 20% de H₂ produziram uma potência líquida no motor de 5 kW.

Cortes et al. (2000), realizaram um estudo para testar a possibilidade de uso energético do capim-elefante para a gaseificação. A gaseificação da biomassa se apresenta como uma alternativa sustentável para geração de energia, uma vez que resulta numa baixa emissão de poluentes. Para tal estudo foi dimensionado um grupo-gerador diesel para operar em regime híbrido, com a substituição de 70% do diesel pelo gás de biomassa. Com os custos do equipamento, pôde-se fazer uma análise da viabilidade econômica da planta-piloto, para gerar eletricidade por gaseificação de capim-elefante em comunidades rurais chegando a

um valor, na época, entre 0,16 e 0,23 R\$/kWh, o que apontaria a viabilidade do projeto como alternativa para eletrificação rural.

Midilli et al. (2001) investigaram a produção de hidrogênio de castanhas de amêndoas aplicando técnicas de gaseificação de leito fixo tipo *downdraft*. A pesquisa foi conduzida em uma planta piloto de 5 kW, com um sistema de gaseificação do tipo *imbert*. Foi concluído que as castanhas podem ser facilmente empregadas para se converter biomassa em hidrogênio por meio de gaseificação *downdraft*.

Zainal et al (2002), realizou investigação experimental de um gaseificador de biomassa *downdraft* de diâmetro interno de 200 mm com o uso de madeira de mobília e cavaco de madeira. Estudaram-se o efeito da relação de equivalência na composição de gás, poder calorífico e a taxa de produção de gás. Ele concluiu que a variação do poder calorífico do gás de síntese aumenta inicialmente com relação de equivalência, atingindo um valor de cume de 0,38 que indica uma relação de equivalência ótima para o melhor desempenho do gaseificador *downdraft*. A Figura. 1.3 mostra que a produção de CO e CH₄ também apresentaram um valor elevado para a relação de equivalência de 0,38. Também é observado que conversão completa de carbono para gás de síntese não ocorreu para nenhuma situação, nem sequer para a relação de equivalência ótima.

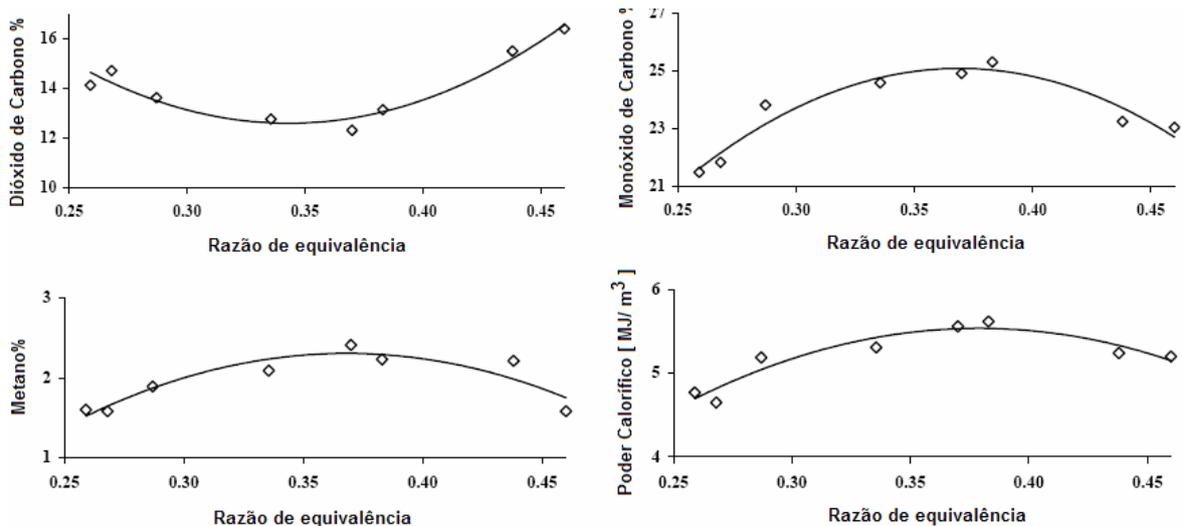


Figura 1.3 - Variação da Razão de Equivalência em relação à composição do gás combustível e o poder calorífico. Fonte : Biomass and Energy (2002).

Giltrap et al. (2003) desenvolveram um modelo numérico em regime permanente para a operação de um gaseificador *downdraft* baseado nas reações cinéticas ocorridas na zona de redução. O modelo apresentou resultados satisfatórios quanto a composição do gás com valores similares àqueles obtidos experimentalmente por Chee (1987) e Senelwa (1997) . Entretanto, a concentração de metano descrita pelo modelo foi acima da prevista na composição real do gás de síntese. Eles sugerem que o modelo poderia ser melhorado com adição de uma maior quantidade de dados relacionados à concentração inicial do gás no topo da região de redução, quantidade de produtos da pirólise relacionada à temperatura de operação, e a variação da reatividade do coque ao longo do comprimento do leito do gaseificador.

Jayah et al. (2003) realizaram simulações numéricas de um sistema de gaseificação do tipo *downdraft*. O modelo considerava as zonas de pirólise e gaseificação como submodelos do programa. As predições indicaram que as partículas deveriam possuir um tamanho ideal de 3-5 μm , e umidade inferior a 15% para um desempenho ótimo do sistema.

Urna et al. (2004), apresenta as características de emissão de um motor Diesel operando em diversas cargas na sua concepção normal e no modo bi-combustível utilizando gás de síntese. Neste estudo as concentrações de poluentes tais como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxidos de enxofre (SO_2), hidrocarbonetos e particulados foram monitorados. Além disso, a taxa de substituição de diesel pelo gás de síntese foi estimada para diferentes cargas. Conforme previsto a inserção do gás de síntese no sistema aumentou a quantidade do CO nos gases de escape do motor. Destaca-se no resultado da pesquisa a redução na emissão de NO_x e SO_2 sem provocar aumento na produção de particulado elemento de desgaste adicional no motor, conforme a Tabela.1.2.

Tabela 1.2 - Comparação das emissões no motor Diesel operando com uma carga de 40kW com apenas diesel e no modo duplo combustível.

Poluente	Emissões (g/kWh)	
	Diesel	Duplo Combustível
NO_x	6,05	3,8
CO	2,9	8,5
HC	1,2	1,07
Particulado	0,25	0,24

Wander et al. (2004) realizaram experimentos num reator de leito fixo *downdraft* estratificado. Este estudo demonstra que a tecnologia de gaseificação de madeira pode produzir um gás capaz de ser queimado em um motor de combustão interna, contanto que seja submetido a um sistema de limpeza adequado. A principal inovação proposta foi a inserção de um sistema de recirculação que queima parte dos gases produzidos, com a finalidade de manter um nível elevado de temperatura na zona de gaseificação e assim gerar aumento da eficiência. O consumo dos resíduos de serraria no gaseificador foi estimado como sendo na ordem de 12 kg/h.

Hanaoka e Minow (2005) investigaram os efeitos dos componentes da biomassa na gaseificação com ar e vapor de água, num reator de leito fixo tipo *downdraft*. O trabalho experimental sugeriu que as informações obtidas na gaseificação, por componente da biomassa, podem ser usadas nas predições de composição de gases gerados em reatores de leito fixo.

Krushna et al. (2005), para examinar os efeitos de parâmetros operacionais em relação a qualidade do gás de síntese e taxa de conversão de biomassa, realizou um estudo experimental de gaseificação de cavacos de madeira em um sistema de gaseificação *downdraft*. Este gaseificador apresentou como resultado os seguintes parâmetros: poder calorífico $5,79 \pm 0,52$ MJ/Nm³, concentração de alcatrão de $14,06 \pm 8,54$ mg/Nm³, concentração de particulado de $3,05 \pm 1,79$ mg/Nm³ e uma taxa de conversão de carbono de $98,01 \pm 0,53\%$. Estes valores sugerem um gás de síntese de qualidade aceitável para o uso em motores de combustão interna. A temperatura de grelha do gaseificador não teve nenhum efeito evidente na qualidade do gás e a taxa de conversão do gás ocorreu entre 740 a 817 °C. O conteúdo de particulado monitorado antes do filtro aumentou significativamente quando a taxa de fluxo de gás mudou de 36 a 56 Nm³/h. Outro resultado interessante é que quando se aumentou o conteúdo de umidade da amostra, a concentração de monóxido de carbono diminuiu enquanto a produção de alcatrão aumentou significativamente.

1.3 – OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Os processos que acontecem durante a gaseificação são tão complexos que a única forma de se determinar a composição do gás, eficiência, temperaturas em diferentes regiões do equipamento e outros parâmetros de operação é através de experimentos laboratoriais.

Este trabalho tem por objetivo principal a análise experimental da gaseificação de biomassa em unidades de leito fixo com tecnologia *downdraft* estratificado associada ao desempenho em motores diesel. O desempenho dessas unidades de gaseificação depende do tipo de biomassa, principalmente no que concerne a composição química, forma, tamanho e teor de umidade. Os níveis de alcatrão e o poder calorífico do gás produzido, por exemplo, são parâmetros importantes que garantem a operação da planta em níveis satisfatórios. Neste estudo, o desempenho do gás de síntese foi estimado por meio de um conjunto moto-gerador e um sistema de dissipação de energia por meio de um banco de resistências. O teor médio de alcatrão foi estimado pelo seu acúmulo na linha de tratamento dos gases. As curvas de desempenho do sistema de geração energética foram obtidas variando-se a carga no motor de combustão interna em regime de rotação constante para o grupo gerador. Investigou-se, também, o nível de substituição do combustível original (diesel) por gás da gaseificação de biomassa, sem a ocorrência de detonação e com níveis satisfatórios de emissões.

Algumas recomendações para a operação de plantas semelhantes são apresentadas para que seja possível um estudo de desenvolvimento de alternativas para a resolução de eventuais questões que dificultem a utilização do gás de biomassa para a geração energética.

O estudo foi dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta o objetivo e a motivação para a implantação de fontes energéticas alternativas baseada na gaseificação de biomassa para a geração elétrica em pequena escala. Apresentando também o estado da arte da tecnologia e as suas principais inovações.

O capítulo 2 apresenta o resumo teórico dos principais constituintes do sistema, que vai desde o combustível sólido, sistema de gaseificação e a utilização de um grupo moto-gerador para a produção de energia a partir do gás de síntese. Este capítulo apresentada as principais tecnologias de gaseificação, sendo dado ênfase na tecnologia de estudo que é a

utilização de gaseificadores downdraft estratificado, por produzirem um combustível mais limpo.

O capítulo 3 apresenta a instrumentação e a metodologia dos ensaios e da aquisição de dados. Foram descritos no sistema de gaseificação, o mapeamento da temperatura no leito do reator, a medição da emissão dos gases de escape, entre outros.

O capítulo 4 apresenta os resultados e a discussão do estudo do sistema em completo, destacando as soluções e melhorias.

O capítulo 5 apresenta as conclusões gerais do trabalho e avalia perspectivas de temas futuros que venham a completar este estudo.

No fim do trabalho encontram-se as referências bibliográficas e os anexos do sistema, contendo os desenhos técnicos da planta de gaseificação.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

2.1 – BIOMASSA

O termo biomassa é usado, em engenharia, para descrever toda a matéria orgânica que pode ser uma fonte de energia como, madeira, resíduos urbanos, florestais e óleos vegetais. Muitos autores denominam a energia gerada pela biomassa como "energia verde" ou "bioenergia".

Biomassa é uma fonte primária de energia, que está sendo explorada em diversos países. Uma das formas de utilização é através da sua queima direta para produzir energia térmica e elétrica. A biomassa pode também ser processada para a produção de combustíveis. A transformação pode ser realizada por processos químicos, como a gaseificação, ou através de processos biotecnológicos, como a fermentação. Como exemplos, pode-se citar o álcool e o biogás. O óleo vegetal, obtido de mamona, e o biodiesel, obtido pela esterificação do óleo vegetal, também são utilizados como combustíveis em motores diesel. A diferença básica entre os dois biocombustíveis está na forma de obtenção e na sua viscosidade final.

Há muitas vantagens na utilização direta da biomassa como combustível, principalmente em relação às reduzidas emissões de poluentes. Comparativamente ao diesel, o conteúdo de enxofre em biomassas, é baixo, ocasionando baixas emissões de SO₂ na combustão. As emissões líquidas de CO₂, liberadas durante a queima de biomassa, podem ser consideradas praticamente nulas, pois esse gás emitido é reabsorvido no próximo ciclo de vida do carbono, na fotossíntese. A biomassa contém baixos níveis de cinza (<1%) o que reduz a quantidade deste rejeito a ser depositada no meio ambiente, em comparação ao carvão mineral, por exemplo.

Entretanto, deve ser observado que em comparação com combustíveis fósseis sólidos, a biomassa contém muito menos carbono e mais oxigênio e, como consequência possui um

baixo poder calorífico. Além disso, o conteúdo de cloro de certas biomassas como algumas palhas, pode exceder os níveis encontrados no carvão.

Entre os diversos tipos de biomassa que podem ser usados como combustíveis, se destacam no Brasil, pela quantidade utilizada, as que são provenientes da madeira, como a lenha, serragem e cavacos. Além dessas, o bagaço de cana também é muito empregado, devido à grande produção brasileira de açúcar e álcool.

Apesar das vantagens destacadas a utilização da biomassa deve ser administrada de forma sustentável, como acontece com qualquer tipo de combustível.

2.1.1 - Justificativas para a implantação da Tecnologia de Biomassa moderna

Uma parcela significativa da energia comercial utilizada no mundo é derivada de combustíveis fósseis, seja o carvão, óleo ou gás natural. Estes representam cerca de 79% da energia consumida. As outras fontes, as chamadas de renováveis, representam 2%, e deste total a maior parte se deve ao uso sustentável de biomassa.

Em termos globais, as fontes renováveis começaram a ser consideradas como importante alternativa à contribuição da matriz energética após as crises do petróleo ocorridas em 1973 e em 1979. Contudo, nestes 30 anos, sua participação em valores absolutos foi modesta, tendo crescido apenas 2% em relação a energia produzida mundialmente.

2.1.1.1 - Conceitos e aspectos de sustentabilidade ecológica

As plantas vivem principalmente em função da água, da exposição solar (luminosidade), da temperatura, dos sais minerais do solo, do nitrogênio e microrganismos do húmus.

A fotossíntese corresponde à absorção da energia solar que a planta faz à custa da sua clorofila, convertendo em energia química. Na fotossíntese, a energia solar é empregada na conversão da água, que a planta retira do solo, e do gás carbônico, absorvido do ar, transformando-os em matéria orgânica (glicose, celulose) e desprendendo oxigênio. Este processo é um importante meio de se sequestrar carbono da atmosfera de forma a reduzir os efeitos do aquecimento global.

O alimento produzido pelas plantas são constituídos essencialmente por açúcares, como glicose, conforme a reação química:



A glicose é um carboidrato que sofre uma série de combinações e cujos produtos de transformação constituem, juntamente com a água, a matéria da planta. A fotossíntese se processa apenas quando há luminosidade e é tanto maior quanto maior a radiação solar, mas cresce também com a concentração de gás carbônico do ar, da água e sais minerais. A Figura 2.1 apresenta a produtividade na conversão de elementos primários em biomassa (fixação de carbono) e a radiação solar em função latitude terrestre.

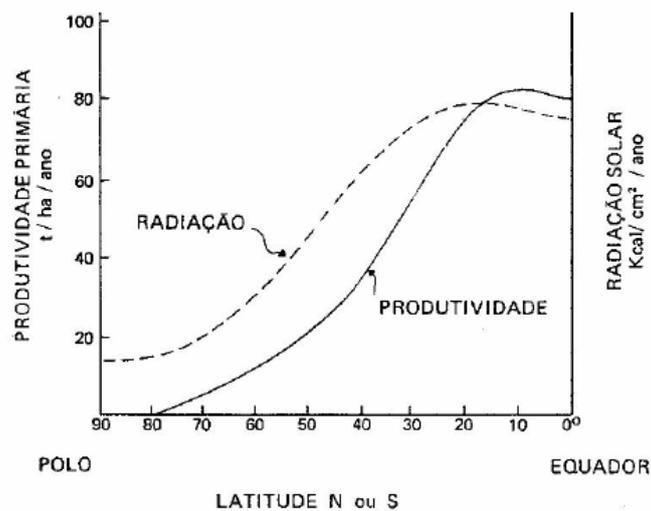


Figura 2.1 - Distribuição da radiação solar total e do potencial de produtividade primária, em função da latitude – Fonte: Cia Vale do Rio Doce (1990).

A respiração é o processo inverso em que a planta devolve gás carbônico, água e energia, com perda de glicose e absorção de oxigênio do ar (reação inversa). A respiração é tanto maior quanto maior a temperatura. Do equilíbrio fotossíntese-respiração depende o crescimento da planta. As reações de fotossíntese aumentam com a intensidade da luminosidade, até atingir estado de saturação luminosa e atinge seu máximo em temperatura em torno de 28° C, ocorrendo apenas de dia. A intensidade da respiração cresce com a temperatura e atinge seu máximo com temperatura acima de 45°C e se processa tanto de dia quanto à noite. A luminosidade e a temperatura regulam,

respectivamente, a fotossíntese e a respiração. A Figura 2.2 apresenta o índice de área foliar versus a idade da floresta. Este índice de área foliar pode ser tomado como medida direta da fixação de carbono (sequestro) e liberação de oxigênio na atmosfera.

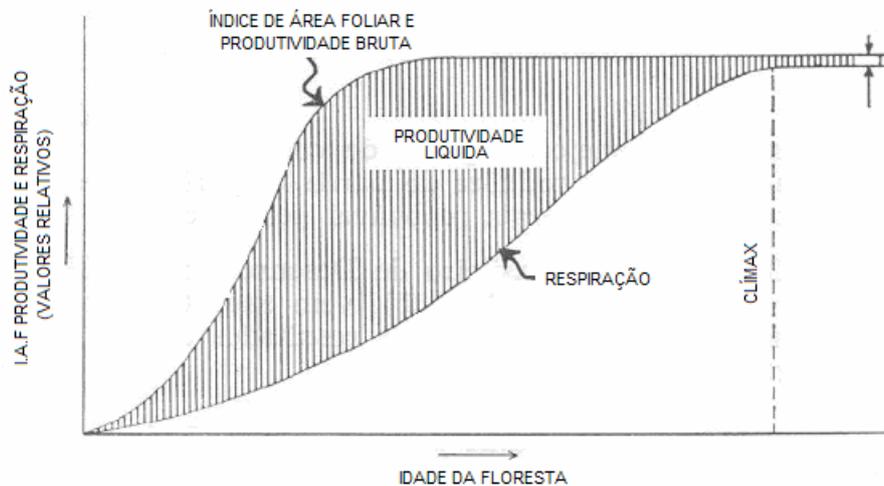


Figura 2.2 - Valores relativos do índice de área foliar (IAF), produtividade bruta (ou fotossíntese total), transpiração ou produtividade líquida (diferença entre produtividade bruta e respiração, segundo a idade de floresta perene) - Fonte Cia Vale do Rio Doce (1990)

Com base nos dados da Fig. 2.2, discutem-se alguns conceitos ecológicos. No crescimento de uma árvore ocorre produção líquida de oxigênio com taxas tanto maiores quanto mais jovem for a planta. Após uma determinada idade, a produtividade bruta da árvore atinge um máximo (fixação de carbono) enquanto os níveis de respiração continuam ascendentes. Com idades avançadas atinge-se o equilíbrio (clímax) de forma que a fixação de carbono e a respiração são de intensidades iguais.

Uma floresta natural fornece em média 3,5 t/ha/ano de lenha, comparado ao plantio de eucalipto, cuja produtividade é da ordem de 11 t/ha/ano, pode se concluir que, do ponto de vista econômicos da utilização dos recursos, é vantajoso o reflorestamento com esta espécie em detrimento às espécies originais. O eucalipto durante o seu crescimento produz, em média, 11 ton/ha/ano de oxigênio e absorve aproximadamente 15 toneladas de gás carbônico.

Com base na Fig. 2.2 pode-se concluir que matas, cerrados e caatinga em equilíbrio, isto é, aquelas que atingiram o clímax, apresentam, em termos líquidos, baixíssimos índices de liberação de oxigênio e fixação de carbono. A renovação de tais ecossistemas acarretam, portanto, maior capacidade de absorção de dióxido de carbono.

2.1.1.2 - Aspectos econômicos e financeiros

A principal barreira no emprego em escala industrial da biomassa é o custo relativamente elevado de implementação, se comparado à quantidade de energia produzida. Além do alto investimento inicial, deve se considerar os custos associados à produção da biomassa comparativamente ao baixo custo financeiro dos combustíveis fósseis.

Assim por se tratar de uma tecnologia comercialmente nova, projetos de biomassa competem por recursos econômicos escassos que acarretam dificuldades de financiamento adequados. Sendo assim este estudo foi estruturado mais nos aspectos técnicos mas sem negligenciar os aspectos relacionados com a viabilidade comercial.

2.1.1.3 - Aspectos políticos e institucionais

A falta de conhecimento adequado no emprego da tecnologia de Biomassa faz com que algumas instituições imponham obstáculos à implantação efetiva de tais empreendimentos. Até recentemente quase todos os principais fornecedores de energia pertenciam ao poder público ou a grandes corporações, que praticamente impossibilitou a entrada de pequenos produtores independentes de energia no mercado. Com a recente desregulamentação, os produtores independentes podem, mais facilmente, introduzir novas tecnologias e métodos de produção de energia, incluindo-se aqueles cujo insumo tem como base a biomassa.

Observa-se, portanto, a importância da sustentação legislativa que assegure o acesso efetivo à rede nacional de distribuição de energia pelos produtores independentes. Este fato começa a ser posto em prática com a aprovação da Lei no 10.438 de 26 de abril de 2002, da Presidência da República, que dispõe sobre a expansão da oferta de energia

emergencial. A criação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) pode acarretar num importante meio de se elevar a participação da biomassa no cenário energético nacional.

O PROINFA tem como objetivo aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Interligado Nacional. Para tal, algumas normas deverão ser cumpridas em duas etapas:

Primeira Etapa. Nesta etapa os contratos serão feitos pela Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S.A) para a implantação de 3.300 MW de capacidade, em instalações com início de funcionamento até a data de dezembro de 2006 , sendo assegurada a compra da energia por um prazo de 15 anos, a partir da data de operação da unidade geradora de energia.

Segunda Etapa. Sendo atingida a meta de 3.300 MW, será iniciada a segunda etapa na qual o Programa será realizado de forma que as fontes alternativas envolvidas sejam responsáveis por 10% do consumo anual de energia elétrica no país. Os recursos necessários para que sejam alcançados estes objetivos virão da CDE (Conta de Desenvolvimento Energético).

2.1.1.4 - Aspectos sócio-econômicos

A aceitação e a participação social são elementos importantes para o sucesso de projetos modernos de geração de energia com base na biomassa. O uso de biomassa, em países não desenvolvidos é vantajoso do ponto de vista social, pois apresenta uso intensivo de mão-de-obra e, relativamente, baixo nível de capital, ao contrário do petróleo que exige alto capital e reduzido uso de mão-de-obra. Assim, ao se empregar biomassa como fonte primária de energia, em substituição aos derivados do petróleo, pode-se, comcomitantemente, aumentar a oferta de trabalho no campo (invertendo o sentido da corrente migratória) bem como reduzir a dependência do petróleo como principal fonte energética.

2.1.2 - Caracterização de Biomassa para Gaseificação

O interesse na conversão dos combustíveis sólidos está principalmente relacionada aos processos termoquímicos da gaseificação e oxidação parcial da biomassa com o objetivo de maximizar a energia disponível do gás de síntese. Para tal deve-se conhecer o potencial energético da amostra em estudo para a determinação da sua eficiência de conversão.

Dentro dos critérios de análise e qualificação da biomassa quanto ao seu potencial energético, destacam-se o Poder Calorífico, Análise Imediata, Análise Elementar e Análise Termogravimétrica.

- **Poder Calorífico** - avalia a quantidade de energia disponível da biomassa por unidade de massa. O poder calorífico de uma amostra de biomassa é determinado pela sua combustão em uma bomba calorimétrica com oxigênio operando em condições adiabáticas segundo a norma NBR8633 (MB2007) da ABNT, 1984 .
- **Análise Imediata**, caracteriza a composição da Biomassa segundo quatro categorias: Teor de Umidade, Teor de Matéria Volátil, Teor de Cinzas, Teor de Carbono Fixo. Segundo a norma NBR 8112 da ABNT,1986.
 - ✓ Teor de umidade - a amostra é aquecida a $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 16 horas. A massa da amostra é determinado antes e depois do aquecimento, a diferença refere-se ao teor de umidade da amostra.
 - ✓ Teor de Matéria volátil - Matéria volátil é todo o produto, excetuando a umidade, desprendido por um material, como gás ou vapor, incluindo hidrogênio, hidrocarbonetos, produtos fenólicos, água, óxidos ou carbono em proporções variadas. Nos processos de combustão, o teor de matérias voláteis, junto com teor de cinza, poder calorífico, prediz a eficiência da combustão, pois amostras com alto teor de voláteis tendem a queimar mais rapidamente que os de baixo teor de voláteis. A metodologia descrita na ABNT NBR 8290/1983 baseia-se na determinação dos destilados voláteis do carvão, desprendidos durante o aquecimento em forno elétrico na ausência de oxigênio. Tal metodologia pode ser empregada para a análise de qualquer biomassa. A amostra de biomassa é

submetida a uma temperatura máxima de $950^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ durante 7 minutos em um cadinho coberto que permite que o produto volátil escape. O peso da amostra é determinado antes e depois de aquecer e perdas de peso são corrigidas devido o conteúdo do teor de umidade.

- ✓ Teor de cinza - A cinza que é o resíduo inorgânico remanescente. A amostra de biomassa é aquecida a 580 a 600°C exposta numa atmosfera oxidante. O peso da amostra é determinado antes e depois do aquecimento. Sendo o resíduo remanescente após a queima, o teor de cinza.

- ✓ Teor de carbono fixo – Representa, basicamente, a concentração de carbono, embora contenha, em pequenas quantidades outros elementos como enxofre, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. Os teores de carbono fixo, expressos em percentuais, são sempre valores calculados. A norma ABNT NBR 8299/1983 recomenda o cálculo do teor de carbono fixo a partir dos teores de cinza, matéria volátil e umidade, ou seja, 100% da amostra menos a soma do percentual dessas espécies.

- Análise Elementar - Determina a composição de biomassa para os seus principais elementos químicos: C, H, O, N, S e cinza.
 - ✓ Análise de carbono - a amostra de biomassa sobre combustão completa com oxigênio e o CO_2 produzido é capturado por um material absorvente e então pesado, permitindo cálculo de massa de C.

 - ✓ Análise de hidrogênio – a amostra de biomassa sobre combustão completa com oxigênio e o H_2O produzido é capturado por um material absorvente e então pesado, permitindo cálculo de massa de H da amostra de biomassa.

 - ✓ Análise de nitrogênio - digestão ácida da amostra de biomassa para formar amônia, e assim são utilizados métodos químicos que permitem o cálculo da massa de N.

 - ✓ Análise de enxofre - determinação de conteúdo de enxofre através de métodos químicos.

- Análise Termogravimétrica (TGA) – nesse tipo de análise, o peso e temperatura da amostra de biomassa são monitorados em função de tempo em uma condição de aquecimento controlado. Os resultados provêm informações relativas mudança de temperatura e perda de massa (pirólise) em função do tempo, da taxa de aquecimento e da temperatura final requerida. A taxa de aquecimento e o tipo de atmosfera de gás presente no ambiente (N₂, O₂, ar, vapor) podem ser variados para produzir diferentes tipos de dados.

Na Tabela 2.1 são apresentados dados para alguns combustíveis. Note-se a ampla disparidade dos parâmetros de interesse para os combustíveis listados. Tais propriedades contribuem de maneira específica nos diferentes processos que ocorrem na gaseificação.

Tabela 2.1. Dados referentes à diferentes biomassas brasileiras – Fonte: Universidade Federal do Pará..

Biomassa	PCS (kcal/kg)	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Densidade a granel (kg/m ³)
Bambu	4533,67	17,78	81,34	0,8777	267
Caroço de açaí	4576,00	19,45	79,44	1,1057	240
Casca de amêndoa	5308,33	20,66	77,73	1,6106	220
Cascas de castanha do Pará	4843,60	27,07	71,04	1,8823	240
Cascas de nozes	5039,00	22,49	75,86	1,6515	260
Cedro	4827,20	15,27	84,63	0,1031	249
Fibra de côco	4458,33	24,67	70,6	4,7314	282

2.1.2.1 - Pré-processamentos dos Recursos Dendroenergéticos

A biomassa bruta, ou seja, nas condições em que é produzida nas atividades florestais, ou ainda na forma de resíduos, pode se apresentar, em termos de granulometria ou umidade, inadequada para a sua utilização direta. A seguir serão apresentadas formas para a redução do tamanho do grão, secagem e densificação do combustível sólido, ajustando tais características de forma que se tenha um melhor rendimento na conversão.

Granulometria

Para aumentar a reatividade, pelo aumento da área reativa superficial do combustível sólido, é necessário realizar processos de adequação da biomassa bruta ao tipo de processo, no que se refere à granulométrica.

Na tabela 2.2 são apresentados dados que demonstram que os distintos sistemas de utilização da biomassa requerem granulometrias bem definidas a fim de se obter melhores condições de operação e rendimento. Assim, sistemas gaseificadores de leito fixo são mais eficientes operando com biomassas cuja granulometria varie de 50 a 100 mm. Caso se disponha de resíduos de biomassa com tamanho de partícula menor deve-se proceder à densificação (produção de briquetes).

Tabela 2.2 - Tipos de Sistema de utilização da Biomassa. Fonte: Nogueira, 2000.

Tipo de Sistema de utilização de biomassa	Granulometria recomendada [mm]
Leito Fixo	50 - 100
Queima em Suspensão	<6,0 - 7,0
Leito Fluidizado Borbulante	20 - 30
Leito Fluidizado Circulante	<6,0 - 7,0

Secagem

Alguns tipos de biomassa apresentam níveis de umidade elevados para os processos em questão, o que dificulta a sua utilização como combustível, e reduz a disponibilidade de energia para conversão em calor. Nos processos de combustão, a umidade evaporada consome parte da energia liberada, que tecnicamente é difícil de recuperar. Adicionalmente, tem-se dificuldades na ignição do combustível e diminuição da temperatura dos produtos da combustão. Assim, a maioria dos sistemas de combustão requer um combustível contenha menos de 40% de umidade em base úmida..

Especificamente nos gaseificadores, a umidade afeta notavelmente a composição e o poder calorífico do gás obtido, portanto recomenda-se uma faixa de 15 a 20% de umidade, (Reed, 1988). A lenha recém cortada apresenta aproximadamente 50% de umidade, em base úmida, que segundo o que foi exposto anteriormente é considerado um

nível elevado para que se possa ter uma utilização eficiente. Logo, para adequar a umidade da biomassa a um processo de conversão determinado, requer-se secagem preliminar.

Os dois fatores principais que limitam a velocidade de secagem são a transferência de umidade da biomassa para o ar e a difusão da umidade no interior do material. A secagem da biomassa pode ser realizada de maneira natural ou por meio de secadores. A secagem natural permite que a biomassa, quando armazenada sob condições adequadas de circulação de ar, de clima e de material, possa atingir, num período de dois ou três meses, a umidade final entre 15 a 20% em base úmida. Os secadores permitem reduzir significativamente este tempo. Nestes equipamentos os agentes de secagem mais utilizados são os produtos de combustão da própria biomassa dos fornos e caldeiras, que são lançados em ambientes com temperaturas de 150 a 300°C. Também se utiliza a secagem com vapor superaquecido.

Densificação

A baixa densidade de alguns tipos de biomassa, particularmente resíduos agrícolas e agroindústrias (serragem e cavacos de madeira), encarece o seu transporte e armazenamento. Para se ter um melhor aproveitamento desse tipo de material desenvolveram-se diferentes tecnologias que tornam possível a sua melhor utilização, com destaque para a densificação.

Os elementos de biomassa prensada recebem o nome de pellets ou briquetes, e geralmente tem uma dimensão predominante de 10 a 30 cm e uma massa específica que atinge valores da ordem de 1.300 kg/m³. Tipicamente, chamam-se pellets os produtos obtidos por auto-aglomeração mediante a ação combinada de calor e pressão. No caso dos briquetes de carvão vegetal, no processo de densificação, necessitam-se de aglomerantes. Os sistemas de densificação mais comuns podem ser prensas com acionamento mecânico ou hidráulico, com matriz em forma de disco ou até mesmo por extrusão como ocorre nas prensas de parafuso. Algumas delas são apresentadas na tabela 2.3.

A quantidade de energia necessária para o processo de densificação diminui em até duas vezes se a biomassa for previamente aquecida a uma faixa de temperatura de 100 a 230°C (Grover & Mishra , 1996). Adicionalmente, o aquecimento provoca aumento no poder calorífico dos pellets, devido à liberação de parte dos voláteis que possuem, relativamente, baixo poder calorífico.

Tabela 2.3 - Comparação entre prensa de pistão e de extrusão (Nogueira, 2000).

Parâmetro ou Característica	Prensa de Pistão	Prensa de Extrusão
Umidade ótima do material	10 - 15%	8 -9%
Densidade dos briquetes	1000 - 1200 kg/m ³	1000 - 1400 kg/m ³
Consumo de poência	50 kWh/t	60 kWh/t
Manutenção	alto	baixo
Uso em Gaseificadores	não recomendável	recomendável

2.2 – ABORDAGEM TECNOLÓGICA

Gaseificadores são mecanismos relativamente simples, tendo em vista a sua mecânica de operação, tais como alimentação e limpeza de gás. Entretanto, a operação de gaseificadores é um processo relativamente complexo. Os progressos observados na área devem-se, principalmente, à observações empíricas, devido aos princípios termodinâmicos não triviais relacionado com o funcionamento do reator. Entre eles pode-se citar a dificuldade em se prever o parâmetros como temperatura, vazão de ar, regime de queima num escoamento em meio poroso e com distribuição de massa não uniforme. No entanto, a experiência em tecnologias relacionadas com outros combustíveis (gás, combustão de carvão), possibilitou ao engenheiro desenvolver processos mais eficientes para a gaseificação de sólidos.

O objetivo do processo da gaseificação é a conversão energética do combustível sólido, biomassa, em gás de síntese, através da sua oxidação parcial em temperaturas da ordem de 700°C. A vantagem da utilização do gás está na sua versatilidade, que vai desde a substituição de combustíveis fósseis em geração de potência e calor, à produção de combustíveis líquidos e substâncias químicas. Este gás, também conhecido como gás pobre, é geralmente utilizado em outro processo de conversão, adequando sistemas em que a biomassa sólida não seria possível de ser utilizada diretamente.

Gaseificadores são equipamentos com diversidade tecnológica ampla e eficiência comprovada. Reed (1988) afirma que durante a segunda Guerra Mundial, devido a escassez de petróleo, mais de um milhão de veículos rodaram na Europa utilizando a tecnologia de gaseificação. Sua classificação vai desde do tipo de construção aos parâmetros de operação, tais como poder calorífico, tipo de agente de gaseificação, pressão de trabalho e direção do movimento relativo entre a biomassa e o agente oxidante.

Segundo Nogueira & Trossero, (2000), o poder calorífico do gás de síntese depende principalmente da pressão de operação e do tipo de agente de gaseificação. A gaseificação empregando ar apesar de ser mais comum e barata não apresenta melhoria no poder calorífico do gás quando comparado ao uso de oxigênio no processo. Isto se deve a grande quantidade de gases inertes presentes no ar. Quando o gás constitui a matéria prima para a produção de líquidos derivados de biomassa, deve ser empregado vapor ou oxigênio como agentes de gaseificação. Além disto, outro fator que pode alterar o poder calorífico do gás de síntese é a quantidade de umidade presente na amostra de biomassa. Para gaseificadores “downdraft” recomenda-se que esse teor de umidade seja inferior a 20%. A Tabela 2.4 apresenta a influência desses critérios de classificação sobre o poder calorífico do gás produzido.

Tabela 2.4. Poder Calorífico para diferentes Sistemas de Gaseificação.

Agente de Gaseificação	Ar	Vapor d'água	Oxigênio
Pressão de operação	Atmosférica	Atmosférica Pressurizada	Pressurizada
Poder Calorífico do gás	4,5 - 6	6 - 7,	~10 12 - 14,
Aplicação	Produção de potência	Produção de potência ou combustíveis líquidos	

Outro parâmetro empregado na classificação de gaseificadores refere-se à sua capacidade unidades, as grande porte utilizam basicamente reatores do tipo Leito Fluidizado, e as de médio porte são de Leito fixo, que pode ser concorrente, contracorrente ou de fluxo cruzado.

2.2.1. Gaseificadores de Leito fluidizado

O leito fluidizado foi desenvolvido antes da Segunda Guerra Mundial para sistemas de gaseificação de grande porte a partir de carvão mineral. Posteriormente, a tecnologia foi adotada pelas indústrias petroquímicas para a secagem e para o craqueamento catalítico de hidrocarbonetos pesados. Uma característica fundamental desses equipamentos é a sua elevada produtividade associada a altas taxas de transferência de calor. Por sua maior complexidade e custo, quando comparados as demais gaseificadores, são empregados em instalações de grande porte, pois requerem maiores investimento.

A gaseificação em leito fluidizado requer uma alimentação de ar pressurizado através de uma placa perfurada, na base da câmara de combustão vertical, que suporta o leito de areia.

O princípio de funcionamento do leito se baseia na passagem de um gás através de um leito de material particulado. Ao se elevar continuamente a vazão do gás atinge-se um regime, no qual o peso das partículas se iguala à força de arraste do gás, denominada velocidade mínima de fluidização. Neste ponto as partículas começam a se descolar uma das outras e ficam suspensas, passando a se comportar como um líquido. Incrementos adicionais de velocidade provocam o surgimento de bolhas de gás no interior da suspensão, criando duas fases. Uma constituída somente de gás, na forma de bolhas, e outra, denominada emulsão, composta de gás e material particulado fluidizado. São elas as responsáveis pela elevada taxa de circulação de sólidos no leito. A elevação continuada da vazão, nesta condição, provoca somente o aumento do número e tamanho das bolhas, sem elevar a pressão na base da grelha. Quando a velocidade do gás atinge a velocidade terminal das partículas começa a haver um arraste do material mais fino, diminuindo a altura do leito e a pressão na sua base.

O combustível sólido é transformado em gás no reator pela ação de agentes redutores em temperaturas da ordem de 1000 °C, em pressões próximas da atmosférica, produzindo um gás de baixo poder calorífico (Gás Pobre). O calor sensível disponível no gás efluente do gaseificador pode ser empregado na geração de vapor d'água ou para pré-aquecer a mistura de ar e vapor, que são os agentes redutores mais usados no processo. O rendimento energético é da ordem de 70%, na conversão para gás de síntese limpo e frio, cujo poder calorífico situa-se na faixa de 1200 a 1600 kcal/Nm³, dependendo dos níveis de umidade, reatividade e demais características do combustível sólido processado.

O leito fluidizado, na gaseificação, é reconhecido pela flexibilidade com relação ao combustível primário, podendo este apresentar alto teor de umidade (<65%), o que caracteriza um nível impraticável para a maioria das variações desta tecnologia. As dimensões máximas do combustível são em torno de 5 a 10 cm. Materiais com granulometrias muito finas apresentam problemas de arraste excessivo do leito.

Dentre outras vantagens pode-se considerar que há o processamento praticamente integral do combustível, não havendo o rejeito de finos, além de possibilitar a redução do teor de enxofre do gás gerado pela adição de agentes dessulfurantes no próprio gaseificador.

2.2.2 Gaseificadores de Leito Fixo

Dentre os gaseificadores de leito fixo, podem-se destacar dois grandes subgrupos: os de circulação de gases contracorrente (*updraft*) e concorrente (*downdraft*). Apesar da diferenciação ser apenas no fluxo relativo do gás e do sólido ocorrem diferenças significativas na qualidade do gás produzido.

Neste trabalho empregou-se a tecnologia de gaseificação de leito fixo. A seguir são apresentados os principais processos termo-químicos inerentes a tecnologia.

O processo de gaseificação da biomassa resulta de complexas reações, e estas não são conhecidas em sua totalidade. Porém em termos teóricos, pode-se dividir o processo em algumas etapas que serão apresentados juntamente com as principais reações químicas presentes no processo.

1. Pirólise ou decomposição térmica, que ocorre a uma temperatura média de 600°C:



2. Oxidação dos voláteis (reações exotérmicas) com produção de CO₂ e H₂O que são agentes redutores na gaseificação, e oxidação parcial do carbono fixo.



3. Gaseificação propriamente dita, eu inclui reações heterogêneas (gás-sólido) entre os gases e o coque residual. Algumas reações homogêneas importantes também ocorrem na fase gasosas, a partir de produtos dos processos anteriores. A seguir são apresentadas estas reações.

Reações heterogêneas:

Reação de Bouduard



Reação Carbono Vapor



Reação de formação do Metano

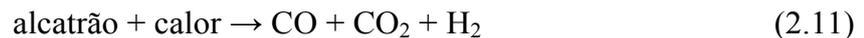


Reações homogêneas:

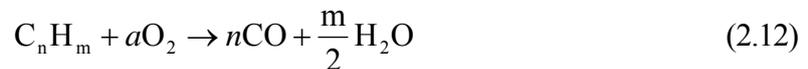
Reação de Deslocamento da Água



- Craqueamento do alcatrão, corresponde ao processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO₂, CH₄ e outros hidrocarbonetos.



- Oxidação parcial dos produtos da pirólise (assumindo hidrocarbonetos de composição genérica).



Na gaseificação, é desejável que estas etapas ocorram em zonas bem definidas do gaseificador. Apesar destas equações não serem suficientes para reproduzir a complexidade dos processos que ocorrem na gaseificação, pode-se verificar algumas conclusões importantes quanto a composição do gás de saída. A adição de água como agente de gaseificação, numa proporção de até 30%, causa aumento na produção de

hidrogênio e de monóxido de carbono nos gás pobre. Isto é causado pelo deslocamento nas equações de reação de carbono vapor e nas reações homogêneas que foram ilustradas anteriormente.

2.2.2.1 - Leito em movimento a contrafluxo com o gás (contracorrente)

O gaseificador contracorrente é o de projeto mais antigo e simples, sendo ainda largamente utilizado para a gaseificação de carvão mineral e, em menor escala, para gaseificação de biomassa. No Brasil, algumas empresas de produção de cal (CaO) ainda empregam este tipo de gaseificador, utilizando toras de madeira, para gerar gás combustível para os fornos de calcinação.

Contracorrente, ou *updraft*, significa que o combustível é alimentado pelo topo (através de uma válvula rotativa ou porta de alimentação) e desce em contracorrente ao ar ou oxigênio (também misturado com vapor d'água ou CO₂), introduzido pela grelha, localizada na base do gaseificador, Figura 2.3.

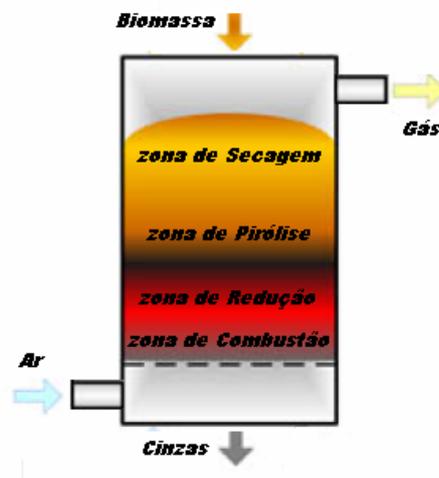


Figura 2.3 - Esquema do Gaseificador *Updraft*.

As primeiras camadas de carvão vegetal ou coque apoiadas sobre a grelha entram em combustão intensa, produzindo CO₂ e H₂O a temperaturas elevadas, que posteriormente são reduzidas a CO e H₂ conforme passam pela camada descendente de coque ou carvão, resfriando a temperaturas da ordem de 750 °C.

Abaixo desta temperatura as taxas de reações de gaseificação caem significativamente, praticamente cessando. Os gases, porém, ao subirem, continuam trocando calor com a corrente de sólidos, promovendo a sua pirólise, com liberação e incorporação à corrente gasosa da matéria volátil do combustível, e, em sequência, aquecimento e secagem. Os gases, já frios e com a incorporação da matéria volátil e umidade do combustível alimentado, sai pelo topo do gaseificador.

As cinzas do combustível, ainda com uma certa fração de carbono do combustível não convertido a gás, saem pela base do gaseificador. A tecnologia apresenta como diferencial a simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com elevado teor de água e material inorgânico, como lixo municipal. Potencialmente, esta tecnologia permite operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha capazes de fundir metais e escória (gaseificação com cinza fundida).

O percentual de alcatrão gerado no gás, contudo, é muito elevado, com valores de 10 a 20%, que equivale a uma concentração da ordem de 100 g/Nm^3 . Tais níveis de alcatrão limitam a sua aplicação em motores de combustão interna ou turbinas. (Kaupp, 1984).

Outro fator importante refere-se à granulometria do combustível empregado que deve ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito ou formação de canais preferenciais de queima, o que geraria queima não uniforme no interior do reator.

2.2.2.2 - Leito em movimento perpendicular ao fluxo de gás (fluxo cruzado)

O gaseificador do tipo fluxo cruzado, ou *crossdraft*, mostrado na Figura. 2.4 é o gaseificador 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 volume o que resulta num gás com baixo teor de alcatrão. A grande quantidade de combustível e cinzas ao redor dessa zona funcionam como isolamento para a parede do gaseificador permitindo a construção com aços moderados, exceto para os bocais e grelhas que requerem ligas refratárias. Em contrapartida, os bocais precisam ser refrigerados para evitar a sua rápida degradação. Kaupp & Goss (1984), afirmam que utilização de biomassa com alto teor de cinzas pode ser prejudicial ao funcionamento desse gaseificador pela formação de escórias na grelha devido à altas temperaturas de operação.

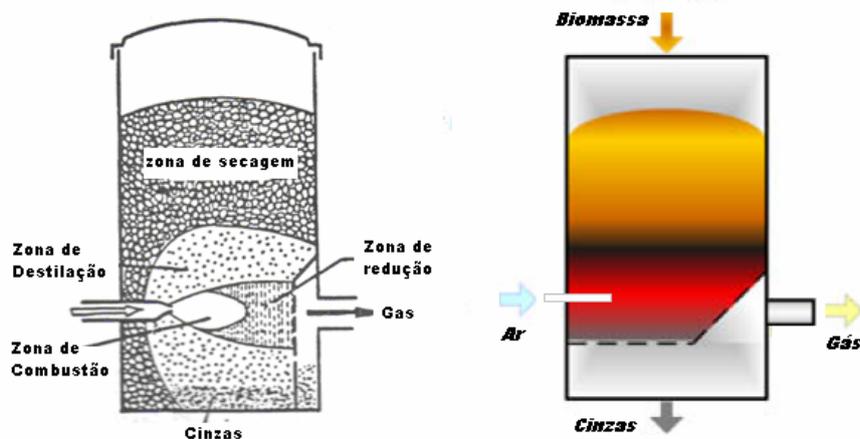


Figura 2.4 - Esquema do Gaseificador de Fluxo cruzado.

O emprego de gaseificador *crossdraft* somente é considerado satisfatório com a utilização de combustíveis com baixo teor de voláteis. Algum sucesso tem sido observado com biomassa não pirolizada, mas para tal o espaçamento entre o bocal de entrada de ar e a grelha é crítico, Reed & Das(1988). O tamanho da partícula de combustível também é fundamental para uma operação satisfatória. Gaseificadores *crossdraft* apresentam tempo de resposta mais rápido do que qualquer outro gaseificador.

2.2.3 - Alternativa Tecnológica: Gaseificador “Downdraft” Estratificado

O gaseificador do tipo concorrente, ou *downdraft stratified*, o ar e a biomassa entram pela parte superior do reator. Uma vantagem nesse tipo de tecnologia reside no fato da parte superior ser permanentemente aberta, proporcionando fluxo de ar uniforme e facilitada na alimentação de combustível. Logo após a primeira região que funciona como um depósito de combustível, tem-se a secagem e a conversão dos voláteis que reagem com o ar gerando uma combustão cujos produtos são basicamente CO, H₂, CO₂, H₂O e N₂. 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 da corrente de gases, ocasionado pelas reações endotérmicas nessa região tem-se o congelamento das reações de forma que partículas pequenas de carvão e cinzas são despejados no final da coluna. Essa última zona, com depósito de carvão e cinzas, atua como uma reserva para acomodar variações de carga e proteger a grelha de um aquecimento excessivo. Meios devem ser providenciados

para se evitar a formação de vazios e pontes de biomassa que podem surgir no interior do reator. Meios mecânicos para agitar ou mover o combustível dentro do gaseificador devem ser previstos.

No gaseificador *Downdraft* o ar e o gás fluem para baixo, na mesma direção que o combustível. Esta configuração possibilita o emprego de combustíveis com elevado teor de matéria volátil, podendo queimar até 99,9% do alcatrão liberado na fase de pirólise (Wander, 2001).

Conforme pode-se verificar na Figura 2.5, o ar introduzido no gaseificador encontra primeiro a biomassa não queimada. A temperatura máxima de operação ocorrerá na fase gasosa, na região de pirólise flamejante, assim o material sólido localizado logo acima dessa região sofre um pré-aquecimento e secagem, principalmente pela troca de calor por radiação e condução com a zona de oxidação dos voláteis. Materiais com umidade elevada apresentam dificuldades de aquecimento e secagem devido a evaporação da água contida no interior das partículas, que retarda ou impede a formação da região de pirólise, levando à formação de gases com alto teor de alcatrão. Está é uma das causas da necessidade de se empregar um material com baixo teor de umidade. Recomenda-se para tal um teor de umidade inferior a 20%.

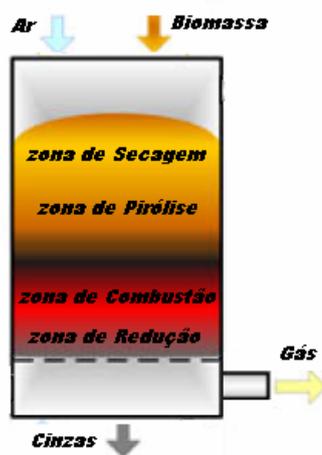


Figura 2.5 - Gaseificador *Downdraft* estratificado.

Conforme a biomassa atinge uma determinada temperatura, geralmente superior a 200°C, ela começa a liberar voláteis combustíveis que ao entrar em ignição com o ar descendente forma-se uma chama em volta das partículas até o esgotamento de toda matéria volátil,

restando apenas uma pequena percentagem de carvão vegetal. Os gases ricos e aquecidos desta região reagem com o carvão vegetal a uma temperatura média de 1000°C, gerando basicamente CO e H₂. Como as reações presentes nesta região são endotérmicas, a temperatura do gás diminui, encerrando as reações de gaseificação. Cerca de 4 a 7% do carbono do combustível adicionado para o processo não são utilizados, sendo coletados pela grelha na forma de cinza. A seguir descrevem-se, com mais detalhes, os principais processos que ocorrem num reator *downdraft* (Wander, 2001).

2.2.3.1 - Zonas de Queima de Biomassa

Pirólise e Oxidação dos Voláteis

No processo de gaseificação a biomassa sólida é transformada em um gás combustível através de sua combustão parcial com o ar. A degradação térmica da biomassa (pirólise, volatilização, etc) ocorre em temperaturas relativamente baixas, 600°C, (Wander, 2001). Caso a taxa de aquecimento seja mais elevada que a taxa de pirólise, para partículas de menor tamanho, a degradação térmica pode ocorrer em níveis de temperatura de 1000-1110°C, paralelamente à oxidação dos voláteis na vizinhança da partícula.

No processo de pirólise há a liberação de gases não condensáveis e alcatrão que representam cerca de 70-90% da massa inicial, restando apenas cerca de 10-30% correspondente ao carvão que é altamente reativo. Estes gases da pirólise são parcialmente queimados com a presença de ar ao redor das partículas. Há a necessidade de reações de combustão exotérmicas para fornecer a energia necessária para a pirólise e secagem do combustível sólido. A temperatura na zona de oxidação dos gases de pirólise é suficientemente alta para a quebra térmica dos produtos da pirólise em componentes de menor peso molecular tal como o alcatrão que é um dos principais problemas do uso do gás de biomassa em motores de combustão interna e em turbinas a gás.

Gaseificação de Fato

O princípio de funcionamento dos gaseificadores fundamenta-se na conversão do carbono em CO (gás combustível). Uma forma bastante simplificada das interações que ocorrem na superfície do combustível sólido durante o processo de gaseificação foi apresentado por

Brandini, (1983). Na Figura 2.6 são apresentadas as principais reações químicas dos gases circundantes. Pela análise das reações pode-se perceber que a existência de vapor de água nos gases reagentes faz com que ocorra uma maior produção de gases combustíveis ($C + H_2O = CO + H_2$), que possibilita o aumento do poder calorífico do gás.

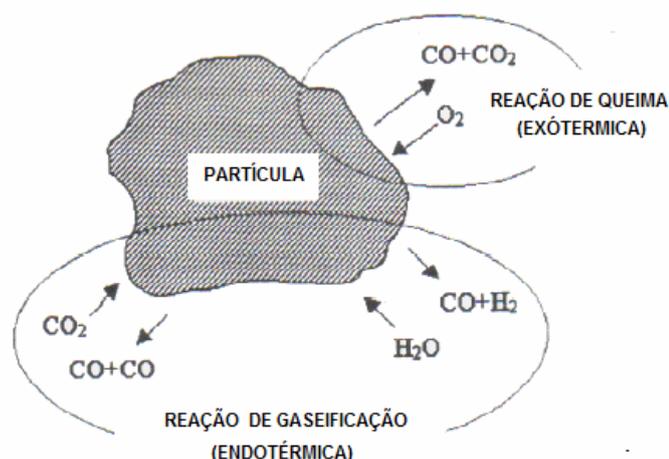


Figura 2.6 - Interações propostas por Brandini (1983).

Normalmente, na composição do gás resultante, a fração volumétrica de CO não é superior a 22%, razão pela qual o gás é chamado de pobre. Estudos realizados em gaseificadores *downdraft* estratificado para a geração em pequena escala tem demonstrado as seguintes proporções na composição dos gases resultantes da gaseificação (Barrio, 2000), Tabela 2.5

Tabela 2.5 - Proporções na composição dos gases resultantes da gaseificação.

Composição do Gás	Proporção
N ₂	46,8 %
CO	20,6%
CO ₂	10,2%
O ₂	1,5%
CH ₄	0,1%
H ₂	20,8%
PCI	4.9 MJ/kg

2.2.4 – Vantagens e Desvantagens da Alternativa Desenvolvida

As principais vantagens dos gaseificadores concorrentes ou *downdraft* estão principalmente da sua simplicidade operacional e elevada eliminação de gases condensáveis, entre 99 a

99,9%. Os baixos níveis de alcatrão tornam a tecnologia atrativa para a queima em motores de combustão interna e turbinas, sem maiores modificações. Adicionalmente, pelas características operacionais do gaseificador os materiais inorgânicos ficam retidos, em grande parte, no fundo do gaseificador, reduzindo a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quentes para fazer a limpeza do gás. Por se tratar de um gaseificador de tubo aberto, o mesmo não apresenta problemas com risco de explosão.

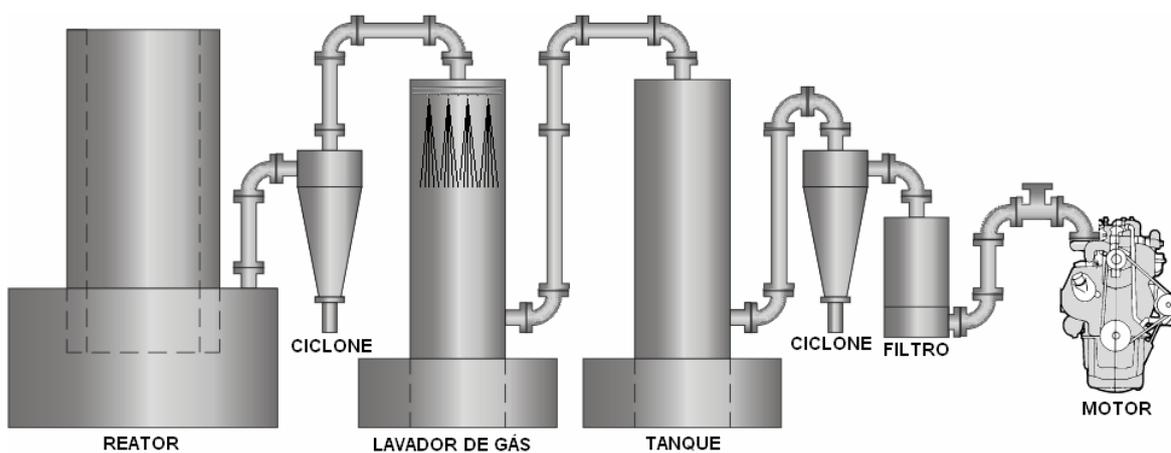
No tocante a eficiência da conversão, apenas cerca de 4 a 7% do carbono da biomassa original não é convertido em gás, sendo eliminado juntamente com as cinzas no fundo do gaseificador. A desvantagem deste tipo de gaseificação está no fato de que a eficiência do processo está diretamente vinculada a umidade do combustível utilizado. Assim Reed (1988) indica que para que o gaseificador possa operar eficientemente, a biomassa deve-se possuir umidade inferior a 20%. Outro fato de importante relevância esta na temperatura de saída dos gases que em média é de 700°C após a zona de gaseificação, sendo assim grande parte da energia do processo estaria sendo perdida através da energia térmica. Mas uma alternativa para este problema seria a utilização desta energia no pré-aquecimento do ar de entrada no leito (regeneração) ou na secagem do combustível.

CAPITULO 3

BANCADA EXPERIMENTAL E MÉTODOS

3.1 - SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

O aparato experimental é constituído de um sistema de gaseificação de leito fixo do tipo *downdraft* estratificado. O sistema de gaseificação principal é composto do reator e de um sistema que limpeza do gás de síntese, conforme a Figura 3.1.



(a)



(b)

Figura 3.1 - (a) Esquema do Sistema de Gaseificação, (b) Sistema de Gaseificação construído.

Os ensaios ocorreram em diversas etapas. A primeira etapa correspondeu ao mapeamento do motor do ciclo diesel na bancada dinamométrica. Na segunda etapa, avaliou-se, quanto ao desempenho, um grupo gerador de 20kVA para a geração elétrica distribuída com o gás de síntese, com auxílio de um banco de resistência. Este grupo gerador foi acionado com um motor diesel de mesmas características do que foi avaliado em bancada dinamométrica. Na terceira etapa o conjunto grupo gerador operou no modo duplo combustível, admitindo o gás de síntese juntamente com ar atmosférico e, por intermédio do governador (sistema de controle de rotação da unidade) procedeu-se à substituição automática de diesel pelo combustível auxiliar em diversos regimes de carga. Numa fase final, operou-se o motor diesel no modo duplo combustível, em bancada dinamométrica, buscando-se a máxima substituição do diesel, para diferentes regimes de carga. A seguir descreve-se, em detalhes, o sistema de gaseificação de biomassa.

3.1.1 – Reator de queima

Os testes foram realizados para duas concepções de reatores praticamente idênticos, um reator (R1) de 300 mm de diâmetro de área transversal de queima e outro reator (R2) de 200 mm.

O reator R1 é composto, basicamente, de um cilindro de 1000 mm de altura e 450 mm de diâmetro, com um selo de água na sua parte inferior para vedação e pré-resfriamento do gás, Figura 3.2. O cilindro refratário (1000 mm de altura por 300 mm diâmetro interno), foi inserido no tubo metálico de 450 mm de diâmetro, e tem como finalidade evitar a perda de energia do reator por transferência de calor. Cabe lembrar que temperaturas elevadas facilitam a quebra das moléculas de alcatrão (craqueamento do alcatrão), que é uma característica importante deste tipo de tecnologia de conversão de combustível sólido em gás de síntese. O cilindro refratário foi apoiado numa base metálica coberta com cimento refratário. O espaço entre a parede externa do cilindro refratário e do tubo de aço foi preenchido com areia, para servir de isolante térmico.

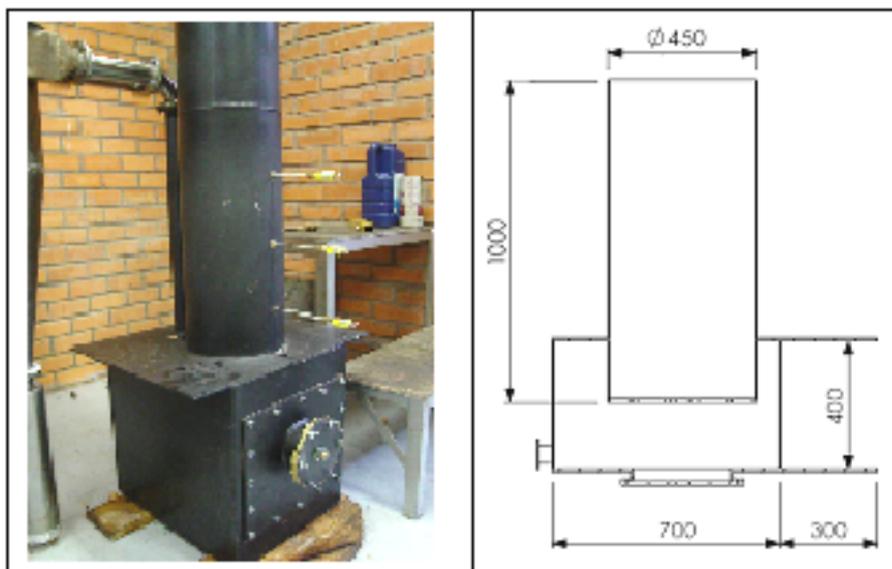


Figura 3.2 -Esquema do Reator R2 e R1 de leito fixo concorrente, respectivamente

A Figura 3.3 apresenta uma fotografia do reator R1 e do sistema de movimentação da grelha. Para facilitar a construção, a base do reator foi idealizada para ser composta de chapas planas cortadas e soldada conforme mostra a Figura 3.2. Na parte inferior do reator foi colocada uma porta de visita que suporta um sistema de movimentação da grelha de sustentação da coluna de biomassa. Esta grelha foi projetada para girar continuamente de forma a manter a coluna reativa o mais homogênea possível. Em altas temperaturas a movimentação da grelha se tornava problemática e optou-se por agitar a coluna pela parte superior do reator, que opera sempre aberta.



Figura 3.3 - Reator R1 e sistema de movimentação da grelha.

3.1.2 – Sistema de Limpeza de Gases

O sistema de limpeza dos gases é composto de dois ciclones, um *scrubber* e um filtro seco. Os equipamentos utilizados no controle de particulados foram um separador ciclônico e um filtro seco. As características principais de sistema de limpeza deste tipo se encontram resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características dos principais componentes do sistema de limpeza.

Separador	Ciclone	Filtro Seco
Força de Separação	Centrífuga	Intercepção direta
Superfície de Separação	Cilíndrica	Cilíndrica composta de um material particulado
Eficiência	80% em partículas menores que 20 μm e mais de 95% para partículas maiores de 50 μm .	90-95% para partículas maiores que 5 μm .
Vantagens	Baixo Custo, operação à altas temperaturas, baixo custo de manutenção (sem partes móveis).	Alta eficiência. Pode separar uma grande quantidade de particulados. Baixa queda de pressão.
Desvantagens	Baixa eficiência para diâmetro menores que 10 μm . Apresenta uma queda de pressão.	Ocupa uma área considerável. Altas temperaturas e gera dano no material filtrante.

O ciclone é um equipamento no qual utilizamos as forças centrífugas para separar materiais sólidos da corrente gasosa. O conjunto consiste de uma entrada horizontal-tangencial dos gases poluídos na parte superior de um corpo cilíndrico com um tubo concêntrico para a saída vertical dos gases filtrados. Um cone ligado a parte inferior do corpo cilíndrico dirige o produto até o dispositivo de descarga na parte inferior do mesmo, Figura 3.4.

Dependendo da velocidade da entrada dos gases e do diâmetro do ciclone obtemos a aceleração centrífuga superior à aceleração gravitacional. A influência desta aceleração resulta na velocidade relativa entre as partículas e as moléculas dos gases. A separação de partículas menores exige velocidades maiores ou diâmetros menores dos ciclones já que a aceleração centrífuga aumenta com a diminuição do raio do ciclone para uma mesma velocidade inicial. O uso de ciclone é, principalmente, destinado à pré-separação dos materiais.

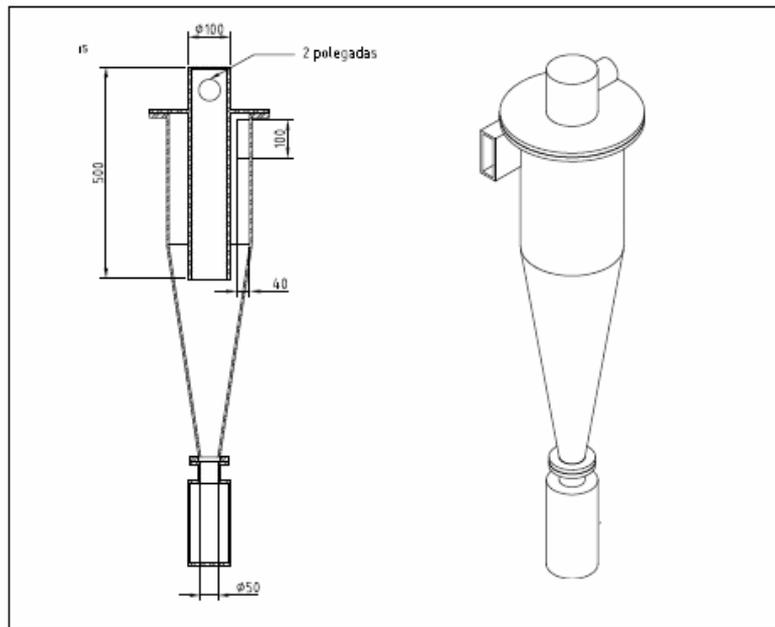


Figura 3.4 - Separador ciclônico utilizado.

A função principal do *scrubber* utilizado é de garantir a lavagem e o resfriamento do gás de síntese. O resfriamento no equipamento garante que os gases resultantes venham a ter uma temperatura próxima à ambiente, que é a temperatura ideal do gás para a sua aplicação em motores à combustão interna. Esta temperatura garante que todo o alcatrão restante na mistura do gás foi condensado durante a passagem no *scrubber*, além de aumentar a densidade do gás que resulta numa maior quantidade de energia disponível por volume de gás.

3.2 – MOTOR DIESEL UTILIZADO

O motor utilizado na avaliação do gás de síntese foi do tipo diesel, da marca Yanmar modelo BTD33. As características deste motor se encontram na Tabela 3.2.

O motor utilizado nos ensaios dinamométricos é similar ao motor do conjunto motogerador onde foram realizados os ensaios de desempenho da unidade com gás de síntese e correção automática do débito da bomba injetora.

Tabela 3.2. Dados principais do motor diesel Yanmar BTD33.

Potência DIN A (CV)	23,6 (1800 rpm) 30,0 (2600 rpm)
Nº Cilindros	3
Diâmetro do Pistão x Curso (mm)	90 x 90
Cilindrada (CC)	1717
Taxa de compressão	17,3:1
Rotação nominal do motor (rpm)	1800/2600
Capacidade do tanque de combustível	25 litros
Capacidade de óleo lubrificante – motor (L)	9,0 litros
Filtro de ar	Seco
Capacidade de água de refrigeração- motor + radiador (L)	8,2
Espaço nocivo (mm)	0,98 ~ 1,18
Bico injetor pressão (kg/cm ²)	210 ±10
Tempo de injeção (Graus a PMS)	26 ± 1 (F.I.C.)
Consumo específico de combustível (Pot. Nominal) (L/H)	6,70
Pressão do óleo lubrificante (kg/cm ²)	2,5 ~ 3,5
Dimensão C x L x A	1045 x 694 x 964

3.2.1 – Instrumentação do motor

3.2.1.1-Bancada Dinamométrica

Foi usada uma bancada com um dinamômetro Hidráulico Heenan & Froud (H&F), conforme a Figura 3.5, no qual o motor foi testado sob diferentes regimes de rotação e carga.

A bancada de ensaios dispunha de instrumentos como:

- Chave de ignição para acionar o motor.

- Tacômetro - indica velocidade de rotação da árvore de manivelas através de um mostrador analógico. Unidade rpm
- Rotâmetro - fornece vazão da água de arrefecimento do motor
- Balança Bextra - mede carga aplicada ao motor através do eixo cardam. Unidade kgf.
- Bureta calibrada - indica o consumo de combustível.
- Sensores de Temperatura - indicam a temperatura de entrada e saída da água de arrefecimento do motor.
- Termopares tipo K – para medição da temperatura de admissão do ar e escape.



Figura 3.5 - Motor Diesel na Bancada do dinamômetro.

A Figura 3.6 mostra uma visão geral dos principais equipamentos de aquisição de dados utilizados juntamente com a bancada dinamométrica. O dinamômetro indica a carga produzida através de uma célula de carga acoplada ao eixo cardam. O controle de carga no dinamômetro é feito por um conjunto de engrenagens. A unidade é fornecida pela balança em kgf. Conhecendo a rotação desenvolvida pelo motor e a sua carga associada é possível determinar a potência produzida no eixo do dinamômetro. A Equação 3.1 fornece a correlação matemática que possibilita determinar a potência do motor a partir do nível de carga e da rotação, obtidos da bancada dinamométrica.

$$\text{Potência [W]} = 0,373(\text{carga [kgf]} \times \text{rotação [rpm]}) \quad (3.1)$$

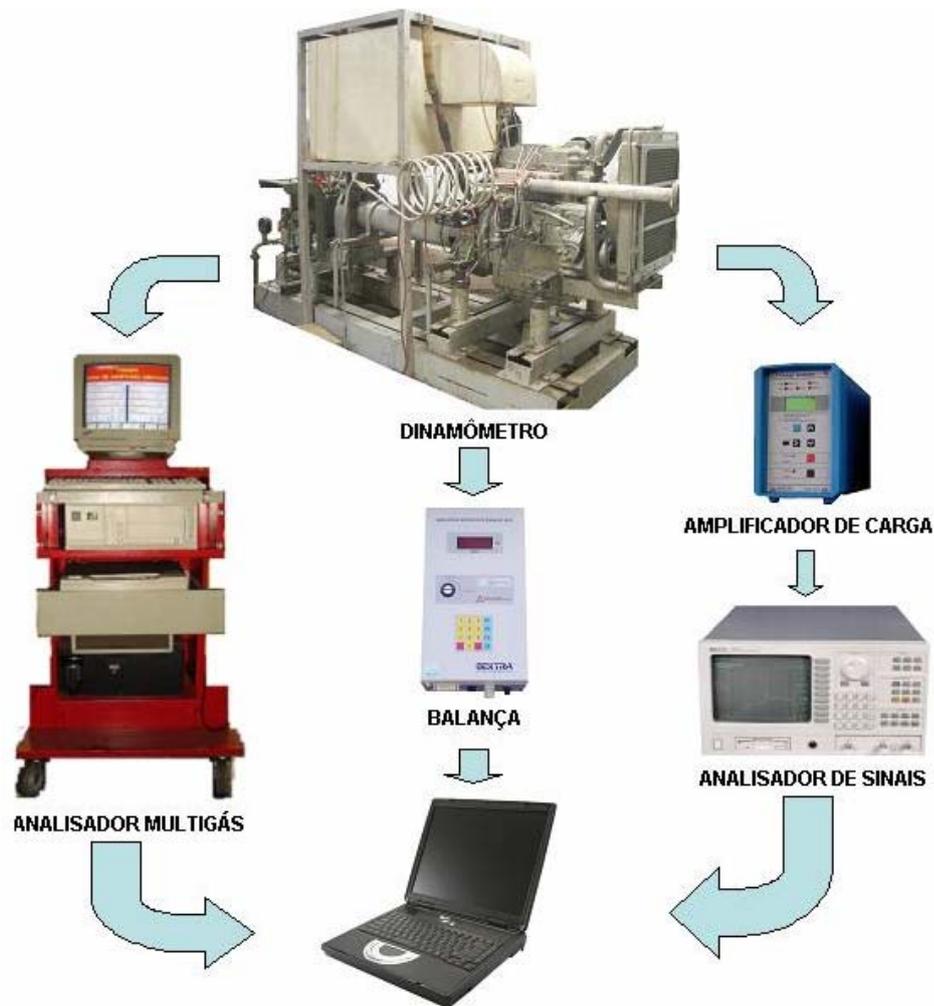


Figura 3.6 - Bancada do dinamômetro e equipamentos de coleta de dados.

3.2.1.1-Sistema de monitoração da Pressão dinâmica no cilindro

Para o monitoramento das condições de operação do motor, mediu-se a pressão dinâmica no interior de um cilindro (número 1), bem como o ponto morto superior deste cilindro. A pressão no interior do cilindro foi adquirida através de um sensor piezelétrico 6001 Kistler, instalado no cabeçote do motor. Para a coleta dos sinais provenientes do sensor utilizou-se amplificador de carga Kistler tipo 5011, Figura 3.6. O ponto morto superior foi obtido por um sensor ótico instalado no eixo do dinamômetro. Este dispositivo consiste em um emissor e um receptor ótico instalados em um disco perfurado preso ao eixo. O furo feito no disco determina o ponto morto superior.

A aquisição e o tratamento dos sinais foram realizados por um Analisador Dinâmico de Sinais HP 35665A. Este analisador tem dois canais, um que permite a aquisições do sinal do sensor piezelétrico e outro que foi utilizado para capturar o sinal do ponto morto superior através de sensor ótico instalado na ponta do eixo do motor. O sinal armazenado pode ser transferido para um computador.

3.2.1.1-Sistema de Analise de Gases

Para a medição de emissões foi utilizado o sistema de análise de gases Modal 1011 da empresa Napro. Tal sistema é composto por um analisador multigás ECO 6010. O analisador de Gases ECO 6010 é um equipamento preparado para a medição de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos pelo método infravermelho e Oxigênio (O₂) e Óxidos Nítrico (NO_x) pelo método eletroquímico, além das medições de velocidade angular e temperatura. O equipamento pode ser utilizado no gás de escape de motores de ciclo Diesel ou Otto.

A amostragem do gás é feita por meio de uma sonda que é introduzida no tubo de escape. Um filtro de coalescência separa o gás do condensado. A medição por infravermelho é feita quando os raios atingem uma amostra de gás, onde alguns atravessam e outros são parcialmente absorvidos. Quanto maior a concentração de gás, maior será a absorção de luz. O analisador mede esta intensidade de luz com o auxílio de foto-elementos precedidos por filtros calibrados com comprimentos de onda precisos e definidos. As escalas de medição dos gases do analisador ECO 6010 são apresentadas na **Tabela 3.3**.

Tabela 3.3 - Escalas de medições do analisador multigás ECO 6010.

Gases analisados	Faixa de medição
Hidrocarbonetos	0 - 10.000 ppm
Monóxido de carbono	0-10%
Dióxido de carbono	0-20%
Oxigênio	0-25%
Óxido Nítrico	0 - 4.000 ppm

3.3 – GRUPO GERADOR

O conjunto moto gerador diesel empregado nos ensaios de desempenho do gás de síntese está detalhado na Tabela 3.4. Na região amazônica o emprego de unidades diesel para geração de eletricidade é largamente disseminado. Um dos objetivos deste projeto foi avaliar a quantidade de diesel que pode ser substituída automaticamente pelo governador, quando o gás de síntese é admitido juntamente com o ar atmosférico (operação no modo duplo combustível).

Tabela 3.4 - Especificações do grupo gerador.

MODELO		YGS20TE	
GERADOR	Fases	Trifásico	
	Tipo	4 Polos,	
	Sistema de acionamento	Luva	
	Frequência / Rotação	Hz/rpm	60/1800
	Potência contínua	KVA	18,0
		KW	16,0
	Potência máxima	KVA	20,0
		KW	19,2
	Tensão de saída (voltagem)	V	127/220
Fator de potência		0,8	
MOTOR	Modelo	BTD33	
CONJUNTO	Nível de ruído	Decibel	
	Dimensões: Comprimento	mm	1600
	Largura	mm	725
	Altura	mm	1006
	Peso líquido seco	Kg	490

O sistema foi ensaiado num grupo Gerador conforme o apresentado na Figura 3.7 e na Tabela 3.4. O sistema é composto por um alternador trifásico auto regulado e auto excitado por compensação através de enrolamento de excitação, transformador de corrente e ponte retificadora que mantém a tensão de saída constante em qualquer condição entre vazio e plena carga.



Figura 3.7 - Grupo Gerador Yanmar 20kVA.

3.3.1 – Instrumentação do Grupo Gerador

A Figura 3.8 mostra uma visão geral dos principais equipamentos de aquisição de dados utilizados no grupo gerador diesel.

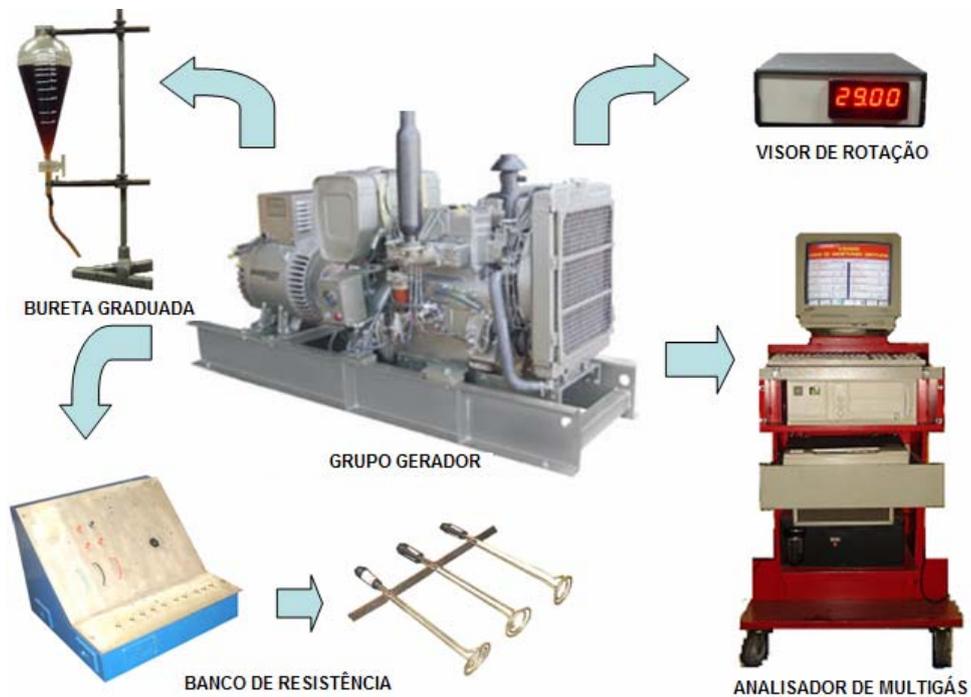


Figura 3.8 - Equipamentos de coleta de dados utilizados no Grupo Gerador.

3.3.1.1-Banco de resistência

Foi desenvolvido um banco de resistência para simular diferentes níveis de carga no gerador. Ele é composto por um painel com uma chave disjuntor de 35A e com nove chaves interruptoras, Figura 3.9. Cada chave do sistema aciona uma resistência com capacidade resistiva de 2000 W. Assim a capacidade máxima de cargas impostas ao gerador foi de 18 kW, ligeiramente menor que a potência nominal do grupo gerador que é de 20 kVA. As resistências utilizadas são do tipo mergulhão, de resfriamento à água.



Figura 3.9 - Componentes principais do banco de resistência.

3.4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.4.1 – Sistema de Alimentação de Biomassa no Reator

O sistema de alimentação do gaseificador foi manual com a inserção de carga total, ou seja, o valor de biomassa equivalente a coluna de retenção.

Na determinação da taxa de consumo do combustível sólido operou-se o gaseificador com apenas uma carga (altura de coluna máxima – 1000 mm) que foi suficiente para funcionar o motor de combustão interna e assim determinar o tempo necessário para recarga. Nos ensaios de consumo, o motor operou entre 1800 a 2000 rpm. A duração do ensaio correspondeu ao tempo necessário para que a biomassa na coluna alcançasse a zona de combustão dos voláteis. A operação da unidade após esta fase implica em alterar a

estequiometria global da reação. Feito isto, realiza-se a pesagem da biomassa correspondente que recupere o nível original da coluna, obtendo o seu consumo em kg/h.

Foram realizadas, junto a Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento do Ibama, análises energéticas das amostras de biomassa para qualificação, segundo os critérios de análise imediata e poder calorífico. A Tabela 3.5 mostra o resultado da caracterização das amostras de cedrinho, semente de açaí e casca do coco de babaçu. O interesse na caracterização dessas espécies deve-se a grande disponibilidade na região amazônica, onde o número de comunidades isoladas é relativamente grande. Cabe lembrar que o principal alvo deste estudo é o desenvolvimento de técnicas de eletrificação, por sistemas distribuídos de pequena escala, para comunidades isoladas.

Tabela 3.5 – Poder Calorífico e Análise imediata das amostras. Fonte: Ibama.

Amostras	Cedrinho	Babaçu	Açaí
Teor de matérias voláteis (%)	78,55	79,41	73,71
Teor de carbono fixo (%)	19,19	18,28	25,36
Teor de Cinzas (%)	1,54	2,14	0,93
Teor de umidade (%)	11,52	11,58	15,9
PCS (kJ/kg)	20950	20846	21055
PCI (kJ/kg)	19062	18962	19159

Além desses dados foi avaliada a densidade dos resíduos, denominada pela ISO de “Bulk Density” ou densidade a granel. Ela representa a massa ocupada da amostra que preenche um volume de um metro cúbico, sendo especificada em kg/m³. A densidade aparente do cedrinho apresentou valores praticamente idênticos quando comparado à semente de açaí, 295,02 kg/m³ e 295,46 kg/m³, respectivamente. Já a casca do côco de babaçu apresentou uma densidade a granel alta, aproximadamente 631,54 kg/m³.

Nos testes de bancada foram utilizadas, principalmente, as amostra de biomassa do tipo cedrinho (*Erisma uncinatum Warm*) como combustível, devido a sua disponibilidade local e por apresentar características intermediárias em relação às duas amostras amazônicas.

A biomassa foi obtida a partir do corte de tarugos cilíndricos de cedro, Figura 3.10. A grande vantagem em se utilizar este combustível sólido está no fato de apresentar uma granulometria uniforme, apresentando, em média, 23 mm de diâmetro por 30 mm de

comprimento. A forma geométrica cilíndrica da biomassa é apropriada, pois minimiza a criação de veios preferenciais de passagem de ar, os quais resultam em uma queima não uniforme no reator. Nestas condições, a qualidade do gás produzido no reator fica aquém do desejado.



Figura 3.10 - Amostra da madeira de cedrinho (*Erisma uncinatum Warm*)

3.4.2 – Suprimento de ar

Inicialmente para se iniciar a queima da biomassa no reator utilizou-se um compressor radial no final da planta de gaseificação. Assim o ar aspirado na entrada superior do reator promove a queima da coluna de carvão até que o sistema de queima entre em regime permanente e comece a produzir o gás de síntese, o que leva cerca de 15 a 20 minutos. A verificação da qualidade do gás é feita através da sua queima na saída do compressor. Neste instante a coluna é preenchida com biomassa e iniciam-se os ensaios. Com o gaseificador já em operação, pode-se desligar o compressor. A regulagem da mistura e da saída da tubulação do compressor é feita por um conjunto de válvulas borboletas e de retenção. Na preparação da mistura ar/gás combustível que alimenta o motor, empregou-se um sistema composto de duas válvulas borboletas, uma para o gás pobre e outra para o ar, conforme a Figura 3.11.

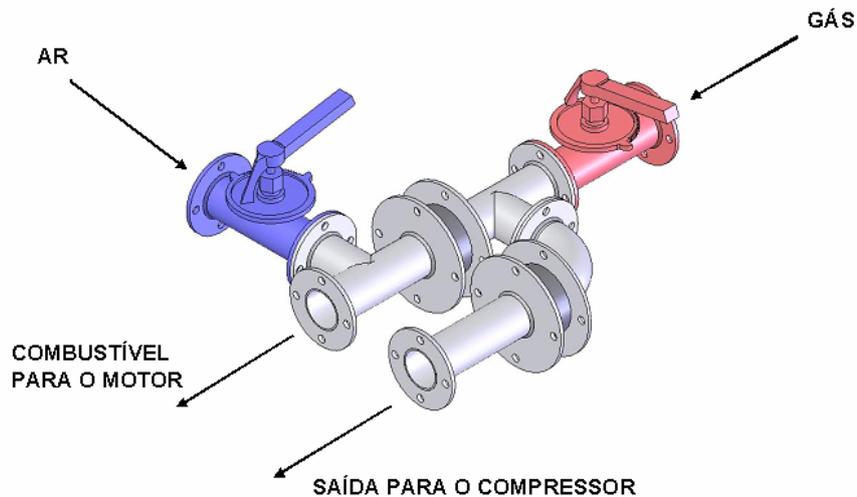


Figura 3.11 - Válvula de regulação da saída do gás.

3.4.3 – Medição do Campo de Temperatura

No corpo do reator foram feitos sete orifícios ao longo do seu comprimento, espaçados a uma distância de 80 mm cada (Figura 3.12), de forma que se possa fazer o monitoramento da temperatura e assim identificar as zonas de pirólise, combustão e gaseificação. Este procedimento também permite avaliar as temperaturas desenvolvidas no reator, principalmente para a zona de oxidação dos voláteis (superior a 900°C) e de gaseificação.



Figura 3.12 - Termopares tipo K ao longo do corpo do Reator.

Para a medição foram utilizados termopares do Tipo K com bainha cerâmica e um sistema de leitura e aquisição de dados. Estes termopares são os mais recomendados para medições

à altas temperaturas, como as que ocorrem no gaseificador. As leituras de temperatura somente são iniciadas quando ocorre um certo nível de estabilização dos processos de queima no reator.

3.4.4 – Ensaio Grupo Gerador

Os ensaios foram realizados segundo a norma NBR 6396 referente a Motores alternativos de combustão interna não veicular. A instrumentação necessária para a realização do ensaio corresponde ao sensor indutivo para a verificação da rotação de trabalho que é ajustada pelo próprio governador do motor, o banco de resistência para a simulação das cargas elétricas, uma bureta de graduação para determinação do consumo volumétrico de óleo diesel no sistema original e no modo duplo combustível, e um analisador multigás ECO6010.

Para a realização dos ensaios no grupo gerador, para as duas concepções de gaseificadores, foi fixada a rotação de 1800 rpm, que corresponde à frequência nominal de trabalho do gerador elétrico acoplado. Estabelecida a rotação foi feito o mapeamento do comportamento do grupo gerador para diversas cargas resistivas. O conjunto foi testado sem carga e com incrementos de carga de 2000 W até a carga máxima de 18 kW.

3.4.5 – Ensaio - Motor Diesel

Na operação com o sistema de gaseificação foi utilizado um motor de Ciclo Diesel. A operação deste motor com gás de biomassa é facilitada uma vez que sempre ocorre a injeção de uma pequena porcentagem de diesel. Esta pequena quantidade de diesel injetada serve de ignição para a mistura ar/gás pobre. Outra vantagem na utilização deste tipo de motor decorre da sua alta taxa de compressão que compensa o baixo poder calorífico do gás de síntese.

Com o sistema de válvulas borboletas é feita a regulagem da entrada de gás e ar no motor, de modo a garantir uma porcentagem de substituição que não resulte em detonação e conseqüentemente em danos aos cilindros do motor.

Os ensaios foram realizados no dinamômetro hidráulico Heenan & Froude e seguiram os seguintes passos:

- Por se tratar de um motor estacionário, utilizado em geradores, as rotações de ensaio foram próximas à rotação nominal do gerador. Os testes foram feitos a 1700, 1800 e 1900 rpm;
- O combustível adicionado foi o gás de síntese ou de biomassa, gerado pelo sistema de gaseificação;
- A porcentagem de substituição do óleo diesel foi determinada pela detonação apresentada no motor;
- Mapeamento do funcionamento do motor através das curvas de torque e potência para cada rotação em estudo;
- Mapeamento da pressão no interior do cilindro como forma de detectar a ocorrência de detonação e caracterização dos principais eventos;
- A potência original do motor no modo duplo combustível deveria ser sempre atingida de modo a se analisar o nível de substituição de diesel.

Inicialmente os ensaios foram realizados com diesel puro, servindo de base para a posterior comparação. Os ensaios foram conduzidos para as condições descritas anteriormente tanto para a medição da emissão de poluentes quanto para o consumo de combustível para a verificação da porcentagem de substituição do óleo diesel por gás de síntese.

Em seguida, com os resultados dos Ensaio no Grupo Gerador, defini-se qual o sistema de gaseificação que possui melhor desempenho, quanto ao grau de economia de diesel. Feita a escolha do reator, realizou-se a coleta de emissões de gases de escape do motor.

A segunda etapa, os ensaios foram feitos na bancada do dinamômetro para duas condições. A primeira condição é idêntica à realizada no Grupo Gerador, onde se utilizou o débito da bomba injetora de combustível sem alterar nenhuma configuração do motor. A segunda condição foi a de regulagem da bomba para a injeção mínima de combustível.

CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Inicialmente buscou-se caracterizar o perfil de temperatura ao longo do reator, objetivando-se avaliar o desempenho do mesmo quanto a este importante parâmetro na gaseificação de biomassa. Na seqüência, foram realizados ensaios na unidade moto-geradora. Por fim, foram conduzidos ensaios no motor diesel posicionado no dinamômetro do Laboratório de Motores de Combustão Interna. Os resultados obtidos e discussão pertinente se encontram neste capítulo.

4.2 - DIMENSIONAMENTO DO REATOR

O projeto de gaseificadores do tipo *downdraft* pode ser obtido a partir do conceito de velocidade superficial (VS). Assumindo-se valores recomendados para a velocidade superficial estima-se a área transversal do reator para um dado requerimento de volume de gás. Em termos físicos, a velocidade superficial pode representar uma medida da taxa de transferência de calor entre as fases sólida e gasosa no interior de um reator de gaseificação.

Segundos estudos da FAO (1986), valores reduzidos na velocidade superficial causam pirólise lenta, com temperatura em torno de 600 °C e produzem elevados níveis de carvão (20-30%) e quantidades consideráveis de alcatrão. Com relação aos gases de síntese, observam-se concentrações elevadas de hidrocarbonetos leves e de alcatrão. No outro extremo, elevada velocidade superficial ocasiona pirólise rápida (aumento da taxa de transferência de calor para a partícula) produzindo menos de 10 % de carvão/cinzas em temperaturas da ordem de 1050 °C. A faixa de temperatura típica para a zona de queima dos gases de pirólise é de 1200 a 1400 °C. Estes gases quentes reagem na zona de redução (carvão) produzindo um gás com menos de 1.000 ppm de alcatrão, mas com poder

calorífico relativamente baixo. A produção de um gás de síntese com baixo teor de alcatrão e sem perdas consideráveis no poder calorífico requer um ajuste adequado na velocidade superficial.

Segundo o relatório da FAO (1986) valores típicos de velocidade superficial para o bom funcionamento de um gaseificador estão numa faixa de 0,30 a 0,35 $\text{m}^3/\text{cm}^2/\text{h}$. Utilizando um bom isolamento térmico, o projeto pode-se alterado em o reator pode operar na faixa de 0,15 a 0,18 $\text{m}^3/\text{cm}^2/\text{h}$.

Com base nas características operacionais do motor de combustão empregado nesta pesquisa (1717 cm^3 a 1800 rpm) estimou-se, para diferentes velocidades superficiais, qual o diâmetro do reator. A Figura 4.1 apresenta os resultados teóricos com destaque para respectivos diâmetros de reator empregados neste estudo. Neste caso, optou-se por operar com níveis baixos de velocidade superficial (0,15 $\text{m}^3/\text{cm}^2/\text{h}$), priorizando-se a formação de carvão. No item a seguir será apresentado o perfil de temperatura do reator. As medidas indicam que a zona de combustão dos voláteis apresenta características mais típicas de reator com velocidade superficial acima de 0,20 $\text{m}^3/\text{cm}^2/\text{h}$. Portanto, considerou-se o diâmetro do reator como satisfatório para a realização deste trabalho.

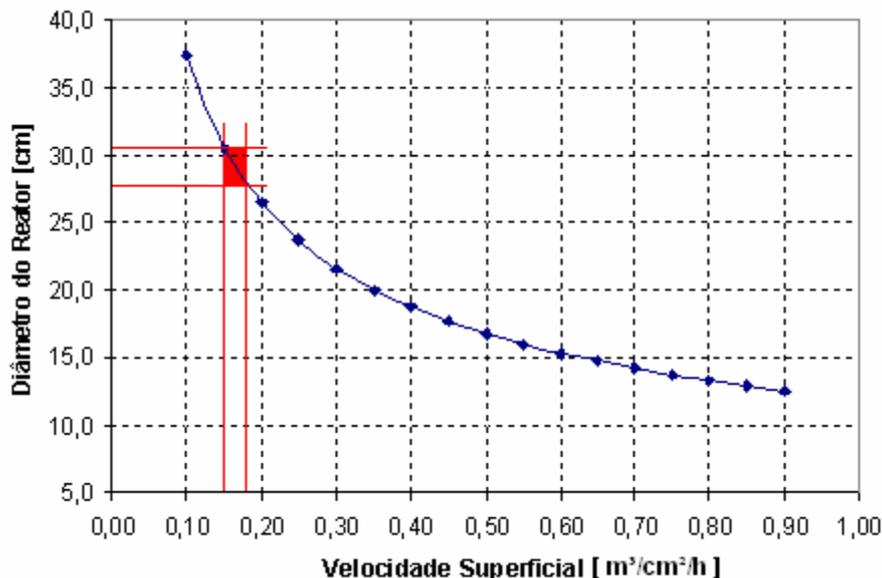


Figura 4.1 - Diâmetro do reator em função da velocidade superficial.

4.3 – PERFIL DE TEMPERATURA DO REATOR

Durante a operação do sistema de gaseificação foram coletadas as temperaturas ao longo da coluna do reator de gaseificação (Fig. 4.2). Essas medições foram realizadas em diferentes pontos no reator para que se pudesse conhecer o perfil de temperatura nas zonas de reação mais importantes, isto é, pirólise e redução. As medidas de temperatura foram feitas com termopares do tipo K. Os termopares foram numerados de 1 a 7, sendo o primeiro localizado a aproximadamente 80 mm acima da grelha do reator. Desta forma, as medidas nos eixo da ordenadas indicam altura a partir do topo da grelha, embora a distância decresça no gráfico.

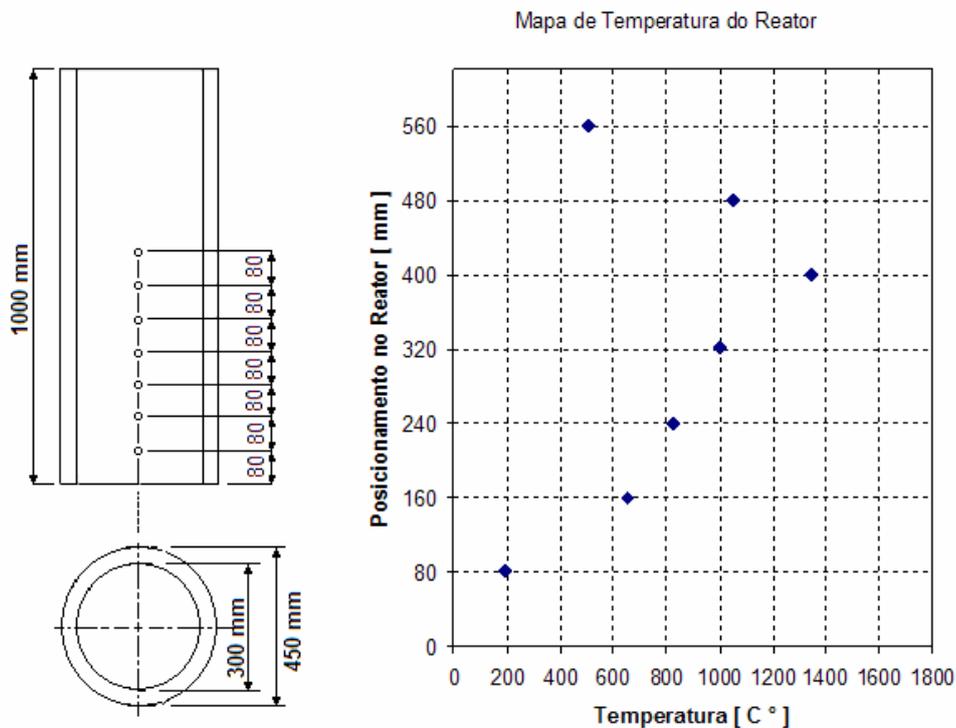


Figura 4.2 - Perfil de Temperatura do Reator.

Com o perfil apresentado na Figura 4.2, pode-se concluir que a zona de combustão apresentou um valor máximo de temperatura medido da ordem de 1350 °C, que ocorreu a uma altura de 400 mm em relação à grelha. Esta zona de pirólise e combustão dos voláteis podem ser delimitadas pelas cotas 330 e 470 mm, acima da grelha, com temperaturas aproximadas de 1000 e 1050°C, respectivamente. Temperaturas da ordem de 1000 °C podem caracterizar o fim das reações de pirólise e o início das reações de redução do carbono (gaseificação). Assim, a partir da correspondente cota (370 mm) até o topo da

grelha (80 mm) tem-se a região de gaseificação, que pelo perfil de temperatura se estendeu até aproximadamente 200 mm, onde o nível de temperatura é superior a 654 °C. Abaixo deste nível de temperatura a taxa de gaseificação decaiu a valores que podem ser considerados nulos. A Figura 4.3 apresenta a fração mássica de CO no gás de biomassa, após a zona de redução, para diferentes níveis de temperatura desta região. Estes dados foram obtidos a partir de um código numérico desenvolvido para o estudo das reações de gaseificação em reatores do tipo *downdraft* (Veras, 2007). Considerou-se apenas a reação de gaseificação do carbono com o CO₂, cuja fração mássica na entrada da zona de redução foi estabelecida em 15%. A altura da coluna da zona de gaseificação foi considerada longa o suficiente para que as reações atingissem um valor assintótico.

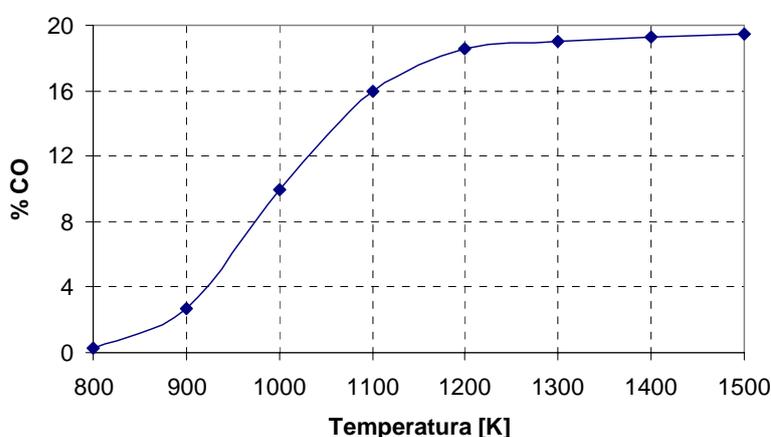


Figura 4.3 - Valores teóricos de fração mássica na saída do reator para diferentes temperaturas da zona de gaseificação.

Como pode ser visto no gráfico da Figura 4.3, ocorreu decaimento na produção e CO quando a temperatura da zona de reação estava abaixo dos 1200 K (927 °C). Acima deste valor não houve alteração na fração mássica de saída do CO, no gás de biomassa. Em torno de 900 K (627 °C), a fração mássica obtida foi de 2,74%, que torna o gás extremamente pobre. Assim, com base na Fig. 4.2, pode se confirmar que a zona de redução (gaseificação) se estendeu por aproximadamente 200 mm da coluna do reator.

4.4 – DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR

Os resultados a seguir mostram a segunda parte do projeto, referente à avaliação de desempenho do Grupo Gerador de 20 kVA funcionando com gás de síntese no modo duplo combustível. O gás foi produzido pelo gaseificador de biomassa, através da queima de resíduos de madeira de cedrinho. Inicialmente o motor diesel do grupo gerador foi aferido na sua concepção original, sem alteração do débito da bomba de combustível. Os testes foram realizados para duas concepções de reatores, um reator (R1) de 300 mm de diâmetro de área transversal de queima e outro reator (R2) de 200 mm. Dependendo do regime de rotação imposto, estes dois reatores apresentam diferentes níveis de velocidade superficial. Foram analisadas principalmente as emissões geradas e a taxa de substituição de Diesel medidas para diversas cargas impostas ao gerador por meio de um banco de resistência. Conforme destacado no capítulo anterior, nenhuma modificação foi introduzida no motor, nos três ensaios, exceto a adição do gás de síntese no ar de admissão. Como a unidade possui regulador de carga (governador), basta misturar gás de biomassa ao ar de admissão para que o sistema diminua, proporcionalmente, a quantidade de diesel original injetado, a partir do sinal do governador, que é ajustado para manter a rotação nominal desejada, nos vários níveis de carga. Neste conjunto moto gerador, para a frequência de 60 Hz, o gerador deve operar na rotação fixa de 1800 rpm. Desta forma, os resultados de potência foram sempre obtidos quando o motor estabilizava o nível de rotação no valor pré-ajustado (1800 rpm).

4.4.1 – Taxa de substituição do Consumo de Diesel por Gás de síntese

Quantitativamente observaram-se diferenças em relação ao consumo de diesel puro para as duas configurações testadas, em diferentes condições de carga. Conforme mostra a Figura 4.4, o sistema R1, denominado nas legendas como o Duplo Combustível 1, apresentou valores inferiores de consumo de diesel e comportamento mais uniforme se comparado com os dados obtidos no reator de 200 mm. O baixo consumo comparativo de diesel observado, no modo Duplo Combustível 2 (reator de 200 mm) na faixa de potência entre 12 e 16 kW pode estar relacionado com a taxa de gaseificação específica. Tiangco et al. (1996) identificaram, experimentalmente, valores ótimos de taxa de gaseificação específica e reatores do tipo “downdraft” na queima de casca de arroz. Os autores apresentaram uma

curva de eficiência do gás cujo pico na taxa de gaseificação específica se encontrava próxima de 200 kg/h m².

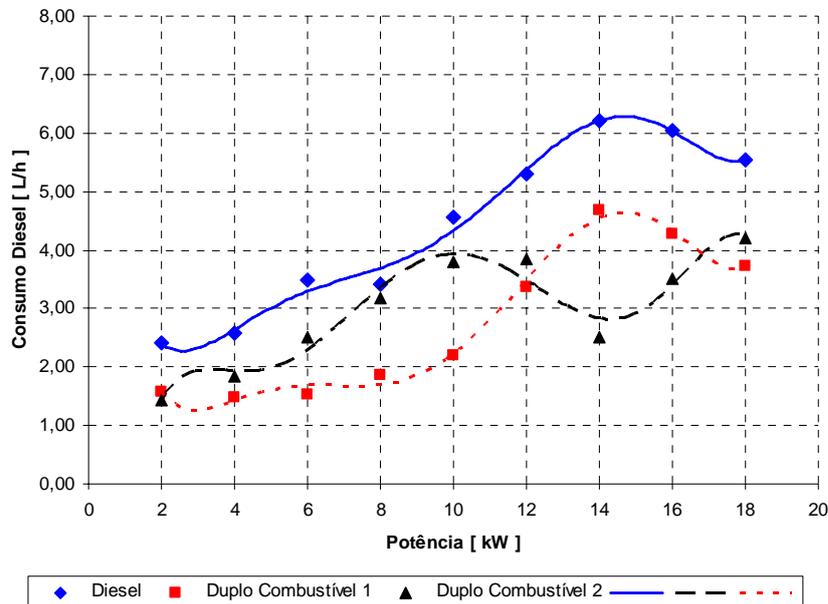


Figura 4.4 – Consumo de diesel para as três condições de ensaio: Diesel , Duplo combustível 1 (R1) com reator de 300 mm e Duplo Combustível (R2) reator de 200 mm.

A Figura 4.5 mostra a taxa de substituição do consumo de óleo diesel para a operação do Grupo Gerador, com combustível original e no modo duplo combustível para os sistemas R1 e R2. O motor foi ensaiado para várias cargas resistivas a uma rotação fixa de 1800 rpm. Neste caso, pode-se supor o emprego da unidade onde a demanda de energia da comunidade é variável. Pela análise dos dados, observou-se que os sistemas apresentam faixas ideais de operação distintas. Para R1 o percentual de substituição do combustível variou entre 57 e 25%, sendo que o melhor desempenho ocorreu nas cargas de 6 e 10 kW. Já o sistema R2 (reator 200 mm) apresentou, na faixa de operação de 14 a 16 kW, resultados melhores de desempenho quando comparados ao R1. O nível de substituição do diesel, para este caso, foi da ordem de 60%. Estes testes foram realizados sem nenhuma alteração no motor. Os dados obtidos, portanto, encorajam o emprego desta tecnologia. O gás de síntese mostrou-se, desta forma, uma importante opção como combustível auxiliar em motores do ciclo diesel de grupos geradores de pequena escala.

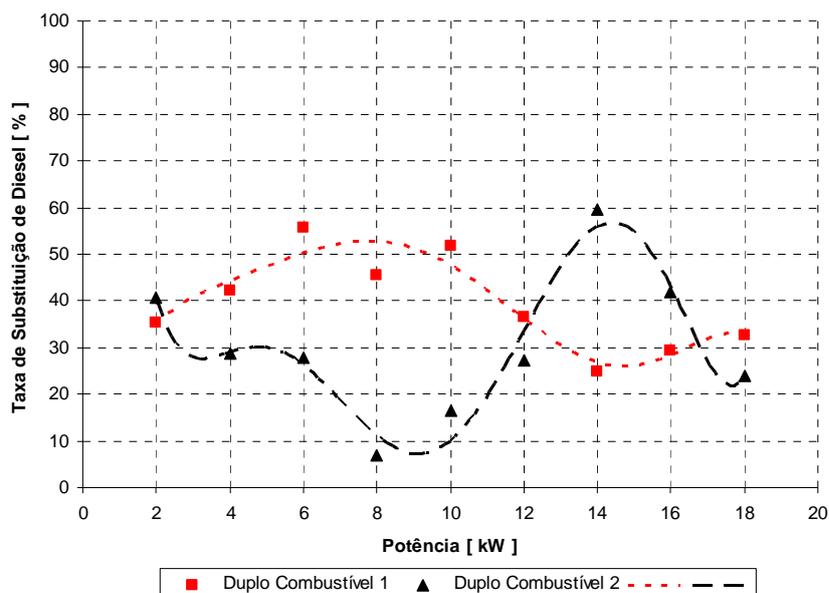


Figura 4.5 - Percentual de substituição de diesel para o sistema utilizando gás de biomassa no Grupo Gerador.

4.4.2 – Análise de Emissões

Para a análise dos gases de escape do motor Diesel foram realizadas medições de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC) não queimados pelo método infravermelho e Oxigênio (O₂) e Óxidos Nítrico (NO_x) pelo método eletroquímico.

A Figura 4.6 mostra que as emissões de NO_x associadas ao modo duplo combustível são em geral bem menores do que as emissões associadas ao consumo do sistema utilizando apenas diesel puro. A diminuição ocorreu para toda a gama de cargas resistivas ensaiadas. A taxa de redução de emissões utilizando gás de síntese apresentou valores que variam de 73,4 a 92,8%, onde os melhores percentuais foram constatados com o motor operando sob baixas cargas. Esta redução se deve ao fato do gás de síntese possuir quantidades expressivas de nitrogênio, que atua como gás inerte na mistura. O nitrogênio em excesso faz com que os picos de temperatura ocorram em níveis que são inapropriados para a formação de NO_x pelo mecanismo térmico.

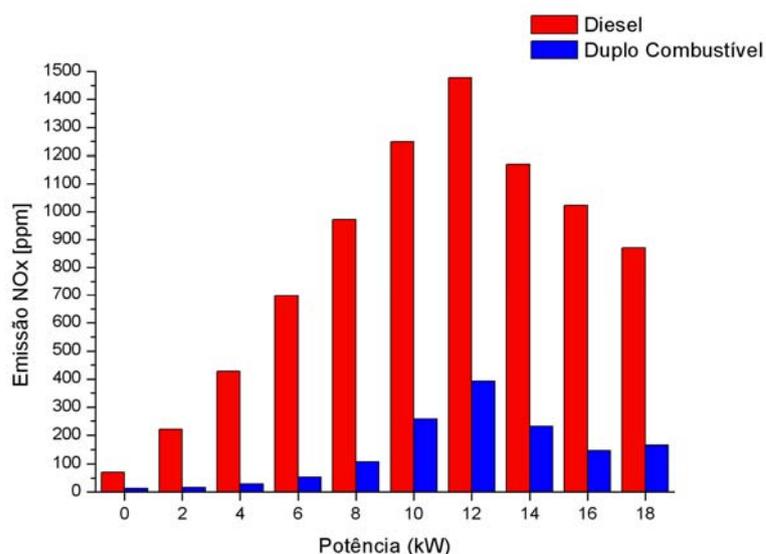


Figura 4.6 - Emissão de NO_x para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível

Esta tendência de queda nas emissões não foi observada para o monóxido de carbono, conforme ilustra a Figura 4.7. De acordo com Kandpal et al. (2004), esse comportamento deve-se principalmente a dois fatores: (i) à própria composição do gás de síntese que é rica em CO e (ii) devido à combustão incompleta. Como não se ajustou o ponto de injeção, é de se esperar que as emissões de CO aumentem.

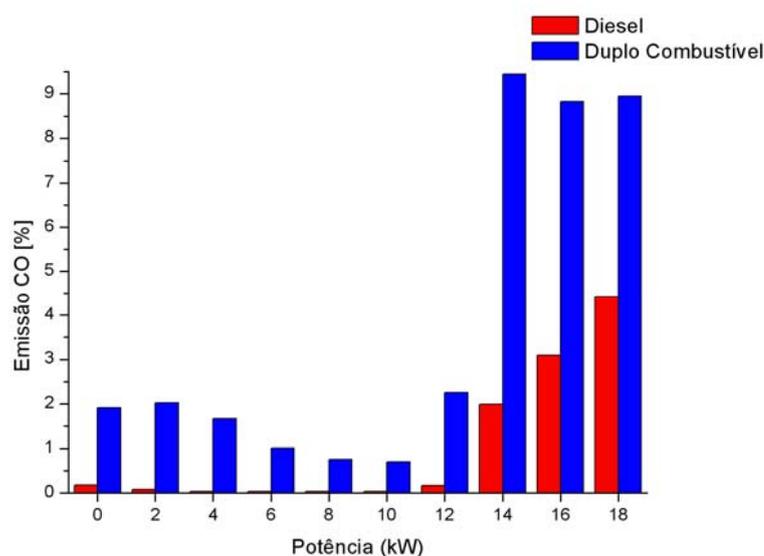


Figura 4.7 - Emissão de CO para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.

Outro fator que pode influenciar na maior emissão de CO esta relacionada ao tempo mais longo de oxidação do CO, principalmente em baixos níveis de temperatura. Sabe-se que a expansão dos gases no interior do cilindro resfria a mistura. Desta forma, uma parcela do CO que seria passível de oxidação acaba por ser emitido nos gases de escape.

A Figura 4.8, apresenta o percentual CO₂ nos gases de escape para nas duas configurações operacionais. As emissões de CO₂ no modo duplo combustível, com gás de síntese, é sempre maior que aquela com combustível original até 12 kW. A partir de 14 kW as emissões de CO₂ no modo duplo combustível são inferiores se comparadas com o diesel puro. Neste caso, a combustão incompleta do CO tem grande influência nos níveis de descarga do dióxido de carbono. Como pode ser observado na Fig. 4.7, as emissões de CO são da ordem de 4% na potência de 18 kW.

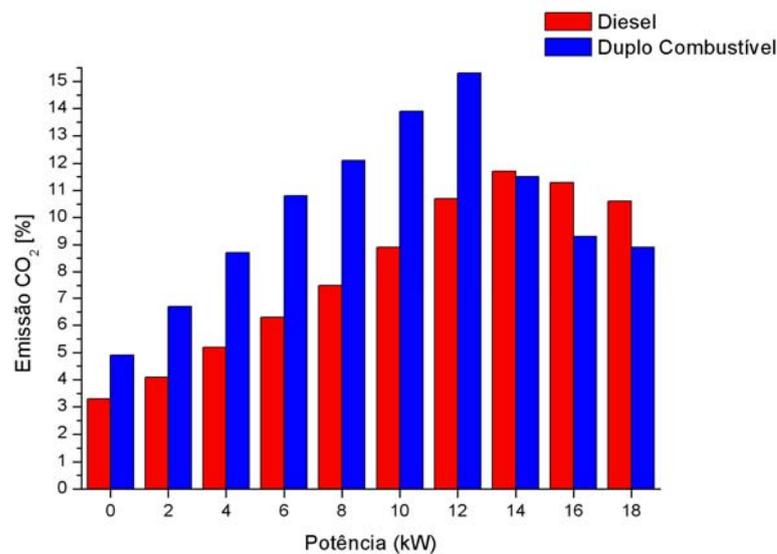


Figura 4.8 - Emissão de CO₂ para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.

A Figura 4.9 apresenta os níveis de emissão de hidrocarbonetos não queimados (HC). Os elevados níveis relativos de HC, para o modo duplo combustível se devem à diluição da mistura pelo nitrogênio e CO₂ contidos no gás de síntese visto que ambos reduzem a velocidade de propagação da chama de forma que próximo ao final do processo de expansão ocorre congelamento das reações de oxidação, tanto para o CO, como para os hidrocarbonetos. Com ajuste no tempo de injeção é de se esperar queda acentuada nas emissões relativas de CO e HC.

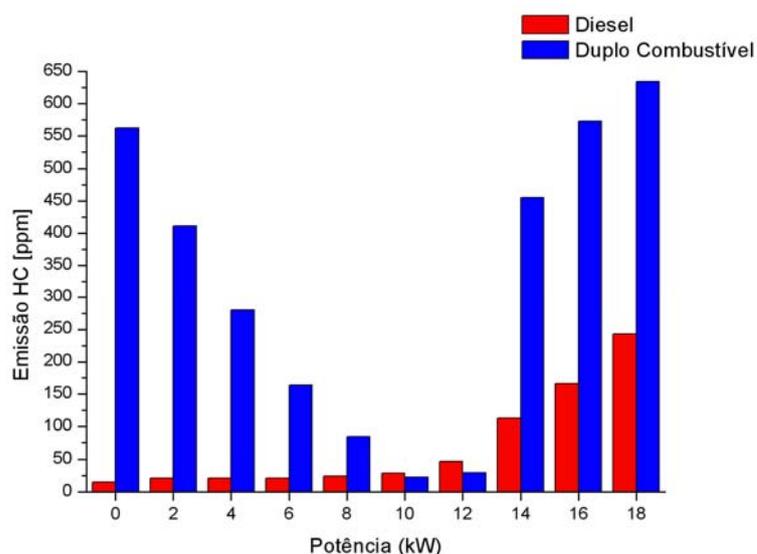


Figura 4.9 - Emissão de hidrocarbonetos não queimados para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.

4.5 – DESEMPENHO DO MOTOR - DÉBITO ORIGINAL

Como o sistema R1, reator de 300 mm apresentou melhores resultados relativos às taxas de substituição do combustível, optou-se por utilizá-lo como referência nos testes na bancada dinamométrica.

Nesta etapa, foram feitos ensaios de bancada para o motor Diesel, em duas condições de operação. A primeira condição é semelhante à realizada no Grupo Gerador, onde utilizou o débito original da bomba injetora de combustível. Na segunda condição ajustou-se o débito da bomba para um valor mínimo de injeção que permitisse o motor operar com diesel puro em marcha lenta, sem carga. Este nível de injeção ainda é ligeiramente superior ao informado na literatura (FAO, 1986) quando gás de síntese é misturado ao ar de admissão. Contudo, levando-se em consideração que o objetivo principal deste trabalho é aplicar a tecnologia de gaseificação evitando-se alterações importantes no grupo gerador. Estas alterações não devem dificultar a operação do conjunto no campo, principalmente em comunidades isoladas. Assim, o nível de injeção de diesel que se julgou adequado seria aquele que permitisse dar partida na unidade sem adição de gás de biomassa. Em alguns casos o ajuste do débito da bomba não pode ser efetuado com o motor em funcionamento. Portanto, buscou-se o nível mínimo de diesel capaz de dar partida e manter o motor em funcionamento apenas com o combustível original.

4.5.1 – Curvas Características de Potência e Torque

Inicialmente apresentam-se os resultados dos testes referentes à carga máxima, onde torque, potência, consumo específico de combustível e pressão dinâmica na câmara de combustão são analisados, comparativamente, para o combustível original e o gás de síntese. Nos testes realizados tentou-se recuperar a potência e o torque original do motor quando operando no modo duplo combustível. Naturalmente, pelas características do gás de síntese, baixo poder calorífico e velocidade de propagação de chama reduzida, é de se esperar queda nos níveis de potência do motor, principalmente em cargas elevadas. Novamente, não se alterou o ponto de injeção do diesel quando operando no modo duplo combustível.

A Figura 4.10 mostra o torque em função da rotação para o motor com solicitação máxima, nas duas condições de ensaio, isto é, com combustível original e no modo duplo combustível (diesel e gás de síntese). Como pode ser visto, utilizando-se o gás de síntese em rotações inferiores a 1700 rpm, ocorreu recuperação do torque com a substituição do combustível original, com acréscimo de 2,05% em relação ao seu valor na concepção original para a rotação de 1600 rpm. Para rotações entre 1700 a 1800 rpm, a queda no torque varia de muito pouco, de 3,11 a 4,19%.

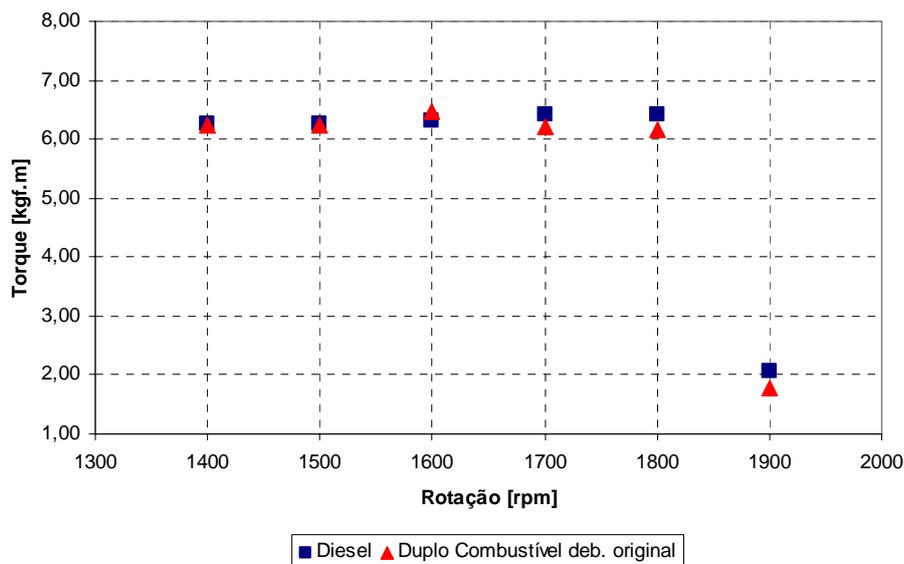


Figura 4.10 - Torque versus rotação, a plena carga com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.

Para a rotação de 1900 rpm, o baixo nível de potência se deve ao sistema de proteção do motor. O governador diminui acentuadamente a injeção de diesel para preservar o motor. O nível de combustível injetado deve apenas compensar as perdas de forma a manter o motor próximo deste regime de velocidade. Portanto, não cabem discussões mais detalhadas para esta rotação.

A Figura 4.11 apresenta a potência versus rotação, para diesel puro e para o gás de síntese. Como pode ser visto, verifica-se uma queda de potência no modo duplo combustível, nas rotações superiores a 1700 rpm, variando de 3 a 13,9 % em relação a operação com somente diesel. Os testes de torque e potência foram realizados com o governador do motor atuando. Verificou-se, portanto, que o ajuste efetuado pelo controle do motor foi eficaz em perceber a presença do gás de síntese na combustão e dosar a injeção de diesel de forma suficiente para recuperar a carga solicitada. O nível de substituição foi verificado pela estimativa do consumo específico de combustível

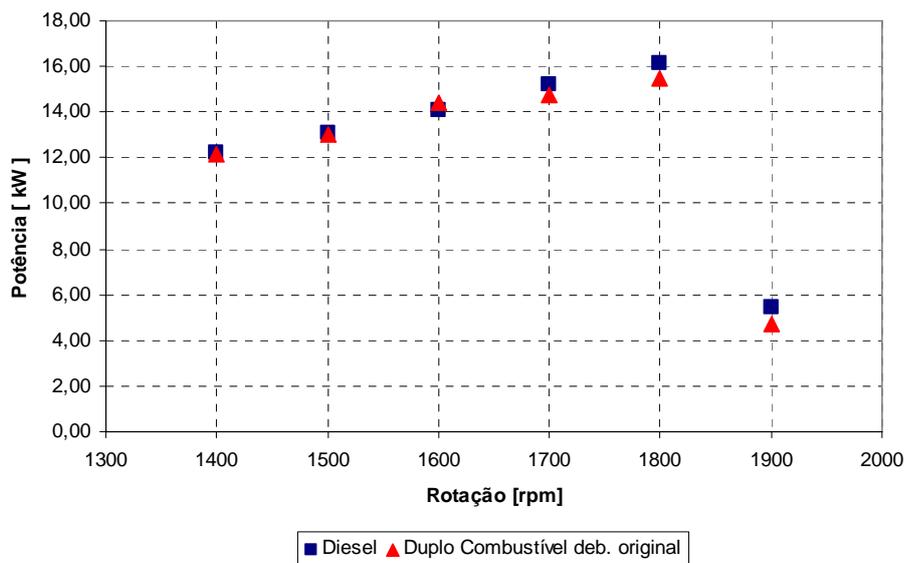


Figura 4.11 - Potência versus rotação, a plena carga com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.

4.5.2 – Consumo Específico de combustível

A Figura 4.12 mostra o consumo específico de combustível de diesel (CEC) para o conjunto de rotações testado. Na figura podem ser vistos os níveis de consumo de diesel nas duas condições de ensaio, original e duplo combustível. Verifica-se que o CEC

diminui, em todas as rotações quando se adiciona gás de síntese ao ar admitido pelo motor. Na faixa de rotação dos ensaios destacou o regime de 1800 rpm onde o motor teve o consumo específico de combustível reduzido de 0,2845 kg/kWh para 0,2045 kg/kWh. Como alertado, o elevado nível de consumo específico a 1900 rpm se deveu à queda acentuada de potência do motor, a despeito da diminuição na quantidade de diesel injetado.

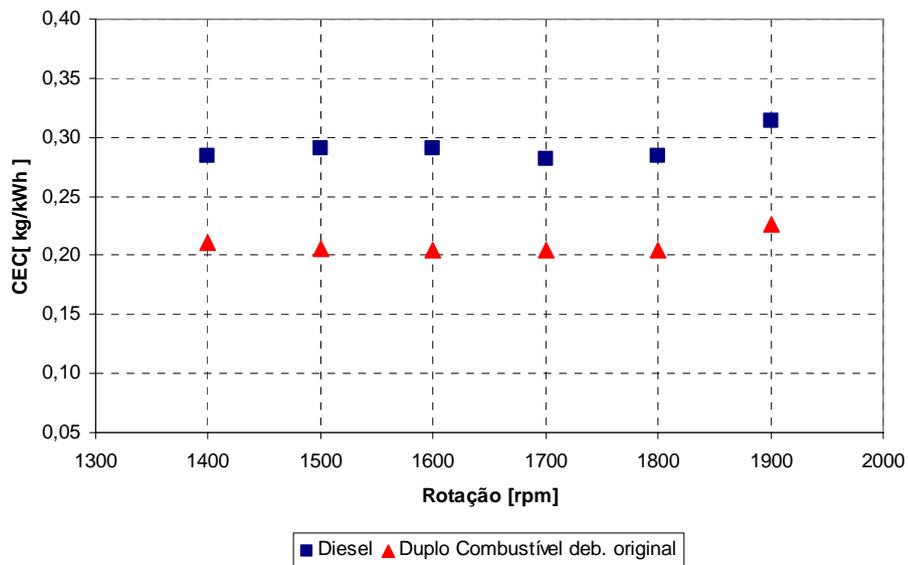


Figura 4.12 - Consumo específico de diesel versus rotação a plena carga nas com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.

4.5.3 – Curvas de Pressão no Cilindro

Foi utilizado um sensor de pressão (piezelétrico) de marca Kristler, modelo 6001 com faixa de atuação de 0 a 250 bar, para captar os sinais de pressão no interior do cilindro. Para amplificar a carga da grandeza física obtida do sensor para uma voltagem que apropriada ao osciloscópio HP 34564 utilizou-se um amplificador de carga também da marca Kristler com faixa de operação de 10 a 500000 pc.

Embora a velocidade nominal do conjunto motogerador seja de 1800 rpm, os testes cobriram a faixa de 1400 a 1800 rpm. Assim, pode-se inferir o efeito da velocidade de propagação da chama, para o caso duplo combustível, no desempenho da unidade. Outras importantes informações podem ser obtidas com estes dados.

Apresenta-se na Figuras 4.13 os valores de pressão de um cilindro com o motor a 1400 rpm, referente ao diesel puro e no modo duplo combustível, respectivamente. O momento imediatamente anterior à injeção pode ser localizado com auxílio da inclinação da curva, que para o caso do diesel puro ocorreu aproximadamente em -8° . No momento da injeção, enquanto não há reação química em taxas pronunciadas (ignição), os gases no interior do cilindro sofrem uma ligeira queda de temperatura devido à parcela de combustível que evapora. Esta queda de temperatura ocasiona diminuição na taxa de acréscimo da pressão no cilindro. Após alguns graus (fase de compressão) nota-se que a inclinação da curva se altera mais uma vez, ocasionado pela liberação de calor do processo reativo. A pressão máxima para o motor com diesel puro foi de 78 bar. O atraso na ignição, com o emprego da mistura ar-gás de síntese, não prejudicou o desempenho do motor.

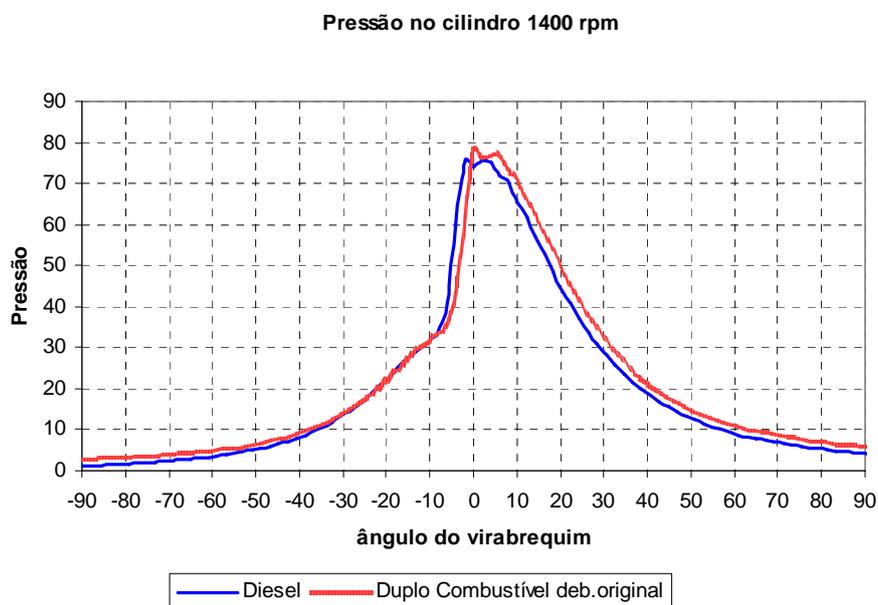


Figura 4.13 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1400 rpm e plena carga.

No modo duplo combustível, a curva de pressão apresenta comportamento um pouco diferenciado. Observa-se um ligeiro deslocamento da curva para a direita, que pode ser atribuído ao maior tempo necessário ao estabelecimento das reações (atraso da ignição) devido a presença do gás pobre na carga admitida. Com o início das reações a curva de pressão no modo duplo combustível não apresenta diferenças qualitativas com o diesel puro, exceto o valor máximo que chegou próximo a 80 bar. Como as curvas são

essencialmente iguais, a potência do motor neste nível de rotação deve ser também similar, independente do tipo de combustível, confirmado pelo resultado da Figura 4.11.

A Figura 4.14 apresenta os resultados de pressão dinâmica do cilindro a uma rotação de 1500 rpm. Neste caso as curvas apresentaram um comportamento bastante semelhante tanto para o diesel puro quanto para o modo duplo combustível. Aqui também foi possível verificar que a presença do gás de síntese gera um pequeno atraso na ignição do combustível. Apesar do atraso, o pico de pressão (80,5 bar) com a adição de gás de síntese é superior aquele obtido com o combustível original. A proximidade entre as curvas acarretou num desempenho (torque) comparável com a utilização dos diferentes combustíveis. Também se pode dizer que, devido à baixa rotação do motor, o atraso na ignição, com o emprego da mistura ar-gás de síntese, não acarretou em queda de desempenho do motor.

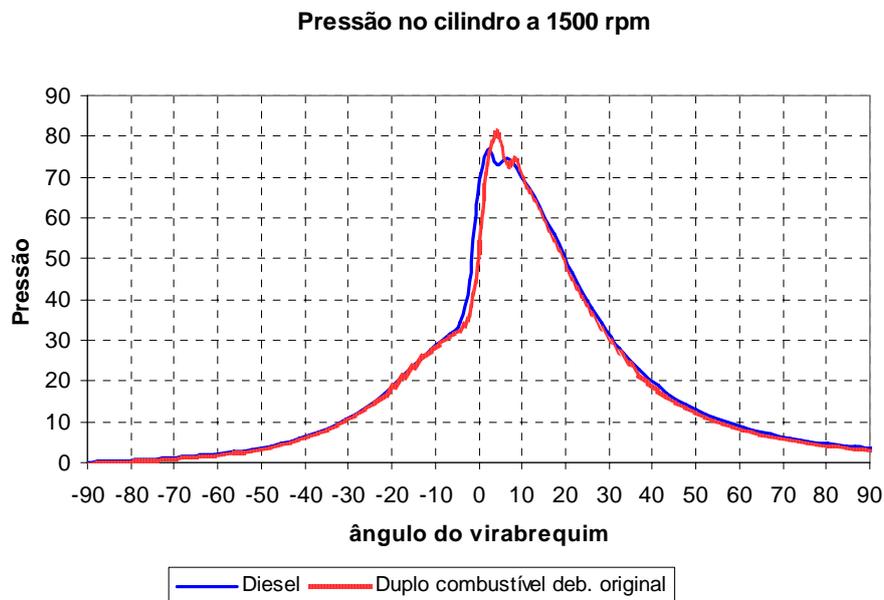


Figura 4.14 -. Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1500 rpm e plena carga.

A Figura 4.15 apresenta a curva de pressão para o diesel puro e duplo combustível com gás de síntese a 1600 rpm e plena carga. Comparativamente, nota-se valores mais elevados de pressão com a utilização de pré-mistura ar-gás de síntese. No modo duplo combustível o cilindro monitorado apresentou pico de pressão da ordem de 81 bar. Em contrapartida, com diesel puro o máximo de pressão obtido foi próximo de 79 bar. Um segundo pico de pressão ocasionou um ligeiro afastamento entre as curvas, com a queda de pressão, devido ao processo de expansão, tendo início, no modo duplo combustível, após a queda com

diesel puro. Níveis mais elevados e prolongados de pressão fazem com que o torque no modo duplo combustível seja ligeiramente superior se comparado com o torque obtido com diesel puro, neste nível de rotação. Novamente observou-se atraso na ignição com o emprego de gás de síntese. Este atraso tende a penalizar o torque do motor. Contudo, como discutido anteriormente, o nível de pressão mais elevado, no modo duplo combustível, foi suficiente para compensar e mesmo sobrepor possíveis quedas de desempenho. Neste nível de rotação específico, verifica-se que pequenos ajustes no tempo de injeção podem acarretar melhorias significativas de desempenho quando o motor operar com gás de síntese. Isto porque, o melhor sincronismo entre o momento da injeção e a posição relativa do pistão, ocasiona níveis de pressão muito mais elevados, acarretando torque também elevado.

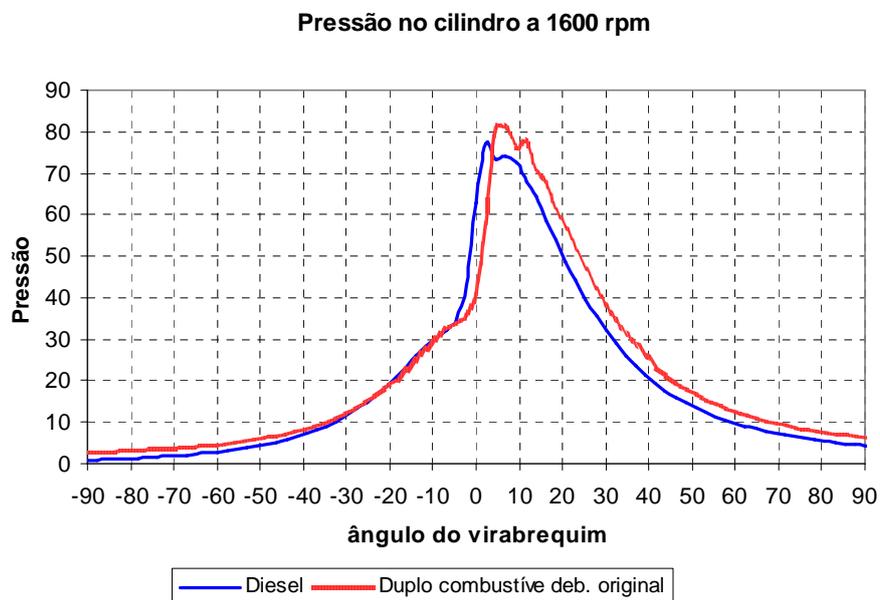


Figura 4.15 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1600 rpm e plena carga.

A Figura 4.16 apresenta a curva de pressão dinâmica para os dois casos estudados a uma rotação de 1700 rpm. Neste caso pode-se considerar que as curvas estão quase sobrepostas e pouco é possível se inferir qualitativamente. Contudo, quando se observa os dados da Figura 4.10 verifica-se que o desempenho do motor foi melhor com o diesel puro. Dada a elevada velocidade do motor, seria apropriado corrigir o tempo de injeção.

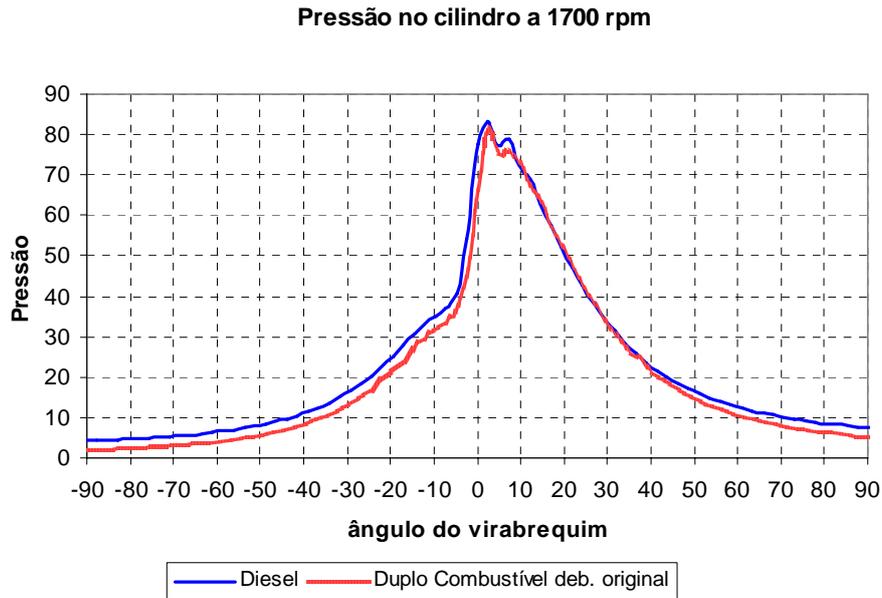


Figura 4.16 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1700 rpm e plena carga.

Os dados da Figura 4.17 indicam o melhor desempenho com o emprego de diesel puro, basicamente devido ao maior nível de pressão obtido com este combustível. As curvas, em geral, apresentam um perfil semelhante, com um pequeno deslocamento para a direita quando o motor opera no modo duplo combustível. Novamente, o acerto no tempo de injeção poderia melhorar o desempenho do motor quando se emprega gás de síntese.

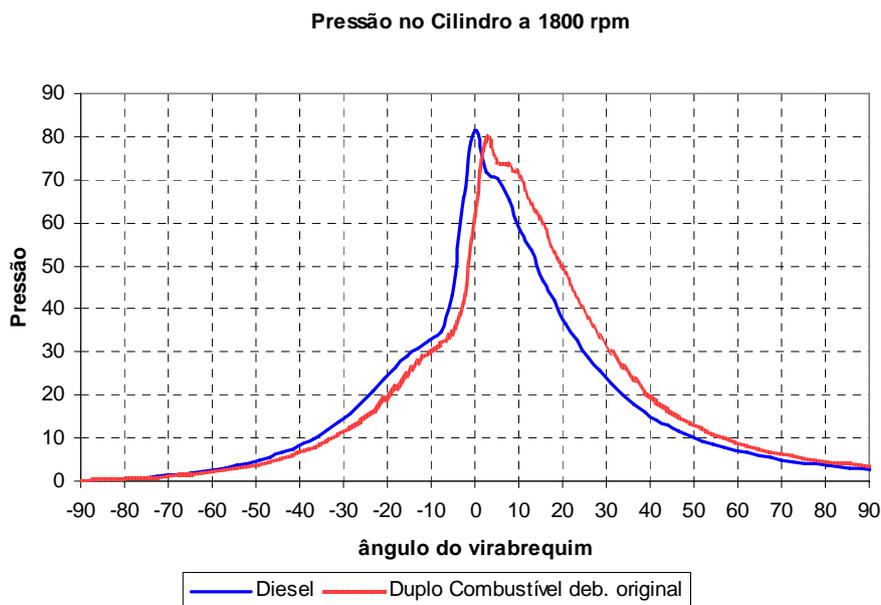


Figura 4.17 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1800 rpm e plena carga.

No regime de 1900 rpm, apresentado na Figura. 4.18, verifica-se, claramente, o efeito da substituição parcial, automática, do diesel por gás de síntese. A redução na quantidade de diesel injetado altera sobremaneira a curva de pressão, tanto quando se compara este regime com os de rotações menores quanto relativamente ao tipo de combustível empregando. A pressão dinâmica no cilindro, com diesel, apresentou pico de pressão da ordem de 58 bar a 9° do PMS. A curva de pressão relativa ao modo duplo combustível também apresentou alterações significativas. A pressão máxima obtida foi da ordem de 35 bar. Neste caso, o desempenho do motor foi muito inferior se comparado com a injeção de diesel apenas. Este nível de pressão indica que o motor opera de modo oscilatório, com o governador tendo reduzido drasticamente a injeção de diesel. Estas curvas não podem ser relacionadas com os dados relatados na Figura 4.11, onde o nível de potência medido foi parecido para os dois casos. Neste caso, a curva de pressão é quase inteiramente definida pela presença do gás de síntese na mistura.

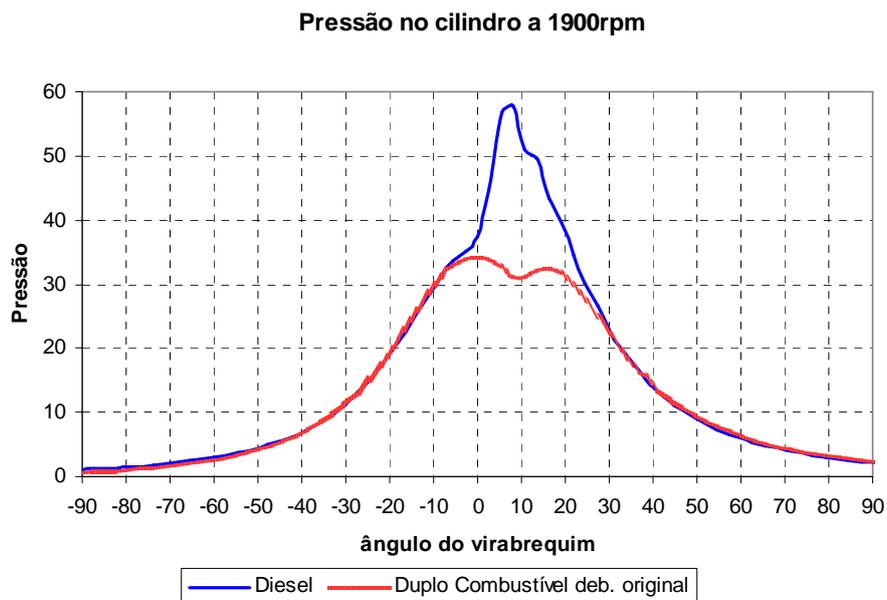


Figura 4.18 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1900 rpm e plena carga.

4.6 – DESEMPENHO DO MOTOR - DÉBITO REDUZIDO

Nesta seção apresenta-se resultados dos ensaios de desempenho do motor, consumo específico de combustível de diesel (CEC) e pressão dinâmica na câmara de combustão, com alteração no débito da bomba injetora. Neste caso, ajustou-se o débito a um nível em

que o motor era capaz de operar de maneira estável, sem carga. O débito ajustado permitia que o motor fosse ligado sem auxílio do gás de síntese, conforme discutido anteriormente.

Os dados do duplo combustível funcionando com o sistema R1 e débito mínimo são apresentados juntamente com os ensaios realizados com o motor na sua concepção original, ou seja, com diesel puro e com o débito original. Da mesma, que nos demais ensaios, o objetivo era verificar que nível de potência poderia ser recuperado com a adição de gás de síntese. Dado que a quantidade máxima de diesel que pode ser injetada está limitada, o motor deve contar basicamente com o poder calorífico e a massa de gás de síntese que pode ser admitida para converter em potência mecânica. Os resultados apresentados se limitam aos níveis de rotação de 1700, 1800 e 1900 rpm. Isto porque o conjunto motogerador é ajustado para operar a 1800 rpm.

4.6.1 – Curvas Características de Potência e Torque

A Figura 4.19 mostra o torque em função da rotação para o motor a plena carga, para o motor diesel funcionando com diesel e no modo duplo combustível funcionando com o sistema R1. Como era de se esperar, houve diminuição do torque e, conseqüentemente da potência.

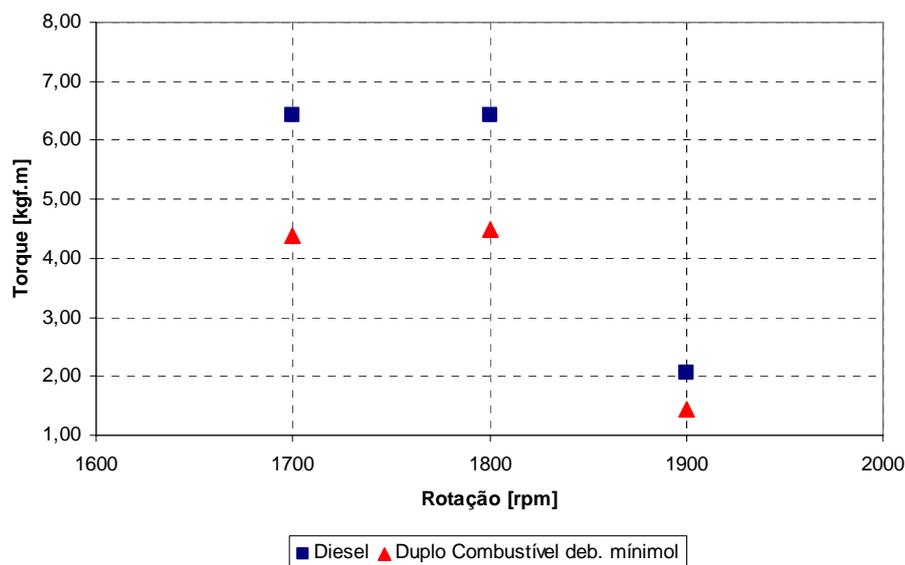


Figura 4.19 - Torque do motor Diesel versus rotação, a plena carga. Débito mínimo da bomba injetora.

A Figura 4.20 apresenta a potência versus rotação, para diesel puro e para o gás de síntese. Os resultados indicaram queda de potência no modo duplo combustível, nas rotações de operação, variando de 29,26 a 30,78% em relação ao diesel. A estimativa da queda de potência teórica é esperada, levando-se em consideração a diferença entre os poderes caloríficos e massa que pode ser injetada. Esta queda de potência limita, como consequência, a potência que o motor pode fornecer quando opera com gás de síntese. A potência fornecida, portanto, gira em torno dos 70% se comparado com diesel puro. Estes valores estão de acordo com os dados divulgados pela FAO (1986).

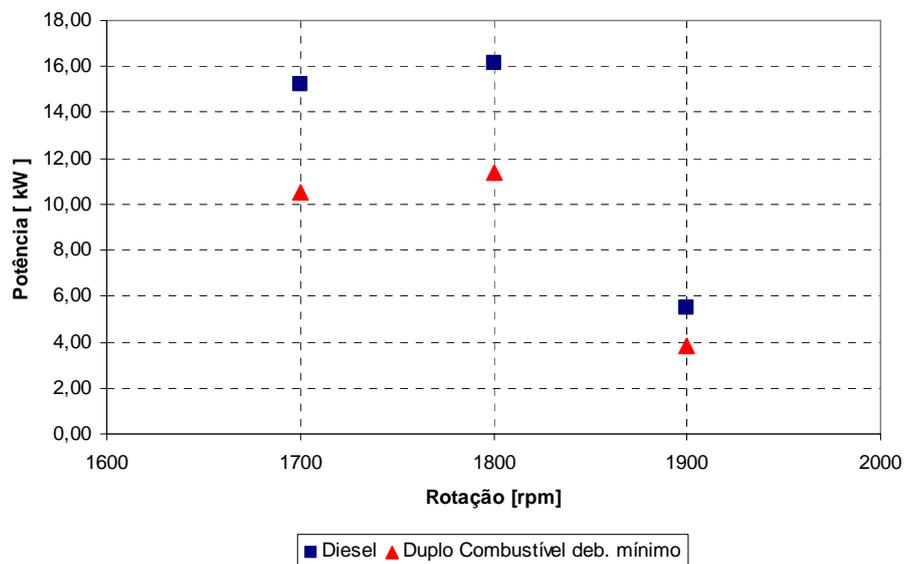


Figura 4.20 – Potência do motor Diesel versus rotação, a plena carga. Débito mínimo da bomba injetora.

4.6.2 – Consumo específico de combustível e taxa de substituição de Diesel

A Figura 4.21 indica o consumo específico de diesel (CEC) do motor nos modos de operação, com diesel puro e diesel e gás de síntese. Na condição padrão operacional, 1800 rpm, o consumo específico de diesel foi da ordem de 0,066 kg/kWh, comparado com 0,2845 kg/kWh com diesel puro. Esta redução no consumo específico, da ordem de 76,59% torna atrativa a tecnologia, a despeito dos 30% de redução na potência disponibilizada.

Este nível de redução no consumo específico poderia ser ainda mais acentuado caso se ajustasse o tempo de injeção. Nas outras rotações, 1700 e 1900 rpm, a taxa de substituição foi de 68,8 e 46,9%, respectivamente.

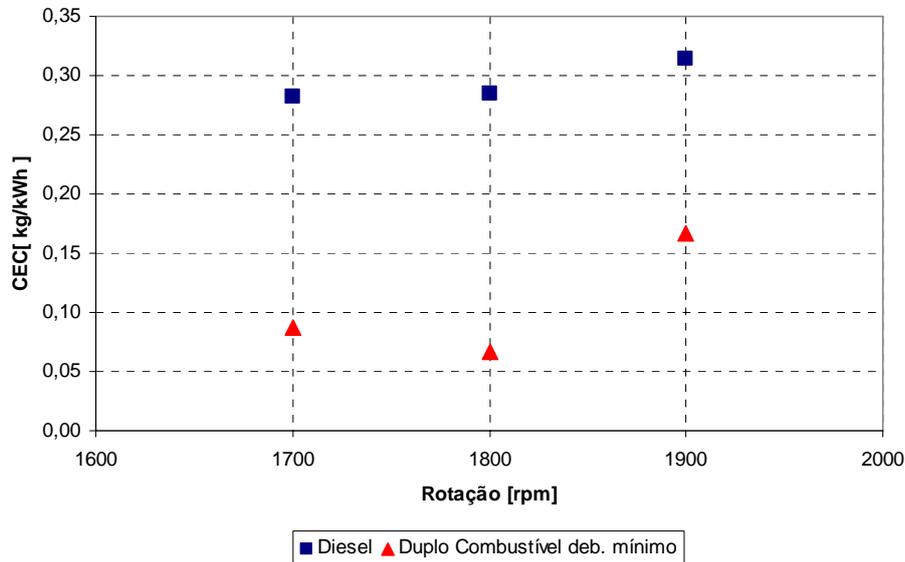


Figura 4.21 - Consumo específico de diesel – débito original modo diesel puro e débito reduzido. no modo duplo combustível.

4.6.3 – Curvas de Pressão no Cilindro

A Figura 4.22 apresenta a pressão dinâmica no interior do cilindro versus o ângulo de virabrequim em relação ao ponto morto superior (PMS), a 1800 rpm e a plena carga, para o sistema usando óleo diesel puro e no modo duplo combustível com a bomba injetora com débito reduzido de combustível. Na rotação de 1800 rpm o pico de pressão apresentou valores próximos a 60 bar enquanto que com diesel puro foi de 80,5 bar. Esta diferença acentuada nos níveis de pressão máximos, bem como no perfil das curvas explica a queda de potência com o emprego de gás de síntese e diminuição no débito da bomba injetora.

O perfil da curva de pressão dinâmica do motor, no modo duplo combustível e débito reduzido, ilustra o atraso acentuado na ignição da mistura que ocorre após, aproximadamente 20° após a o início da injeção. O ajuste no tempo da ignição certamente acarretará melhoria de desempenho. Cabe lembrar, contudo, que possíveis avanços são limitados pelo fenômeno de detonação.

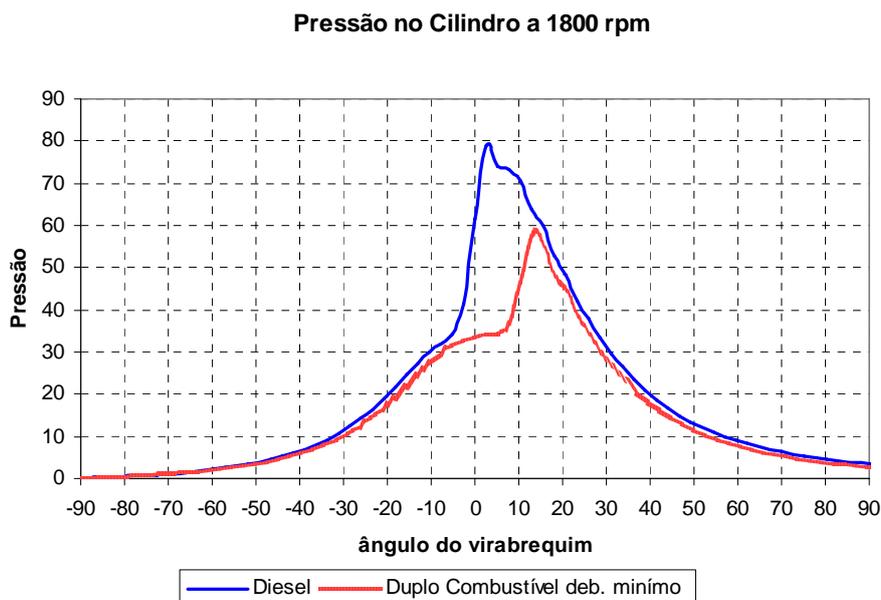


Figura 4.22 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1800 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.

A Figura 4.23 apresenta a curva de pressão dinâmica do cilindro a uma rotação de 1700 rpm. Neste regime as curvas guardam boa semelhança com aquelas obtidas para 1800 rpm. As observações anteriores (1800 rpm) se aplicam neste caso também.

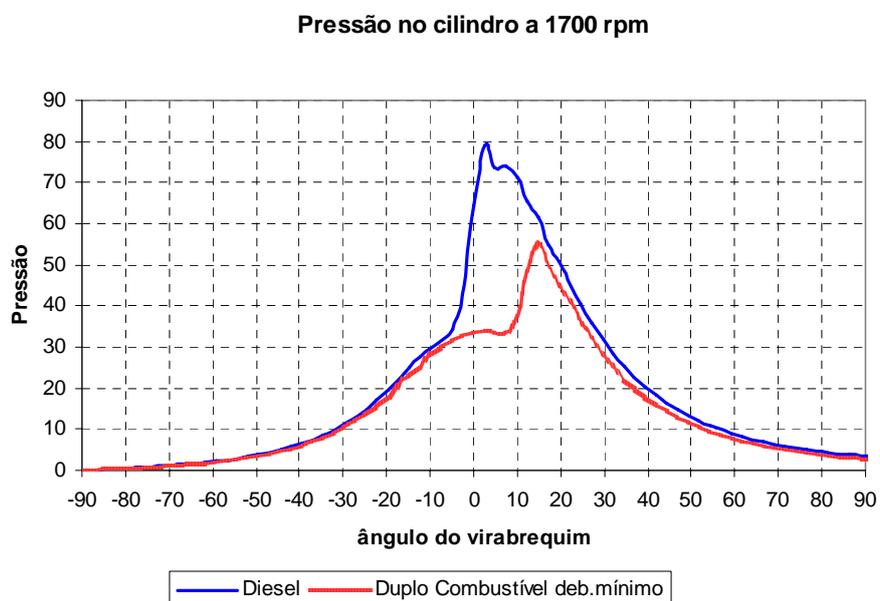


Figura 4.23 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1700 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.

Conforme mostrado na Figura. 4.24, a pressão dinâmica no cilindro na condição de diesel puro apresentou pico de pressão de aproximadamente 58 bar a 9° do PMS. Novamente, neste regime, o atraso na injeção e o baixo poder calorífico do gás atenuaram a pressão máxima no cilindro. Como consequência, a potência fornecida pelo motor sofre redução. Neste regime, o sistema de proteção do motor, ajustado no governador, altera de maneira significativa a operação do motor.

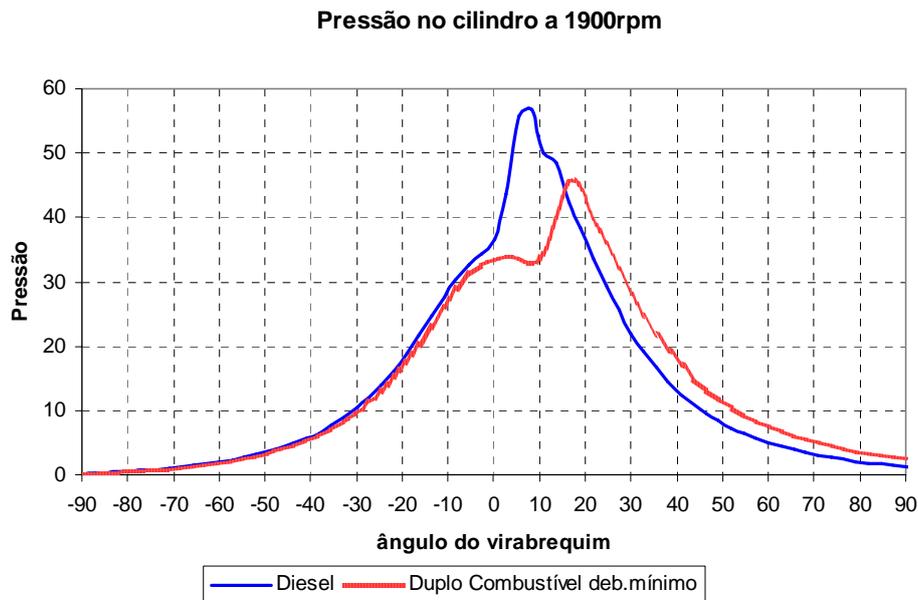


Figura 4.24 - Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1900 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.

4.7 - ANALISE DO FILTRO SECO

Após o encerramento dos ensaios verificou-se a eficiência dos componentes da bancada de gaseificação com relação a limpeza e qualidade do gás produzido. O filtro seco, composto de uma mistura de semente de açaí e tarugos de cedro, foi desmontado para a verificação dos resíduos. A tampa que lacrava o filtro foi retirada e verificou-se que o elemento filtrante existente na parte superior do recipiente encontrava-se limpo, sem nenhuma evidência de particulado ou alcatrão. A parte inferior do filtro por onde ocorre a entrada do gás, existe um reservatório para resíduos. Neste local, conforme a Figura 4.25 verificou-se uma mistura de água e material particulado. A presença desses materiais apenas na parte inferior do filtro, demonstram a eficiência do dispositivo e a sua necessidade para que os particulados de cinzas não atinjam o interior do motor, uma vez que, a mesma possuem

minerais muito abrasivos que podem causar desgaste no motor. Desta forma, pode concluir que o gás que alimentava o motor apresenta baixos níveis de contaminantes, como particulados e alcatrão.



Figura 4.25 – Filtro seco após realização dos ensaios. Elemento do filtro: semente de açaí e madeira de cedrinho.

4.8 - CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A partir da densidade a granel do combustível e pela geometria do reator, foi possível estimar seu consumo médio de biomassa, aferido numa balança, em alguns dos testes.

A densidade a granel do cedrinho é de 295,02 kg/m³, conforme os resultados apresentados pelo laboratório da Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento do Ibama. Com o funcionamento do gaseificador por um período de uma hora foi feita a medição do consumo de biomassa. A taxa de consumo de biomassa foi da ordem de 7,5 kg/h para uma geração de 11,4 kW no modo duplo combustível.

Com base no consumo de diesel, no poder calorífico do mesmo e na eficiência térmica estimada para o motor, segundo a tabela 4.1, foi possível estimar a parcela de energia proveniente deste combustível no total da potência gerada.

Tabela 4.1. Dados dos ensaios de bancada no dinamômetro a 1800 rpm

Modo-combustível	Potência [kW]	Consumo [l/h]	CEC [kg/kWh]
Diesel	16,13	5,50	0,2845
Duplo combustível	11,41	0,91	0,0666

Densidade diesel = 0,8336 [g/cm³] = 0,8336 [kg/L]

Modo Duplo combustível

A.Diesel

Fluxo mássico de diesel [kg/s]

$$m_{diesel} = CEC_{diesel} \cdot Potência \quad (4.1)$$

$$m_{diesel} = 0,0666 \text{ [kg/kWh]} \cdot 11,41 \text{ [kW]}$$

$$m_{diesel} = 0,7599 \text{ [kg/h]}$$

$$m_{diesel} = 0,000211 \text{ [kg / s]}$$

Energia disponível na amostra de diesel consumida [kW]

$$Q_{diesel} = m_{diesel} \cdot PCI_{diesel} \quad (4.2)$$

$$Q_{diesel} = 0,000211 \text{ [kg / s]} \cdot 42621,24 \text{ [kJ / kg]}$$

$$Q_{diesel} = 8,996 \text{ [kW]}$$

Como o rendimento térmico é de 29,71% da energia disponível do diesel que é convertida em potência de eixo tem-se

$$W_{eixo.diesel} = \eta_{diesel} \cdot Q_{diesel} \quad (4.3)$$

$$W_{eixo.diesel} = 0,2971 \cdot 8,99 \text{ [kW]}$$

$$W_{eixo.diesel} = 2,67 \text{ [kW]}$$

B.Biomassa

Quantidade de energia da biomassa utilizada

$$Q_{TOTAL} = Q_{gas} + Q_{diesel.efetivo} \quad (4.4)$$

$$Q_{gas} = 11,41 \text{ [kW]} - 2,67 \text{ [kW]}$$

$$Q_{gas} = 8,74 \text{ [kW]}$$

Consumo de biomassa do gaseificador 7,5 [kg/h] e PCI 4553 [kcal/kg] para o caso do cedrinho, conforme análise realizada pelo laboratório do Ibama.

$$CEC_{bio} = \frac{m_{bio}}{Q_{gas}} \quad (4.5)$$

$$CEC_{bio} = \frac{7,5 \text{ [kg/h]}}{8,74 \text{ [kW]}}$$

$$CEC_{bio} = 0,858 \text{ [kg/kWh]}$$

Energia total disponível pela amostra de biomassa

$$Q_{bio.disponivel} = m_{bio} \cdot PCI_{bio} \quad (4.6)$$

$$Q_{bio.disponivel} = 7,5 \text{ [kg/h]} \cdot 19062 \text{ [kJ/kg]}$$

$$Q_{bio.disponivel} = 39,71 \text{ [kW]}$$

Eficiência de conversão (Energia biomassa → Potência de eixo)

$$\eta_{\text{gaseificador..motor}} = \frac{Q_{\text{bio}}}{Q_{\text{bio.disponivel}}} \quad (4.7)$$

$$\eta_{\text{diesel}} = \frac{8,74 \text{ [kW]}}{39,71 \text{ [kW]}}$$

$$\eta_{\text{diesel}} = 0,219 = 21,9\%$$

Fração de combustível que contribui para a geração de potência no modo duplo combustível

$$\text{Diesel} \quad x_{\text{diesel}} = \frac{Q_{\text{diesel.efetivo}}}{\text{Potência}} \quad x_{\text{diesel}} = \frac{2,67 \text{ [kW]}}{11,41 \text{ [kW]}} \quad x_{\text{diesel}} = 0,2371 = 23,71\%$$

$$\text{Gás} \quad x_{\text{gas}} = \frac{Q_{\text{gas}}}{\text{Potência}} \quad x_{\text{gas}} = \frac{8,74 \text{ [kW]}}{11,41 \text{ [kW]}} \quad x_{\text{gas}} = 0,7659 = 76,59\%$$

Para se ter idéia da importância na utilização de gaseificadores na redução de problemas relacionados à escassez de energia em comunidade isoladas, apresenta-se uma simulação de demanda energética para um caso hipotético. Dois cenários são investigados, o primeiro em que energia gerada era provida de grupo geradores diesel utilizando óleo diesel puro, e o segundo com a utilização de gaseificadores e ajuste no débito do diesel objetivando operação no modo duplo combustível.

Os dados apresentados no estudo são baseados em uma residência durante o período de um mês, onde os aparelhos elétricos serão o mínimo necessário para prover conforto dessa família. Os aparelhos são um chuveiro, uma televisão, um aparelho de som, uma geladeira e um conjunto de seis lâmpadas incandescentes. As características dos equipamentos e o período médio de tempo de uso diário de cada um são mostrados na Figura 4.26 do simulador de consumo disponível do site da Companhia Energética de Brasília (CEB).



Figura 4.26 - Simulador de consumo de energia mensal de uma residência. Fonte: CEB (2007).

Assim foi considerado o uso do motor diesel na velocidade de 1800 rpm nas duas situações. Na primeira situação considerando o consumo específico de diesel de 0,2845 kg/kWh e sua densidade de 0,8336 g/cm³ se obtém um consumo mensal de diesel de 92,65 litros para atender a demanda. Num período de um ano ter-se-ia, aproximadamente, um consumo de 1111,90 litros para uma família. No segundo cenário deve-se considerar não apenas o consumo de diesel para a mesma demanda, mas também o consumo de biomassa. Para tal foi feito o cálculo para distinguir a fração de diesel e gás de síntese que contribuem para a geração energética no modo duplo combustível. Analisando os dados dos ensaios, foi constatado que dos 271,5 kWh/mês, 63,56 kWh seriam providos por diesel e os outros 207,94 kWh pela biomassa. Assim pelo CEC do diesel utilizado conforme a Figura 4.21, e fração de energia do diesel que contribui para a geração foi possível estimar um consumo mensal de 5,078 litros de diesel. Já para a biomassa com o consumo específico de 0,858 kg/kWh, seriam necessários 178,41 kg por mês para cada família.

Com esses valores já da para ter idéia de quanto é significativa a economia de diesel, assim como a diminuição de impactos ambientais associada à emissão do combustível fóssil com a utilização da tecnologia de Gaseificação de Biomassa.

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A instalação e operacionalização de um sistema de gaseificação do tipo “*downdraft*” estratificado é relativamente simples e de baixo custo, tornando a tecnologia bastante atrativa para pequenas comunidades. É importante destacar que o nível de operação julgado satisfatório foi obtido após a equipe trabalhar intensamente na unidade. Diversos fatores influenciam a operação da unidade. Com ganho de experiência e massa crítica as dificuldades foram amenizadas, possibilitando a execução deste trabalho.

A biomassa pode produzir até 60% de alcatrão quando submetida a degradação térmica. Níveis elevados de concentração de alcatrão no gás de síntese são indesejados. Análise detalhada dos componentes após o reator indica que a tecnologia *downdraft* apresentou baixíssimos índices deste composto nos gases de descarga da unidade. Os filtros foram examinados e não apresentaram depósitos de alcatrão, bem como o coletor de admissão do motor. Uma inspeção detalhada do motor não foi efetuada neste trabalho, visto que a tanto o conjunto motogerador e o motor da bancada dinamométrica não operaram por um grande número de horas. Tal inspeção deve ser efetuada após, aproximadamente, 1000 horas de operação.

O resfriamento posterior do gás combustível até a temperatura ambiente foi importante por dois motivos: condensa o vapor d'água presente no gás e melhora o desempenho do motor, uma vez que o rendimento volumétrico do mesmo é otimizado. Recomenda-se, portanto, que o motor seja avaliado com ajustes no tempo de injeção, bem como que se identifique o ponto ótimo para diferentes condições de carga e rotações.

O estudo mostrou que sem alterações no motor diesel (injeção original e controlada pelo governador) foi possível obter um percentual de substituição de diesel da ordem de 40%, sem perdas substanciais de potência e torque no motor. Já para a situação de regulagem de débito reduzido houve redução de 73% no consumo específico de diesel com perda associada de aproximadamente 30% de potência do motor. Além disso, os valores das

curvas de pressão dinâmica do cilindro do motor diesel indicaram possíveis melhoras de desempenho com ajuste no tempo de injeção.

Relativamente aos níveis de emissões, investigados experimentalmente para plena carga do motor a 18kVa, calculados como destaque para a faixa de rotação de 1800 rpm, que é o regime operacional para o grupo gerador, observaram-se:

- Redução média de 83% nas emissões de NO_x usando o gás de síntese, comparativamente ao diesel puro;
- Aumento de cerca de 2 vezes nas emissões de CO usando o gás de síntese, comparativamente ao diesel puro;
- Redução de 14% nas emissões de CO₂ usando o gás de síntese para baixas cargas, comparativamente ao diesel puro.

Não foram avaliadas, rigorosamente, as emissões de material particulado. A avaliação foi feita por observação visual e não se identificou aumento nos níveis de emissão de fumaça com o emprego de gás de síntese. Recomenda-se uma avaliação mais detalhada deste poluente, em trabalhos futuros.

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permite afirmar que a utilização do gás de síntese, produzido por gaseificadores do tipo “downdraft” estratificado, torna atrativa a operação de grupos geradores diesel destinados a eletrificação de pequenas comunidades isoladas. Como importante vantagem destaca-se a possibilidade de substituição parcial de óleo diesel sem importantes modificações operacionais na unidade. Isto proporciona maior versatilidade e segurança para a comunidade, visto que em períodos de escassez de matéria prima para a queima nos gaseificador ou problemas neste, pode-se rapidamente ajustar o motor para utilizar diesel puro, isto é, operar na condição original.

Recomenda-se, também, operar a unidade de gaseificação com injeção de água, preferencialmente vapor, na zona de redução. Esta técnica pode implicar numa maior proporção de hidrogênio nos gás de síntese. Testar a unidade com um turbocompressor na linha de admissão de ar seria interessante como meio de se minimizar a perda de potência da unidade quando operando no modo duplo combustível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas de Energia Elétrica do Brasil. MME (2005).

Barrio, M., Fossum, M., Hustad, J.E. A small-scale stratified downdraft gasifier coupled to a gas engine for combined heat and power production. Norwegian University of Science and Technology, Department of Thermal Energy and Hydro Power, (2000).

BEN, Balanço Energético Nacional de 2005 – ano base 2004, Ministério de Minas e Energia (2005).

Brandini, A., “Employment of Gás Producer and Gasifiers in Rural Áreas of Latin América, (1983).

Chee, C.S.,. The air gasification of wood chips in a downdraft gasifier. MSc Thesis, Kansas State University. / Senelwa, K.,. The air gasification of woody biomass from short rotation forests. Ph.D. Thesis, Massey University, New Zealand, (1987)

Cortes, M.; Sanchez, C.G. Projeto gaseificação de gramínea (*pennisetum purpureum*). Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.Encontro de Energia no Meio Rural, (2000).

FAO forestry paper 72, “Wood gas as engine fuel”, Food and agriculture organization of the United Nations, (1986).

Giltrap, D.L., McKibbin, R. and Barbes G.R.G., A Steady State Model of Gas-char Reactions in a Downdraft Biomass Gasifier, Solar Energy, 2003.

Grover, P. D.; Mishra, S. K. , “ Biomass briquetting: Technology and Practices “, Food and agriculture organization of the United Nations, (1996).

Hanaoka, T., Inoue, S., Uno, S., Ogi, T. and Minow, T., Effect of Woody Biomass Componentes on Air-steam Gasification, Biomass and Bioenergy, (2005).

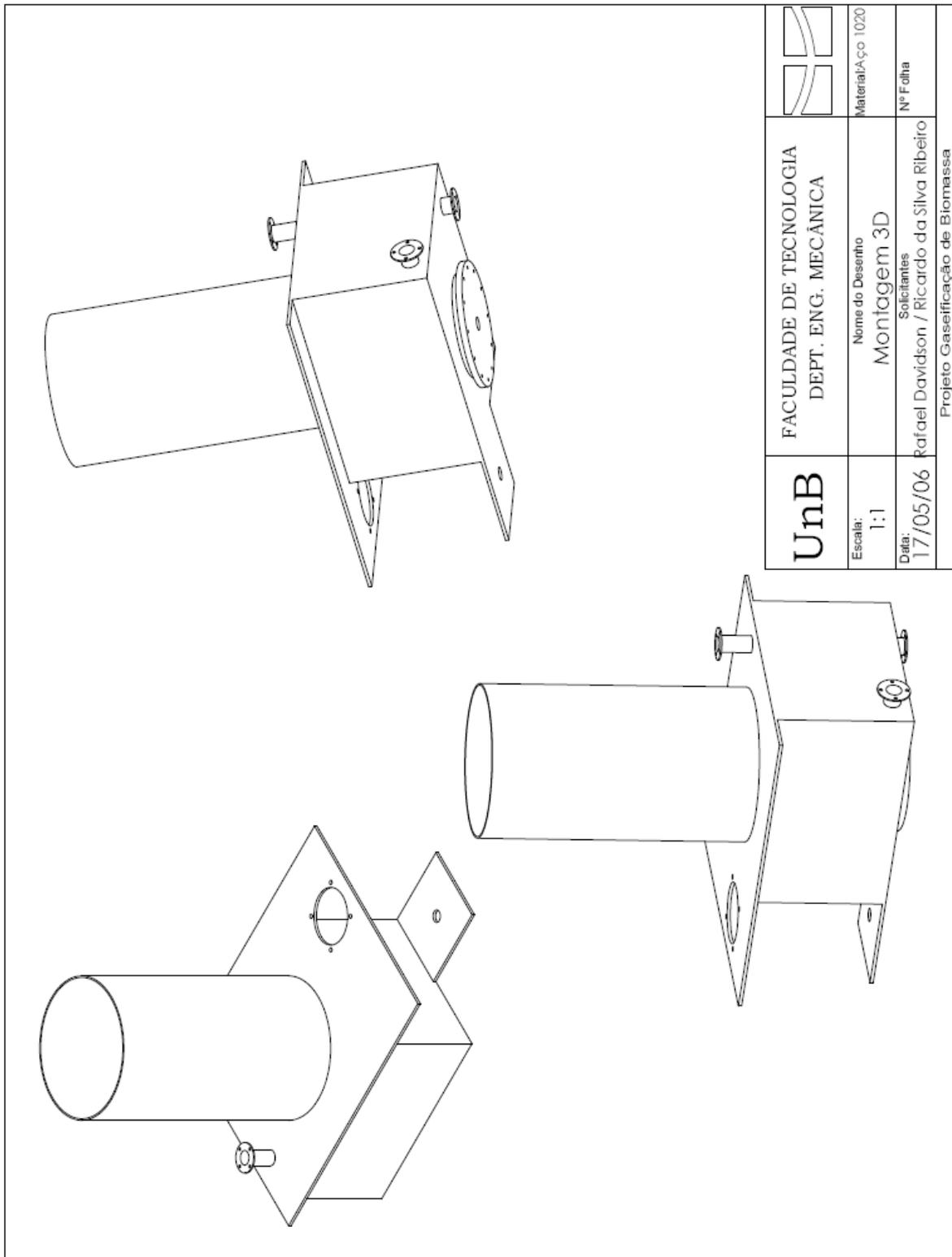
- Jayah, T.H., Aye, L., Fuller, R.J. and Stewart, D.F., Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying, *Biomass and Bioenergy*, (2003).
- Kandpal, T.C. Uma, R. Nishore, V.V.N , Emission characteristics of na electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes, *Biomass and energy* 27 pag 195-203, (2004).
- Kaupp A.; Goss, J.R, “State-of-the-Art for small Gas Producer-Engine Systems”, Final report to USDA, Forest Service (1984).
- Krushna N. Patil, Raymond L. Huhnke, Danielle D. Bellmer. Experimental Study of a Downdraft Gasifier. Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan , (2005).
- Larson, Eric D. , “Smalle scael gasification basead Biomass Power Generation”, Center for Energy and Environmental Etudies , Princeton , USA, (1998).
- Lin, K.S., Wang, H.P., Lin, C.-J. and Juch, C-I, A Process Development for Gasification of Rice Husk, *Fuel Processing Technology*. (1998).
- Midilli, A., Dogru, M., Howarth, C.R., Ling, M.J. and Ayhan, T., Combustible Gás Production from Sewage Sludge with a Downdraft Gasifier, *Energy Conversion & Management*, (2001).
- Nogueira, L.A., Trossero, M.A. “Dendroenergia: Fundamentos e aplicações.”, Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, Brasília. (2000).
- Peres, S., Gás do bagaço de cana: um combustível substituto do gás natural. Universidade de Pernambuco. XV Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, (1999).
- Reed, T.B., Das, A, "Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems", "Biomass Energy Foundation Press", Golden, Colorado, USA, (1988).

- Tiangco et al., “Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers”, biomass and bioenergy, (1996).
- Urna,R. ; Kandpal,T.C. ; Kishore,V.V.N. Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes.Indian Instituis of Technology.Biomass and Bioenergy , (2004).
- Warren, T.J.B., Poulter, R. and Parfitt, R.I., “Converting Biomass to Electricity on a Farm-sized Scale using Downdraft Gasification and a Spark-ignition Engine”, Bioresource Technology, (1995)
- Wander, P. R, “Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativa de energia renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul”, tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (2001).
- Wander, P.R., Altafini, C.R. and Barreto, R.M., Assessment of a Small Sawdust Gasification Unit, Federal University of Rio Grande do Sul State (UFRGS), Brazil .Biomass and Bioenergy 27 (2004) 467-476.
- Zainal, Z.A., Ali Rifau, Quadir, G.A, Seetharamu, K.N. “ Investigação Experimental de um gaseificador de biomassa de downdraft” , Biomassa e Bioenergy, (2002).

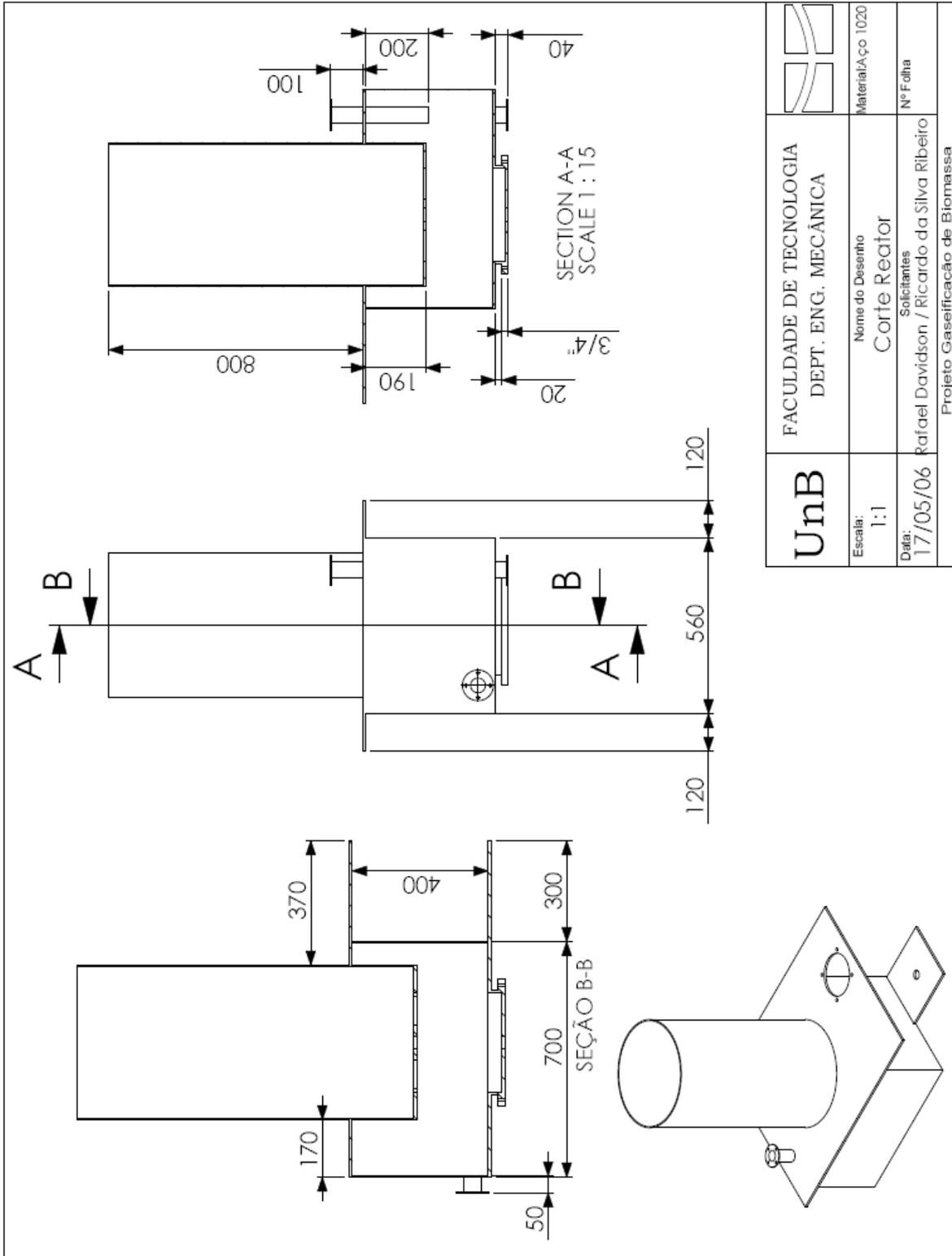
APÊNDICE

A - DESENHOS TÉCNICOS

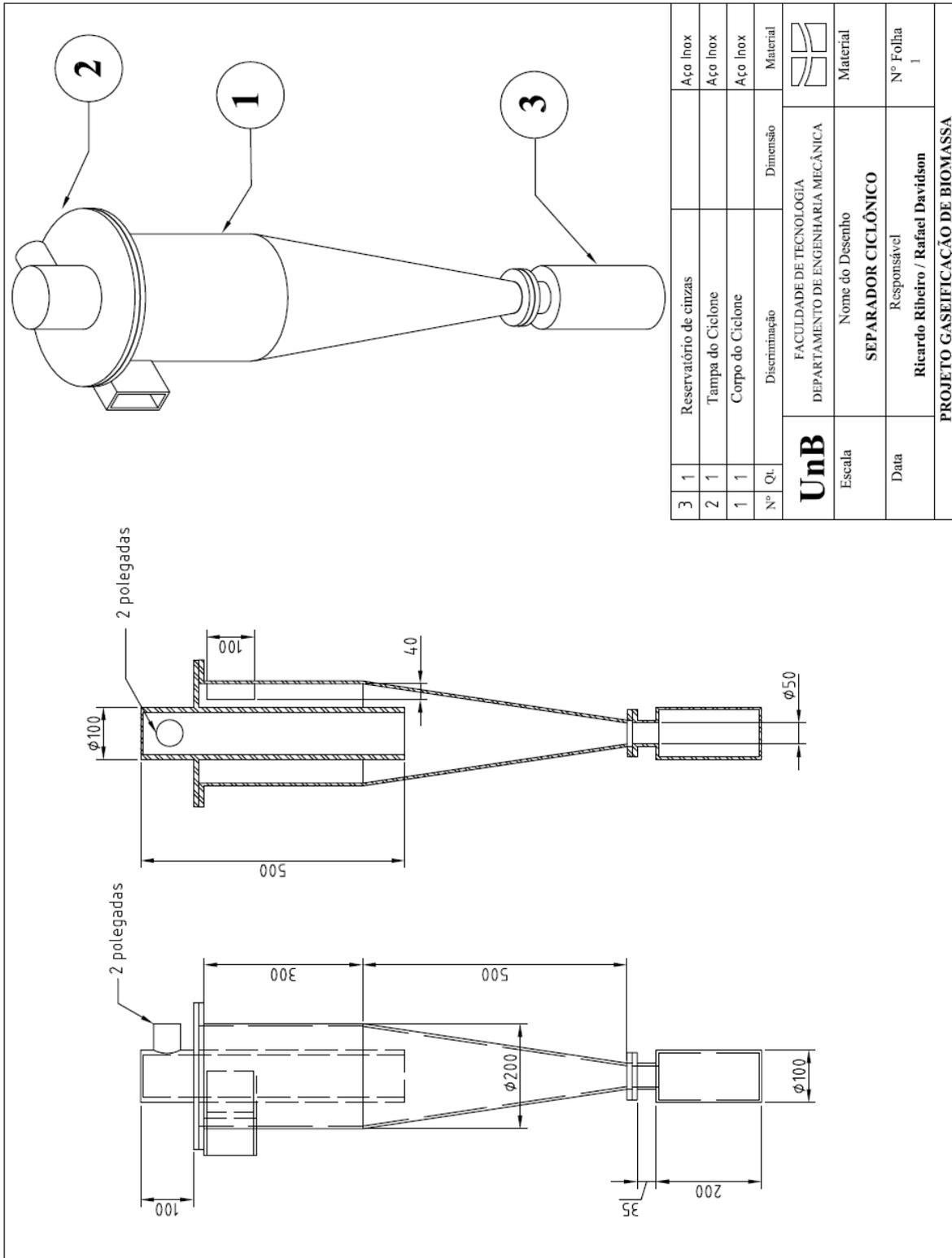
MONTAGEM DO REATOR 3D



CORTE NO REATOR

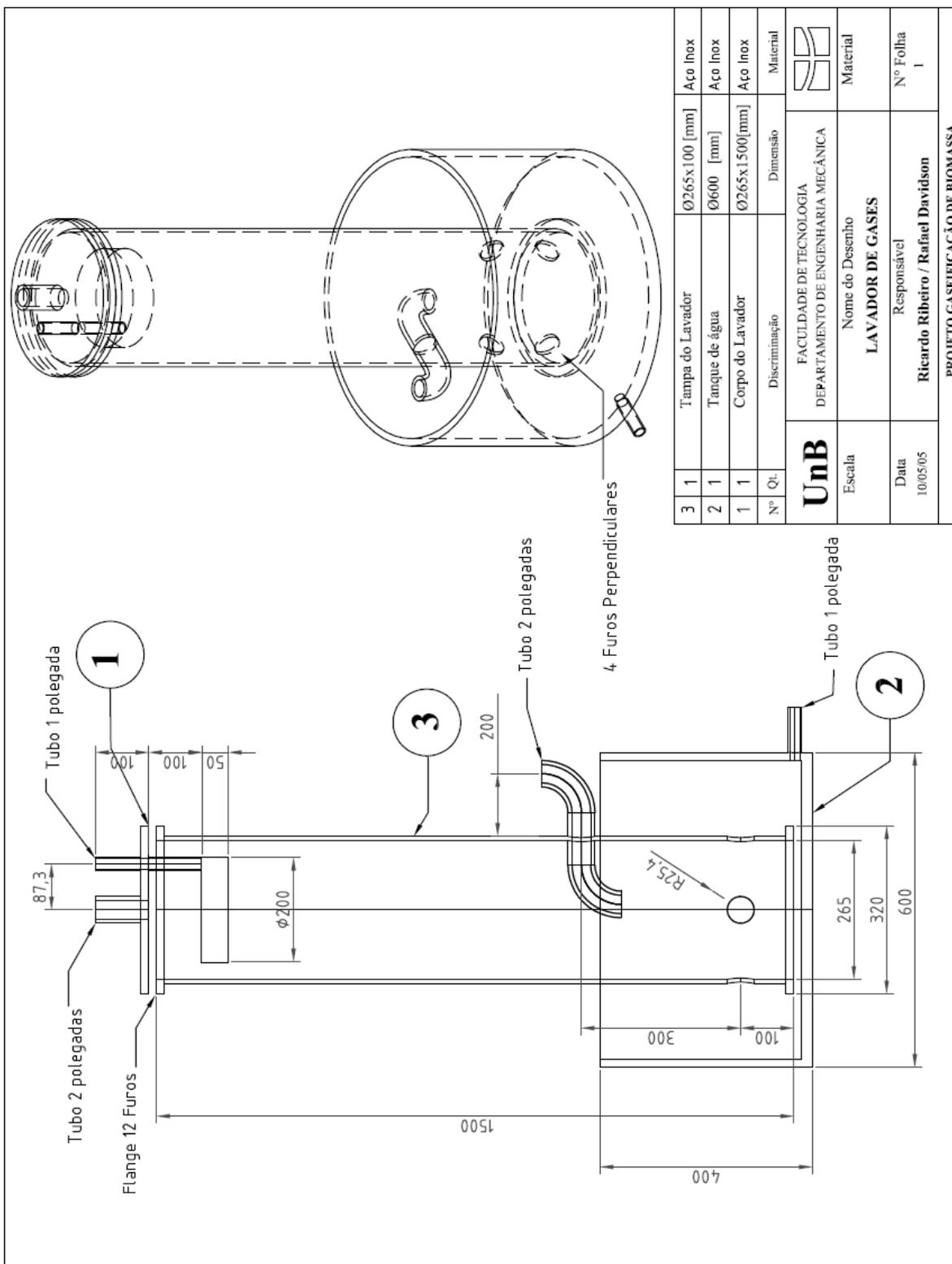


SEPARADOR CICLÔNICO



3	1	Reservatório de cinzas	Aço Inox
2	1	Tampa do Ciclone	Aço Inox
1	1	Corpo do Ciclone	Aço Inox
Nº	Qt	Discriminação	Dimensão
UnB FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
Escala	Nome do Desenho SEPARADOR CICLÔNICO		
Data	Responsável Ricardo Ribeiro / Rafael Davidson		
PROJETO GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA			
			Material Nº Folha 1

LAVADOR DE GÁS



TANQUE

