



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

*- Mestrado - Doutorado -*

**GERAÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA A  
PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE REJEITOS DE  
BIOMASSA**

por

Adriano Sitônio Rumão

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica*

**ADRIANO SITÔNIO RUMÃO**

**GERAÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA A  
PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE REJEITOS DE  
BIOMASSA**

*Tese de Doutorado apresentada ao curso  
de Pós-Graduação em engenharia  
mecânica da Universidade Federal da  
Paraíba, em cumprimento às exigências  
para obtenção do Grau de Doutor.*

***Orientador: Professor Dr. Emerson Freitas Jaguaribe***

# **GERAÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE REJEITOS DE BIOMASSA**

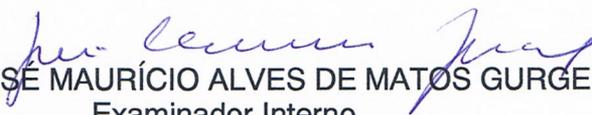
*por*

**ADRIANO SITÔNIO RUMÃO**

*Tese aprovada em 27 de março de 2013*



Prof. Dr. EMERSON FREITAS JAGUARIBE  
Orientador



Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL  
Examinador Interno



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO  
Examinador Interno



Prof. Dr. PIO CAETANO LOBO  
Examinador Externo



Prof. Dr. RENNIO FELIX DE SENA  
Examinador Externo

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por tudo que tenho e sou. Aos meus pais, José Djalma Rumão, e Rosângela Sitônio Rumão, aos meus irmãos, pelo exemplo de perseverança, honestidade, dedicação e altruísmo em tudo que realizaram. A minha esposa Ladjane Souza Rumão, pelo amor, carinho, amparo, e paciência em todos os momentos. Ao nosso filho Gustavo Souza Sitônio Rumão, que com sua presença me trouxe perseverança para o término deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

- Aos meus pais, irmãos, esposa, filho e familiares, pelo grande incentivo e suporte.
- Ao meu orientador professor Emerson Freitas Jaguaribe, pela competência, dedicação, amizade, apoio e credibilidade depositada em minha pessoa.
- Aos alunos e colegas do laboratório de Inovação, pela contribuição e ajuda para realização da parte experimental.
- A todos os examinadores que participaram do Exame de Qualificação e da avaliação da tese de doutorado, me honrando com suas contribuições.
- À todos que fazem parte da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela atenção dispensada;
- Ao colega Jackson da Silva Farias pelos serviços prestados.
- Aos Professores Rennio Felix de Sena do Departamento de Química Industrial, e Raul Rosenhain do LACOM da UFPB pelo suporte a análise da composição do gás produzido pelo gaseificador.
- À todos os demais que de algum modo contribuíram para conclusão deste trabalho.

# **GERAÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE REJEITOS DE BIOMASSA**

## **RESUMO**

O principal objetivo deste estudo é a geração de eletricidade usando um sistema formado por um gaseificador de biomassa, moderno, topo aberto (com um sistema de lavagem do gás), importado da Índia, e um grupo gerador de 36 kVA. O motor, originalmente a diesel MWM D229-4 foi convertido no Laboratório de Inovação da UFPB, para funcionar com gás pobre. O gaseificador foi projetado para alimentar um motor do tipo dual, com capacidade máxima de geração de 20 kWe. Foi usado, todavia, para alimentar um motor a diesel convertido para funcionar apenas com gás. Nestas condições não gerava potências superiores a 8,4 kWe, uma vez que ocorria parada brusca do motor, decorrente do seu encharcamento pela água de lavagem do gás. Este fato fez com que drásticas modificações no projeto original, fossem introduzidas. As alterações efetuadas possibilitaram a produção de gás suficiente para gerar 26 kWe. O motor foi testado com diferentes ângulos de ignição, 22°, 20°, 16° e 9°, e o gaseificador com dois diferentes tipos de rejeitos de madeira. Verificou-se que o ajuste do motor tinha grande influência nos desempenhos, do motor, do gaseificador e, conseqüentemente, no do sistema gaseificador/grupo gerador. Neste ajuste destacou-se o ângulo de ignição de 9° que permitiu maiores vantagens econômicas e melhores condições de funcionamento, quando todo o intervalo de potência ensaiado foi considerado. Levando em conta que a potência elétrica produzida com a biomassa residual foi 6 kW acima da estipulada para o sistema que funcionaria com o motor dual, isto é, com diesel e gás pobre, e tratando-se de um sistema ecologicamente correto, pode-se concluir sobre a importância do uso de gaseificadores de biomassa como sendo uma opção para resolver o dilema da energia elétrica no Brasil.

Palavras chave: Gaseificador de biomassa; Motor Diesel convertido; Geração de eletricidade.

# **GENERATION OF ELECTRIC POWER AND ENERGY FROM BIOMASS GASIFICATION OF REJECTS**

## **ABSTRACT**

The main goal of this study is the generation of electricity using a modern open top biomass gasifier, (having a water gas cleaning system) imported from India, and a 36 kVA engine-generator. The engine, originally a Diesel MWM D229-4 was converted at the Laboratório de Inovação da UFPB to run just with poor gas from the gasifier. The fact that the imported gasifier had been designed to feed a dual engine to generate at the maximum 20 kWe, caused some difficulty when associated with the converted engine which ran just with gas. Therefore, drastic changes needed to be introduced at the original gasifier because when the engine was running at levels of power greater than 8.4 kWe, a sudden interruption occurred due to flooding of the gas cleaning water. Upon the required modifications, the gasifier was able to produce sufficient poor gas to generate 26 kWe of power. The engine was tested for different ignition advance angles: 22°, 20°, 16° e 9° and for two different types of wood. It was noted that the angle adjustment had a great influence not only over the engine performance itself, but also on the efficiencies of the gasifier and consequently of the system composed by the gasifier and the electrical generator. In this adjustment the ignition advance angle of 9° stood out as one that could guarantee economic advantages and better performance for the system, when the entire experimental range of power is considered. Taking into account that in our experiments an additional of 6 kWe was obtained as compared to the designed value for the Indian system operating with a dual engine, running with diesel and poor gas, we can conclude that the present results and considerations point to the importance of using a biomass gasifier as a successful means of solving the electrical energy dilemma in Brazil.

Key-words: Biomass gasifier; Diesel converted engine; electricity generation

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO II</b> .....	6
<b>OTTOLIZAÇÃO DE MOTORES DIESEL</b> .....	6
<b>2.1 Introdução</b> .....	6
<b>2.2 Motores do ciclo padrão ar diesel</b> .....	6
2.2.1 Concepção dos motores Diesel.....	6
2.2.2 Particularidades dos motores Diesel.....	6
2.2.3 Desenvolvimento do sistema de injeção dos motores Diesel.....	9
<b>2.3 Motores do ciclo Otto</b> .....	10
2.3.1 Concepção dos motores do ciclo Otto.....	10
2.3.2 Particularidades dos motores do ciclo Otto.....	10
<b>2.4 Principais fatores responsáveis pela diferença entre o ciclo real e o teórico, nos motores de combustão interna</b> .....	12
<b>2.5 Considerações sobre a ottolização de um motor diesel</b> .....	13
2.5.1 A substituição dos bicos injetores.....	13
2.5.2 Fatores que limitam a taxa de compressão.....	14
2.5.3 Modificação da taxa de compressão.....	14
2.5.4 Mudanças características decorrentes da ottolização em motores Diesel.....	14
2.5.5 O sistema de ignição.....	15

2.5.5.1 Importância do ângulo de ignição do motor ottolizado.....	15
2.5.6 Eficiência térmica, $\eta T$ , em função da taxa de compressão.....	16
<b>2.6 Adaptações do motor MWM D-229-4 Ottolizado, para funcionar com gás pobre</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>18</b>
<b>GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Biomassa.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 A gaseificação.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Princípios do Processo de Gaseificação.....</b>	<b>20</b>
3.4.1 Reações de Gaseificação.....	21
3.4.1.1 Reações heterogenias gás - sólido.....	21
3.4.1.3 Craqueamento do alcatrão.....	21
<b>3.5 O gaseificador.....</b>	<b>22</b>
3.5.1 Tipos de Gaseificadores.....	22
3.5.1.1 Gaseificadores Contracorrente.....	23
3.5.1.2 Gaseificadores Concorrente.....	24
3.5.1.3 Gaseificadores de Fluxo Cruzado.....	25
3.5.1.4 Gaseificadores de Leito Fluidizado.....	26
<b>3.6 O Gaseificador usado nesse trabalho.....</b>	<b>28</b>
3.6.1 Componentes do gaseificador.....	28
3.6.2 Sistema de limpeza da água de lavagem do gás produzido.....	29
<b>3.7 Histórico do uso do processo de gaseificação.....</b>	<b>30</b>
<b>3.8 Publicações que relacionam o gás pobre, proveniente da gaseificação, à geração de eletricidade.....</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>34</b>

<b>MONTAGEM DO GASEIFICADOR INDIANO</b> .....	34
<b>4.1 Introdução</b> .....	34
<b>4.2 Construção do LI</b> .....	34
<b>4.3 Montagem do gaseificador</b> .....	35
4.3.1 Construção de uma estrutura metálica para uso de uma talha .....	36
<b>4.4 Conversão da tensão trifásica local de 380 V para 220 V trifásico, requerida pelos equipamentos eletro-eletrônicos do gaseificador</b> .....	38
<b>4.5 Sincronismo entre a água de saída da lavagem primária e retorno para caixa d'água</b> .....	39
 <b>CAPÍTULO V</b> .....	 40
<b>ALGUNS CONCEITOS E CORRELAÇÕES FÍSICO MATEMÁTICAS PERTINENTES</b> .....	40
<b>5.1 Introdução</b> .....	40
<b>5.2 Correlações Físico Matemática</b> .....	40
5.2.1 Poder calorífico inferior do gás pobre produzido .....	40
5.2.2 Poder calorífico inferior da biomassa (madeira).....	41
5.2.3 Poder calorífico inferior do gás, determinado a partir de sua composição.....	41
5.2.4 Massa específica do gás pobre produzido no gaseificador .....	42
5.2.5 Consumo de Biomassa.....	42
5.2.6 Fluxos de gás pobre, de alimentação do motor, e dos gases de escape .....	42
5.2.7 Massa específica da biomassa.....	43
5.2.8 Eficiência do gaseificador.....	44
5.2.9 Eficiência do grupo gerador (motor/gerador) .....	44
5.2.10 Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador .....	45
 <b>CAPÍTULO VI</b> .....	 46

<b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	46
<b>6.1 Introdução</b> .....	46
<b>6.2 O aparato experimental</b> .....	46
6.2.1 Instrumentos e equipamentos empregados .....	47
6.2.1.1 Serra de bancada elétrica.....	47
6.2.1.2 Balança eletrônica digital .....	48
6.2.1.3 Acendedor a gás .....	49
6.2.1.4 Pistola estroboscópica de ponto, ou de ponto indutiva .....	49
6.2.1.5 Tacômetro digital a laser .....	50
6.2.1.6 O simulador de carga.....	50
6.2.1.7 Sistema de controle de rotação.....	51
6.2.1.8 Vacuômetro analógico.....	51
6.2.1.9 Termobalança .....	52
6.2.1.10 Paquímetro .....	52
6.2.1.11 Analisador de Energia .....	53
6.2.1.12 Tubo de Pitot .....	53
6.2.1.13 Manômetro em “U” .....	54
6.2.1.14 Termômetro Digital com sensor de temperatura.....	55
6.2.1.15 Anemômetro digital.....	55
6.2.1.16 Bomba de vácuo .....	56
6.2.1.17 Notebook .....	56
6.2.1.18 Analisador de gases veiculares.....	57
6.2.1.19 Bomba centrífuga .....	57
6.2.1.20 Garrafa de coleta de amostras de gás pobre para análise .....	58
6.2.1.21Cromatógrafo gasoso acoplado a espectrômetro de massa (GCMS) .....	59
<b>6.3 Os primeiros experimentos com o sistema gaseificador/grupo gerador</b> .....	60
6.3.1 Testes preliminares .....	60

<b>6.4 Procedimentos experimentais para os testes após correções no sistema gaseificador / grupo gerador</b> .....	63
6.4.1 Padronização da biomassa .....	63
6.4.2 Verificação do teor de umidade da biomassa .....	64
6.4.3 Verificação da massa específica da biomassa.....	64
6.4.4 Aferição do conjunto tubo de Pitot com manômetro em “U” .....	65
6.4.5 Procedimentos para o início do funcionamento do gaseificador .....	65
6.4.6 Verificação qualitativa (visual) da intensidade da chama.....	66
6.4.7 Automação do motor com a variação da carga.....	66
6.4.8 Ajuste da mistura ar / gás pobre.....	67
6.4.9 Ajuste do ângulo de ignição.....	67
6.4.10 A partida do motor .....	68
6.4.11 Variação da carga aplicada ao motor .....	68
6.4.12 Avaliação do consumo de biomassa .....	68
6.4.13 Determinação da vazão de gás que alimenta o motor e dos gases de escape .....	69
6.4.14 Determinação da pressão do gás produzido que chega ao motor .....	69
6.4.15 Medição de temperaturas nos ensaios.....	69
6.4.16 Determinação da composição do gás produzido pelo gaseificador .....	70
6.4.17 Acompanhamento do volume de alcatrão produzido.....	70
<b>CAPÍTULO VII</b> .....	71
<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	71
<b>7.1 Introdução</b> .....	71
<b>7.2 Medidas de temperaturas</b> .....	71
7.2.1 Temperatura da água do sistema de lavagem e do gás pobre antes da primeira lavagem e depois da segunda.....	71

7.2.2	Temperaturas do gás pobre ao longo da tubulação de distribuição até o coletor de admissão do motor, do ar e da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor, para cada potência elétrica gerada.....	73
7.2.3	Temperatura dos gases de escape do motor e da parede externa do escapamento .	75
7.2.3.1	Temperatura dos gases de escape do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa .....	75
7.2.3.2	Temperatura da parede externa do escapamento do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa.....	76
7.2.4	Temperatura da água do sistema de arrefecimento do motor .....	76
<b>7.3</b>	<b>Determinação da massa de cinzas produzidas .....</b>	<b>77</b>
<b>7.4</b>	<b>Determinação do volume de alcatrão produzido .....</b>	<b>77</b>
<b>7.5</b>	<b>Determinação da pressão do gás pobre na linha de distribuição em função da potência elétrica gerada .....</b>	<b>78</b>
<b>7.6</b>	<b>Determinação da potência elétrica consumida pelos equipamentos do gaseificador</b>	<b>79</b>
<b>7.7</b>	<b>Determinação do fluxo dos gases de escape do motor em função da potência elétrica produzida .....</b>	<b>79</b>
<b>7.8</b>	<b>Teor de umidade da biomassa .....</b>	<b>80</b>
<b>7.9</b>	<b>Massa específica da biomassa .....</b>	<b>81</b>
<b>7.10</b>	<b>Poder Calorífico Inferior (PCI).....</b>	<b>82</b>
7.10.1	Determinação do PCI da biomassa .....	82
7.10.2	Determinação do PCI do gás pobre .....	82
7.10.3	Curva característica do PCI do gás pobre em função do teor de monóxido de carbono, desenvolvida neste trabalho .....	83
7.10.3.1	Valores do poder calorífico do gás pobre, obtidos em função do teor de CO a partir da Eq. 5.1, e outros.....	84
<b>7.11</b>	<b>Composição do gás pobre determinada a partir da análise Cromatográfica gasosa, com espectrômetro de massa (GCMS) e do analisador de gases veicular.....</b>	<b>86</b>
<b>7.12</b>	<b>Consumo específico .....</b>	<b>87</b>

7.12.1 Consumo específico de biomassa em função da potência elétrica do grupo gerador, utilizando diferentes ângulos de ignição .....	87
7.12.2 Consumo específico de gás pobre em função da potência elétrica do grupo gerador, para diferentes ângulos de ignição.....	89
<b>7.13 Eficiências.....</b>	<b>90</b>
7.13.1 Eficiência do grupo gerador na produção de potência elétrica, para o motor funcionando apenas com gás pobre, ajustado para diferentes ângulos de ignição .....	90
7.13.2 Eficiência do gaseificador, utilizando biomassa mista e densa, em função do poder calorífico do gás pobre.....	91
7.13.3 Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador .....	92
 <b>CAPÍTULO VIII.....</b>	 <b>94</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>94</b>
 <b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	 <b>98</b>
 <b>REFERÊNCIAS.....</b>	 <b>99</b>

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo diesel ideal (teórico). .....	7
Figura 2.2 – Ciclo diesel real (de acordo com BARROS,2006). .....	7
Figura 2.3 – Ciclo Otto ideal (teórico). .....	10
Figura 2.4 – Ciclo Otto real ( de acordo com BARROS,2006a). .....	11
Figura 2.5 – (a) Efeito do avanço de ignição na pressão final da combustão da mistura e (b) ocorrência da detonação devido a um avanço de ignição excessivo (MARTINS, 2006). ..	16
Figura 2.6 – Eficiência térmica do ciclo de ar-padrão Otto.....	16
Figura 2.7 - sistema de controle de gás de um motor de combustão interna, utilizado na Índia para um gaseificador com capacidade de 250 kg/h de consumo de biomassa (DASAPPA et al, 2003). .....	17
Figura 3.1- Gaseificador contracorrente e suas zonas de reações. ....	23
Figura 3.2- Gaseificador concorrente e suas zonas de reações.....	24
Figura 3.3- Gaseificador de fluxo cruzado e suas zonas de reações.....	26
Figura 3.4- Gaseificador de leito fluidizado.....	27
Figura 3.5 - Gaseificador e seus periféricos . .....	29
Figura 3.6 - Sistema de purificação da água de lavagem dos gases. ....	30
Figura 4.1 - Grupo gerador com motor MWM 229-4 otto-lizado, no Laboratório de Motores do CT/UFPB.....	35

Figura 4.2 – Estrutura metálica projetada para instalação de uma talha de 3 toneladas, utilizada na montagem do gaseificador. ....	36
Figura 4.3 – Fabricação e montagem, pela equipe do LI, da estrutura metálica para dar suporte a uma talha com capacidade de 3 toneladas. ....	37
Figura 4.4 – Reator suspenso, acima se sua plataforma de base, em processo de instalação. ....	37
Figura 4.5 – Gaseificador montado com seus periféricos responsáveis pelos processos de lavagens, resfriamento, limpeza da água e distribuição do gás pobre. ....	38
Figura 4.6 – Auto-transformador responsável pela conversão da tensão de 380 V trifásico para 220 trifásico. ....	39
Figura 4.7 – Sistema de sincronismo entre a bomba de alimentação da lavagem primária e a de retorno d'água para caixa. ....	39
Figura 6.1 – Gaseificador importado da Índia, montado no LI. ....	47
Figura 6.2 – Motor da MWM D229-4 convertido e já com os acessórios para ser alimentado pelo gás pobre. ....	47
Figura 6.3 - Serra de bancada elétrica. ....	48
Figura 6.4 – Balanças eletrônica digital, BEL (A) e de precisão (B). ....	48
Figura 6.5 - Acendedor a gás. ....	49
Figura 6.6 – Verificação do ângulo de ignição, utilizando uma pistola estroboscópica. ....	49
Figura 6.7 – Tacômetro digital a laser. ....	50
Figura 6.8 – Simulador de Carga (Banco de resistência A, gerador B e painel de controle C). ....	51
Figura 6.9 – Pick-up Magnético (A), Unidade Controladora de Velocidade (B) e Atuador (C). ....	51
Figura 6.10 - Vacuômetro utilizado na determinação da pressão do gás que alimenta o motor. ....	51

Figura 6.11 - Termobalança do Laboratório de Carvão Ativado. ....	52
Figura 6.12 - Paquímetro sendo utilizado para verificar as dimensões da biomassa. ....	52
Figura 6.13 – Analisador de energia registrando o consumo de energia, potência, etc, dos equipamentos de acionamento do gaseificador.. ....	53
Figura 6.14 – Tubo de Pitot, lado esquerdo, Fabricado no LI para determinação da vazão de gás pobre consumida pelo motor, e lado direito, instalado juntamente com o tubo em “U” com querosene e sendo aferido. ....	54
Figura 6.15 - manômetro em “U”, utilizado na determinação da vazão do gás consumido pelo motor.....	54
Figura 6.16 - Termômetros digitais (A) e sensores de temperaturas constituídos de termopares do tipo K (B). ....	55
Figura 6.17 - Anemômetro digital. ....	55
Figura 6.18 - Bomba de vácuo de deslocamento positivo.....	56
Figura 6.19 - Notebook conectado a central de análise de gases. ....	57
Figura 6.20 – Analisador de gases Discovery G4 da Alfatest. ....	57
Figura 6.21 - Bomba Centrífuga para bombeamento de água para lavagem do gás pobre. ....	58
Figura 6.22 - Garrafa de coleta de amostras de gás pobre, acoplada a bomba de vácuo. ...	59
Figura 6.23 - Espectrômetro de Massa com Cromatografia Gasosa (GCMS - QP 2010) do LACOM.....	59
Figura 6.24 - Grelha construída e instalada. ....	61
Figura 6.25 - Controlador de fluxo manual da mistura ar/gás. ....	62
Figura 6.26 - Gaseificador antes das modificações. ....	63
Figura 6.27 - Gaseificador após as modificações. ....	63
Figura 6.28 - Biomassa em pedaços para uso no gaseificador. ....	63

Figura 6.29 - Amostras 1,2,3 e 4 que formam a biomassa do tipo mista, e logo abaixo a biomassa do tipo densa. ....	64
Figura 6.30 - Chama piloto do queimador para inspeção visual da qualidade do gás pobre. ....	66
Figura 6.31 - Vista do sensor, parafuso de referência do sensor e goniômetro, instalados na polia motriz do motor. ....	67
Figura 6.32 – Topo do gaseificador, com visão da biomassa abaixo deste. ....	68
Figura 6.33 - Pesagem dos rejeitos de madeiras antes do abastecimento do gaseificador. .	69
Figura 6.34 – Purgador do alcatrão produzido na gaseificação da biomassa. ....	70
Figura 7.1 - Temperatura dos gases de escape do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa. ....	75
Figura 7.2 - Temperatura da parede externa do escapamento do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa. ....	76
Figura 7.3 - Pressão do gás pobre na linha de distribuição em função da potência elétrica gerada. ....	78
Figura 7.4 - Fluxo dos gases de escape do motor em função da potência elétrica produzida, para diversos ângulos de ignição do motor. ....	80
Figura 7.5 - Valores típico do Poder Calorífico Inferior do gás pobre, em função da potência elétrica gerada, com ângulos de ignição variados. ....	83
Figura 7.6 - Curva representativa do Poder Calorífico Inferior do gás proveniente da gaseificação de madeira em função do teor de monóxido de carbono, obtida neste trabalho, a partir dos dados de Garcia, 2002, e de Yoshikawa, 2006. ....	84
Figura 7.7 - Valores do poder calorífico do gás pobre, obtidos em função do teor de CO a partir da Eq. 5.1, e outros. ....	85
Figura 7.8 - Composição do gás pobre a partir da análise com Cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massa do LACOM. ....	86

Figura 7.9 – Composição do gás pobre da amostra enviada para o LACOM, identificada a partir do analisador de gases veiculares. ....	86
Figura 7.10 - Curvas de consumos específicos de biomassa mista e densa em função das potências elétricas produzidas pelo grupo gerador, para vários ajustes de ângulos de ignição do motor operando apenas com gás pobre.....	88
Figura 7.11 - Curvas de consumos específicos de gás pobre em função das potências elétricas produzida pelo grupo gerador, para vários ajustes de ângulos de ignição do motor. ....	89
Figura 7.12 – Curvas de eficiências do grupo gerador em função da potência elétrica gerada para as biomassas mista e densa, com vários ângulos de ignição. Motor operando, apenas, com gás pobre. ....	90
Figura 7.13 - Eficiência do gaseificador, utilizando biomassa mista e densa, em função do poder calorífico do gás pobre, para o grupo gerador funcionando com o motor ajustado com vários ângulos de ignição. ....	92
Figura 7.14 - Curvas de eficiências do sistema gaseificador/grupo gerador em função das potências elétricas produzidas, utilizando biomassa mista e densa, com vários ângulos de ignição, e o motor operando apenas com gás pobre. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição volumétrica do gás produzido pela Forest Industry Division (FAO, 1986). .....	20
Tabela 7.1 - Temperaturas da água do sistema de lavagem e do gás pobre para diversas potências produzidas pelo gerador, fazendo-se uso dos vários tipos de biomassa considerados (Vazão da água da lavagem primária 6000 l/h). .....	72
Tabela 7.2 - Temperaturas do gás pobre ao longo da tubulação de distribuição até o coletor de admissão do motor, do ar e da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor, para cada potência elétrica gerada .....	74
Tabela 7.3 – Teor de umidade das amostras dos rejeitos de madeira utilizados como biomassa no gaseificador, obtidos em triplicata. ....	81
Tabela 7.4 – Valores, em triplicata, de amostras das massas específicas dos rejeitos de madeira utilizados como biomassa no gaseificador .....	81

## NOMENCLATURA

*CB* – Consumo de biomassa do gaseificador ( $\text{kg/m}^3$ ).

*CT* – Centro de Tecnologia.

*d* - diâmetro da tubulação de escoamento (m).

*EDC* – Electronic Diesel Control.

*EPRI* – Electric Power Research Institute.

*g* - aceleração devido a gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

*GCMS* – Cromatógrafo Gasoso acoplado a Espectrômetro de Massa.

*GGG* – Gaseificador/Grupo Gerador.

*GN* – Gás Natural.

*h* - deslocamento do fluído no tubo em “U” (m).

*HDI* – High Pressure Diesel Injection.

*i* - cada um dos componentes do gás.

*ICE* – Ignição por Centelha.

*ICO* – Ignição por Compressão.

*IISc/CGPL* – Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory.

*IPT* – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

*JTD* – Unijet Turbo Diesel.

*LACOM* – Laboratório de Combustíveis da UFPB.

*LCA* – Laboratório de Carvão Ativado.

LI – Laboratório de Inovação.

LP – Liquefeito de Petróleo.

LTE – Laboratório de Termoenergética.

$M_{ad\_g}$  - massa adicionada ao gaseificador no intervalo de tempo (kg).

MCI – Motores de Combustão Interna.

MME – Ministério de Minas e Energia.

$M_s$  – Vazão mássica de biomassa utilizada no gaseificador (kg/s).

$m_v$  - massa correspondente ao volume da amostra (kg).

PCI – Poder Calorífico Inferior ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ).

$\text{PCI}_{\text{biomassa}}$  - poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador ( $\text{J}/\text{kg}$ ).

$\text{PCI}_{\text{gás}}$  - poder calorífico inferior do gás produzido, exclusivamente, pela gaseificação de madeira ( $\text{J}/\text{Nm}^3$ ).

$\text{PCI}_{\text{gás}_{\text{comp}}}$  - Poder Calorífico Inferior do gás combustível a partir de sua composição ( $\text{kcal}/\text{Nm}^3$ ).

$\text{PCI}_{\text{Madeira}}$  – Poder Calorífico Inferior da madeira ( $\text{kcal}/\text{kg}$ ).

PCS - Poder Calorífico Superior ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ).

PET – Politereftalato de Etileno.

$Pe_{\text{útil}}$  - potência elétrica útil (W).

$PM$  - peso molecular (g).

$\text{PMa}$  – Peso Molecular aparente (g).

PMI – Ponto Morto Inferior.

PMS – Ponto Morto Superior.

$Q_{v\_gás}$  - Fluxo volumétrico de gás pobre ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

R – Coeficiente de correlação de Pearson.

$T_{CH2}$  - temperatura do gás pobre após trocar calor com a biomassa na parte superior do reator ( $^{\circ}C$ ).

$T_{CH3}$  - temperatura do gás pobre após a lavagem primária ( $^{\circ}C$ ).

$T_{CH4}$  - temperatura do gás pobre após a lavagem secundária ( $^{\circ}C$ ).

$T_{gás\_ac}$  - temperatura do gás pobre logo após a segunda lavagem com água do chiller ( $^{\circ}C$ ).

$T_{gás\_adm}$  - temperatura do gás pobre ao chegar na entrada do coletor de admissão do motor ( $^{\circ}C$ ).

$T_{gás\_dl}$  - temperatura do gás pobre depois da primeira lavagem ( $^{\circ}C$ ).

$T_{H2Ochiller}$  - temperatura da água do sistema de lavagem secundária, proveniente do chiller ( $^{\circ}C$ ).

$T_{H2Oent}$  - temperatura da água do sistema de lavagem primária, antes do processo ( $^{\circ}C$ ).

$T_{H2Osaída}$  - temperatura da água do sistema de lavagem primária, depois do processo ( $^{\circ}C$ ).

$T_{Mist\_ar/gás}$  - temperatura da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor ( $^{\circ}C$ ).

UFPB – Universidade Federal da Paraíba.

$V_{gás}$  – Velocidade do gás pobre na tubulação de alimentação do motor (m/s).

$V_m$  - volume correspondente a massa da amostra ( $m^3$ ).

X - fração molar.

$\%C_2H_2$  - teor em percentual de etino no gás.

$\%C_2H_4$  - teor em percentual de eteno no gás.

$\%CH_4$  - teor em percentual de metano no gás.

$\%CO$  - teor em percentual de monóxido de carbono no gás.

$\%H_2$  - teor em percentual de hidrogênio no gás.

$\%UM$  - valor, em percentual, da umidade contida na madeira.

$\gamma_{gas}$  - peso específico do gás que está escoando no tubo ( $N/m^3$ ).

$\gamma_{liq}$  - peso específico do líquido no tubo em “U” ( $N/m^3$ ).

$\eta_T$  - Eficiência Térmica do motor de combustão interna.

$\eta_{gaseif.}$  - Eficiência do gaseificador na gaseificação de biomassa (%).

$\eta_{gg}$  - Eficiência do grupo gerador (%).

$\eta_{sist.}$  - Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador (%).

$\rho_{Gás}$  - Massa específica do gás pobre ( $kg/m^3$ ).

$\rho_{bio}$  - Massa específica da biomassa ( $kg/m^3$ ).

$\Delta t$  - intervalo de tempo em que a massa foi adicionada ao gaseificador (h).

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O Brasil é o décimo maior consumidor de energia do mundo, apresentando uma demanda por energia elétrica sempre crescente. Assim é que, nos últimos doze anos essa demanda evoluiu em quase 38 %, enquanto a média mundial foi de 30 % (FERNANDES, 2012). E como era de se esperar o consumo de energia primária, também, tem se elevado significativamente, o que vem exigindo, nestas últimas décadas, imensos esforços para se aumentar a produção de energia, buscando-se, inclusive, a diversificação de fontes. A auto-suficiência na produção de petróleo (O DIA ONLINE, 2006) anunciada em 2006 demonstra o sucesso desses esforços.

A constante elevação na produção de petróleo, não tem assegurado, todavia, o atendimento dos anseios da modernização da sociedade brasileira, que se torna, ainda, mais crítica com o alargamento populacional. Por sua vez, demonstrando falta de planejamento e/ou conhecimento de causa, o governo não tem, com a urgência que se faz necessário, resolvido problemas relacionados à embargos a hidroelétricas, como a de Belo Monte, a ser construída no Rio Xingu, ou as do Rio Parnaíba, PI, nem, tampouco, investido em fontes alternativas. Sem maiores opções, reduz, ainda mais, as possibilidades de suprir o deficit, sempre crescente de energia, desestimula o uso do Gás Natural, GN, veicular e ou industrial, para garantir o funcionamento de usinas térmicas, como a de Uruguaina, no Rio Grande do Sul, e incentiva o emprego de óleos pesados na indústria. Por sua vez, o horizonte brasileiro, no plano da energia elétrica, não é animador: 1. Considerando-se todos os empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, que chega a 129.174.669 kW, com 89 % proveniente de fontes renováveis, 74 % advêm de centrais hidroelétricas (BEN, 2012; BIG, 2013); 2. A continuidade na exploração do potencial hidrelétrico, ainda disponível, está muito comprometida por problemas de viabilidade econômica e, no caso de certas regiões, por restrições relacionadas ao impacto ambiental,

tornando os investimentos nesse tipo de geração muito elevados. 3. O consumo de energia elétrica em 2012, subiu 3,3 %, em relação ao ano anterior (ITAIPU BINACIONAL, 2013). 4. Há expectativa, de que em 2020, o consumo de eletricidade seja 61% superior ao ano de 2010 (TOLMASQUIM, 2012).

O acelerado aumento de consumo de energia elétrica, dificulta a ampliação da rede de distribuição, tendo como efeito principal, o crescimento de sua indisponibilidade, o que atinge diretamente as comunidades isoladas da rede básica, vítimas do alto custo de seu provimento (FALL, 2000; MCKENDRY, 2002; TORRES et al, 1977). Deve-se observar, ainda, que o custo de manutenção e as perdas na distribuição no campo, são maiores do que para usuários urbanos. Dado o baixo poder aquisitivo das comunidades isoladas, o acesso à rede elétrica exige subsídios. Visando-se reduzir estes subsídios, a qualidade do serviço existente tende a ser depreciada, tornando mais difícil, a ampliação da rede, e logo a inclusão daqueles que não são atendidos pelo serviço. Verifica-se, por outro lado, que até aquelas comunidades atendidas pela energia gerada por termoelétricas, que, em geral, queimam combustíveis fósseis, têm dificuldades em pagar a conta de energia, a tal ponto do Governo se propor a publicar uma resolução para a adoção de horário de abastecimento inferior a 24 horas. Esta medida visava reduzir o impacto da operação dos sistemas isolados na Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC) e nas despesas de operação e manutenção dos equipamentos, ficando o atendimento mais adequado nos horários de maior consumo, quando o aumento da carga possibilita melhor desempenho das unidades geradoras (ANEEL, 2006). As principais razões para tal medida seriam: o elevado consumo das unidades geradoras termelétricas usadas para o atendimento a essas populações; os problemas de acesso, de transporte e de armazenamento de combustível; e as dificuldades de investimento para a substituição da energia termelétrica por fontes alternativas de geração. Entende-se, porém, que o resultado de dispositivos legais como estes levam a redução do acesso à energia, e logo à diminuição das taxas de emprego e dos níveis de renda, depreciando, em muito, o poder aquisitivo dessa população, e provocando um êxodo crescente. Contribui, ainda, para o desperdício de energia, e a destruição das matas e bosques, ainda, existentes, quando buscando-se diminuir custos queima-se de forma ineficiente a madeira, muitas vezes, de origem ilegal.

Percebe-se, entretanto, que, como uma compensação da natureza, via de regra, há nestas comunidades uma grande produção de resíduos de biomassa à espera de tecnologia apropriada, para aproveitar o seu conteúdo energético. Um estudo feito pela Universidade

Tecnológica Federal do Paraná, concluiu que se utilizada a casca de toda produção de arroz do Brasil, seria possível gerar cerca de 268,69 MW, representando 0,21% na produção energética total do País (SILVA et al, 2012). Ademais, deve ser observado que o baixo custo dos rejeitos, e a diminuição da agressão ao meio ambiente, que seu aproveitamento pode oferecer, tornam a bioeletricidade uma excelente fonte para suprir déficits de eletricidade. De fato, a produção de energia elétrica a partir da biomassa tem sido defendida como opção importante, tanto para os países em desenvolvimento (JAGUARIBE et al, 1991, 1992, 2002; LEÃO et al, 1995; LOBO et al, 1992a, 1992b, 2002; NOGUEIRA, 1995; OVEREND e BAIN, 1995; SILVA et al, 2012; WILLIAMS e LARSON, 1992), quanto para os países da União Européia (GRASSI; 1993, HOLLINDALE et al, 1995; KURKELA et al, 1991; RUYCK et al, 1996) e para os Estados Unidos (OVEREND, 1996; ROBINSON *et al*, 1998).

Há duas alternativas para o uso da biomassa. Uma é a produção de combustível líquido (álcool, biodiesel, etc.) que é de fácil armazenamento, embora de elevado custo. A segunda é a produção de gás, que nem sempre é simples de se estocar, mas oferece outras vantagens de uso, a ponto de tornar-se competitivo até mesmo com a hidroeletricidade. A produção de gás pela fermentação de resíduos fermentescíveis é menos conveniente do que pela pirólise de resíduos de biomassa ligno-celulósica, que fornece como produto o gás pobre, ou manufaturado.

O uso da energia da biomassa através do gás pobre é, de fato, uma extraordinária opção energética que segue a tendência mundial da evolução na utilização dos combustíveis gasosos, motivada, sobretudo, pela possibilidade da “descarbonização da economia” (GRÜBLER, 1998, NAKICENOVIC, 1997), uma vez que tais combustíveis possuem pequenas cadeias de carbono. De acordo com a Electric Power Research Institute, EPRI, o mundo necessita desacelerar a descarbonização por um fator igual a três, até 2030, (EPRI, 1999). Assim, o desafio de hoje consiste, em se estimular e se por em prática, com mais intensidade, três conceitos básicos já muito em voga, dois relacionados com a substituição de: 1. processos energéticos (de consumo, ou de geração de energia), por outros mais eficientes. 2. fontes energéticas poluentes, pelo uso de fontes “verdes” (PHILIPPE, 2002). O terceiro diz respeito a utilização da co-geração, aproveitando-se, por exemplo, o calor de rejeito. Atualmente estudos indicam a existência de um grande potencial para a utilização de resíduos vegetais como lenha, restos agrícolas (sabugo de milho, cascas de cereais etc.) e principalmente rejeitos das indústrias de açúcar e álcool

(bagaço de cana, palha da cana) e celulose (cascas de árvores) em gaseificadores. É neste quadro que a tecnologia de gaseificação de biomassa é capaz não só de tornar viável, como também mais interessante a utilização de combustíveis renováveis, contribuindo para uma condição de melhor proveito do imenso potencial renovável existente em países como o Brasil. É notório que o emprego do gás pobre produzido por gaseificadores modernos, associado a grupos geradores, fazendo o aproveitamento da energia térmica veiculada pelo gás pobre, ou eliminada pelo escape, pode permitir a aplicação prática desses conceitos na zona rural brasileira.

Com a vantagem da utilização de combustíveis gasosos, a busca pela ottolização de motores diesel, vem sendo muito cobiçada por empresas que os utilizam em grupos geradores, e em processos de acionamentos. Isto se deve, ao motor Diesel ter uma característica que não é inerente ao motor originalmente produzido para funcionar com ignição por centelha, a robustez. É esta qualidade que permite ao motor Diesel ottolizado trabalhar em condições normais, consideradas impossíveis de serem suportadas por motores originalmente do ciclo Otto. Também, em favor desta busca, deve ser lembrado que os motores do ciclo Otto com a robustez dos diesel custam de duas a três vezes o valor do diesel com equivalente potência. A ottolização de um motor diesel consiste na substituição de diversos componentes, para mudança do ciclo de ignição por compressão, ICO, para o ciclo de ignição por centelha, ICE. A sua grande vantagem é a possibilidade de geração de energia totalmente independente da utilização do óleo diesel, de forma otimizada, o que não é possível com motores duais (diesel/gás).

Assim, visando o estudo do processo de gaseificação na geração de energia elétrica, utilizando um motor ottolizado pelo Laboratório de Inovação, LI, foi adquirido um gaseificador de leito fixo concorrente “topo aberto”, moderno, do Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, usado originalmente, na Índia, para alimentar um motor do tipo dual, com uma capacidade máxima de geração de 20 kWe .

O gaseificador, importado, foi montado no Laboratório de Inovação, LI, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. O gás produzido pelo aproveitamento do conteúdo energético de rejeitos de biomassa alimenta um motor Diesel MWM D229-4, ottolizado que opera apenas com o gás pobre. Ao motor, está acoplado um gerador elétrico de 36 kVA de potência, tendo, em princípio, como meta, produzir uma

potência máxima de 20 kWe utilizando apenas como combustível, o gás originado do gaseificador.

## **CAPÍTULO II**

### **OTTOLIZAÇÃO DE MOTORES DIESEL**

#### **2.1 Introdução**

Neste capítulo serão apresentadas as particularidades e concepções dos motores dos ciclos Diesel e Otto, os aspectos essenciais à conversão do motor Diesel para Otto, ou seja, à ottolização, assim como as adaptações desenvolvidas no motor ottolizado para funcionar com o gás pobre.

#### **2.2 Motores do ciclo padrão ar diesel**

##### **2.2.1 Concepção dos motores Diesel**

O motor Diesel, ou motor de ignição por compressão, ICO, inventado e patenteado por Rudolf Christian Karl Diesel em 1897, engenheiro mecânico alemão, é um motor de combustão interna que funciona sob os efeitos de uma reação química, uma explosão controlada e espontânea, conseguida quando o óleo é injetado ao ar comprimido, a alta pressão e temperatura (MORAN e SHAPIRO, 2008). Nestes motores, a ignição se dá sem a necessidade de uma centelha elétrica, ou de uma superfície aquecida, por uma fonte externa de energia (TAYLOR, 1971).

##### **2.2.2 Particularidades dos motores Diesel**

Na Figura 2.1 se visualiza o gráfico de pressão (P) em função do volume (v), para o ciclo Diesel ideal, com os seus diversos estágios:

- 1 – 2 : compressão isentrópica (entropia constante)
- 2 – 3: fornecimento de calor,  $q_{23}$ , a pressão constante
- 3 – 4: expansão isentrópica
- 4 – 1: rejeição de calor,  $q_{41}$ , a volume constante

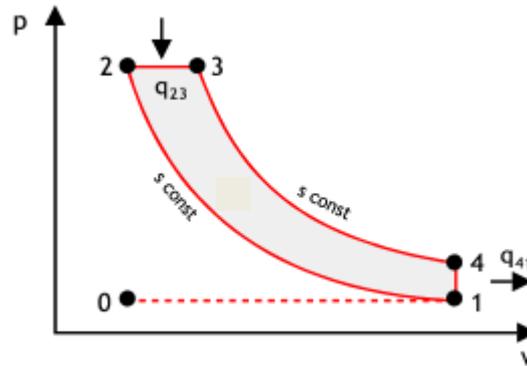


Figura 2.1 – Ciclo diesel ideal (teórico).

Uma vez que, na prática, os processos não ocorrem adiabaticamente, a pressão constante, e a volume constante, o ciclo Diesel próximo do real, ao levar em conta as perdas de calor e por atrito, passa a ter uma forma diferente daquela típica do ciclo ideal, ver Figura 2.2

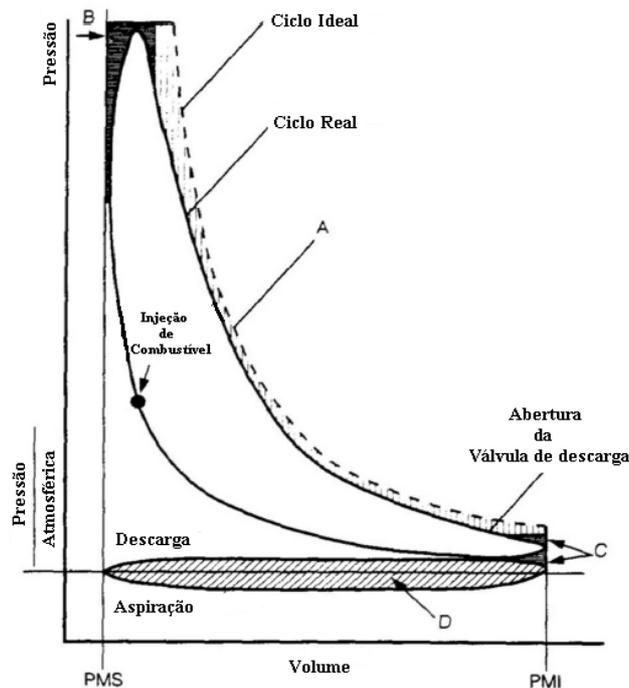


Figura 2.2 – Ciclo diesel real (de acordo com BARROS,2006).

Verifica-se, na Figura 2.2, regiões inerentes às perdas em um ciclo Diesel real, assim caracterizadas:

1. Região D: perdas advindas do bombeamento de ar, nos processos de admissão e descarga;
2. Região B: perdas, no processo de ignição, relacionada com a combustão não instantânea, e a dissociação do combustível em elementos, tais como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  e em outros compostos, com a absorção de calor;
3. Região A: perdas, na expansão, provocadas pela troca de calor com o sistema de arrefecimento do motor;
4. Região C: representa as perdas, advindas da abertura antecipada da válvula de descarga.

Do ponto de vista do funcionamento do motor real, é possível a observação de algumas particularidades, tais como:

- 1- No ciclo, Figura 2.2, região D, verifica-se a existência do processo de admissão de ar e de descarga dos gases provenientes da combustão, com deslocamento do pistão, o que não é relacionado no ciclo ideal, processos 0 - 1 e 1 - 0, respectivamente, ver Figura 2.1.
- 2- A compressão interna no cilindro é muito elevada em relação à dos motores do ciclo Otto (que tem como taxa de compressão máxima 12:1), suas taxas de compressão se situam entre 14:1 a 25:1;
- 3- A temperatura do ar comprimido eleva-se consideravelmente, chegando a ultrapassar os 700 °C;
- 4- Alta pressão de injeção de combustível, podendo alcançar 1400 bar, nos sistemas mais modernos;
- 5- Há dois tipos de injeção de combustível: a direta, na qual o combustível é diretamente injetado no cilindro; a indireta, quando o combustível é injetado em uma pré-câmara.

### 2.2.3 Desenvolvimento do sistema de injeção dos motores Diesel

Desde a construção do primeiro motor Diesel, o principal problema tem sido o processo de injeção do combustível de forma que a combustão ocorra de maneira mais ideal possível. Todavia, os sistemas existentes não sofreram grandes modificações no decorrer dos anos. As principais alterações, que resultaram em evolução significativa, foram, primeiramente, o aparecimento da bomba rotativa em linha, desenvolvida por Robert Bosch, em 1927, que permitiu aos motores alcançarem rotações mais elevadas e, conseqüentemente, disponibilizarem maiores potências. Foi apenas no decorrer da década de 80, que surgiram os primeiros sistemas de gerenciamento eletrônicos EDC (Electronic Diesel Control). O desenvolvimento dos sistemas EDC, embora trazendo consideráveis resultados, esbarravam na limitação mecânica dos sistemas em uso, que não podiam dispensar o meio utilizado para comprimir o óleo diesel, isto é, um pistão acionado no instante adequado. Assim, mantinham-se os componentes básicos dos sistemas de injeção, utilizando-se os recursos eletrônicos para monitoramento e controle, sem possibilidade de intervenções importantes no processo de injeção. O início, duração e término da injeção permaneciam acoplados à posição da árvore de manivelas, uma vez que as bombas injetoras não permitiam variações, por serem acionadas por engrenagens conduzidas pela rotação do motor. Diferentemente dos motores do ciclo Otto, utilizados nesta década, que já faziam uso da injeção eletrônica de combustível, e do sistema de ignição transistorizado independentes, os motores Diesel, ainda, esperavam por novas tecnologias.

Em 1997, a Alfa Romeo lançou o seu modelo 156, equipado com um motor Diesel dotado de um sistema de injeção revolucionário, denominado, de JTD (Unijet Turbo Diesel). Tal sistema aumentava a potência e o torque, com redução do consumo e dos níveis de emissões de gases, abrindo novas perspectivas para o futuro desses motores. Posteriormente, os direitos de fabricação desse sistema foram cedidos a Robert Bosch, que começou a equipar motores para a Mercedes Benz, BMW, Audi, Peugeot e Citroën (esses últimos denominam o sistema de HDI (High Pressure Diesel Injection)). Em 2003, no segmento de motores mais pesados, as fábricas Mercedes, Scania e Volvo anunciaram os lançamentos dos novos motores equipados com esse sistema, que ganhou a denominação de COMMON RAIL.

Segundo a Robert Bosch do Brasil, o sistema Common Rail Bosch é um moderno e inovador conjunto de injeção diesel. Ele foi desenvolvido para atender à atual exigência

do mercado que clama por motores com menor consumo, baixas emissões de poluentes, e maior rendimento. Nesses sistemas são necessárias altas pressões de injeção, curvas de injeções exatas, e dosagens extremamente precisas do volume de combustível.

## 2.3 Motores do ciclo Otto

### 2.3.1 Concepção dos motores do ciclo Otto

Os motores do ciclo Otto, patenteado nos EUA por Otto e Langen, em 1876, são motores de combustão interna, MCI, de dois e quatro tempos, no qual a ignição é ordinariamente provocada por uma centelha elétrica (TAYLOR, 1971). Nesses motores, uma mistura de combustível e ar é inflamada pela centelha de uma vela de ignição (MORAN e SHAPIRO, 2008).

### 2.3.2 Particularidades dos motores do ciclo Otto

Na Figura 2.3 se visualiza o gráfico de pressão ( $P$ ) em função do volume ( $v$ ), para o ciclo Otto ideal, com os seus diversos estágios:

- 1 – 2 : compressão isoentrópica (entropia constante)
- 2 – 3: fornecimento de calor,  $q_{23}$ , a volume constante
- 3 – 4: expansão isoentrópica
- 4 – 1: rejeição de calor,  $q_{41}$ , a volume constante

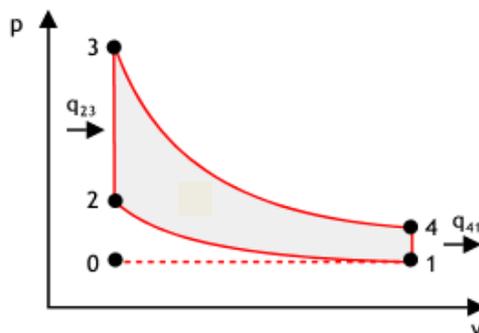


Figura 2.3 – Ciclo Otto ideal (teórico).

Na prática, os processos não ocorrem adiabaticamente, e a volume constante, o que faz com que o ciclo Otto, próximo do real, tenha uma forma diferente daquela apresentada pelo ciclo ideal, ver Figura 2.4.

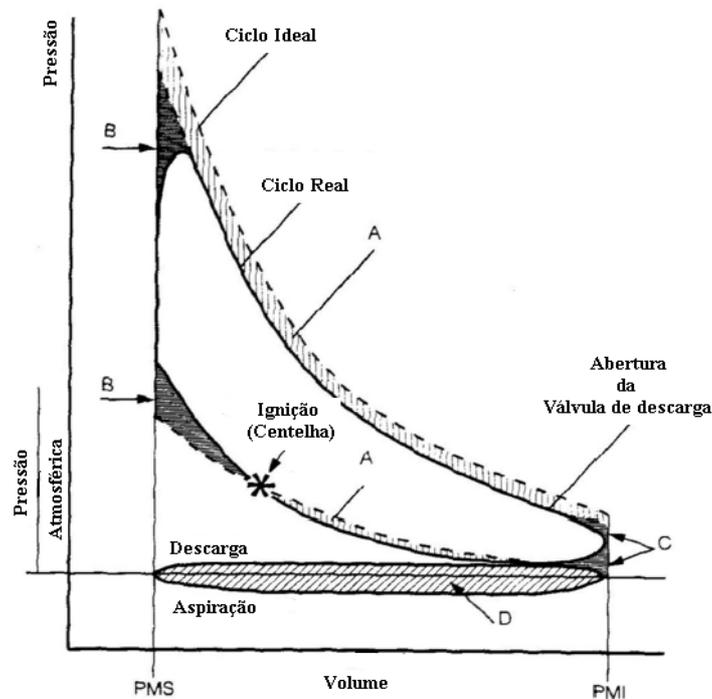


Figura 2.4 – Ciclo Otto real ( de acordo com BARROS,2006a).

São divisadas na Figura 2.4, regiões inerentes às perdas em um ciclo Otto real:

1. Região D: perdas advindas do bombeamento de ar, nos processos de admissão e de descarga;
2. Região B: perdas, no processo de ignição, relacionada com a combustão não instantânea, e à dissociação do combustível em elementos, tais como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{CO}$  e outros compostos, com absorção de calor;
3. Região A: perdas, na expansão, provocadas pela troca de calor, pelas paredes, com o sistema de arrefecimento do motor;
4. Região C: representa as perdas, advindas da abertura antecipada da válvula de descarga.

Do ponto de vista do funcionamento do motor real, destacam-se algumas particularidades, tais como:

- 1- No ciclo da Figura 2.4, região D, tem-se, o processo de admissão de uma mistura ar/combustível, e descarga dos gases provenientes da combustão, com deslocamento do pistão, o que não é considerado no ciclo ideal, processos 0 - 1 e 1 - 0, respectivamente, ver Figura 2.3;
- 2- Suas taxas de compressão se situam entre 8:1 a 12:1;
- 3- O processo de queima da mistura se inicia por meio de uma centelha elétrica;
- 4- São motores menos robustos do que os do ciclo Diesel.

#### **2.4 Principais fatores responsáveis pela diferença entre o ciclo real e o teórico, nos motores de combustão interna**

Os principais fatores que fazem com que haja diferenças entre os ciclos reais e teóricos, são:

- 1- No ciclo teórico a aspiração e descarga são feitas à pressão constante, enquanto que no ciclo real isso não acontece.
- 2- Na teoria o calor é introduzido instantaneamente e a pressão constante, enquanto que na realidade, isso não ocorre.
- 3- No ciclo teórico não existe dissociação do combustível, mas no real ele se dissocia em elementos tais como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , O, CO e outros compostos, absorvendo calor.
- 4- Na teoria a abertura da válvula de descarga é considerada instantânea, enquanto que no ciclo real ela se abre antes do pistão atingir o PMI.
- 5- No ciclo ideal, as perdas de calor são nulas, enquanto que no real elas são sensíveis, devido à necessidade de refrigeração dos cilindros.
- 6- A pressão e temperatura máxima obtidas no ciclo real são inferiores às determinadas quando os calores específicos são constantes, com a variação da temperatura, admitido no ciclo ideal.
- 7- Os calores específicos dos gases reais crescem com o aumento de temperatura.
- 8- O processo de combustão substitui o processo de transferência de calor a alta temperatura, e a combustão pode ser incompleta.

- 9- Cada ciclo mecânico do motor envolve um processo de alimentação e de descarga e, devido às perdas de carga dos escoamentos nas válvulas, é necessária certa quantidade de trabalho para alimentar o cilindro com ar e descarregar os produtos da combustão no coletor de escapamento.
- 10- Existem irreversibilidades associadas aos gradientes de pressão e temperatura.

## **2.5 Considerações sobre a ottolização de um motor diesel**

A busca pela ottolização de motores diesel, tanto para uso de combustíveis líquidos, ou gasosos, vem sendo muito cobiçada por empresas que os utilizam em grupos geradores, e processo de acionamentos. Isto se deve, ao motor Diesel ter uma característica que não é inerente ao motor do tipo ICE, a robustez. É essa qualidade que permite ao motor Diesel trabalhar, em condições normais, consideradas impossíveis de serem suportadas por motores do ciclo Otto original.

Segundo Martins (2006) diversos parâmetros são responsáveis por influenciar o processo de combustão de um MCI, tornando-o mais eficiente, rápido e completo. Os principais parâmetros estão relacionados com a geometria e o controle do motor, tais como o desenho da câmara de combustão, taxa de compressão, turbulência, ângulo de ignição, riqueza e nível de preparação da mistura, carga, velocidade do motor e características do combustível.

### **2.5.1 A substituição dos bicos injetores**

Em um processo de conversão, que busca a ottolização do motor, o primeiro passo a ser dado está relacionado com o desenvolvimento de um projeto para adaptação de velas de ignição ao cabeçote do motor, sua realização e a consequente adequação da taxa de compressão.

Nos motores Diesel, a depender de sua concepção, os bicos injetores podem ser encontrados tanto na parte externa, como na interna da tampa do cabeçote. Conseqüentemente, deverá haver, pelo menos, duas concepções diferentes para se fazer face às duas situações.

### 2.5.2 Fatores que limitam a taxa de compressão

Nos motores do tipo ICO, que aspiram apenas ar, não se impõe, dessa forma, um limite à taxa de compressão, em razão da característica química do combustível, como ocorre nos motores ICE. Por esse motivo, as taxas de compressão para o motor diesel, são bem superiores àsquelas dos motores ICE, situando-se entre 14:1 e 25:1, como já citado. E são as altas taxas que requerem motores com estruturas mais robustas, e com pressão de injeção de combustível bem elevada, o que, de certa forma, encarece muito seu processo de fabricação, refletindo em seu preço de aquisição. Nesses motores, a auto-ignição é necessária para que se tenha o início da combustão, exatamente no momento em que o combustível é injetado.

Nos motores do tipo ICE, por admitirem uma mistura ar/combustível, a taxa de compressão é limitada pela característica química do combustível. Caso se tenha uma taxa de compressão elevada nesses motores, ocorre a auto-ignição do combustível, ou a pré-ignição, antes mesmo do surgimento da centelha da vela, provocando alto consumo, perda de potência, aquecimento do motor, que pode até fundir os pistões, causando sérios danos para o motor.

### 2.5.3 Modificação da taxa de compressão

Em processos que envolvem ottolização de motores Diesel, a mudança da taxa de compressão é inevitável, pois, eles deixam de admitir apenas ar, e passam a aspirar uma mistura ar/combustível, que se comprimida de forma inadequada, entra em combustão de forma espontânea, comprometendo o desempenho do motor, podendo até danificá-lo. A taxa de compressão do motor ottolizado, depende exclusivamente do índice de resistência à detonação do combustível admitido, conhecido como octanagem.

### 2.5.4 Mudanças características decorrentes da ottolização em motores Diesel

Os motores diesel ottolizados, passam a ter as características dos motores do tipo ICE, tais como:

- 1- A temperatura do fluido de arrefecimento do motor pode passar de 83 °C, para uma faixa de temperatura entre 90 °C a 95 °C, a depender do combustível;
- 2- Diminuição bastante significativa da intensidade do ruído, em cerca de 10 dB;
- 3- Aumento da vida útil do motor, quando otolizado de forma correta, com taxa de compressão e sistema de ignição com ângulos adequados ao combustível utilizado;
- 4- Diminuição de particulados, provenientes da combustão do diesel;
- 5- Dependendo do combustível, há aumento na sua potência útil;
- 6- Praticamente não há carbonização do motor.

### 2.5.5 O sistema de ignição

Como se sabe, em um motor otolizado, o processo de ignição é provocado pela centelha de uma vela, originada por uma alta tensão advinda de um sistema de ignição, estático (que não utiliza um distribuidor), ou, dinâmico, que faz uso de um distribuidor. Dessa forma, dependendo de quanto se pretende despende na conversão, ou da necessidade do tempo de resposta do próprio sistema de ignição, é possível se optar por componentes que tornam o sistema estático, ou dinâmico.

#### 2.5.5.1 Importância do ângulo de ignição do motor otolizado

O correto conhecimento do ângulo de ignição, que é o instante em que deve ocorrer a centelha na vela de ignição para dar início a combustão da mistura, é de extrema importância para o desempenho do motor, uma vez que a ação decorrente deve estar em perfeito sincronismo com o tempo motor. A ocorrência da centelha não sincronizada com o movimento do pistão reduz o torque, conseqüentemente a potência e pode causar rompimentos estruturais no sistema biela/pistão. O ângulo de ignição adequado permite que o ponto máximo de pressão na combustão se dê logo após o PMS, ver Figura 2.5a. Como pode ser visto na Figura 2.5b, quanto maior o ângulo de avanço, até o limite da detonação, maior será a pressão após o PMS, o que gera um resultado final benéfico para a realização de trabalho. Avanços excessivos, também, podem dar origem a produção elevada do poluente NO<sub>x</sub> (MARTINS, 2006).

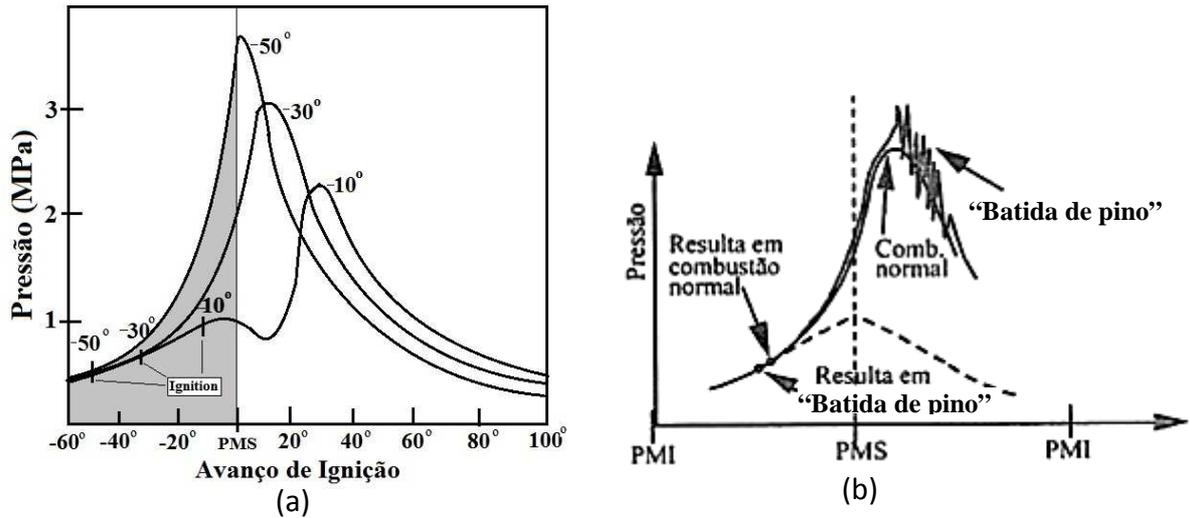


Figura 2.5 – (a) Efeito do avanço de ignição na pressão final da combustão da mistura e (b) ocorrência da detonação devido a um avanço de ignição excessivo (MARTINS, 2006).

### 2.5.6 Eficiência térmica, $\eta_T$ , em função da taxa de compressão

A simples substituição de componentes não garante, todavia, o sucesso de uma otolização. Como se pode perceber, na Figura 2.6, o rendimento térmico, em motores do ciclo Otto, cresce com o aumento da taxa de compressão (MORAN e SHAPIRO, 2008, WYLEN et al, 2001). Porém, por admitir uma mistura ar/combustível, a possibilidade de auto-ignição ou “detonação”, estabelece um limite superior para taxa de compressão desses motores. Tais fatos demonstram, portanto, a importância da escolha da taxa de compressão no processo de otolização, que é função, também, do combustível substituto.

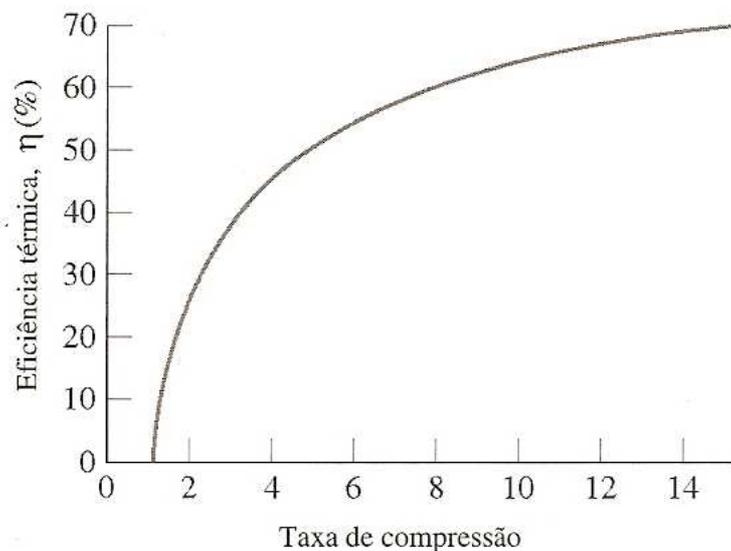


Figura 2.6 – Eficiência térmica do ciclo de ar-padrão Otto.

## 2.6 Adaptações do motor MWM D-229-4 Ottolizado, para funcionar com gás pobre

O grupo gerador utilizado nos ensaios é formado por um gerador da Bambozzi de 36 kVA e um motor do tipo aspirado a diesel, de injeção direta, da marca MWM, modelo D229-4, 3,922 litros de cilindrada total, taxa de compressão de 17:1, com uma potência nominal de 44,13 kW (60 cv), que fora ottolizado pela equipe do Laboratório de Termoenergética da Universidade Federal da Paraíba, LTE/UFPB, tendo-se mantido a taxa de compressão do motor diesel original, para ser alimentado pelo gás produzido da gaseificação de biomassa residual.

O gás produzido através do processo de gaseificação não tem a energia de pressão necessária a adaptação aos aparatos existente no mercado capazes de promoverem a alimentação funcional dos motores a gás, à qual está associada à adequada quantidade de combustível, na pressão correta e no momento preciso. Dessa forma, nesses casos, necessário se faz, projetar um tal sistema de alimentação.

Na Índia, nos motores alimentados por gás pobre, produzidos por gaseificação, foi utilizado um regulador de pressão, que modula, mecanicamente, a quantidade de gás a ser admitida pelo motor com a variação da carga, ver Figura 2.7.

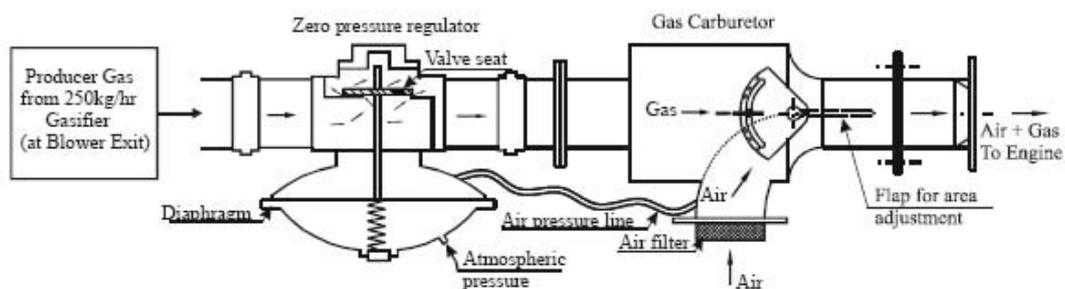


Figura 2.7 - sistema de controle de gás de um motor de combustão interna, utilizado na Índia para um gaseificador com capacidade de 250 kg/h de consumo de biomassa (DASAPPA et al, 2003).

Neste trabalho, foi projetado um sistema de alimentação para o motor ottolizado funcionar com gás pobre proveniente da gaseificação, ver capítulo VI, seção 6.3.1.

## CAPÍTULO III

### GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

#### 3.1 Introdução

Neste Capítulo serão conceituados termos fundamentais relacionados com o tema discutido, tais como biomassa e gaseificação; tece-se considerações sobre o processo químico da geração do gás pobre, culminando-se com uma descrição dos principais tipos de gaseificadores para potência elétrica ou para calor, e do gaseificador utilizado neste trabalho.

#### 3.2 Biomassa

Por biomassa entende-se toda e qualquer matéria formada por carboidratos, lipídios (óleos vegetais), proteínas, dentre outras substâncias, que, em geral, são de origem animal, ou vegetal. Resulta de uma série de processos físico-químicos naturais, quando os seres vivos clorofilados utilizam o dióxido de carbono e água para obter glicose através da energia luminosa, em geral, a solar. Constituem, portanto, fonte de energia renovável. Em termos da geração de energia, costuma-se associá-la aos advindos de recentes transformações de organismos vivos, usados como combustíveis, ou para sua obtenção, excluindo-se os fósseis, que embora se originem, também, de seres vegetais, ou animais, consomem largos espaços de tempo em suas transformações.

Existem, pelo menos, três formas de se aproveitar (converter) a energia química da biomassa: a termoquímica, a bioquímica, e a térmica. Quando a biomassa é aquecida, mas não pirolisada, pode-se extrair dela gás, líquido ou sólido, os quais podem ser, ainda,

transformados em combustível líquido, ou gasoso, como o álcool, ou o metano. No caso do procedimento bioquímico, bactérias, fermentos e enzimas são adicionados, de maneira a fermentar a biomassa transformando-a em álcool. A forma mais antiga, todavia, é a térmica, quando a biomassa é queimada para gerar calor. Esse calor pode ser aproveitado diretamente (cocção, ou em processos industriais) ou indiretamente (geração de energia elétrica, como em termelétricas). Inclui-se, também nessa opção os processos combinados de pirólise e gaseificação, que particularmente constitui o objeto desse trabalho.

### 3.3 A gaseificação

Por gaseificação se entende a transformação de combustíveis sólidos (madeira, rejeitos de agricultura, etc.), a temperaturas elevadas (800 ~ 1000 ° C), em uma mistura gasosa de combustíveis (SÁNCHEZ, 2010).

Como gases, tem-se mais facilidade na acomodação para transporte, ou armazenamento, melhora-se a eficiência de combustão, tendo-se maior controle de chama – intensidade; continuidade; intermitência, etc – e de vazão. A mistura de gás assim produzida é conhecida por gás de baixo poder calorífico, gás pobre ou manufaturado. O processo é, também, considerado como sendo resultante de uma combustão parcial da biomassa, uma vez que o volume de ar, ou mais precisamente o oxigênio, utilizado é inferior aquele necessário para a queima completa da biomassa. Assim, nos processos de gaseificação a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases, cujos principais componentes são: CO (monóxido de carbono), CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), H<sub>2</sub> (hidrogênio) e, dependendo das condições de operação, CH<sub>4</sub> (metano), hidrocarbonetos leves e vapor de água em diferentes proporções. Caso a quantidade de ar seja suficiente para a combustão completa, dado que a biomassa contém moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio, serão produzidos apenas dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e vapor de água (H<sub>2</sub>O) e N<sub>2</sub>. Na prática, a gaseificação consegue converter 60 a 90% da energia da biomassa em energia interna do gás (REED e DAS, 1998).

A Tabela 3.1 apresenta as composições típicas do gás, em percentual volumétrico, resultantes das gaseificações da madeira e do carvão vegetal.

Tabela 3.1: Composição volumétrica do gás produzido pela Forest Industry Division (FAO, 1986).

Elemento	Madeira (vol. %)	Carvão (vol. %)
Nitrogênio - N	50 - 54	55 - 65
Monóxido de Carbono - CO	17 - 22	28 - 32
Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub>	9 - 15	1 - 3
Hidrogênio - H <sub>2</sub>	12 - 20	4 - 10
Metano - CH <sub>4</sub>	2 - 3	0 - 2

### 3.4 Princípios do Processo de Gaseificação

A gaseificação envolve, basicamente, quatro processos, que podem ocorrer na mesma região, ou em regiões diferentes do reator denominadas zonas, ver Figura 3.1, a depender das tecnologias empregadas, a saber:

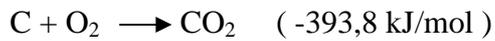
1. A secagem da biomassa é a ocorrência inicial e se dá na parte superior do reator, durante o aquecimento do combustível. Essa etapa é mais significativa e lenta para materiais mais úmidos.
2. A pirólise (desvolatilização ou decomposição térmica) se inicia a pelo menos 280 °C, quando ocorre vaporização das partes voláteis e se dá, na continuação, a fragmentação das partículas sólidas. (Esse último fenômeno se dá pela quebra molecular do material pelo calor, quando a biomassa é aquecida na ausência de ar, ocorrendo a formação de carvão, gases (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) e vapores de alcatrão. Esses vapores ao tocarem superfícies a temperaturas mais baixas se condensam formando o ácido, ou o extrato pirolenhoso.).
3. A combustão, ou reação do material com oxigênio, é o processo responsável pelo fornecimento de calor para as demais etapas. Essa fase pode ocorrer no próprio reator principal, em um gerador de vapor ou em câmara de combustão. O que se queima podendo ser: parte do próprio gás de síntese; outros produtos da gaseificação (líquidos e sólidos), e até o combustível primário.
4. A gaseificação em si ocorre na zona de redução quando o carbono e os hidrocarbonetos do combustível reagem parcialmente com o oxigênio, gerando como combustíveis principalmente o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H<sub>2</sub>). Esse processo se dá em temperatura de 400 °C a 900 °C.

### 3.4.1 Reações de Gaseificação

Segundo Sánchez (2010), durante os processos de gaseificação, ocorrem, principalmente, reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução, que envolvem fases sólidas e gasosas, descritas a seguir.

#### 3.4.1.1 Reações heterogenias gás - sólido

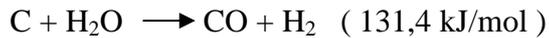
Oxidação do carbono:



Reação de Boudouard:



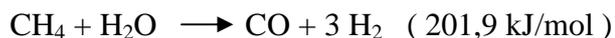
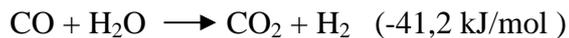
Reação de gás d'água:



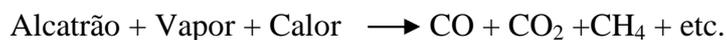
Formação de metano:



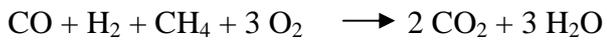
#### 3.4.1.2 Reações homogêneas (fase gasosa)



#### 3.4.1.3 Craqueamento do alcatrão



Além dessas reações, destaca-se a oxidação de parte dos produtos da pirólise:



### 3.5 O gaseificador

O gaseificador é essencialmente um reator onde ocorrem várias reações químicas e físicas. Dentro do reator a biomassa perde umidade, aquece, sofre pirólise, oxida e se reduz por toda a extensão do reator até que chega ao final como uma mistura de combustível gasosa.

#### 3.5.1 Tipos de Gaseificadores

Segundo Sánchez et al (2002), os gaseificadores podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores:

Pelo poder calorífico do gás produzido:

- Gás de baixo poder calorífico: até 5 MJ/Nm<sup>3</sup>
- Gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm<sup>3</sup>
- Gás de alto poder calorífico: 10 a 40 MJ/Nm<sup>3</sup>

Pelo tipo de agente de gaseificação:

- Ar
- Vapor de água
- Oxigênio
- Hidrogênio (hidrogaseificação)

Pela pressão de trabalho:

- Baixa pressão (atmosférica)
- Pressurizados (até 6 MPa)

Pelo tipo e forma da biomassa:

- Resíduos agrícolas
- Resíduos industriais

- Resíduos sólidos urbanos (lixo)
- Biomassa in natura
- Biomassa peletizada
- Biomassa pulverizada

A classificação dos gaseificadores mais utilizada, por sua funcionalidade, é feita, todavia, pela direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação (contra-fluxo ou contra-corrente, concorrente ou fluxo direto ou paralelo, fluxo cruzado e leito fluidizado). Particularmente, esse último fator de identificação mencionado, pode alterar o posicionamento de duas (combustão e redução), das quatro zonas internas de processamento do gaseificador, zonas essas já descritas no item 3.4 (GODINHO, 2006).

### 3.5.1.1 Gaseificadores Contracorrente

Os gaseificadores contracorrente são os mais simples, onde a entrada de ar fica na parte inferior do gaseificador, com o fluxo ascendente de gases contrário ao movimento da biomassa, a qual é introduzida pela parte superior. Neste caso, a biomassa ao ser consumida na zona de combustão, desloca-se para baixo sob a ação da força gravitacional, ver Figura 3.1.

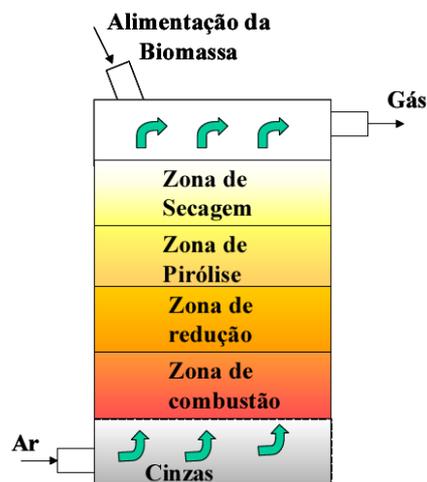


Figura 3.1- Gaseificador contracorrente e suas zonas de reações.

Os gaseificadores contracorrente tendem a ter uma eficiência térmica alta, pelo fato dos gases quentes, provenientes da zona de combustão, pré-aquecerem a carga de

combustível ao passarem por ela. A simplicidade é sua principal característica. A principal desvantagem é produzirem um gás extremamente impuro. O alcatrão e outros produtos de pirólise não são craqueados na zona de combustão, já que são levados pelo fluxo de gases para a parte superior do gaseificador, podendo causar incrustações nas tubulações. Quando são projetados em grandes dimensões, estes possuem uma câmara na parte superior, acima do topo, para reduzir a velocidade do gás, permitindo a condensação de parte dos voláteis dentro do gaseificador.

Para recobrir a zona de combustão são utilizados materiais refratários e, com o objetivo proteger as partes metálicas e diminuir as perdas por troca de calor, às vezes, faz-se uso de material isolante na câmara de combustão. A temperatura de saída dos gases produzidos é em torno de 400 ° C.

Os gaseificadores deste tipo podem ser utilizados com uma larga variedade de combustíveis, como, resíduos agrícolas e municipais, desde que projetados para cada finalidade. O fato de, o gás produzido, geralmente conter grandes quantidades de particulados, alcatrões e voláteis, seu uso, em motores de combustão interna é desaconselhado. É, portanto, mais utilizado em queimadores para aquecimento direto.

### 3.5.1.2 Gaseificadores Concorrente

São os mais difundidos para geração de potência mecânica utilizando motores de combustão interna, pois, o gás produzido apresenta baixa concentração de alcatrão. No gaseificador concorrente, ver Figura 3.2, as zonas de combustão e de redução estão posicionadas de forma oposta aos gaseificadores contracorrente. A alimentação da biomassa é feita pelo topo, e a admissão de ar se dá em fluxo descendente. O fluxo de ar tem o mesmo sentido do movimento do gás produzido, passando pelas zonas de combustão e de redução.

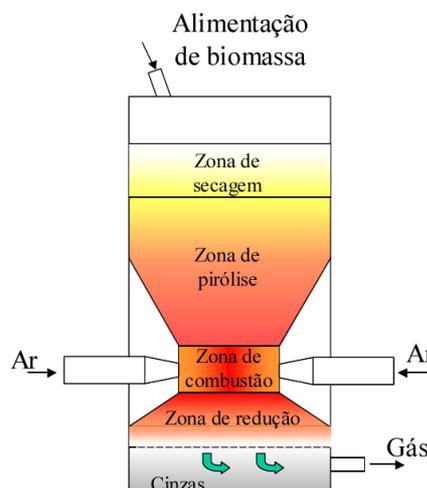


Figura 3.2- Gaseificador concorrente e suas zonas de reações.

A característica fundamental de projeto desses gaseificadores é dirigir o alcatrão e os voláteis provenientes da zona de pirólise à zona de combustão e redução. Desse modo, em condições de operação controlada, permite o craqueamento do alcatrão pela alta temperatura (cerca de 1000 °C), o que acarreta a degradação térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão, sendo transformadas em compostos de menor peso molecular, como CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, e outros gases, eliminando até 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível (HENRIQUES, 2009).

Verifica-se, pois, que esse tipo de gaseificador produz um arranjo privilegiado na zona de combustão. Essa zona deve ser bem projetada afim de não permitir regiões com baixa temperatura, pois, pode tornar possível a passagem de voláteis sem serem craqueados, perdendo, assim, o propósito do projeto.

O diâmetro interno na zona de combustão é reduzido, criando uma garganta, geralmente feita de material cerâmico. É nessa garganta que estão posicionadas as entradas de ar, as quais são distribuídas apropriadamente a fim de garantir uma uniformidade do ar e uma temperatura adequada em toda a seção, permitindo a quebra do alcatrão. Por outro lado, o fluxo de gás move-se no mesmo sentido das cinzas, provocando um arrasto das mesmas. Por esse motivo, o gás gerado tende a ter uma quantidade significativa de cinzas e de fuligem, em contraste com o que acontece nos gaseificadores contracorrentes, onde essas partículas são filtradas quando o gás passa pela biomassa. Como os gases não trocam calor diretamente com as zonas de pirólise e de secagem, sua temperatura fica em torno de 700 °C.

Uma variante desse gaseificador é o do tipo topo aberto, utilizado para biomassa polidispersa com entrada de ar pela parte superior, com objetivo de evitar altas temperaturas e, conseqüentemente, a fusão de cinzas.

### 3.5.1.3 Gaseificadores de Fluxo Cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado o gás é retirado lateralmente da câmara de gaseificação, na mesma altura do leito em que é injetado o ar. O injetor é normalmente arranjado de forma a distribuir o ar no centro da zona de combustão, produzindo um gás combustível com características intermediárias entre os gaseificadores contracorrente e concorrente.

A taxa de fornecimento de ar é consideravelmente maior do que em outros tipos de gaseificadores. Por esse motivo, cria-se uma zona de combustão com temperatura extremamente alta, com liberação de gases muito rápida. Ambas as zonas, de combustão e de redução, são concentradas em um pequeno volume no centro do gaseificador, ver Figura 3.3. Isso significa dizer, que o uso de materiais refratários é dispensável para delimitar a região.

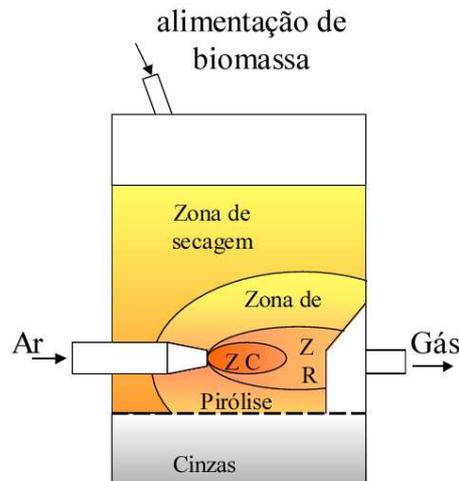


Figura 3.3- Gaseificador de fluxo cruzado e suas zonas de reações.

As principais vantagens dos gaseificadores de fluxo cruzado são: a rápida resposta às variações de carga; simplicidade de construção, e peso reduzido. Por outro lado, são muito sensíveis às variações na composição e umidade do combustível, sendo que, para fins práticos, exigem o uso de carvão vegetal limpo e seco.

#### 3.5.1.4 Gaseificadores de Leito Fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado, ver Figura 3.4, consistem de um recipiente vertical, onde as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de corpúsculos inertes (areia, cinzas ou alumina) suportado por uma placa distribuidora e fluidizado pelo fluxo de ar, criando melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação. Nessas condições, a maioria dos voláteis estará em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação possivelmente completa e limpa. O agente gaseificante, previamente

pressurizado, é obrigado a atravessar a placa distribuidora no sentido ascendente e em quantidade suficiente para conseguir que a força de arrasto do escoamento do fluido supere o peso dos sólidos do leito e promova, simultaneamente, a queima parcial do combustível.

Na gaseificação em leito fluidizado, não se observam zonas separadas de pirólise, oxidação e redução, como no caso de gaseificadores em leito fixo, sendo que todos os processos acontecem em todo o volume do leito simultaneamente.

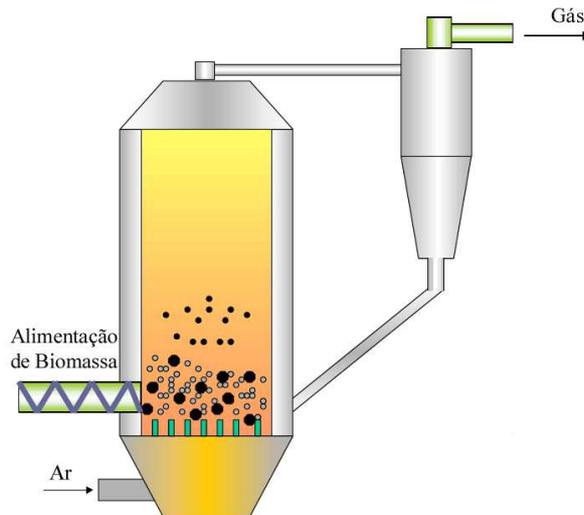


Figura 3.4- Gaseificador de leito fluidizado.

Nesses gaseificadores duas fases podem ser identificadas na seção transversal do leito: a emulsão e as bolhas. A emulsão contém as partículas sólidas com gás, onde seu fluxo é limitado pela quantidade que permite a fluidização incipiente (velocidade mínima de fluidização).

O leito é aquecido inicialmente por um combustível auxiliar (Gás LP, carvão vegetal, etc.) e quando a temperatura estiver suficientemente alta, a biomassa é introduzida, dando início ao processo de gaseificação.

Como a biomassa possui alta reatividade, um gaseificador de leito fluidizado pode operar a temperaturas relativamente mais baixas, mas, neste caso, pelo fato do alcatrão produzido na pirólise não ser prontamente gaseificado, estará presente em maior quantidade no gás produzido. A presença do alcatrão pode ser interessante, pois, aumenta o poder calorífico do gás e proporciona uma chama mais luminosa, com melhor transferência de calor por radiação. Por outro lado, esse pode se incrustar nas tubulações, como também, impedir o uso em motores de combustão interna.

A principal vantagem dos gaseificadores de leito fluidizado é o fácil controle da temperatura, por meio da variação do fluxo de ar e da alimentação da biomassa.

Esses gaseificadores não apresentam resposta automática às mudanças de consumo do gás produzido. Para tanto, é necessário variar o fluxo de ar e a alimentação da biomassa para dentro do leito para se alterar a vazão de gás produzido. Caso o sistema alimentado pelo gás requeira uma variação no consumo, será obrigatória a existência de um controlador para o fluxo de ar e para a alimentação da biomassa

### **3.6 O Gaseificador usado nesse trabalho**

O gaseificador utilizado nos ensaios foi do tipo leito fixo concorrente “topo aberto”, importado da Índia, do Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL. Sua capacidade térmica é de 80 kWt, e empregado originalmente, na Índia, para alimentar um motor do tipo dual (diesel/ gás pobre), pertencente a um grupo gerador, fazendo a substituição de até 80% do diesel utilizado pelo motor, com uma capacidade máxima de geração de 20 kWe.

O grande diferencial deste gaseificador, para os demais convencionais, é o conjunto de lavagens dos gases instalado, o que possibilita a remoção dos resíduos proveniente da gaseificação da biomassa. Este conjunto de lavagens é formado por dois sistemas, um primário, constituído de dois bicos injetores, com água a temperatura ambiente, e um secundário, constituído por um bico injetor, com água a temperatura de 5 °C.

#### **3.6.1 Componentes do gaseificador**

Os principais componentes do gaseificador são, o reator e as partes ligadas diretamente a este, ver Figura 3.5, constituídos por:

1. Parte superior com abertura para a alimentação da biomassa, através da qual é admitido o maior percentual de ar de processo;
2. O reator;
3. O depósito de cinzas,
4. Saída do gás produzido.

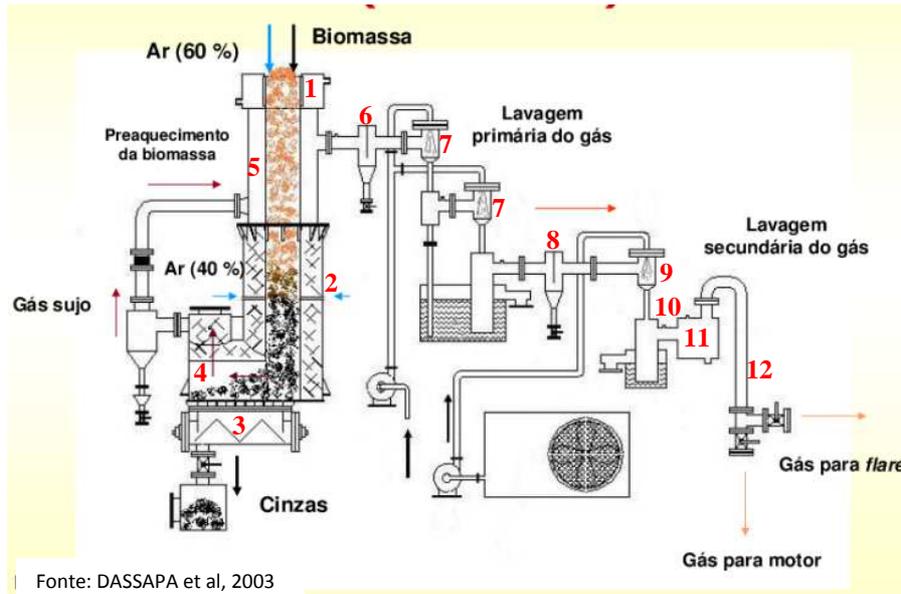


Figura 3.5 - Gaseificador e seus periféricos .

Após sua produção, o gás segue para alimentar o motor, passando pelos seguintes componentes:

5. Trocador de calor para pré aquecimento da biomassa.
6. Placa de condensação de alcatrão.
7. Dois resfriadores (“coolers”), onde ocorrem a lavagem primária, com água a temperatura ambiente;
8. Placa de condensação d’água no gás.
9. Um trocador de calor (cooler) com água proveniente de uma central de refrigeração (chiller), a uma temperatura de aproximadamente 5 °C. (o objetivo principal deste processo de lavagem é aumentar a densidade do gás.).
10. Um queimador de chama piloto, onde se verifica a qualidade do gás produzido, pela coloração da chama.
11. Um filtro de tecido, situado antes da tubulação de alimentação do gás para o motor, para reter os particulados não eliminá-los durante os processos de lavagem.
12. Tubulação de distribuição do gás para o motor.

### 3.6.2 Sistema de limpeza da água de lavagem do gás produzido

Para realizar a limpeza da água utilizada na lavagem primária do gás, o gaseificador dispõe de um circuito, ver Figura 3.6, com os seguintes elementos:

1. Tanque de decantação;
2. Filtro de carvão ativado;
3. Torre de resfriamento.



Figura 3.6 - Sistema de purificação da água de lavagem dos gases.

### 3.7 Histórico do uso do processo de gaseificação

A gaseificação de combustíveis sólidos teve origem nas últimas décadas do século XVIII (REED, 1981). A forma mais antiga conhecida para se produzir gás a partir de materiais orgânicos foi à chamada destilação seca (dry distillation), ou seja, a pirólise do combustível sólido a uma temperatura de 600 a 1100 °C, na presença de pouco oxigênio, produzindo, principalmente, os gases combustíveis  $H_2$ ,  $CH_4$  e  $CO$ . Este princípio foi utilizado pela primeira companhia de gás de carvão que iniciou suas operações em Londres em 1812, para a iluminação pública (GROENEVELD, 1980).

A partir de então, começa o desenvolvimento de gaseificadores para a produção do gás combustível. O histórico desse desenvolvimento, e os fatos que influenciaram a necessidade do uso, e aqueles que contribuíram para diminuir o seu interesse, estão listados abaixo:

- Em 1839, na Alemanha, o químico alemão Karl Gustav Bischof desenvolveu o primeiro gaseificador contracorrente.
- Em 1840, Ebelman, na França, construiu um gaseificador de cinza fundida.
- Siemens, em 1857, fez modificações no projeto do gaseificador de Bischof, e este foi utilizado por toda Europa pelos 100 anos seguintes.
- Em 1859, é descoberto, pelo norte-americano coronel Edwin Laurentine Drake, o primeiro poço de petróleo nos Estados Unidos. A partir daí começa-se a produzir querosene derivado do petróleo para uso na iluminação pública, diminuindo o emprego de gaseificadores para este fim.
- Em 1861, os irmãos Siemens na Alemanha, constroem o primeiro gaseificador de porte industrial.
- No período de 1879 a 1881, na Inglaterra, Dowson, com o objetivo de remover o alcatrão e as cinzas geradas no processo de gaseificação, desenvolveu projetos para o resfriamento e a limpeza do gás.
- Neste mesmo período (1879 a 1881), surge o petróleo como opção de combustível industrial. Fato que contribuiu para a diminuição do interesse pelo uso de gaseificadores.
- Winkler, em 1920, desenvolveu os reatores de leito fluidizado.
- Por volta de 1930, com o surgimento das linhas de distribuição de gás natural e a substituição em larga escala por combustíveis derivados do petróleo, a um preço muito atrativo, as plantas dos países industrializados, que produziam gás a partir de gaseificadores foram quase todas desativadas.
- Em 1936, Lurgi projetou um gaseificador que operou com pressões acima da atmosférica.
- Com o início da segunda guerra mundial, em 1939, houve escassez de combustíveis derivados do petróleo na Europa e intensificou-se a procura por outras fontes, o que resultou no ressurgimento de muitas atividades de desenvolvimento e implantação de gaseificadores. O tipo mais comum de reator utilizado foi o gaseificador de leito fixo (WILTGEN FILHO, 1981).
- Durante a segunda guerra mundial, de 1939 a 1945, foram desenvolvidas técnicas de conversão de motores de ignição por centelha e compressão para operarem com gás combustível produzidos por pequenos gaseificadores, chamados de gasogênios.

Estes motores passaram a ser utilizados em larga escala em automóveis, tratores, embarcações, etc.

- O fim da guerra, 1945, renovou o fornecimento de combustíveis fósseis e rápida reconversão de veículos que utilizavam gasogênio para diesel ou para gasolina (REED, 1981).
- Em 1948, Koppers-Totzek, também projetou gaseificadores que operavam com pressões acima da atmosférica.

Atualmente a Índia é o país que mais tem investido no desenvolvimento de gaseificadores. Desde a década de 80 cerca de 4000 sistemas foram instalados, parte para geração de energia em projetos de eletrificação rural e parte para bombeamento voltado para irrigação, em proporções praticamente iguais (DIAS, 2004).

### **3.8 Publicações que relacionam o gás pobre, proveniente da gaseificação, à geração de eletricidade.**

Fernandes (2000), utilizando capim-elefante como biomassa em um gaseificador de leito fluidizado, conseguiu gerar um gás com Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de 3,16 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Sridhar et al (2001), testou um motor com taxa de compressão 17:1, que no modo diesel desenvolvia 24 kW de potência de eixo. No modo dual (diesel/gás pobre, com poder calorífico médio de 4,65±0,15 MJ/Nm<sup>3</sup>, usando madeira Causurina), desenvolveu uma potência de 17,5 kWe (20 kW no eixo).

Segundo Lora et al (2004), a técnica mais adequada, para produzir energia elétrica a partir de biomassa usando gaseificadores, é através da utilização de motores de combustão interna. Sugere, ainda, que os gaseificadores sejam do tipo concorrente, por gerar gás com menor teor de alcatrão.

Lora e Andrade (2004) verificaram que a biomassa no Brasil possui um potencial térmico de geração de eletricidade de 27 GW. Apontam, ainda, que dentre as tecnologias para a conversão da energia contida na biomassa em eletricidade a gaseificação é a mais promissora.

Martins (2004), verificou que o consumo de diesel, para uma relação de substituição de 80%, em uma unidade de gaseificação e geração de energia elétrica de 20

kW (motor diesel/gás com gerador acoplado) desenvolvida pelo Indian Institute of Science (IISc), é de aproximadamente 1 litro/h.

Apolinario (2004), considerando a potência consumida nos equipamentos elétricos periféricos (bombas de água, refrigerador e ventilador do secador), em um gaseificador indiano concorrente, verificou que a potência líquida gerada caía de 20 para 14 kWe.

Ushima (2004) fez testes com um gaseificador de leito fixo descendente, de 20 kWe, importado da Índia, utilizando cavaco de eucalipto como biomassa, e obteve um gás com um Poder Calorífico Superior (PCS) médio de  $5,7 \text{ MJ/Nm}^3$ , e uma potência térmica média de 67,1 kWt.

Fernandes (2004), fazendo uso de um gaseificador de leito fluidizado, produziu um gás com uma capacidade térmica de 174 kWt, e PCI  $4,6 \text{ MJ/Nm}^3$ , conseguindo uma potência de eixo máxima de 45,1 kW. O motor utilizado foi o Mercedes-Benz do tipo M366G com potência nominal de 65 kW a 1800 rpm, com gás natural.

Muraro (2006), testou um motor Mercedes-Benz do tipo M366G, com potência máxima de 65 kW (Gás Natural) a 1800 rpm, com um gás pobre de PCI  $4,24 \text{ MJ/Nm}^3$ . O gás foi produzido a partir de um gaseificador de leito fluidizado, utilizando a casca de arroz como biomassa. O motor alimentado com o gás pobre conseguiu atingir a potência máxima de 40,7 kW a 1800 rpm.

## **CAPÍTULO IV**

### **MONTAGEM DO GASEIFICADOR INDIANO**

#### **4.1 Introdução**

Encontra-se neste capítulo o detalhamento do processo de montagem do gaseificador indiano no Laboratório de Inovação, LI, do Centro de Tecnologia da UFPB, CT.

#### **4.2 Construção do LI**

A construção do Laboratório de Inovação, LI, foi concluída, praticamente, em fevereiro de 2010. Assim, no início deste mesmo mês, iniciou-se o processo de montagem do gaseificador que havia sido importado da Índia, através de um convênio firmado com o Ministério das Minas e Energia, MME. Na mesma ocasião foi transferido para o LI o grupo gerador com motor MWM 229-4 otto-lizado, que se encontrava, temporariamente, no Laboratório de Motores do CT, ver Figura 4.1.



Figura 4.1 - Grupo gerador com motor MWM 229-4 ottolizado, no Laboratório de Motores do CT/UFPB.

### 4.3 Montagem do gaseificador

A falta de um esquema detalhado e intuitivo de montagem dos componentes (tubulações, reator, bombas, filtros, bases, removedor de cinzas, etc.), e periféricos (quadro de comando, chiller, escada, torre de refrigeração, secador de biomassa, etc.) do gaseificador, constituiu um dos problemas para a equipe do LI destacada para por o aparato em funcionamento. Uma outra dificuldade existiu ao se perceber que todos os motores e equipamentos elétricos oriundos da Índia estavam preparados para funcionar em rede de 220 V trifásica, enquanto que a do Laboratório era, como é padrão no Nordeste do Brasil, 380 V trifásico. Constatou-se, ainda, que como só foram importados os componentes do gaseificador, evitando-se a compra do grupo gerador com motor dual (diesel/gás pobre), as conexões entre o gaseificador e o motor não foram expedidos da Índia. Também não acompanharam o gaseificador: o soprador, aparato que a princípio seria indispensável para auxiliar na alimentação do motor, quando aquele funcionasse com carga, e o modulador de gás, que regula, de forma automática, o fluxo de gás, em função da variação da carga do motor.

Deve-se salientar que toda a montagem mecânica, elétrica, hidráulica e fabricação de alguns acessórios responsáveis pelo acoplamento e funcionamento do sistema gaseificador/grupo gerador, foi executada pela equipe do próprio LI.

#### 4.3.1 Construção de uma estrutura metálica para uso de uma talha

Considerando-se a necessidade de instalar o gaseificador em ambiente fechado, juntamente com a impossibilidade do uso de máquina do gênero das empilhadeiras, foi necessário se projetar e construir uma estrutura metálica com 6,5 m de altura. A estrutura serviu para dar suporte a uma talha com capacidade de 3 toneladas, ver Figura 4.2. O projeto desta estrutura foi executado pelo Prof. José Gonçalves de Almeida, do Departamento de Engenharia de Mecânica da UFPB. De posse do projeto, a equipe do LI, visando a minimização de custos, fabricou as peças e efetuou a montagem da estrutura, no próprio Laboratório de Inovação, ver Figura 4.3.



Figura 4.2 – Estrutura metálica projetada para instalação de uma talha de 3 toneladas, utilizada na montagem do gaseificador.



Figura 4.3 – Fabricação e montagem, pela equipe do LI, da estrutura metálica para dar suporte a uma talha com capacidade de 3 toneladas.

Lançando-se mão desse aparato foi possível posicionar o reator, com mais de duas toneladas, na plataforma de base, Figura 4.4.



Figura 4.4 – Reator suspenso, acima se sua plataforma de base, em processo de instalação.

Dando sequência à montagem do gaseificador, foram instalados os componentes responsáveis pelos processos de lavagens, resfriamento, limpeza e distribuição do gás pobre, ver Figura 4.5.



Figura 4.5 – Gaseificador montado com seus periféricos responsáveis pelos processos de lavagens, resfriamento, limpeza da água e distribuição do gás pobre.

#### **4.4 Conversão da tensão trifásica local de 380 V para 220 V trifásico, requerida pelos equipamentos eletro-eletrônicos do gaseificador**

Para converter a tensão trifásica da rede local de 380 V para 220 V, foi adquirido um auto-transformador da marca Sotrafo, com potência nominal de 15 kVA, ver Figura 4.6.



Figura 4.6 – Auto-transformador responsável pela conversão da tensão de 380 V trifásico para 220 trifásico.

#### 4.5 Sincronismo entre a água de saída da lavagem primária e retorno para caixa d'água

Após o término da montagem do gaseificador, e ao primeiro funcionamento verificou-se que a água da lavagem primária que era armazenada temporariamente em uma caixa coletora tinha sua vazão menor do que a de retorno para a caixa d'água, promovendo, em questão de minutos, o esvaziamento da água na supracitada caixa coletora, o que provocava o aquecimento do motor elétrico da bomba, e caso se persiste no funcionamento nestas condições, a queima do motor elétrico. Para solucionar tal problema, teve-se que projetar um sistema de sincronismo de vazão, o qual fazia parar a bomba de retorno quando o nível da água na caixa de coleta atingia certo ponto inferior, ao tempo em que a bomba responsável pela vazão da lavagem primária tinha seu funcionamento contínuo, ver Figura 4.7.



Figura 4.7 – Sistema de sincronismo entre a bomba de alimentação da lavagem primária e a de retorno d'água para caixa.

## CAPÍTULO V

### ALGUNS CONCEITOS E CORRELAÇÕES FÍSICO MATEMÁTICAS PERTINENTES

#### 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as correlações físico matemáticas utilizadas para avaliação dos dados experimentais advindos de ensaios com o sistema gaseificador/grupo gerador.

#### 5.2 Correlações Físico Matemática

##### 5.2.1 Poder calorífico inferior do gás pobre produzido a partir da gaseificação da madeira

Poder Calorífico de um combustível é a quantidade de energia, na forma de calor, liberada durante sua combustão completa, por unidade de massa, ou de volume. Caso esta quantidade de energia inclua o calor liberado pela condensação da água formada durante a combustão, o poder calorífico é chamado de Superior (PCS). Assim, o Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível, por unidade de massa, ou de volume após serem deduzidas as perdas com a evaporação da água.

Para se determinar o poder calorífico inferior do gás produzido na gaseificação,  $PCI_{gás}$  (MJ/Nm<sup>3</sup>), foi deduzida, neste trabalho, a Eq. (5.1), a partir dos dados experimentais de Yoshikawa (2006), e da curva de Garcia (2002), que correlacionam o poder calorífico inferior com o monóxido de carbono proveniente da gaseificação da madeira, ver Figura 7.6.

$$PCI_{gás} = - 0,004738 \cdot (\%CO)^2 + 0,4149 \cdot (\%CO) - 0,1057 \quad (5.1)$$

onde:

$\%CO$  é o teor, em percentual, de monóxido de carbono no gás.

### 5.2.2 Poder calorífico inferior da biomassa (madeira)

Neste trabalho, o poder calorífico inferior da madeira,  $PCI_{Madeira}$  (kcal/kg), foi calculado a partir da seguinte equação (GARCIA, 2002):

$$PCI_{Madeira} = 4756 - 53,418 \cdot (\%UM) \quad (5.2)$$

onde:

$\%UM$  é o valor, em percentual, da umidade contida na madeira.

### 5.2.3 Poder calorífico inferior do gás, determinado a partir de sua composição

Pode-se calcular, também, o poder calorífico do gás combustível,  $PCI_{gás_{comp}}$ , em kcal/Nm<sup>3</sup>, produzido no gaseificador através da fórmula empírica de Dulong, Eq. (5.3), em função do percentual de cada composto presente no gás (ITEGAN, 2011).

$$PCI_{gás_{comp}} = 3050 \cdot (\%CO) + 2580 \cdot (\%H_2) + 8500 \cdot (\%CH_4) + 13500 \cdot (\%C_2H_2) + \\ + 14050 \cdot (\%C_2H_4) \quad (5.3)$$

onde:

$\%CO$  é o teor em percentual de monóxido de carbono no gás;

$\%H_2$  é o teor em percentual de hidrogênio no gás;

$\%CH_4$  é o teor em percentual de metano no gás;

$\%C_2H_2$  é o teor em percentual de etino no gás;

$\%C_2H_4$  é o teor em percentual de eteno no gás;

#### 5.2.4 Massa específica do gás pobre produzido no gaseificador

Cada substância tem peso molecular igual à soma dos pesos atômicos dos átomos que a constituem. Entende-se, dessa forma, que a mistura dos gases se comporta como se fosse um gás puro. Assim, o peso molecular aparente,  $PMa$  (g), é avaliado pela expressão:

$$PMa = \sum X_i \cdot PM_i \quad (5.4)$$

onde:

$X$  é a fração molar;

$PM$  é o peso molecular (g).

$i$  cada um dos componentes do gás.

Assim, conhecida a composição do gás pobre, e considerando que este, está nas Condições Normais de Temperatura e Pressão, CNTP, pode-se utilizar a Eq. (5.5) para determinar a sua massa específica,  $\rho_{Gás}$  (kg/m<sup>3</sup>), (RUNTE JUNIOR, 2005):

$$\rho_{Gás} = \frac{PMa}{22,4} \quad (5.5)$$

#### 5.2.5 Consumo de Biomassa

O consumo de biomassa,  $CB$  (kg/h), do gaseificador, é dado por:

$$CB = \frac{M_{ad\_g}}{\Delta t} \quad (5.6)$$

onde:

$M_{ad\_g}$  é a massa adicionada ao gaseificador no intervalo de tempo (kg);

$\Delta t$  é o intervalo de tempo em que a massa foi adicionada ao gaseificador (h).

#### 5.2.6 Fluxos de gás pobre, de alimentação do motor, e dos gases de escape

O tubo de Pitot é um medidor de pressão diferencial que avalia a diferença entre a pressão local total, ou de estagnação, e a pressão estática local, fornecendo, assim, a

pressão dinâmica. Os tubos de Pitot estáticos, do tipo separados, são indicados para medidas de perfil de velocidades no interior de tubos, ou como indicadores da velocidade do ar, em práticas aeronáuticas (ISMAIL, 2000).

Na determinação dos fluxos, de gás pobre oriundo do gaseificador e dos gases já queimados liberados pelo escape, foram utilizados dois conjuntos formados por tubos de Pitot e manômetros em “U”, ver Figura 6.14.

Avaliando-se a altura de líquido deslocado no manômetro em “U”, determinou-se a velocidade do gás pobre,  $V_{gás}$  (m/s), na tubulação usando-se a expressão:

$$V_{gás} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \left( \frac{\gamma_{líq.-1}}{\gamma_{gás}} \right)} \quad (5.7)$$

onde:

$g$  é a aceleração devido a gravidade ( $m/s^2$ );

$h$  é o deslocamento do fluido no tubo em “U” (m);

$\gamma_{líq.}$  é o peso específico do líquido no tubo em “U” ( $N/m^3$ );

$\gamma_{gás}$  é o peso específico do gás que está escoando no tubo ( $N/m^3$ ).

Conhecendo-se a velocidade e a área da seção transversal da tubulação de escoamento do gás, calculou-se o fluxo volumétrico,  $Q_{v\_gás}$  ( $m^3/s$ ), utilizando-se a Eq. (5.8):

$$Q_{v\_gás} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V_{gás} \quad (5.8)$$

onde,

$d$  é o diâmetro da tubulação de escoamento (m).

### 5.2.7 Massa específica da biomassa

A massa específica da biomassa,  $\rho_{bio}$  ( $kg/m^3$ ), utilizada para funcionamento do gaseificador foi determinada por:

$$\rho_{bio} = \frac{m_v}{V_m} \quad (5.9)$$

onde,

$m_v$  é a massa correspondente ao volume da amostra (kg);

$V_m$  é o volume correspondente a massa da amostra ( $m^3$ ).

### 5.2.8 Eficiência do gaseificador

Quando o gás pobre é utilizado na alimentação de motores de combustão interna, a expressão mais adequada para a determinação da eficiência de gaseificação,  $\eta_{gaseif.}$  (%), é dada por (CHAVES, 2012; FAO, 1986):

$$\eta_{gaseif.} = \frac{PCI_{gás} \cdot Q_{v\_gás}}{PCI_{biomassa} \cdot M_s} \times 100(\%) \quad (5.10)$$

onde:

$PCI_{gás}$  é o poder calorífico inferior do gás produzido pelo gaseificador ( $J/Nm^3$ );

$PCI_{biomassa}$  é o poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador ( $J/kg$ );

$M_s$  é a vazão mássica da biomassa utilizada no gaseificador ( $kg/s$ ).

### 5.2.9 Eficiência do grupo gerador (motor/gerador)

A eficiência do grupo gerador,  $\eta_{gg}$  (%), é definida como a razão da potência elétrica útil pela potência disponível, ver Eq. (5.11).

$$\eta_{gg} = \frac{Pe_{útil}}{Q_{v\_gás} \cdot PCI_{gás}} \times 100(\%) \quad (5.11)$$

onde:

$Pe_{útil}$  é a potência elétrica útil (W).

### 5.2.10 Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador

A eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador,  $\eta_{sist.}$  (%), é definida pela seguinte equação:

$$\eta_{sist.} = \eta_{gaseif.} \cdot \eta_{gg} \cdot 100(\%) \quad (5.12)$$

## **CAPÍTULO VI**

### **DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **6.1 Introdução**

Neste capítulo são descritos o aparato e os testes preliminares que serviram de avaliação da capacidade de funcionamento do gaseificador e que permitiram, em um segundo momento, promover as correções e melhorias necessárias a deixá-lo em condições de desempenho superiores às nominais, asseguradas por seu fabricante. Descrevem-se, ainda, os testes com o sistema formado pelo gaseificador e grupo gerador, onde houve a preocupação de se evidenciar, também, as regulagens realizadas no motor, e os benefícios que o seu bom funcionamento trazem para o gaseificador, e conseqüentemente à geração da potência.

#### **6.2 O aparato experimental**

O equipamento básico usado nos ensaios abaixo descritos foi o sistema constituído pelo gaseificador indiano, ver Figura 6.1 e pelo grupo gerador, ver Figura 6.2, ambos já descritos com detalhes, nas seções 2.6 e 3.6.



Figura 6.1 – Gaseificador importado da Índia, montado no LI.



Figura 6.2 – Motor da MWM D229-4 convertido e já com os acessórios para ser alimentado pelo gás pobre.

## 6.2.1 Instrumentos e equipamentos empregados

### 6.2.1.1 Serra de bancada elétrica

A serra de bancada elétrica, ver Figura 6.3, foi utilizada na formatação da biomassa que alimentou o gaseificador.



Figura 6.3 - Serra de bancada elétrica.

#### 6.2.1.2 Balança eletrônica digital

Para avaliação da massa da biomassa de alimentação do gaseificador, foi usada a balança eletrônica do tipo digital, marca BEL, com capacidade máximo de 12,000 kg com exatidão de 0,001 g, No caso de avaliações de massa, para análises, uma digital de precisão de marca Shimadzu, com exatidão de 0,0001 g. ver Figura 6.4 (B), foi empregadas.



Figura 6.4 – Balanças eletrônica digital, BEL (A) e de precisão (B).

### 6.2.1.3 Acendedor a gás

O acendedor a gás, é um instrumento que fazendo uso de um carburante gasoso, quando em chamas, ver Figura 6.5, tem a capacidade de produzir uma tocha fácil de ser regulada e, portanto, adequada ao acendimento do gaseificador.



Figura 6.5 - Acendedor a gás.

### 6.2.1.4 Pistola estroboscópica de ponto, ou de ponto indutiva

A pistola estroboscópica, ver Figura 6.6, é um instrumento eletrônico utilizado para a verificação do ângulo de avanço do ponto de ignição em motores do tipo ICE.



Figura 6.6 – Verificação do ângulo de ignição, utilizando uma pistola estroboscópica.

#### 6.2.1.5 Tacômetro digital a laser

Tacômetro digital a laser é um instrumento que mede velocidades, especialmente de partes de motores, ou eixos, em rotação, com a vantagem de dispensar o contato físico com a peça em movimento. A Figura 6.7 ilustra o tacômetro a laser, que mede de 2,5 a 99999 rotações por minuto, rpm, com resolução de 0,1, até 999,9 rpm, e de 1, para rotações acima de 1000 rpm.



Figura 6.7 – Tacômetro digital a laser.

#### 6.2.1.6 O simulador de carga

O simulador de cargas é um equipamento que tem por objetivo possibilitar a avaliação, de forma indireta e contínua, da potência do motor, que se encontra acoplado a um gerador elétrico, ao se excitar um banco de resistências elétricas, ver Figura 6.8. É constituído por um conjunto de três equipamentos: dois bancos de resistências, com capacidade de 45 kW cada, e um painel de controle. O painel dispõe de um visor onde se pode fazer a leitura de vários parâmetros como frequência e potência elétrica, além de permitir que se estabeleça, através de um botão rotativo, em qual potência o desempenho do motor será examinado.



Figura 6.8 – Simulador de Carga (Banco de resistência A, gerador B e painel de controle C).

#### 6.2.1.7 Sistema de controle de rotação

O sistema de controle de rotação, conhecido também como governador eletrônico, é um conjunto de equipamentos responsáveis pela constante manutenção da rotação do motor com a variação da carga aplicada. Este sistema é constituído de um pick-up magnético, que emite um sinal de frequência para uma unidade controladora de velocidade, que por sua vez, envia um sinal de tensão para um motor magnético que está interligado com o eixo do corpo de borboleta, que acelera o motor, ver Figura 6.9.



Figura 6.9 – Pick-up Magnético (A), Unidade Controladora de Velocidade (B) e Atuador (C).

#### 6.2.1.8 Vacuômetro analógico

Como se sabe, um vacuômetro, ver Figura 6.10, é um tipo de manômetro utilizado para medir pressões inferiores a uma atmosfera física.



Figura 6.10 - Vacuômetro utilizado na determinação da pressão do gás que alimenta o motor.

### 6.2.1.9 Termobalança

Termobalança, ver Figura 6.11, é um equipamento que utiliza a termogravimetria para medir as variações de massa de uma amostra durante o aquecimento (ou resfriamento) ou quando mantida a uma temperatura específica. Esta mede, principalmente, a diferença de massa devida à: evaporação, sublimação, decomposição, oxidação, redução e também adsorção/dessorção de gás.



Figura 6.11 - Termobalança do Laboratório de Carvão Ativado.

### 6.2.1.10 Paquímetro

Na determinação das dimensões da biomassa foi utilizado um paquímetro, ver Figura 6.12.



Figura 6.12 - Paquímetro sendo utilizado para verificar as dimensões da biomassa.

#### 6.2.1.11 Analisador de Energia

O analisador de energia, ver Figura 6.13, é um equipamento de teste eletrônico usado na análise das características de desempenho de redes elétricas ativas, registrando consumo, potência real, fator de potência, etc.



Figura 6.13 – Analisador de energia registrando o consumo de energia, potência, etc, dos equipamentos de acionamento do gaseificador..

#### 6.2.1.12 Tubo de Pitot

Como é de conhecimento geral, o Tubo de Pitot serve para se medir a velocidade de fluidos, em modelos físicos de laboratórios de hidráulica, de aerodinâmica e também em hidrologia. Nesse último caso para a medição indireta de vazões em rios e canais, em redes de abastecimento de água, em adutoras, em oleodutos e ainda a velocidade dos aviões, avaliando-se, aí, a do escoamento do ar. Tubos de Pitot, ver exemplo na Figura 6.14, foi fabricado e aferido no próprio Laboratório de Inovação, LI.



Figura 6.14 – Tubo de Pitot, lado esquerdo, Fabricado no LI para determinação da vazão de gás pobre consumida pelo motor, e lado direito, instalado juntamente com o tubo em “U” com querosene e sendo aferido.

#### 6.2.1.13 Manômetro em “U”

Os manômetros em “U”, usados nesse trabalho, ver Figura 6.15, tinham como líquido o querosene.



Figura 6.15 - manômetro em “U”, utilizado na determinação da vazão do gás consumido pelo motor.

#### 6.2.1.14 Termômetro Digital com sensor de temperatura

Na avaliação de temperaturas foram utilizados termômetros digitais com sensores de temperatura do tipo k, ver Figura 6.16, recomendados para uso contínuo, em atmosferas inertes ou oxidantes, até 1260°C.

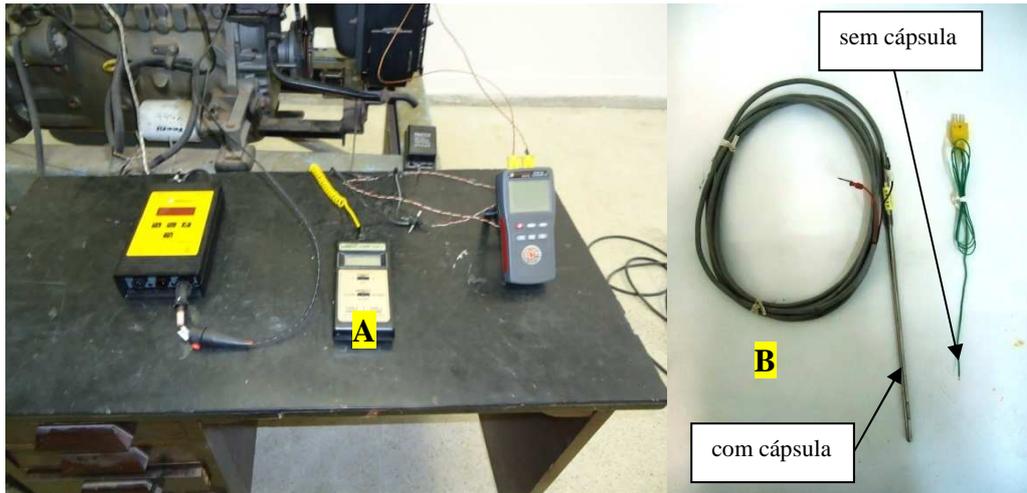


Figura 6.16 - Termômetros digitais (A) e sensores de temperaturas constituídos de termopares do tipo K (B).

#### 6.2.1.15 Anemômetro digital

Anemômetro é um instrumento utilizado para medir a velocidade do vento, e também, em alguns casos, a sua direção e temperatura. O utilizado neste trabalho, ver Figura 6.17, foi o da marca ICCEL modelo AN – 4870, com as seguintes especificações: velocidade do ar até 35 m/s, vazão até 99.999 m<sup>3</sup>/min, temperatura de bulbo seco de 20 ° C a 60 ° C e de bulbo úmido de 22 ° C a 70 ° C.



Figura 6.17 - Anemômetro digital.

#### 6.2.1.16 Bomba de vácuo

Bomba de vácuo é um equipamento destinado à produção de vácuo (pressão menor do que uma atmosfera) ou à redução adicional da pressão de um vácuo já existente. Uma bomba de vácuo pode ser de deslocamento positivo, ou seja, do tipo que transporta uma carga de gás de uma entrada para uma saída ou escape, centrífugos ou criogênicos. A bomba de vácuo utilizada neste trabalho foi do tipo deslocamento positivo de pistões com funcionamento a seco, ver Figura 6.18.



Figura 6.18 - Bomba de vácuo de deslocamento positivo.

#### 6.2.1.17 Notebook

Para o registro e processamento de medições, direto da bancada de testes, usou-se um microcomputador portátil com processador Intel Atom inside de 1.6 GHz com 1 GB de memória RAM, ver Figura 6.19.

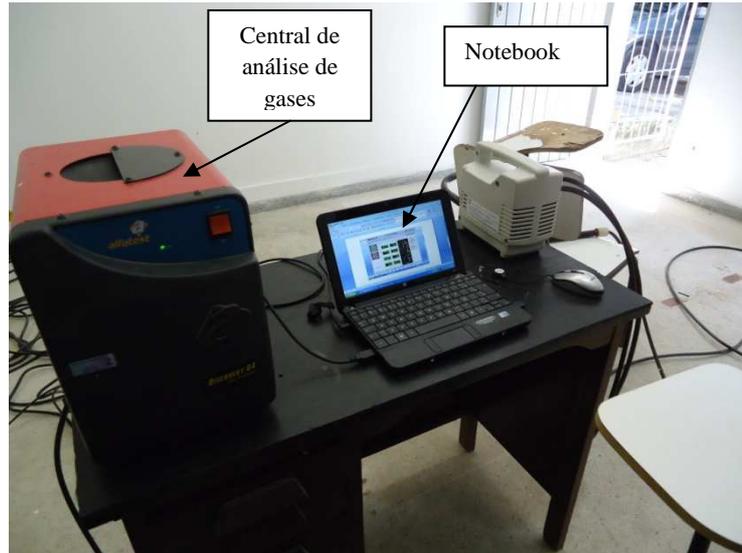


Figura 6.19 - Notebook conectado a central de análise de gases.

#### 6.2.1.18 Analisador de gases veiculares

A análise dos gases foi feita com o Discovery G4 da Alfateste, constituído de quatro componentes: central de análise eletrônica, sonda, compressor de ar e regulador de pressão, ver Figura 6.20.

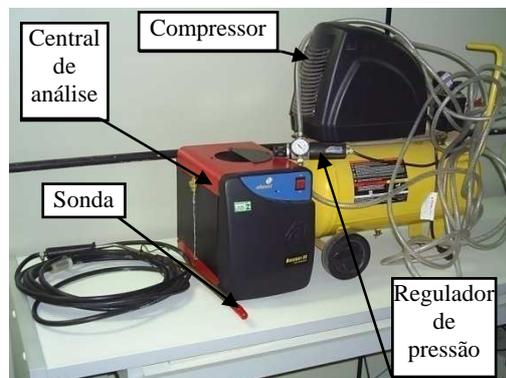


Figura 6.20 – Analisador de gases Discovery G4 da Alfateste.

#### 6.2.1.19 Bomba centrífuga

Uma vez que há no sistema do gaseificador a necessidade de deslocar fluidos com importantes alturas de carga, são empregadas três bombas centrífugas, ver Figura 6.21.



Figura 6.21 - Bomba Centrífuga para bombeamento de água para lavagem do gás pobre.

#### 6.2.1.20 Garrafa de coleta de amostras de gás pobre para análise

Produzida no próprio LI, as garrafas de coleta de amostras serviram para a retirada e armazenamento de amostragens do gás pobre, a serem analisadas no Laboratório de Combustível do Depto. de Química da UFPB, LACOM. Para suas confecções escolheu-se o material mais adequado, o qual não poderia reagir com gás, nem permitir que o gás reagisse com a atmosfera externa. Concluiu-se que o melhor material, considerando-se, inclusive seu custo, seria o Politereftalato de etileno (PET), utilizado na fabricação das garrafas do PET dos refrigerantes, ver Figura 6.22. O referido plástico apresenta alta resistência mecânica (impacto) e química, além de constituir excelente barreira para gases e odores.



Figura 6.22 - Garrafa de coleta de amostras de gás pobre, acoplada a bomba de vácuo.

#### 6.2.1.21 Cromatógrafo gasoso acoplado a espectrômetro de massa (GCMS)

O Cromatógrafo Gasoso (GC) é um equipamento que permite a separação de uma amostra de gás complexa (mistura) em seus constituintes que entram sequencialmente no Espectrômetro de Massa (MS), executando, assim, a análise individual de cada um dos seus compostos. As substâncias separadas saem das colunas dissolvidas no gás de arraste e passam por um detector; dispositivo que gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de material desorvido. O registro desse sinal em função do tempo, para cada substância, aparece como picos com área proporcional à sua massa, o que possibilita a análise quantitativa da amostra. O modelo utilizado foi o GCMS – QP 2010 da SHIMADZU, ver Figura 6.23.



Figura 6.23 - Espectrômetro de Massa com Cromatografia Gasosa (GCMS - QP 2010) do LACOM.

## 6.3 Os primeiros experimentos com o sistema gaseificador/grupo gerador

### 6.3.1 Testes preliminares

Os testes preliminares realizados no LI, tiveram como principal objetivo, a avaliação das condições de funcionamento e de operação dos componentes do conjunto gaseificador e grupo gerador.

Os principais aspectos apreciados nos ensaios iniciais foram:

1. A condição de funcionamento do sistema de bombeamento para lavagem dos gases;
2. O estado de operacionalização dos sensores de temperatura e de pressão, distribuídos ao longo do gaseificador;
3. O tempo necessário para a geração do gás pobre a partir de rejeitos de madeiras, buscando-se observar, visualmente, a cor e a intensidade da chama piloto, para se saber quando o gás poderia ser usado como combustível motor;
4. As pressões na tubulação de distribuição do gás produzido;
5. O funcionamento do sistema de remoção de cinzas;
6. O volume produzido de alcatrão;
7. As condições de partida e de funcionamento do motor com gás pobre, sem carga, utilizando-se redutores/moduladores convencionais empregados para gás natural e gás liquefeito de petróleo.

Analisando-se o funcionamento do sistema de lavagem, foram observadas constantes interrupções, sempre que ocorriam os inesperados desarmamentos dos contactores elétricos das bombas, com conseqüente parada do gaseificador, cujo processo dinâmico depende do fluxo de água.

Nestes ensaios, ao se fazer uma inspeção detalhada nos equipamentos, sensores, controladores, contactores, dispositivos auxiliares, etc., foi verificado que: todos os sensores de temperatura (termopares e Pt-100), a exceção de um, estavam “abertos”; muitos contactores tinham limites de amperagem abaixo daqueles necessários ao bom funcionamento dos equipamentos que protegiam; o travamento do sistema que promove a liberação de cinzas, devido a passagem de biomassa, ou carvão para o sistema motorizado

de remoção, reduzindo o fluxo de gás pobre produzido; o sensor de oxigênio, que indicava o nível de queima da biomassa não estava respondendo adequadamente; o sistema de controle e de registro de temperatura dos Pt-100, do painel de controle, estava danificado; não estava havendo sincronismo no processo de entrada da água de lavagem e de seu retorno através do tanque de decantação; não foi incorporado um anemômetro que registrasse o fluxo de gás produzido. Finalmente não havia um analisador de energia, que facilitaria a análise da eficiência do conjunto gaseificador/grupo gerador, na produção de energia elétrica. É necessário acrescentar que o gaseificador não veio equipado com instrumento necessário a se determinar a velocidade do gás na linha.

Com base nas dificuldades comentadas acima, buscou-se de imediato:

1. Adquirir um analisador de energia que permite a avaliação da eficiência energética do sistema gaseificador/grupo gerador, ver Figura 6.13.
2. Projetar, construir e aferir, no LI, um tubo de Pitot, para avaliar as velocidades na linha de gás produzido, ver Figura 6.14.
3. Substituir todos os contactores não adequados à proteção dos equipamentos elétricos.
4. Dimensionar, e comprar um soprador de queimadores.
5. Reavaliar a necessidade de se instalar um modulador de gás (carburador de gás) no motor convertido.
6. Corrigir e aferir todos os sensores de temperatura com problemas, bem como consertar o mostrador (display) de temperatura.
7. Construir a grelha que não veio, da Índia, com o gaseificador, necessária a evitar a queda da biomassa ou do carvão no removedor de cinzas, ver Figura 6.24.



Figura 6.24 - Grelha construída e instalada.

8. Tornar automático o controle de entrada e de saída de água de lavagem no tanque de decantação.

Feitas as correções acima citadas, colocou-se o gaseificador em funcionamento para testar os redutores convencionais utilizados com gás Liquefeito de Petróleo, LP, e com Gás Natural, GN, com o gás de baixo poder calorífico produzido pelo gaseificador alimentando o motor convertido. Devido à baixa pressão do gás pobre, os redutores convencionais não deram a vazão suficiente para o funcionamento do motor. Isto exigiu o projeto e fabricação, no próprio LI, de um sistema de controle de fluxo para tornar possível a alimentação, ver Figura 6.25. Com tal sistema foi possível fazer funcionar o motor convertido, desde sua partida, até seu funcionamento a uma rotação constante de 1800 rpm (gerenciada por um sistema eletrônico de controle de rotação, Figura 6.9) , sem carga, com o gás pobre.



Figura 6.25 - Controlador de fluxo manual da mistura ar/gás.

Nesta fase, foi verificado que ao se introduzir uma carga no motor, um pouco superior à menor conseguida pelo simulador de carga (8,4 kW), havia uma súbita parada de seu funcionamento. Examinando-se a causa, foi observado que ocorria uma sucção de água de lavagem dos gases para o motor, a qual estava inundando todo o compartimento do filtro de tecido, responsável pela retenção de particulados do gás. Considerações técnicas constataram que tendo o gaseificador sido projetado para operar com um motor dual, onde a partida se daria com diesel e durante todo seu funcionamento seria usado de 18 a 20 % de diesel, operá-lo apenas com o gás provocava um arrasto de água, tendo em vista a pequena dimensão dos condutos molhados juntamente com a alta velocidade do gás. Desta forma, o problema foi corrigido alargando-se todos os condutos, como pode ser observado ao se comparar as Figuras 6.26 e 6.27.



Figura 6.26 - Gaseificador antes das modificações.



Figura 6.27 - Gaseificador após as modificações.

## 6.4 Procedimentos experimentais para os testes após correções no sistema gaseificador/grupo gerador

### 6.4.1 Padronização da biomassa

A biomassa (rejeitos de madeiras) utilizada foi cortada em tabletes com tamanhos mais próximos possíveis daquele requerido (60 mm x25 mm x25 mm), ver Figura 6.28. A padronização dos tamanhos garante queima mais uniforme no reator, por não dar lugar a canais preferenciais para o ar admitido. Deve ser salientado que dentre a biomassa utilizada, havia praticamente cinco tipos de rejeitos madeira, com massas específicas diferentes. Das cinco, quatro juntas formavam basicamente a biomassa definida como mista. Aquela com massa específica mais uniforme foi denominada de biomassa do tipo densa.



Figura 6.28 - Biomassa em pedaços para uso no gaseificador.

#### 6.4.2 Verificação do teor de umidade da biomassa

Antes de se abastecer o reator com a biomassa, avaliava-se o seu teor de umidade. Esta avaliação foi executada no Laboratório de Carvão Ativado do Centro de Tecnologia da UFPB, LCA, fazendo uso de uma termobalança, ver Figura 6.11. A temperatura utilizada para esses ensaios foi de 105 ° C, programação auto, valor da variação do percentual de umidade mínima de 0,1 %. No procedimento, quando a amostra em estudo apresentava uma diferença de perda de umidade inferior a 0,1 %, o ciclo de secagem era finalizado automaticamente, e o mostrador exibia o valor do teor de umidade avaliado. Na determinação da umidade da biomassa, foram selecionados, ao acaso, três amostras do tipo misto (de cada tipo de madeira que a constituía) e três do tipo densa, ver Figura 6.29.



Figura 6.29 - Amostras 1,2,3 e 4 que formam a biomassa do tipo mista, e logo abaixo a biomassa do tipo densa.

#### 6.4.3 Verificação da massa específica da biomassa

Para a determinação da massa específica da biomassa, se faz necessário o conhecimento das suas dimensões e sua respectiva massa. As amostras utilizadas neste procedimento foram as mesmas da determinação do teor de umidade, ver Figura 6.29.

A partir da coleta dos dados acima, avaliou-se a massa específica das amostras de biomassa, utilizando a Eq. (5.9).

#### 6.4.4 Aferição do conjunto tubo de Pitot com manômetro em “U”

A aferição dos conjuntos, tubo de Pitot com manômetro em “U”, utilizados para determinação das vazões de gás pobre que alimenta o motor e dos gases de escape, foi feita provocando-se uma vazão de ar, em uma tubulação, utilizando-se, para tanto, dois tipos de sopradores, ver Figura 6.14. Por sua vez, os valores das vazões foram registrados com o anemômetro digital, ver Figura 6.17, comparando-se os valores de leitura com os calculados a partir da Eq. (5.8), tendo-se o cuidado de se efetuar a devida conversão para  $\text{m}^3/\text{min}$ .

#### 6.4.5 Procedimentos para o início do funcionamento do gaseificador

Ao se fazer funcionar o gaseificador pela primeira vez, o reator foi completamente carregado de carvão vegetal, ficando o gás a queimar, por duas horas na chama piloto, ver Figura 6.30. Na sequência o carvão vegetal não foi mais empregado, uma vez que ao se desligar o gaseificador sempre fica carvão remanescente.

É recomendável que em toda e qualquer operação a biomassa seja preparada com as dimensões, teor de umidade e massa específica recomendados. Estes cuidados garantirão que o gás pobre gerado, após lavagem, tenha qualidade suficiente para alimentar motores de combustão interna.

Para dar início à ignição do gaseificador, o operador deverá adotar os seguintes procedimentos:

- 1- Verificar se a biomassa está a pelo menos 1 (um) metro acima do nível da entrada lateral de ar do gaseificador;
- 2- Certificar-se de que não há cinzas acumuladas no reservatório;
- 3- Abrir a tampa superior do reator e desbloquear todos os canais de ar;
- 4- Abrir parcialmente a válvula de gás do queimador, e fechar completamente a válvula de gás ligada ao motor;
- 5- Ligar o chiller;
- 6- Ligar as bombas d'água dos coolers e do chiller ;
- 7- Manter, nos bocais de ar laterais, com auxílio do acendedor a gás, ver Figura 6.5, uma chama até que o carvão fique com uma coloração avermelhada;

- 8- Após 15 minutos, no máximo, o gás produzido deverá ser capaz de se inflamar na presença de uma chama;
- 9- E depois de mais 15 minutos de funcionamento com o queimador aceso, a chama terá uma coloração azulada, podendo, o gás, a partir daí, ser utilizado para o funcionamento do motor de combustão interna;
- 10- A biomassa deverá ser completada em intervalos de tempo, ficando a depender do consumo do gás.
- 11- As cinzas deverão ser removidas em intervalos de tempo suficientes a não comprometer a passagem do gás através do reservatório das cinzas.

#### 6.4.6 Verificação qualitativa (visual) da intensidade da chama

A qualidade do gás produzido para dar início à partida do motor é determinada, de forma visual, pela coloração da chama piloto no queimador, ver Figura 6.30. Quando a chama estiver com uma coloração azulada, o procedimento de partida do motor poderá ser iniciado.



Figura 6.30 - Chama piloto do queimador para inspeção visual da qualidade do gás pobre.

#### 6.4.7 Automação do motor com a variação da carga

A automação da potência do motor em função da variação da carga, fazendo com que seja mantida a rotação do motor em valor constante de trabalho, isto é, 1800 rpm, foi obtida empregando-se um sistema de controle de rotação, ver Figura 6.9.

Este sistema mostrou-se bastante estável à variação da carga aplicada ao motor funcionando com o gás pobre como combustível.

#### 6.4.8 Ajuste da mistura ar/gás pobre

O controle da mistura ar/gás admitida pelo motor foi realizado de forma manual. Para tanto foi construído no LI um controlador de fluxo, ver Figura 6.25. Através da escolha correta do posicionamento da borboleta deste controlador foi possível dar partida ao motor e funcioná-lo com cargas, a uma rotação constante de 1800 rpm, de forma contínua, até a carga máxima suportada, sem o uso do soprador.

#### 6.4.9 Ajuste do ângulo de ignição

O ajuste do ângulo de ignição do motor foi executado fazendo o deslocamento do sensor em relação ao parafuso de referência instalado na polia motriz, ver Figura 6.31. Para verificação do ângulo, utilizou-se de uma Pistola estroboscópica de ponto, ou de ponto indutiva, juntamente com um goniômetro impresso instalado na face da polia. O goniômetro foi ajustado de tal forma que o 0° coincidia com o ponto morto superior do primeiro cilindro. Ao se fazer funcionar o motor, o ângulo visualizado nas marcas de referência, com auxílio da pistola, ver Figura 6.6, seria o de seu funcionamento.

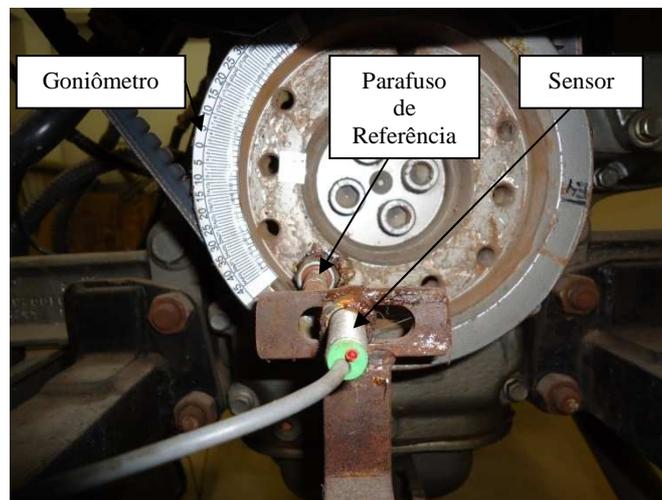


Figura 6.31 - Vista do sensor, parafuso de referência do sensor e goniômetro, instalados na polia motriz do motor.

#### 6.4.10 A partida do motor

O tempo para início do procedimento de partida do motor é de no máximo 15 minutos após o início do funcionamento do gaseificador.

#### 6.4.11 Variação da carga aplicada ao motor

A variação da potência elétrica solicitada ao motor foi conseguida utilizando-se um simulador de cargas, ver Figura 6.8. Esta variação iniciou-se sempre da menor carga possível (8,4 kWe) até a máxima alcançada para cada ângulo de ignição ajustado.

#### 6.4.12 Avaliação do consumo de biomassa

Para se avaliar o consumo de biomassa com o gaseificador em operação foram utilizados os seguintes procedimentos:

1. Aplicava-se carga ao motor e alimentava-se o gaseificador até que a biomassa atingisse o topo, ver Figura 6.32;



Figura 6.32 – Topo do gaseificador, com visão da biomassa abaixo deste.

2. Cronometrava-se o tempo de funcionamento do motor a dada potência e registrava-se a biomassa adicionada ao gaseificador por meio de uma balança, ver Figura 6.33;



Figura 6.33 - Pesagem dos rejeitos de madeiras antes do abastecimento do gaseificador.

3. O término de cada teste a uma dada potência, se dava com o gaseificador com biomassa até o topo, que era o referencial utilizado;
4. A partir dos dados coletados acima, determinava-se o consumo de biomassa em kg/h, utilizando a Eq. (5.6).

#### 6.4.13 Determinação da vazão de gás que alimenta o motor e dos gases de escape

Para se determinar a vazão de gás combustível que alimenta o motor, e dos gases de escape, utilizou-se um conjunto, tubo de Pitot e manômetro em “U”, ver Figura 6.14. A partir da altura do volume de querosene deslocado, e utilizando a Eq.(5.8), determinava-se a vazão para cada potência ensaiada com o motor.

#### 6.4.14 Determinação da pressão do gás produzido que chega ao motor

Já se tinha conhecimento de que a pressão do gás na linha que alimenta o motor era negativa (vácuo), sendo assim, utilizou-se um vacuômetro analógico para se avaliar as pressões no decorrer dos ensaios, ver Figura 6.10.

#### 6.4.15 Medição de temperaturas nos ensaios

As temperaturas nos ensaios foram medidas com termômetros digitais utilizando termopares do tipo K, ver Figura 6.16. Ao funcionar o motor a uma determinada carga, esperava-se todo sistema, gaseificador e grupo gerador, entrar em regime para começar a registrar as temperaturas monitoradas nos testes.

#### 6.4.16 Determinação da composição do gás produzido pelo gaseificador

A primeira medida da composição do gás produzido pelo gaseificador foi realizada de duas formas diferentes, uma, em tempo real utilizando-se o analisador de gases veiculares, ver Figura 6.20, conectado a um notebook, ver Figura 6.19. Ao mesmo tempo, coletava-se uma amostra do gás na garrafa, ver Figura 6.22, para se fazer a análise no LACOM. Ali, era utilizado um Cromatógrafo gasoso acoplado a espectrômetro de massa (GCMS), ver Figura 6.23. Verificada a consistência dos resultados, passou-se, apenas, a empregar o analisador de gases veicular.

#### 6.4.17 Acompanhamento do volume de alcatrão produzido

A maior parte do volume de alcatrão líquido produzido fica armazenada em um reservatório (purgador) situado pouco antes do primeiro cooler, ver Figura 6.34. O conteúdo do purgador era esvaziado periodicamente, e seu volume verificado com o auxílio de uma proveta.

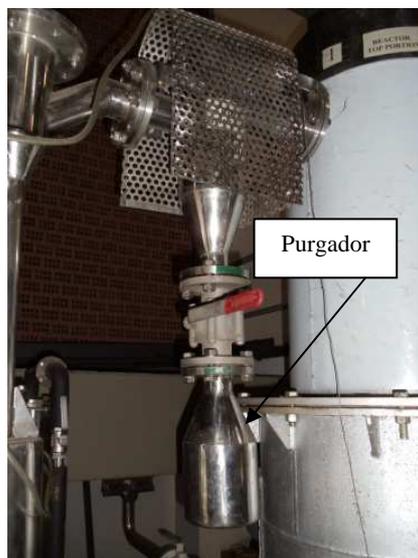


Figura 6.34 – Purgador do alcatrão produzido na gaseificação da biomassa.

## **CAPÍTULO VII**

### **RESULTADOS E ANÁLISES**

#### **7.1 Introdução**

Os resultados experimentais e suas análises relacionados com à geração de potência e energia elétrica obtida a partir de um sistema formado por gaseificador e um grupo gerador, GGG, com motor diesel otolizado, usando rejeitos de biomassa, são considerados no presente capítulo.

Considerando a importância das temperaturas no diagnóstico do funcionamento do sistema GGG, as magnitudes das principais temperaturas necessárias ao quadro de avaliações são apresentadas. Sendo, por outro lado, o poder calorífico da biomassa, parâmetro determinante da energia interna do gás e, logo, da potência gerada pelo motor, que por sua vez está relacionada com o seu teor de umidade (GARCIA, 2002) e com a sua massa específica, essas grandezas são avaliadas a partir de amostras da biomassa utilizada, tendo-se verificado, posteriormente, que seus valores se situam dentro dos limites recomendados pela literatura especializada (DASAPPA, 2003).

#### **7.2 Medidas de temperaturas**

7.2.1 Temperatura da água do sistema de lavagem e do gás pobre antes da primeira lavagem e depois da segunda.

A Tabela 7.1 faz referência às temperaturas: da água do sistema do gaseificador (antes e após a lavagem do do gás pobre); do gás pobre, previamente à primeira lavagem,

$T_{gás\_al}$ ; posteriormente àquela lavagem,  $T_{gás\_dl}$  e logo após a segunda lavagem (desta feita realizada com água refrigerada no chiller,  $T_{gás\_ac}$ ).

Tabela 7.1- Temperaturas da água do sistema de lavagem e do gás pobre para diversas potências produzidas pelo gerador, fazendo-se uso dos vários tipos de biomassa considerados (Vazão da água da lavagem primária 6000 l/h).

Pot. (kWe)	Biomassa	$T_{gás\_al}$ (°C)	$T_{H2Oent.}$ (°C)	$T_{H2Osaída}$ (°C)	$T_{gás\_dl}$ (°C)	$T_{H2Ochiller}$ (°C)	$T_{gás\_ac}$ (°C)
8,4	Mista	148	27	27	29	5	10
8,4	Mista	170	28	28	29	5	10
8,4	Mista	163	28	28	30	5	10
13	Mista	181	28	28	30	5	10
18	Mista	210	28	29	30	6	10
8,4	Mista	116	27	27	27	8	10
13	Mista	153	27	27	27	6	9
18	Mista	186	27	28	28	6	9
23	Mista	214	27	29	29	6	9
8,4	Mista	132	26	26	26	9	11
13	Mista	164	26	27	27	7	10
18	Mista	190	26	27	27	6	8
23	Mista	212	26	27	27	5	8
26	Mista	230	27	28	27	6	8
8,4	Densa	149	27	28	28	5	9
13	Densa	173	27	28	28	5	8
18	Densa	202	27	28	29	5	9
23	Densa	229	27	28	28	5	8
26	Densa	257	28	28	29	5	9

Legenda:  $T_{gás\_al}$  temperatura do gás pobre antes da primeira lavagem;

$T_{gás\_dl}$  temperatura do gás pobre depois da primeira lavagem;

$T_{H2Ochiller}$  temperatura da água do sistema de lavagem secundária, proveniente do chiller;

$T_{\text{gás\_ac}}$  temperatura do gás pobre logo após a segunda lavagem com água do chiller;

$T_{\text{H}_2\text{Oent}}$  temperatura da água do sistema de lavagem primária, antes do processo;

$T_{\text{H}_2\text{Osaída}}$  temperatura da água do sistema de lavagem primária, depois do processo.

Observa-se que durante os experimentos, a temperatura da água do sistema de lavagem primária (vazão de 6000 l/h),  $T_{\text{H}_2\text{Oent}}$  (°C), antes da lavagem, na entrada da bomba, se situou entre 26 °C e 28 °C. Esta pequena variação deve-se ao grande volume de água proveniente de uma caixa com 10.000 L, que serve como sumidouro. Tais fatores, também, são decisivos na pequena oscilação das temperaturas pós lavagem, que faz a temperatura  $T_{\text{H}_2\text{Osaída}}$  passar de 26 °C a 29 °C. Apesar de ser observada uma variação na temperatura do água do chiller,  $T_{\text{H}_2\text{Ochiller}}$ , para baixas potências, vale salientar que quando em regime, esta se situa no entorno de 5 °C independente da potência gerada. Pode-se constatar, também, que independente do tipo de biomassa usado, a elevação da potência gerada faz aumentar, consideravelmente, como era de se supor, a temperatura do gás pobre, antes do processo de lavagem,  $T_{\text{gás\_al}}$ .

7.2.2 Temperaturas do gás pobre ao longo da tubulação de distribuição até o coletor de admissão do motor, do ar e da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor, para cada potência elétrica gerada

A Tabela 7.2 apresenta as temperaturas: do gás pobre após o removedor de cinzas,  $T_{\text{CH1}}$ ; após trocar calor com a biomassa na parte superior do reator,  $T_{\text{CH2}}$ ; ao final da lavagem primária,  $T_{\text{CH3}}$ ; depois de completar a lavagem secundária,  $T_{\text{CH4}}$ ; na entrada do coletor de admissão do motor,  $T_{\text{gás\_adm}}$ ; do ar admitido pelo motor,  $T_{\text{ar\_adm}}$ , e da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor,  $T_{\text{Mist\_ar/gás}}$ , para as diferentes potências elétricas geradas nos ensaios.

Tabela 7.2- Temperaturas do gás pobre ao longo da tubulação de distribuição até o coletor de admissão do motor, do ar e da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor, para cada potência elétrica gerada

Pot. (kWe)	Biomassa	T <sub>CH1</sub> (°C)	T <sub>CH2</sub> (°C)	T <sub>CH3</sub> (°C)	T <sub>CH4</sub> (°C)	T <sub>gás_adm</sub> (°C)	T <sub>ar_adm</sub> (°C)	T <sub>Mist_ar/gás</sub> (°C)
8,4	Mista	326	148	29	10	22	30,8	31
8,4	Mista	385	170	29	10	22	31,1	31
8,4	Mista	386	163	30	10	23	30,2	32
13	Mista	400	181	30	10	22	30,9	32
18	Mista	425	210	30	10	21	31,2	31
8,4	Mista	257	116	27	10	24	29,5	31
13	Mista	331	153	27	9	23	31	32
18	Mista	385	186	28	9	23	34,3	32
23	Mista	444	214	29	9	23	33,7	34
8,4	Mista	297	132	26	11	25	31	31
13	Mista	335	164	27	10	25	31,1	32
18	Mista	390	190	27	8	23	32,3	31
23	Mista	419	212	27	8	22	35,7	33
26	Mista	441	230	27	8	22	33,5	33
8,4	Densa	300	149	28	9	25	28,9	31
13	Densa	365	173	28	8	24	32,1	33
18	Densa	407	202	29	9	24	34,8	34
23	Densa	444	229	28	8	23	36,2	34
26	Densa	502	257	29	9	23	34,9	35

Legenda: T<sub>CH1</sub> temperatura do gás pobre logo após o removedor de cinzas;

T<sub>CH2</sub> temperatura do gás pobre após trocar calor com a biomassa na parte superior do reator;

T<sub>CH3</sub> temperatura do gás pobre após a lavagem primária;

T<sub>CH4</sub> temperatura do gás pobre após a lavagem secundária;

T<sub>gás\_adm</sub> temperatura do gás pobre ao chegar na entrada do coletor de admissão do motor;

T<sub>Mist\_ar/gás</sub> temperatura da mistura ar/gás pobre admitida pelo motor.

Verifica-se da Tabela 7.2, apesar de ter conhecimento de que no processo existem temperaturas maiores do gás, que as temperaturas mais elevadas, registradas, são aquelas na saída do removedor de cinzas, ponto 4 na Figura 3.5. De uma forma geral, todavia, nas

outras situações não se pode caracterizar a influência do tipo de madeira nessas temperaturas. Vê-se, ainda, que as temperaturas do gás, ao deixar o aquecedor de biomassa,  $T_{CH2}$ , dependem diretamente da magnitude dos valores de  $T_{CH1}$ .

De grande importância para o funcionamento do sistema é o valor da diferença de temperaturas entre o gás pobre no final da lavagem secundária e o da entrada do coletor de admissão do motor,  $T_{CH4} - T_{gás\_adm}$ . Como pode ser identificado na Tabela 7.2, ela, em todos os casos é significativa, chegando aos 15 °C.

### 7.2.3 Temperatura dos gases de escape do motor e da parede externa do escapamento

#### 7.2.3.1 Temperatura dos gases de escape do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa

A Figura 7.1 mostra as temperaturas dos gases de escape do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa. É visível que o ângulo de 9°, sobretudo no caso da biomassa mista, teve uma influência maior na elevação da temperatura desses gases, que, regra geral, é proporcional a magnitude da potência gerada.

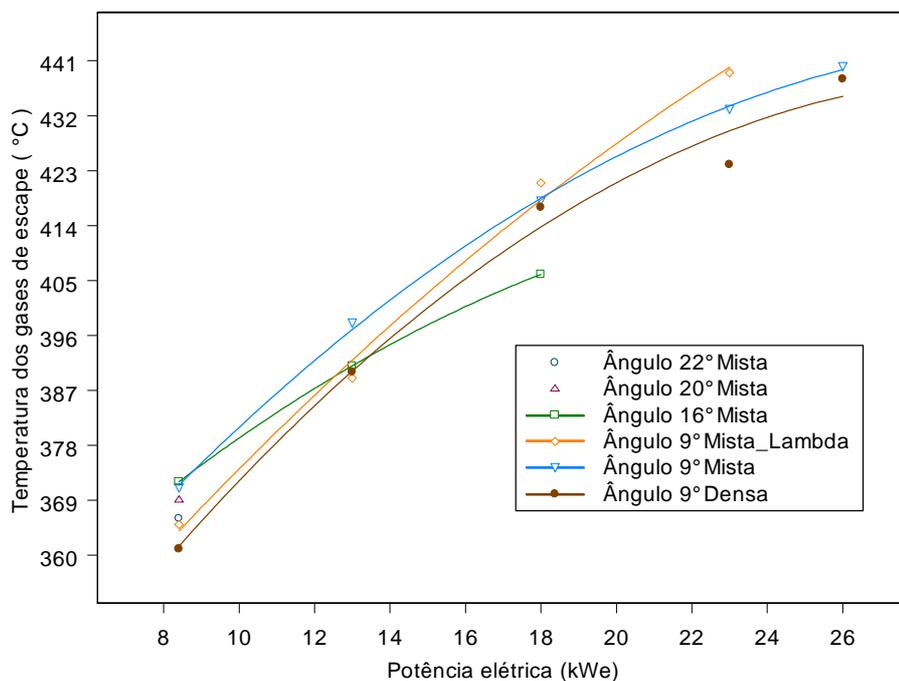


Figura 7.1 - Temperatura dos gases de escape do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa.

### 7.2.3.2 Temperatura da parede externa do escapamento do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa

A Figura 7.2 apresenta o comportamento da temperatura da parede externa do escapamento do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando as biomassas mista e densa. Uma vez que o nível de potência determina o nível da temperatura dos gases de escape, nesse caso, também, independentemente do tipo de biomassa a temperatura da parede externa mostrou-se proporcional à potência gerada. E como ocorreu na Figura 7.1, o ângulo de ignição de 9° garantiu, temperaturas mais elevadas.

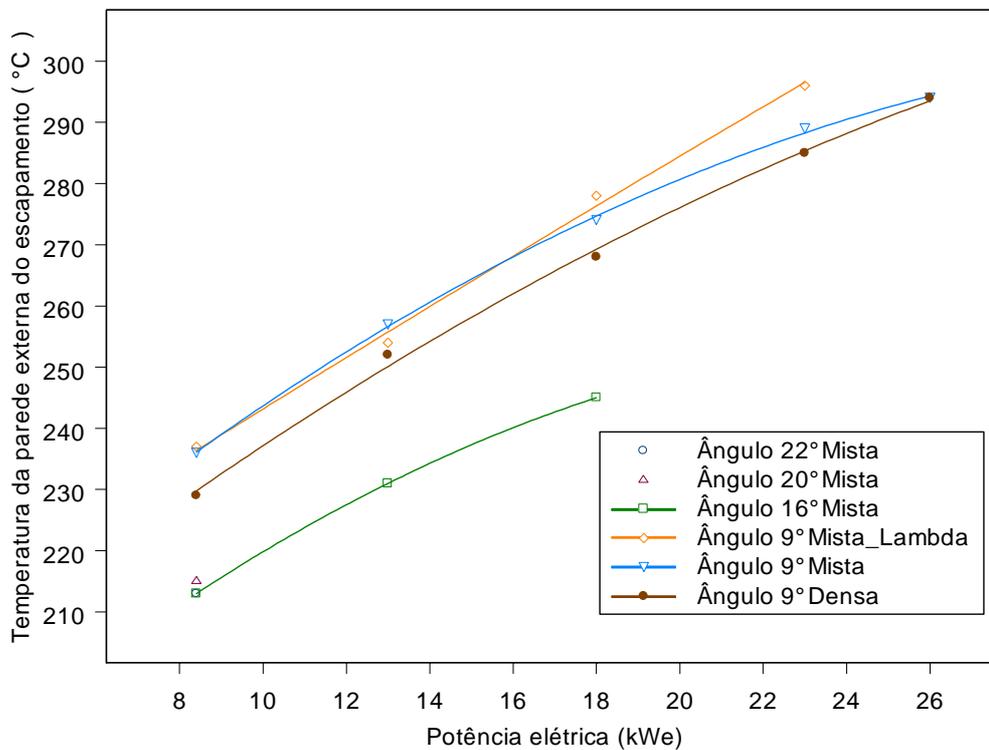


Figura 7.2 - Temperatura da parede externa do escapamento do motor em função da potência elétrica gerada, para vários ângulos de ignição, utilizando biomassa mista e densa.

### 7.2.4 Temperatura da água do sistema de arrefecimento do motor

Durante todos os experimentos realizados com o sistema GGG, a maior temperatura da água do sistema de arrefecimento do motor registrada foi de 81 °C. Este

mesmo motor antes de ser convertido trabalhando em regimes de potências semelhantes registrou temperatura igual a 83 °C.

### **7.3 Determinação da massa de cinzas produzidas**

Na produção de gás pobre, o gaseificador, após consumir 166,814 kg de biomassa, gerou 0,212 kg de cinzas (resíduo inorgânico remanescente da queima da matéria orgânica ao se transformar em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>), ou seja, 0,13 %. Segundo Figueiredo (2009), dos produtos de pirólise de madeira seca, na gaseificação a alta temperatura (900 °C), 10 % é carvão. Valores médios registrados na literatura mostram que o percentual de teor de cinza de madeiras se situa entre 0,14 a 2,73 % (VALE et al, 2002). Um carvão vegetal de qualidade deve possuir teor de cinza inferior a 3 % (PEREIRA et al, 2000). No caso do presente estudo o percentual ficou abaixo desses citados. Embora se saiba que a correlação entre a quantidade de lignina da biomassa e o teor de cinzas seja negativa, dando um indicativo de que biomassas mais densas permitem um percentual menor de cinzas após pirólise, verifica-se que a eficiência da queima é, de fato, fator preponderante para a redução desse percentual.

### **7.4 Determinação do volume de alcatrão produzido**

O gaseificador, após consumir 166,814 kg de biomassa, produziu um volume de 65 ml (64,3 g) de alcatrão líquido. Verifica-se que o percentual em massa, do alcatrão produzido, em relação ao consumo de biomassa, é de 0,039 %, valor percentual bem menor que o encontrado na literatura. Segundo Pimenta et al (2001) a lignina apresenta um rendimento em carvão de 55% quando a carbonização é realizada entre 450 – 550 °C. Os outros 45% estão divididos em alcatrão (15%), líquido condensado (20%) e gases não condensáveis (10%). Toda pirólise de madeira durante sua decomposição térmica há a consequente emissão da fumaça proveniente do leito de reação. Na condensação dessa fumaça é produzido o licor pirolenhoso, que por decantação pode ser separado em uma fase aquosa (alcoóis, cetonas, e outros compostos voláteis de baixo peso molecular) e outra viscosa denominada de alcatrão vegetal (parte solúvel, 5 % em base seca e outra insolúvel, 6,5% em base seca), composto de água, fenóis voláteis e piche. Uma vez que a composição

final do ácido pirolenhoso depende de vários fatores entre os quais o teor de umidade da biomassa e a temperatura de carbonização, além do próprio processo de carbonização.

O baixo percentual de alcatrão gerado nos experimentos, nestes tipos de gaseificadores, ocorre tendo em vista que seus fluxos atravessam a zona de combustão e de redução que se encontram a altas temperaturas, quando são submetido ao processo de craqueamento, ver seção 3.5.1.2. Estudos mostram que quanto mais seca a biomassa, menos alcatrão é gerado em processos de gaseificação.

### 7.5 Determinação da pressão do gás pobre na linha de distribuição em função da potência elétrica gerada

A Figura 7.3 exibe o comportamento da pressão do gás pobre na linha de canalização do sistema GGG, em função da potência elétrica gerada pelo grupo gerador, para cada ângulo de ignição do motor.

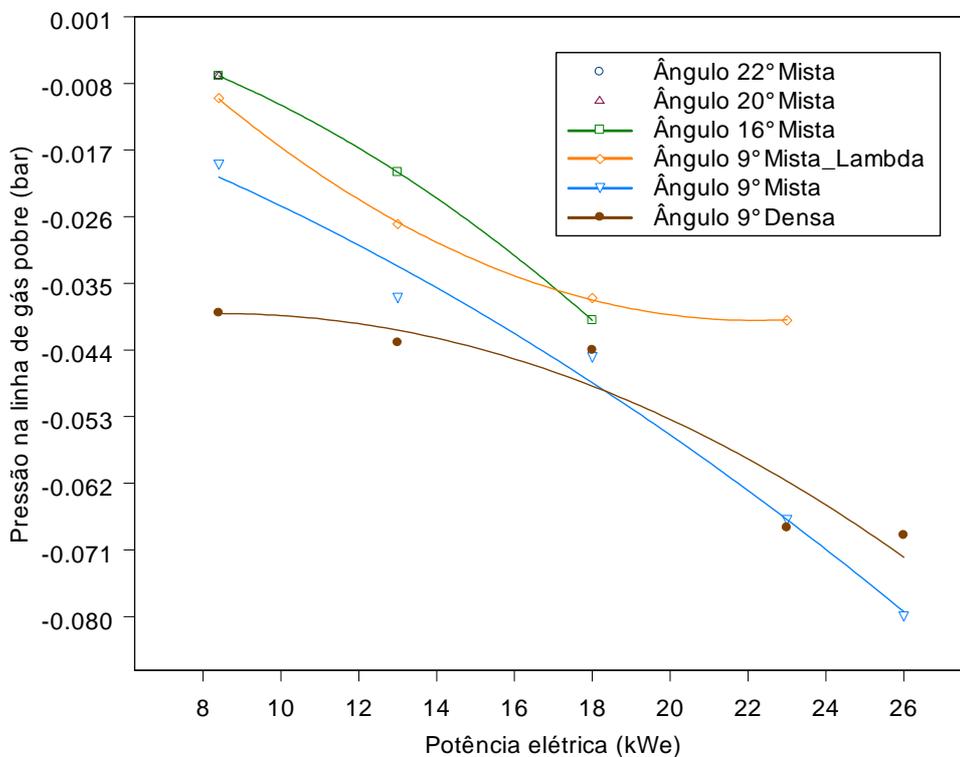


Figura 7.3 - Pressão do gás pobre na linha de distribuição em função da potência elétrica gerada.

Em termos gerais, depreende-se da Figura 7.3 que a pressão de vácuo se eleva na medida em que a potência elétrica gerada cresce. Deve ser entendido que na composição dessa Figura 7.3 dois aspectos são observados: 1. A quantidade de gás gerada é função da massa específica da biomassa e do nível do funcionamento do motor. Assim, via de regra, a madeira densa produziu, devido à maior dificuldade de ser realizada a sua queima, uma menor quantidade de gás, em potências mais elevadas, ver Figura 7.8. Por outro lado, quanto menor o ângulo de ignição, maior a aspiração, ver Figura 7.3, e conseqüentemente, maior é a velocidade da reação da combustão da biomassa.

### **7.6 Determinação da potência elétrica consumida pelos equipamentos do gaseificador**

Como foi visto no Capítulo III, uma série de equipamentos elétricos dão controle e suporte ao funcionamento do gaseificador. Entende-se, desta forma, que parte da energia gerada serve ao seu próprio funcionamento. Para se analisar a eficiência do sistema GGG foi necessário, portanto, se computar o total dessa energia em kW, fazendo-se uso de um analisador de energia, ver Figura 6.13. A energia total consumida pelo sistema foi de 4 kW. Percebeu-se, ao mesmo tempo, que em um sistema mais racional, é possível reduzir uma bomba de 1 kW, no circuito de lavagem primária.

### **7.7 Determinação do fluxo dos gases de escape do motor em função da potência elétrica produzida**

A Figura 7.4 ilustra os valores do fluxo dos gases de escape em função da potência elétrica produzida, com o motor funcionando com ângulos de ignição diferenciados, para produção de gás pobre com biomassa mista e densa.

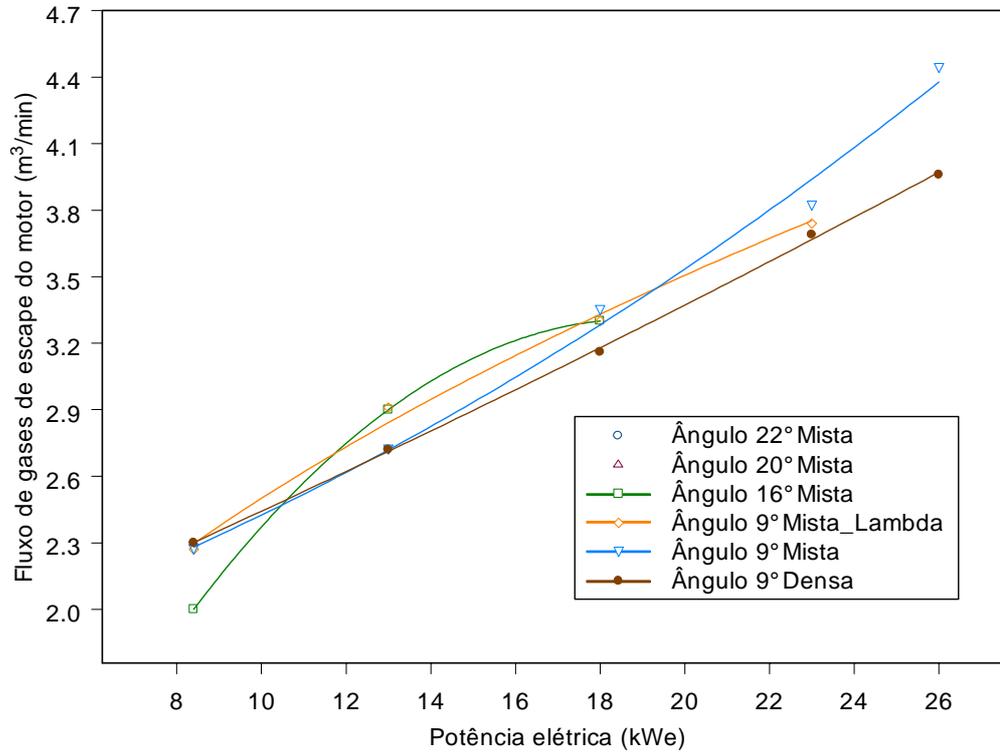


Figura 7.4 - Fluxo dos gases de escape do motor em função da potência elétrica produzida, para diversos ângulos de ignição do motor.

Verifica-se, ao analisar a Figura 7.4, que o fluxo dos gases de escape do motor, aumenta, para produzir uma maior geração de potência elétrica, para todos os ângulos de ignição.

## 7.8 Teor de umidade da biomassa

A Tabela 7.3 apresenta, em triplicata, os resultados do teor de umidade das amostras de biomassa empregadas nos experimentos, obtidos a partir dos procedimentos descritos na seção 6.4.2, de grande importância para determinação do poder calorífico inferior da biomassa.

Tabela 7.3–Teor de umidade das amostras dos rejeitos de madeira utilizados como biomassa no gaseificador, obtidos em triplicata.

Amostra	Teor de Umidade (%)	Teor de Umidade (%)	Teor de Umidade (%)	Média (%)
1	9,54	8,89	10,10	9,51
2	9,73	8,86	7,80	8,80
3	9,21	8,38	7,87	8,49
4	7,79	6,82	6,79	7,13
Densa	10,33	8,78	6,69	8,60

Como pode ser observado na Tabela 7.3, o teor de umidade das amostras da biomassa utilizada no gaseificador variou de 6,69 a 10,33% (o máximo aceitável, para uso neste tipo de gaseificador, é de 15%). E uma vez que aqueles valores foram obtidos em triplicata, optou-se por se empregar, nos cálculos, seus valores médios, isto é, para a madeira mista, 8,48 %, e para a madeira densa, 8,60 %.

### 7.9 Massa específica da biomassa

Na Tabela 7.4, estão apresentados os valores, também em triplicata, das massas específicas das amostras da biomassa utilizada nos experimentos, advindos de procedimentos descritos na seção 6.4.3.

Tabela 7.4–Valores, em triplicata, de amostras das massas específicas dos rejeitos de madeira utilizados como biomassa no gaseificador

Amostra	Massa específica 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica 2 (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica 3 (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )
1	488,28	474,37	637,47	533,37
2	708,79	783,98	668,37	720,38
3	495,93	583,82	725,76	601,84
4	759,84	668,86	788,74	739,15
Densa	725,49	753,28	803,35	760,71

Verifica-se, na Tabela 7.4, que todas as massas específicas das amostras ficaram acima de  $300 \text{ kg/m}^3$ , valor limite inferior sugerido pela literatura técnica especializada (DASAPPA, 2003), quando empregada em gaseificadores semelhantes ao usado neste trabalho. De fato, segundo a Forest Products Laboratory (1974), citado por Pimenta et al. (2001), as magnitudes das massas específicas apresentadas na Tabela 7.4, se situa entre a madeira pesada ( $500$  a  $600 \text{ kg/m}^3$ ) e a muito pesada ( $600$  a  $720 \text{ kg/m}^3$ ).

## **7.10 Poder Calorífico Inferior (PCI)**

### 7.10.1 Determinação do PCI da biomassa

O Poder Calorífico Inferior da biomassa utilizada nos testes foi equivalente a  $18029,63 \text{ kJ/kg}$ , para a madeira mista, e  $18002,78 \text{ kJ/kg}$  para a do tipo densa. Valores obtidos a partir da Eq. (5.2). Esses valores são concordantes com aqueles encontrados na literatura especializada (QUIRINO et al., 2004).

### 7.10.2 Determinação do PCI do gás pobre

Na Figura 7.5 aparecem os valores típicos do Poder Calorífico Inferior do gás pobre, determinados a partir da Eq. (5.1), em função da potência elétrica gerada, fazendo uso de parâmetros relacionados com os ensaios realizados com o sistema GGG.

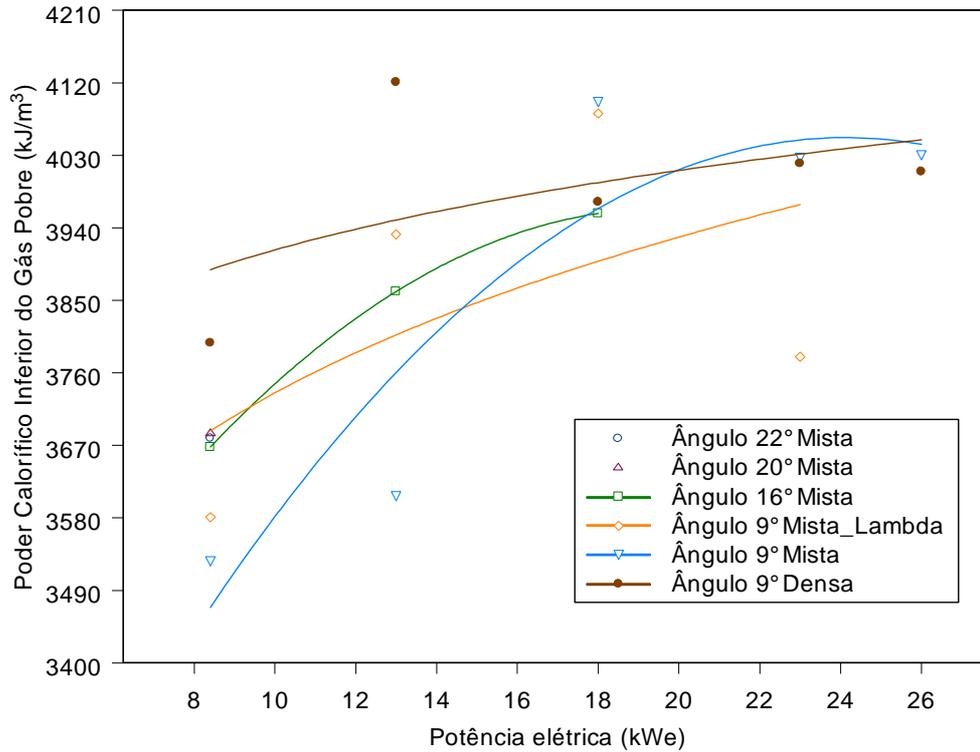


Figura 7.5 - Valores típicos do Poder Calorífico Inferior do gás pobre, em função da potência elétrica gerada, com ângulos de ignição variados.

Deduz-se da Figura 7.5 que independentemente do tipo de madeira ou do ângulo de avanço utilizado, o poder calorífico inferior do gás pobre cresce com o aumento da potência elétrica gerada. Por sua vez, o ajuste com ângulo de ignição de 9°, utilizando madeira do tipo densa, gera o gás pobre, em uma grande faixa, com maiores PCI.

7.10.3 Curva característica do PCI do gás pobre em função do teor de monóxido de carbono, desenvolvida neste trabalho

A Figura 7.6 mostra a curva do Poder Calorífico Inferior do gás proveniente da gaseificação de madeira em função do teor de monóxido de carbono.

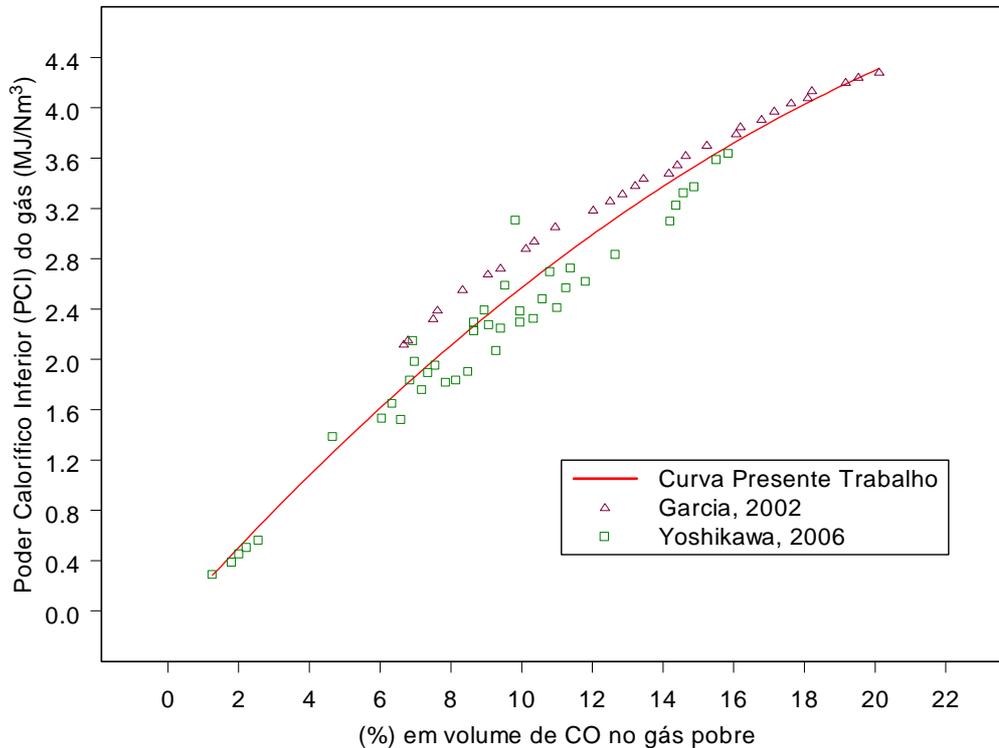


Figura 7.6 - Curva representativa do Poder Calorífico Inferior do gás proveniente da gaseificação de madeira em função do teor de monóxido de carbono, obtida neste trabalho, a partir dos dados de Garcia, 2002, e de Yoshikawa, 2006.

A curva que aparece na Figura 7.6 foi construída a partir da combinação de dados de CO x PCI, apresentados por Yoshikawa (2006) e de outros pontos obtidos de correlações advindas de Garcia (2002). Desta maneira a supramencionada curva, dada pela Eq. (5.1) não apenas abrange um domínio de percentual de CO que varia de 1 a aproximadamente 21 %, mas expressa um elevado grau de correlação entre o Poder Calorífico Inferior e o valor de CO, tendo em vista que o cálculo do Qui-quadrado resultou em 0,9379, o que gerou um coeficiente de correlação de Pearson,  $R = 0,968$ , bem próximo de 1 que significa uma correlação perfeita positiva entre estas duas variáveis (SANTOS, 2007).

7.10.3.1 Valores do poder calorífico do gás pobre, obtidos em função do teor de CO a partir da Eq. 5.1, e outros

A Figura 7.7 mostra os valores, utilizados neste trabalho, do poder calorífico do gás pobre, determinado a partir do teor de CO obtido experimentalmente com o analisador de gases veicular, e da Eq. (5.1). Observa-se, também, os dados de Garcia (2002), os de Yoshikawa (2006) e aquele obtido a partir da composição de uma amostra de gás pobre, legendada como experimental LACOM.

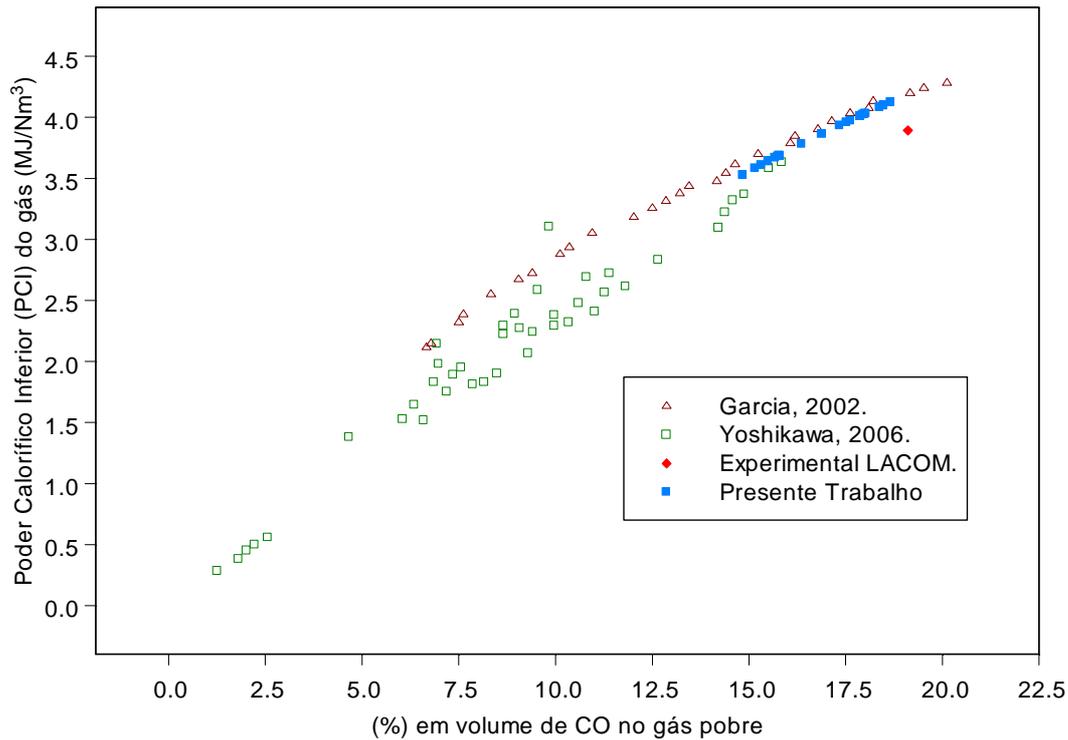


Figura 7.7 - Valores do poder calorífico do gás pobre, obtidos em função do teor de CO a partir da Eq. 5.1, e outros.

Da Figura 7.7, nota-se que os valores do poder calorífico do gás pobre, utilizados neste trabalho, determinados a partir do teor de CO obtido em tempo real fazendo-se uso do analisador de gases veicular, ver Figura 6.20, quando comparados com valores da literatura (Garcia, 2002; Yoshikawa, 2006), e estatisticamente, retratam, com um grau de confiança elevado, valores obtidos na prática. Observou-se também que o valor do poder calorífico do gás pobre, obtido a partir da composição deste a uma dada referência (motor ajustado com ângulo de ignição de  $9^\circ$ , produzindo 24 kWe, biomassa mista), determinada no LACOM, e complementada com uso do analisador veicular, ver seção 6.4.16, quando analisado estatisticamente, não alterou o valor do coeficiente de correlação de Pearson,  $R = 0,968$  dando um desvio padrão de  $\sigma_y = 0,975 \text{ MJ/Nm}^3$ .

## 7.11 Composição do gás pobre determinada a partir da análise por Cromatografia gasosa, com espectrômetro de massa (GCMS) e do analisador de gases veicular

A Figura 7.8 ilustra os dados identificados, da Composição do gás pobre a partir da análise de uma amostra com GCMS do LACOM.

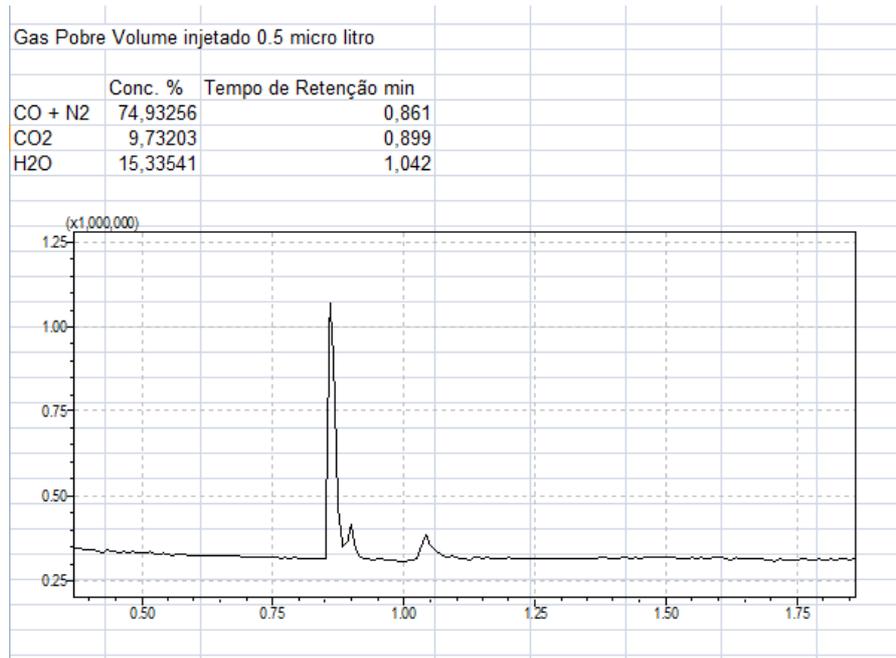


Figura 7.8 - Composição do gás pobre a partir da análise com Cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massa do LACOM.

Da Figura 7.9, pode-se visualizar a composição do gás pobre a partir do analisador de gases veiculares. Estes dados pertencem ao mesmo gás da amostra utilizada para análise no LACOM, analisada diretamente na tubulação, ao mesmo tempo da coleta.



Figura 7.9 – Composição do gás pobre da amostra enviada para o LACOM, identificada a partir do analisador de gases veiculares.

Na comparação entre os dados, da Figura 7.8 e 7.9, se identifica uma real consistência entre os valores do teor de CO<sub>2</sub>. Esta coerência garante de certa forma uma confiabilidade no conjunto dos dados. Pois o GCMS não é capaz de distinguir o teor de CO do de N<sub>2</sub>, devido a semelhança do peso molecular, dando como resultado a soma. Daí a necessidade do uso dos dois equipamentos, para, por diferenças, obter a composição real da amostra do gás em estudo.

## **7.12 Consumo específico**

### **7.12.1 Consumo específico de biomassa em função da potência elétrica do grupo gerador, utilizando diferentes ângulos de ignição**

É, basicamente, através do ajuste do ângulo de ignição que se consegue fazer funcionar um motor com elevado desempenho, isto é, produzindo potências com baixo consumo de combustível. Particularmente nesse sistema GGG, constatou-se, ao longo desse estudo, ver Figuras 7.3 e 7.5, que a escolha desse ângulo corrobora, também, com o funcionamento do gaseificador, aumentando a geração do gás pobre com elevação do PCI, devido ao aumento da pressão de vácuo na linha de gás. Do ponto de vista químico a literatura especializada mostra que a razão maior para o aumento do desempenho do sistema decorre da elevação do CO, como demonstraram Yoshikawa (2006) e Garcia (2002).

A Figura 7.10, mostra gráficos de potência elétrica, em função do consumo específico de biomassa, levantados a partir de dados experimentais obtidos com o motor do grupo gerador funcionando apenas com gás pobre, operando com diversos ângulos de ignição.

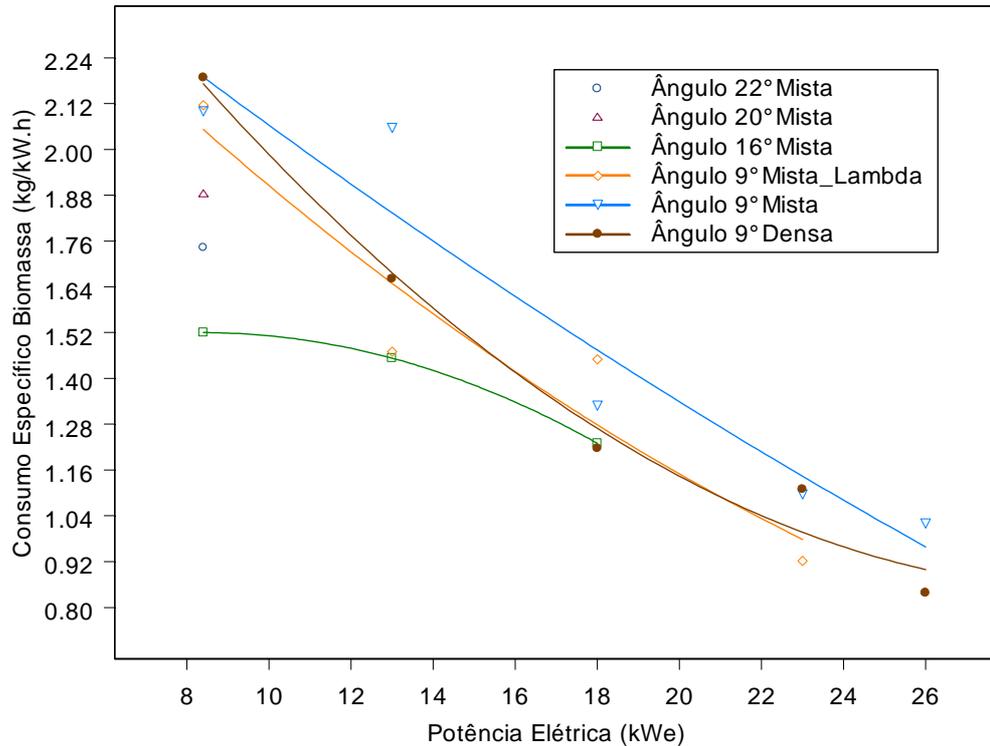


Figura 7.10 - Curvas de consumos específicos de biomassa mista e densa em função das potências elétricas produzidas pelo grupo gerador, para vários ajustes de ângulos de ignição do motor operando apenas com gás pobre.

Mais uma vez, a partir da Figura 7.10, considerando-se toda a gama de variação da potência, se percebe que o ângulo de 9°, independentemente do tipo de madeira, foi o que proporcionou o menor consumo em função da potência produzida. Quando se leva em conta potências até 18 kW, observa-se, contudo, ser a curva que a combinação do ângulo igual a 16° que mais se adapta à condição de economicidade.

Vê-se, ainda, na mesma figura que o menor consumo específico para a potência máxima atingida, isto é, 26 kWe, foi alcançado com a madeira densa e o ângulo de 9°, e foi de 0,838 kg/kWe.h. No Instituto de Pesquisas Tecnológica, IPT, com o motor do tipo dual trabalhando com 25 % de diesel e 75 % de gás pobre produzido por um gaseificador originalmente do mesmo tipo do ensaiado neste trabalho, gerou 20 kWe, tendo consumo de biomassa igual a 0,900 kg/kWe.h (APOLINARIO, 2004, MARTINS, 2006).

### 7.12.2 Consumo específico de gás pobre em função da potência elétrica do grupo gerador, para diferentes ângulos de ignição

A Figura 7.11, mostra gráficos de consumo específico de gás pobre em função das potências elétricas produzidas pelo grupo gerador, para vários ajustes de ângulos de ignição do motor.

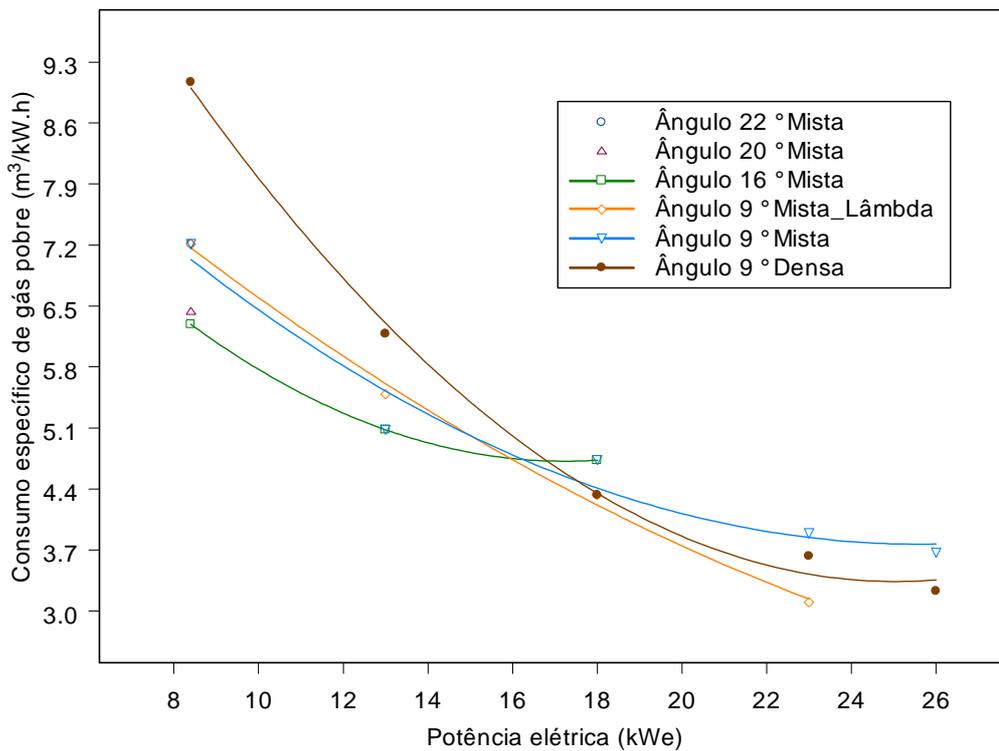


Figura 7.11 - Curvas de consumos específicos de gás pobre em função das potências elétricas produzida pelo grupo gerador, para vários ajustes de ângulos de ignição do motor.

Verifica-se que dentre as curvas apresentadas na Figura 7.11, levando-se em conta todo o intervalo de potência, aquelas relacionadas ao ângulo de ignição de 9° com biomassa mista e densa, são as responsáveis pelos menores consumos específicos de gás pobre. Constata-se, ainda, nessas mesmas condições, que o menor consumo específico de gás pobre ocorreu para máxima potência e correspondeu a 3,67 m³/kW.h. Analisando de forma isolada, o ajuste com o ângulo de ignição de 16°, obteve menor consumo específico em uma faixa de potências elétricas, mas limitou o seu valor máximo em 18 kW.

### 7.13 Eficiências

7.13.1 Eficiência do grupo gerador na produção de potência elétrica, para o motor funcionando apenas com gás pobre, ajustado para diferentes ângulos de ignição

Os valores das eficiências do grupo gerador foram determinados pela Eq. (5.11). A Figura 7.12 mostra esses valores em função da potência elétrica, para o motor operando com vários ângulos de ignição.

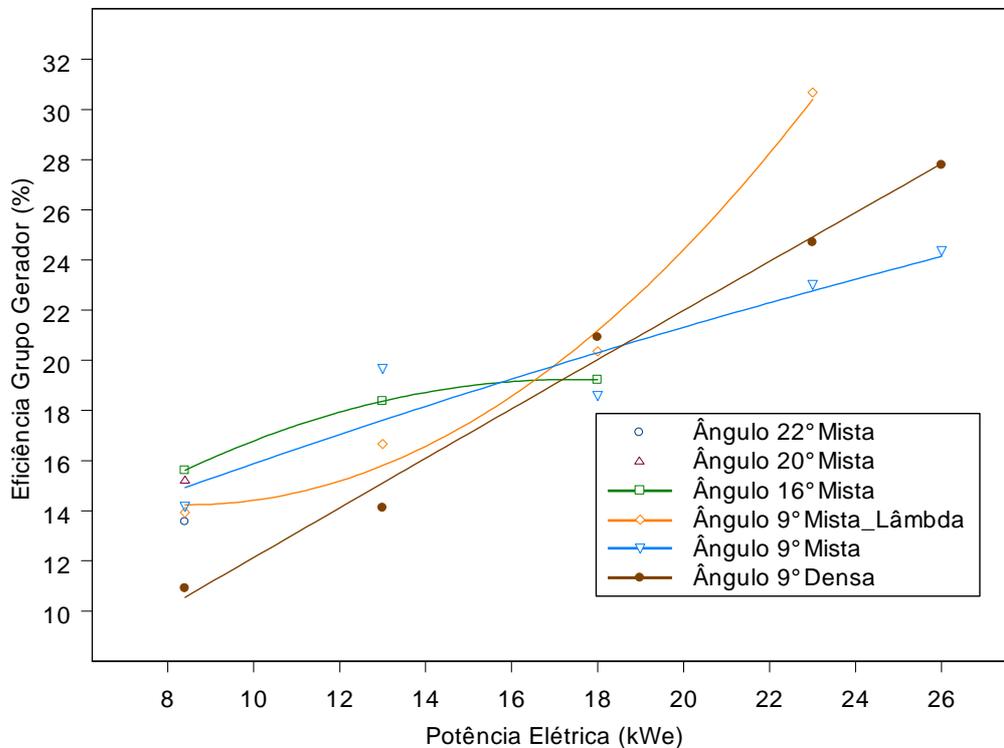


Figura 7.12 – Curvas de eficiências do grupo gerador em função da potência elétrica gerada para as biomassas mista e densa, com vários ângulos de ignição. Motor operando, apenas, com gás pobre.

Da Figura 7.12, verifica-se que o grupo gerador, para potências acima de 16 kWe, foi o mais eficiente, com o motor funcionando com ângulo de ignição de 9°. Para potências menores do que 18,5 kW, o uso da biomassa mista foi mais efetivo. Já para potências acima de 18,5 kW, a biomassa densa mostrou-se mais adequada. O maior valor registrado foi de 30,68 %. Em um estudo realizado com o mesmo tipo de gaseificador, no IPT, com o motor do tipo dual trabalhando com 25 % de diesel e 75 % gás pobre, gerando a potência

elétrica de 20 kWe, o grupo gerador teve eficiência de 35 % (APOLINARIO, 2004, MARTINS, 2006). Segundo Muraro (2006), os gases pobres, formados basicamente por monóxido de carbono (CO), apesar de possuírem baixo PCI, apresentam maior rendimento volumétrico<sup>1</sup> no motor, uma vez que a razão ar/combustível é menor do que a da maioria de outros combustíveis como gás natural, Gás LP, gasolina, etc.

#### 7.13.2 Eficiência do gaseificador, utilizando biomassa mista e densa, em função do poder calorífico do gás pobre

Na Figura 7.13, pode-se observar a eficiência do gaseificador calculada a partir da Eq. (5.10), em função do poder calorífico inferior do gás pobre, para o grupo gerador funcionando com o motor<sup>1</sup> ajustado com vários ângulos de ignição.

---

<sup>1</sup> Rendimento Volumétrico: é a razão entre o peso de ar aspirado pelo motor no curso de aspiração de um cilindro e o peso de ar que, nas condições de pressão e temperatura do ambiente, seria necessário para ocupar o mesmo volume (OBERT, 1971)

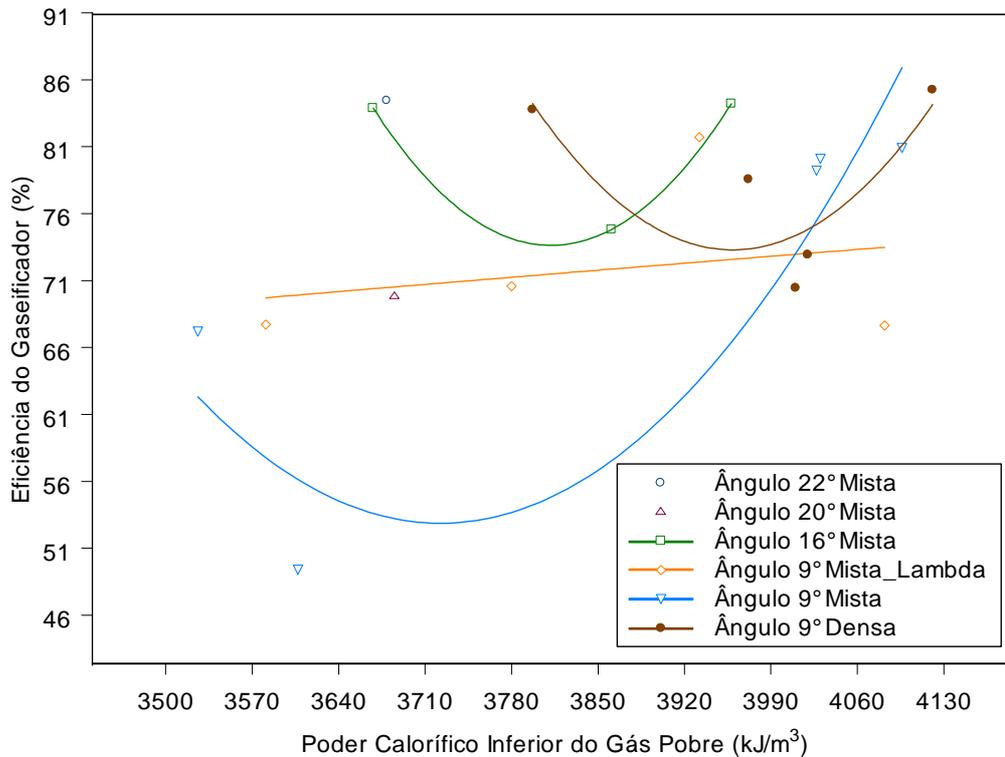


Figura 7.13 - Eficiência do gaseificador, utilizando biomassa mista e densa, em função do poder calorífico do gás pobre, para o grupo gerador funcionando com o motor ajustado com vários ângulos de ignição.

Percebe-se, na Figura 7.13, que para o mesmo valor do poder calorífico, se tem eficiências diferenciadas. A maior eficiência, do gaseificador, registrada foi de 85,25 %, com o motor funcionando com ângulo de ignição de 9°, e biomassa densa. Segundo Reed e Das (1988), na prática, a gaseificação pode converter de 60 % a 90 % da energia da biomassa em energia no gás. No IPT, a maior eficiência registrada para um gaseificador do mesmo tipo foi de 72 %, operando com grupo gerador com motor dual, trabalhando com 75 % de gás pobre e 25 % de diesel, produzindo 20 kWe (APOLINÁRIO, 2004, MARTINS, 2006). Na Índia, no IISc/CGPL, o gaseificador registrou uma eficiência máxima de 79 % (DASAPPA et al, 2003).

### 7.13.3 Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador

A Figura 7.14 ilustra o comportamento da eficiência do sistema GGG na conversão da biomassa em energia elétrica.

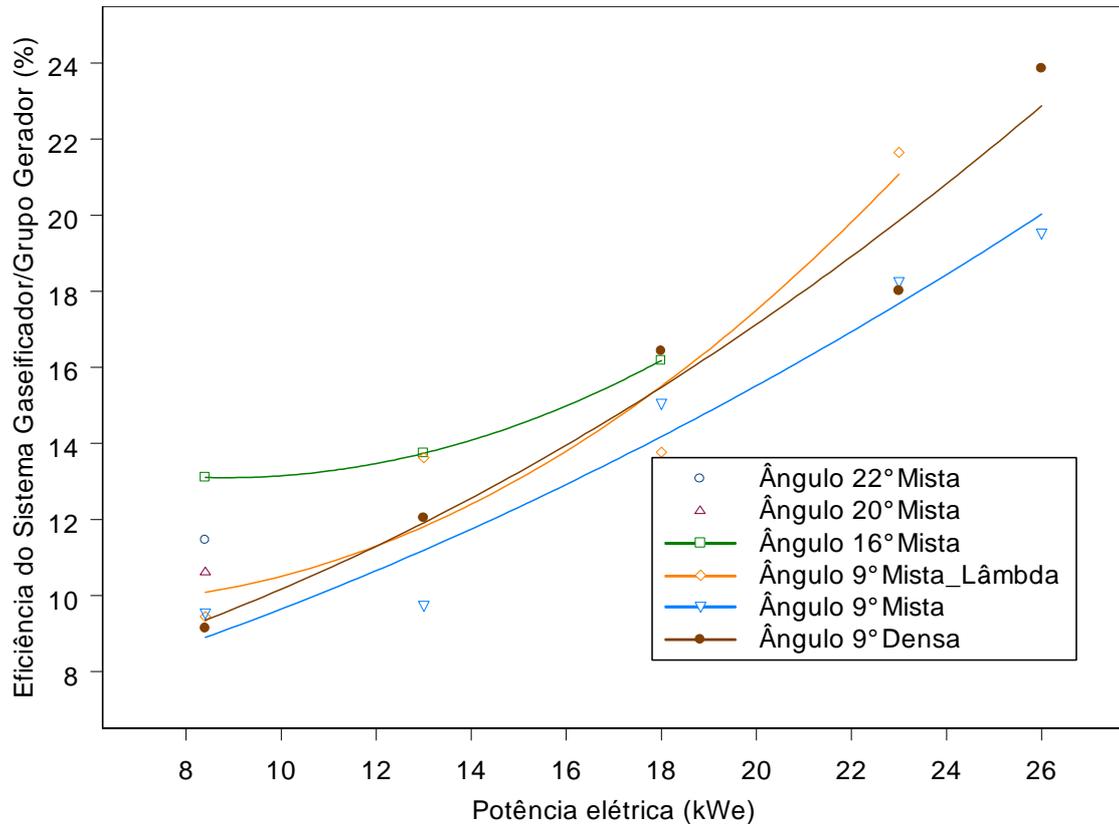


Figura 7.14 - Curvas de eficiências do sistema gaseificador/grupo gerador em função das potências elétricas produzidas, utilizando biomassa mista e densa, com vários ângulos de ignição, e o motor operando apenas com gás pobre.

Nota-se que a eficiência do sistema GGG variou de 9,14 % a um máximo de 23,85 %, na curva referente ao motor com ângulo de ignição ajustado para 9°, com biomassa densa. Em testes realizados no IPT, com um gaseificador idêntico ao desse trabalho, utilizando um motor do tipo dual trabalhando com 25 % de diesel e 75 % gás pobre, a eficiência máxima, do sistema gaseificador/grupo gerador, registrada foi de 20 % (APOLINÁRIO, 2004, MARTINS, 2006). Verifica-se também uma influência do ajuste do ângulo de ignição na eficiência do sistema GGG.

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSÃO

Neste trabalho, de cunho teórico-experimental, houve ocasião de se considerar os aspectos técnicos construtivos e funcionais de um gaseificador importado, de um motor otolizado e de um sistema de geração de energia formado pelo gaseificador/grupo gerador (GGG), todos, suficientemente instrumentalizados. Assim, pode-se inferir, graças aos vários ensaios e as informações coletadas, e levando-se em conta:

**a) o gaseificador que:**

a.1) Em todos os ensaios, o teor de umidade dos rejeitos de madeira usados obedeceram, rigorosamente, ao especificado pelo fabricante do gaseificador, enquanto suas massas específicas estiveram sempre acima da mínima recomendada, o que garantiu a gaseificação adequada desses resíduos.

a.2) A Eq. (5.1), deduzida neste trabalho, advinda da composição dos dados experimentais de Yoshikawa (2006), e da curva de Garcia (2002), cuja distribuição apresentou forte correlação ( $R = 0,968$ ) alargou a faixa de cálculo do PCI do gás pobre, em função do teor de CO, de sua composição. Além do mais, possibilitou a determinação dos valores do poder calorífico do gás pobre, utilizados no presente estudo, a partir do teor de CO, obtido em tempo real, fazendo-se uso do analisador de gases veicular.

a.3) A partir da composição de uma amostra de gás pobre, obtida experimentalmente no LACOM e complementada com o analisador veicular, se chegou ao PCI de  $3,89 \text{ MJ/Nm}^3$ . Usando-se o mesmo valor do teor de CO, isto é 19,11%, na Eq. (5.1) resultou em  $4,18 \text{ MJ/Nm}^3$ . O módulo da diferença entre esses dois valores é igual a  $0,29 \text{ MJ/Nm}^3$ , ou seja, menor do que o desvio padrão calculado dado por  $\sigma_y = 0,975 \text{ MJ/Nm}^3$ . Este fato evidencia que a Eq. (5.1) serve para se fazer estimativas de PCI em termos do percentual de CO.

a.4) Independentemente da biomassa utilizada e da potência de trabalho, a diferença entre a temperatura da água de saída, após a lavagem primária dos gases, e da que entra no gaseificador, oriunda da caixa d'água, se situou entre 0 e 2 °C, ver Tabela 7.1. Em consequência, não foi necessário se utilizar a torre de refrigeração, que veio da Índia, como um dos periféricos;

a.5) O sistema de lavagem como refrigerante do gás pobre, mostrou-se eficiente, pois, apenas com a lavagem primária houve uma redução na temperatura do gás de cerca de 228 °C. Já a secundária fez baixar a temperatura em, aproximadamente, 20 °C. Em todas as situações, a temperatura do gás, após os processos de lavagem, se situou entre 8 e 10 °C, ver Tabela 7.2.

a.6) Observa-se, a partir da Tabela 7.2, que o gás pobre ao chegar ao coletor de admissão do motor tem sua temperatura elevada em 11 à 15 °C. Este fato, reduz, consideravelmente, a ação benéfica da lavagem secundária, realizada com água proveniente do chiller e impede o aproveitamento eficiente do gás. Provavelmente, o uso de isolamento térmico na tubulação entre o final da lavagem secundária e a entrada do coletor de admissão do motor, venha a ser suficiente para minorar essa elevação de temperatura, o que poderá ocasionar um aumento na potência final do motor;

a.7) Embora, em uma primeira análise, se possa julgar que o comportamento do desempenho do motor não tenha qualquer repercussão no do gaseificador, o fato da aspiração promovida pelo motor excitar a produção de gás e a de CO, associado aos resultados experimentais, possibilitaram que fossem apreciados as seguintes ocorrências:

a.7.1) A pressão de vácuo, na tubulação do gaseificador, se eleva na medida em que a potência elétrica gerada cresce, ver Figura 7.3.

a.7.2) A quantidade de gás pobre produzida é função da pressão de vácuo, que, por sua vez, depende do ajuste do motor. (De uma forma geral, menores ângulos de ignição do motor, acarretarão a elevação da pressão de vácuo, ver Figura 7.3, e maior produção de gás pobre, ver Figura 7.11.).

a.7.3) A variação do ângulo de ignição incide diretamente na posição do eixo do corpo de borboleta, para manter a rotação constante em 1800 rpm, o que interfere diretamente na pressão de vácuo na linha de distribuição de gás pobre, que por sua vez, influencia no consumo específico de gás e de biomassa, ver Figuras 7.3, 7.10

e 7.11. Assim, percebe-se que as eficiências do gaseificador estão diretamente relacionadas com o ajuste do ângulo de ignição do motor, ver Figura 7.13.

**b) o motor que:**

b.1) O melhor ângulo de ignição para funcionamento do motor, para potências elétricas superiores a 16 kWe, ver Figura 7.11, foi de 9°, pois proporcionou menores consumos específico de gás pobre. Para potências abaixo da mencionada, o ângulo de 16° se sobressaiu.

b.2) A maior eficiência registrada para o grupo gerador, foi de 30,68 % a potência elétrica máxima de 23 kW. Nessas condições, o motor estava funcionando com lâmbda em torno de 1 (mistura estequiométrica), com ângulo de ignição de 9°, e biomassa mista, ver Figura 7.12.

b.3) O motor que faz uso de apenas gás pobre em sua alimentação não pode funcionar com o fator lâmbda em torno de 1, pois, compromete a estabilidade da rotação, quando há ocorrência de variação de carga.

b.4) O sistema de controle de rotação do motor mostrou-se estável para todos os testes onde foram utilizados uma mistura ligeiramente rica, ou seja, com fator lâmbda  $0,95 \leq \lambda \leq 0,98$ .

**c) O Sistema GGG que:**

c.1) A eficiência cresce com o aumento da potência elétrica. A maior eficiência, do sistema GGG, registrada, foi de 22,52 %, para um ângulo de ignição de 9°, utilizando biomassa densa, ver Figura 7.14. Até a potência 18 kW, o uso do ângulo de ignição de 16° foi mais efetivo. A partir daquela potência, até a máxima ensaiada, o ângulo de ignição de 9° tornou-se mais adequado.

c.2) O ângulo de ignição que proporcionou um menor consumo de biomassa, foi o de 16°, mas limitou a potência máxima em 18 kWe. Dentre os ângulos ensaiados, o que apresentou menor consumo de biomassa, com maior geração de potência elétrica foi o de 9°, com o gaseificador alimentado com biomassa densa, que proporcionou o valor de 0,812 kg/kWe.h, para potência elétrica de 26 kWe, ver Figura 7.10. Este resultado demonstra que o comportamento do sistema analisado é mais eficiente do que o do IPT (APOLINARIO, 2004, MARTINS, 2006). Naquele Instituto, o sistema formado por um gaseificador originalmente semelhante, tinha motor, do grupo gerador, do tipo dual, trabalhando com 25 % de diesel (poder calorífico aproximadamente 9 vezes o do gás pobre) e 75 % de gás

pobre, e gerou a potência máxima de 20 kWe, consumindo 0,900 kg/kWe.h de biomassa.

c.3) Além de ter se mostrado mais eficiente do que o sistema do IPT, foi surpreendente o resultado alcançado em termos do valor da potência máxima, de 26 kWe, fazendo-se uso para o auto funcionamento de apenas 3 kWe. Deve ser observado, ainda, que o sistema original estava projetado para 20 kWe, consumindo 4 kWe, usando motor dual, ou seja, queimando, também, diesel e usando outros componentes como: soprador, modulador e torre de refrigeração, totalmente dispensáveis na concepção aqui adotada. Desta forma, constatou-se que a simplicidade do nosso sistema, não apenas o tornou mais econômico e produtivo, mas também, deixa a possibilidade de ser melhorado, quando for utilizado isolamento térmico em parte de sua tubulação.

Os resultados obtidos mostraram que o uso da energia da biomassa através do gás pobre é uma extraordinária opção energética para geração de energia elétrica, sendo viável, principalmente se a biomassa advém de rejeitos. Como observado, há no País um grande potencial para a utilização de resíduos vegetais em gaseificadores, o que estimula o emprego desses aparatos, que poderão resolver, em grande parte, o dilema do atendimento da demanda energética nacional.

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A partir das observações supramencionadas se recomendaria que:

1. O motor operasse com ângulos de ignição diferenciados, escolhidos a partir das evidências que aparecem nas Figuras 7.10 e 7.11. Tal procedimento viabilizaria o aumento da eficiência do sistema GGG. Para tanto deve ser utilizado um sistema de ignição programável que trabalhe com diferentes ângulos de ignição, a depender da potência gerada.
2. Fosse aproveitado o calor dos gases de escape em cogeração, sobretudo, quando se trabalha com potências elevadas, ver Figuras 7.1, 7.2 e 7.4.
3. Utilizasse isolamento térmico na tubulação, no circuito, após a lavagem secundária, até o coletor de admissão do motor.
4. O funcionamento do gaseificador seja processado, totalmente, independente da rede elétrica. Para tanto, deve-se empregar um grupo gerador de 4 kWe convertido para Gás LP.
5. Utilizasse outras fontes de rejeito biomassa no processo de gaseificação.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2006, “Informativo Semanal no. 237”, 7 a 13 de setembro.
- APOLINARIO, S. M., 2004, “Tecnologia de Gaseificação de Biomassa: Projetos Gaseifamaz e Gaseibras”, 1º Seminário sobre a Utilização de Energias Renováveis para Eletrificação Rural do Norte e Nordeste do Brasil, CENBIO.
- BEN – Balanço Energético Nacional, 2012 – Ministério de Minas e Energia. Disponível em [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf)
- BIG –Banco de Informações de Geração, 2013, “Capacidade de Geração do Brasil– ANEEL”. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp>
- CHAVES, L. I., 2012, “Microgeração de Energia Elétrica com Gás de Síntese de um Gaseificador Concorrente utilizando Mazilaurus Itaúba”. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós- Graduação em Energia na Agricultura, Cascavel – Paraná.
- DASAPPA, S., MUKUNDA, H. S., PAUL, P. J. et al., 2003, “ Biomass to Energy : The Science and Technology of the IISc Bio-energy systems” , 1ed. Índia, ABETS.
- DIAS, M. S. C., 2004, “Uso de Pequenos Gaseificadores para Geração de Energia Elétrica e Bombeamento d’água em Localidades Remotas”, Solarterra Engenharia e Serviços Ltda, São Paulo. Disponível em <http://www.solarterra.com.br/pdf/gaseificadores.PDF>.
- EPRI, 1999, “Electricity Technology Roadmap, Summary and Synthesis”. Palo Alto, CA : Electric Power Research Institute.
- FALL, L.M., 2000, “L’Énergie rurale et la pauvreté dans les pays en développement” Revue de l’Énergie, no. 522, pp. 603-628.

- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986, “Wood Gas as Engine Fuel”. A Report of the Mechanical Wood Products Branch of FAO Forestry Paper No 72.
- FERNANDES, D., 2012, “ Brasil é 10º maior consumidor mundial de energia elétrica “. BBC\_Brasil.[http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2012/03/120331\\_brasil\\_ranking\\_consumo\\_energia\\_df\\_rw.shtml](http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2012/03/120331_brasil_ranking_consumo_energia_df_rw.shtml)
- FERNANDES, M. C., 2000, “Avaliação Tecno-econômica da Gaseificação do Capim- elefante para Eletrificação Rural”. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.
- FERNANDES, M. C., 2004, “Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado”. Universidade Estadual de Campinas. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.
- GARCIA, R., 2002, “Combustíveis e Combustão Industrial”. Rio de Janeiro: Interciência.
- GODINHO, M., 2006, “Gaseificação e Combustão de Resíduos Sólidos da Indústria Calçadista”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.
- GRASSI, G., 1993, “Present e Future Situation of Bioenergy in the E.C.; Strategy for Biomassa Implementation”, apresentação feita no VI Congresso Brasileiro de Energia, , Rio de Janeiro.
- GROENEVELD, M.J., 1980, “The co-current moving bed gasifier”, Ph.D. Thesis, Twente University of Technology, The Netherlands.
- GRÜBLER, A., 1998, “*Technology and Global Change*”. Cambridge, G.-B. : Cambridge - University Press.
- HENRIQUES, R. M., 2009, “Potencial para Geração de Energia Elétrica no Brasil com Resíduos de Biomassa Através da Gaseificação”. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético – COPPE, Rio de Janeiro.

- HOLLINDALE, A.C., BREAG, G.R., REUPKE, P., TARIQ, A.S., 1995, “Decentralized electricity production from biomass”, in Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry, Proceedings of the 8th European Conference, Edited by Chartier, Ph., Beenackers, A.A.C.M., Grassi, G., pp. 1037-1041, Vol. 2.
- ISMAIL, K. A. R., 2000, “Técnicas de Medidas e Instrumentação”. Campinas – SP: do autor. ISBN 85-900609-5-0.
- ITAIPU BINACIONAL, 2013 “Agora é oficial: Itaipu fecha 2012 com um total de 98.287.128 MWh”. Disponível em <http://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/agora-e-oficial-itaipu-fecha-2012-com-um-total-de-98287128-mwh>.
- ITEGAN - Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia, 2011, ” Desenvolvimento de um software para a avaliação da eficiência da combustão em Usinas Termoeletricas operando com gás e alternando com diesel. Estudo de Caso realizado na UTE-Manauara” , Relatório Final. Manaus-AM.
- JAGUARIBE, E.F., ANDRADE, J.P., LOBO, P.C., 1992, "Sugar-Cane: A Versatile Renewable Energy Source" Paper 223, 21st ASES Annual Conference, Cocoa Beach, FL, EUA, 13 a 18 de junho.
- JAGUARIBE, E.F., LOBO, P.C., 1991, "An assessment of Brazilian alternative energy policies". Em M.E. Arden, S.M. Burley & M. Coleman (Eds.), Proc. 1991 Solar World Congress, Pergamon Press, New York. v 3, pp 3585-3590.
- JAGUARIBE, E.F., LOBO P. C., LIMA NETO, J. R., SOUZA, W. L., ROCHA, F. A. A., 2002, “Estudo Termoeconômico da Ampliação de um Sistema de Cogeração de Energia em uma Destilaria de Cana de Açúcar”. IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, ENCIT 2002, ABCM, Trabalho CIT02-0641, Anais em CD-Rom, Caxambu.
- KURKELA, E.; SIPILA, K.; SOLANTAUSTA, Y., 1991, “Power production from biomass by simplified IGCC processes-reaserch activities in Finland”, First European Forum on Electricity Production from Biomass and Solid Wastes by Advanced Technologies, Editors: Grassi, G.; Bertini,I., Commission of the European Communities, Florence.

- LEÃO, A.J.H.C., CARPENTIERI, A.E., CUNHA FILHO, H.F., BRITO, R.B., 1995, “Metodologia para desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao setor elétrico: caso exemplo”, Projeto WBP/SIGAME, XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, ELETROSUL/CIGRIS, Camboriú.
- LOBO, P.C, JAGUARIBE, E.F., LIMA NETO, J.R., ROCHA, F.A.A., SOUZA, W.L., 2002, “Availability comparison between cogeneration schemes in two different sucro-alcohol plants”. Anais 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - ECOS2002. Berlim, Alemanha, 3-5 de julho, VIII, pp. 1448-1454.
- LOBO, P.C., JAGUARIBE, E.F. e ANDRADE J.P., 1992a, "Cogenerated Electricity as the Principal Sugarcane Commodity " IASTED International Conference on Power Systems and Engineering, Vancouver, BC, Canadá 5 a 7 de agosto.
- LOBO, P.C., JAGUARIBE, E.F., ANDRADE, J.P., 1992b, "Possibilities of Sugarcane as an Energy Feedstock" 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, CA, EUA, Anais pp.5.359-5.370.
- LORA, E. E. S., ANDRADE, 2004, “Geração de energia e a gaseificação de biomassa”. Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST), Biomassa Energia, pp. 311-320.
- LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., ARADAS, M. E. C., 2004, “Geração Elétrica em Pequena Escala a Partir da Gaseificação de Biomassa”. Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá. Disponível em [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200002&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200002&script=sci_arttext).
- MARTINS, J., 2006, “Motores de Combustão Interna”. 3. Ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas. 437 p.
- MARTINS, O. S., 2004, “Aproveitamento da Biomassa para a Geração de Energia Elétrica”, 1º Seminário sobre a Utilização de Energias Renováveis para Eletrificação Rural do Norte e Nordeste do Brasil, CENBIO. Disponível em

<http://pt.scribd.com/doc/36274179/1%C2%B0SeminarioFRE-ANEEL-CENBIO-Biomassa-041209>.

MARTINS, O. S., 2006, “Gaseificação de Biomassa”, Transferência de Tecnologia – Projeto Indiano, Projeto GASEIFAMAZ, CENBIO. Disponível em [http://www.bioenergy-world.com/americas/2006/IMG/pdf/CENBIO-Osvaldo\\_Stella-Bioenergy\\_World\\_Americas\\_2006.pdf](http://www.bioenergy-world.com/americas/2006/IMG/pdf/CENBIO-Osvaldo_Stella-Bioenergy_World_Americas_2006.pdf)

MCKENDRY, P., 2002, “Energy production from biomass” Bioresource Technology, vol 83 pp. 37-46; 47-54; 55-63.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., 2008 “Princípios de Termodinâmica para Engenharia” , 4 ed. Rio de Janeiro, LTC.

MURARO, W., 2006, “Avaliação do Funcionamento de Motor ICE com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação de Casca de Arroz”. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.

NAKICENOVIC, N., 1997, “Freeing Energy from Carbon”. Dans *Technological Trajectories and the Human Environment*, Washington, D.C.: National Academy Press, 74-88.

NOGUEIRA, L. A. H., 1995, “Uso de Biomassa Florestal para Geração Elétrica em Grande Escala: o Projeto WBP-SIGAME no Brasil”, Reunión Regional sobre Generación de Electricidad a partir de Biomasa, FAO/UNDP, Montevideu.

O DIA ONLINE, 2006 “ A independência veio do fundo do mar: Brasil torna-se auto-suficiente na produção de petróleo e consolida a soberania nacional”. Disponível em <http://odia.terra.com.br/especial/economia/autosuficiencia/index.asp>.

OBERT, E. F., 1971, “Motores de combustão interna”. Porto Alegre: Globo. 618 p.

OVEREND, R. P., 1996, “Production of Electricity from Biomass Crops - US Perspective”. NREL.

- OVEREND, R. P., BAIN, R. L., 1995, "Technical Support of the U.S. DOE Biomass Power Program in the Development of Biomass to Electricity Technologies" Presented at the 210th American Chemical Society Meeting [Fuel Division].
- PEREIRA, J. C. D., STURION, J. A., HIGA, A. R., HIGA, R. C. V., SHIMIZU, J. Y., 2000, "Características da Madeira de Algumas Espécies de Eucalipto Plantadas no Brasil". Embrapa Florestas, Colombo – Paraná. Documentos 38, ISSN 1517-536X.
- PHILIPPE, U. Dunsky, Centre Hélios. Les Cahiers, 2002. Volume 1 | Numéro 1, 17 décembre.
- PIMENTA, A. S., BARCELLOS, D. C., OLIVEIRA, E., 2001, "Carbonização". Universidade Federal de Viçosa – UFV. Curso de Carbonização, Departamento de Engenharia Florestal – DEF, Viçosa – MG.
- QUIRINO, W. F., VALE A. T., ANDRADE, A. P. A. de, ABREU, V. L. S., AZEVEDO, A. C. dos S., 2004, "Poder Calorífico da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos". Biomassa & Energia, v. 1, n. 2, p. 173-182.
- REED, T.B., & DAS, A., 1988, "Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems", Biomass Energy Foundation Press, USA.
- REED, T.B., 1981, "Biomass gasification: principles and technology", Noyes Data Corporation.
- ROBINSON, A.; BAXTER, L.; JUNKER, H.; SHADDIX, C.; FREEMAN, M., 1998, "Fireside issues associated with coal-biomass cofiring". NREL/TP-570-25767.
- RUNTE JUNIOR, E. F., 2005, "Transporte de Gás Natural", apresentação PowerPoint. Disponível em : [www.compuland.com.br/helio/terminaisedutos/gn1.ppt](http://www.compuland.com.br/helio/terminaisedutos/gn1.ppt)
- RUYCK, J. de, ALLARD, G., MAMNIATIS , K., 1996, "An externally fired evaporative gasturbine cycle for small scale biomass gasification", in Biomass for Energy and the Environment, Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Edited by Chartier, ph., Ferrero, G.L. , Henius, U.M., Hultberg, S., Sachau, J., Wiinblad, M., Vol. 1, pp. 260-265.
- SÁNCHEZ, C. G., 2010, "Tecnologia da Gaseificação de Biomassa", São Paulo: Átomo.

- SÁNCHEZ, C. G., LORA, E. S., HAPP, J. F., 2002, “Capítulo 7 Gaseificação, disciplina: Tecnologia da Combustão”. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas.
- SANTOS, C., 2007, “Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem”. Lisboa: Sílabo.
- SILVA, O. H. da, ARDENGHI, T. C., RITTER, C. M., SANTOS, F. da R., HALMEMAN, M. C. R., 2012, “Potencial Energético da Biomassa da Casca do Arroz no Brasil“. III SIAUT – Simpósio Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, Paraná.
- SRIDHAR, G., PAUL, P. J., MUKUNDA, H. S., 2001, “Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel—an experimental analysis”. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier, V. 21, pp 61–72. Disponível em <http://cgpl.iisc.ernet.in/site/Portals/0/Publications/ReferedJournal/Biomass%20derived%20producer%20gas%20as%20a%20reciprocating.pdf>.
- TAYLOR, C.F., 1971, “Análise dos motores de combustão interna”. São Paulo: Edgard Blücher. 558 p.
- TOLMASQUIM, M.T., 2012, “Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil”, SCIELO Brasil, Estud. av. vol.26 no.74 São Paulo, *Print version* ISSN 0103-4014. Disponível em [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142012000100017&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142012000100017&script=sci_arttext)
- TORRES, C.C. CHEEMA, L.S., LOBO, P.C., 1977, "Prospects of power generation from solar plants in the northeast of Brazil" *Anais do UNESCO/WMO Solar Energy Symposium*, WMO No. 477, Genebra, Suíça. pp. 581-590.
- USHIMA, A. H., 2004, “RESULTADOS PRELIMINARES DO PROJETO GASEIFAMAZ”. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo. Disponível em [http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/IIIseminario/ademar\\_convert.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/IIIseminario/ademar_convert.pdf).
- VALE, A. T., BRASIL, M. A. M., LEÃO, A. L., 2002, “Quantificação e Caracterização Energética da Madeira e Casca de Espécies do Cerrado”. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80. ISSN 0103-9954.

- WILLIAMS, R.; LARSON, E.D., 1992, "Advanced Gasification-Based Biomassa Power Generation e Cogeneration". In: Fuels and Electricity from Renewable Sources of Energy. Edited by Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. & Williams, R.. Island Press, Washington.
- WILTGEN FILHO, L., 1981, "Gaseificadores para carvão mineral", Energia, Fontes Alternativas, vol. III, p. 13-21.
- WYLEN, G. J.V., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., 2001, "Fundamentos da termodinâmica", 5 ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- YOSHIKAWA, K., 2006, "R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels". Elsevier/Energy, Science@Direct.