

Gaseificação de Biomassa na Geração de Eletricidade em Pequena Escala

R. S. Ribeiro, R. D. C. Lima, A. S. Pinto e C. A. G. Veras

Resumo- Este trabalho tem por objetivo apresentar a tecnologia de gaseificação de biomassa, de pequena escala, aplicada na geração de eletricidade por meio de motogeradores diesel. O gás de síntese, produzido num sistema de gaseificação *downdraft* estratificado foi misturado ao ar de admissão e queimado nos cilindros no modo duplo combustível. Diferentes níveis de injeção de diesel, ajustados manual ou automaticamente, permitiram avaliar o desempenho do motor, em diferentes níveis de carga, quando operando com gás de síntese e diesel. Torque, consumo específico de diesel, potência, emissões e outros parâmetros foram avaliados com o motor operando na configuração original e no modo duplo combustível com gás de biomassa. A gás produzido a partir de diferentes tipos de biomassa se mostrou adequado, para esta aplicação específica, e importantes níveis de substituição de diesel por gás originado na central de gaseificação.

Palavras-chave— biomassa, diesel, gaseificação, geração distribuída.

I. INTRODUÇÃO

A geração e o uso eficiente da energia se apresentam como um dos grandes desafios sociais deste século. Intensificam-se as buscas por fontes renováveis que venham a diminuir a preocupante dependência das sociedades modernas nos combustíveis fósseis. Assim, é possível num futuro próximo reduzir danos ambientais associados com a intensa utilização deste insumo após a revolução industrial.

A biomassa, dentre as alternativas energéticas, destaca-se no panorama brasileiro pelo enorme potencial de aproveitamento para a matriz energética nacional. As condições climáticas regionais favorecem a produção deste insumo de modo a satisfazer consideráveis níveis de demanda. Estes elementos são importantes motivadores da pesquisa atual e se espera, viabilize, em larga escala, a produção de biocombustíveis a partir da biomassa. Parte considerável do potencial dos biocombustíveis não é aproveitada energeticamente. O desenvolvimento de tecnologias e processos aperfeiçoados de conversão térmica aplicados à biomassa é, por conseguinte, oportuno e desejável.

Inicialmente, a biomassa foi empregada como lenha e

posteriormente, em função da escassez desta, passou-se a empregar o carvão mineral como fonte primária de energia. Como consequência, ocorreu desenvolvimento mais acentuado da indústria metalúrgica e o surgimento de máquinas a vapor que, por fim, caracterizaram a Revolução Industrial.

O emprego do petróleo se popularizou de tal forma que a matriz energética mundial, já há algum tempo, é quase toda fundamentada nesta fonte de energia não renovável. Neste século, as estimativas com base na taxa de consumo bem como nas tecnologias existentes para a extração do petróleo, indicam um esgotamento desta fonte de energia. No Brasil, o desbalanço entre a produção e consumo de petróleo nos torna ainda, importadores deste insumo (figura 1), a despeito da maior produção observada na década passada.

O consumo em massa de combustíveis fósseis tem, também, contribuído no aumento preocupante da concentração de gases que contribuem para o efeito estufa, na formação da chuva ácida e a liberação de material particulado na atmosfera causando problemas aos recursos naturais e a saúde humana.

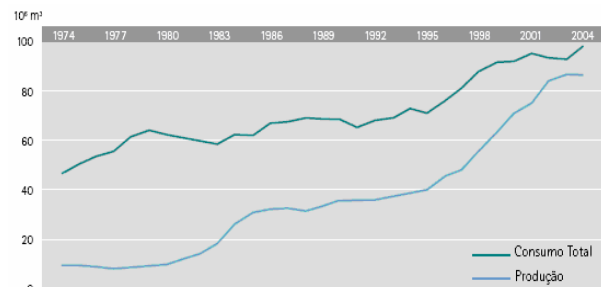


Figura 1. Relação entre o nível de consumo total e a produção do petróleo.

Uma importante justificativa para o emprego de fontes energéticas renováveis se baseia na possível utilização de resíduos industriais e do agronegócio. No Brasil, a produção de resíduos tem aumentado de forma constante, principalmente a partir do crescimento destes setores. Considerando o elevado nível de geração de resíduos sólidos no Brasil, da ordem de 21×10^6 toneladas anuais, aproveitá-los para geração de energia é uma alternativa oportuna pois resolve dois problemas simultaneamente, um de ordem ambiental e outro de natureza energética.

O processo de gaseificação de biomassa, em reatores de leito fixo, tipo *downdraft*, tem sido objeto de pesquisa de diferentes grupos, com aplicações das mais variadas. Os estudos são, via de regra, experimentais e numéricos, sendo

Este trabalho foi apoiado, em grande parte, pela Eletronorte Brasil.

R. S. Ribeiro, (e-mail: ricardo.ribeiro@eln.gov.br)

R. D. C. Lima, (e-mail: rafael.lima@eln.gov.br)

A. S. Pinto (e-mail: adailton@eln.gov.br); trabalham na trabalha na Eletronorte-Brasil.

C. A. G. Veras trabalha no Laboratório de Energia e Ambiente do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB (e-mail: gurgel@unb.br).

alguns bastante inovadores.

Warren et al. [1] mostraram a praticabilidade de plantas de gaseificação para utilização em escala rural empregando tecnologia *downdraft*. Para tal, foi testada uma planta capaz de gerar 30 kWe (eletricidade) e 60 kW na forma de calor, empregando lascas de biomassa como combustível e um motor de ignição por centelha na geração de potência. Lin e colegas (1998) desenvolveram um processo de gaseificação de para casca de arroz. Eles concluíram que, para uma potência de 10 kW, 28 kg/h de casca de arroz deve ser consumida pela planta de gaseificação. Os experimentos foram realizados num leito fixo, de escala laboratorial, do tipo *downdraft*.

Midilli et al. [2] investigaram a produção de hidrogênio de castanhas de amêndoas aplicando técnicas de gaseificação de leito fixo tipo *downdraft*. A pesquisa foi conduzida em uma planta piloto de 5 kW, com um sistema de gaseificação do tipo *imbert*. Foi concluído que a castanha pode ser facilmente empregada para se converter biomassa em hidrogênio por meio de gaseificação *downdraft*.

Jayah et al. [3] realizaram simulações numéricas de um sistema de gaseificação do tipo *downdraft*. O modelo considerava as zonas de pirólise e gaseificação como sub-modelos do programa. As predições indicaram, como tamanho ideal, partículas da ordem de 3-5 cm e umidade inferior a 15%.

Wander et al. [4] conduziram experimentos num reator de leito fixo, *downdraft*, estratificado. O consumo de combustível foi da ordem de 12 kg/h. Foi proposto um sistema de recirculação que queima parte dos gases para manter um nível elevado de temperatura na zona de reação. Problemas com ligação e aderência na grelha foram relatados.

Hanaoka e colegas [5] investigaram os efeitos dos componentes da biomassa na gaseificação com ar e vapor d' água, num reator de leito fixo, tipo *downdraft*. O trabalho experimental sugeriu que as informações obtidas na gaseificação, por componente da biomassa, podem ser usadas nas predições de composição de gases gerados neste tipo de reatores.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Gaseificadores com tecnologia *downdraft* são recomendados pela simplicidade e baixo teor de alcatrão. Reed e Das [6] alertam, entretanto, que esta tecnologia ainda não está totalmente disseminada e, desta forma, necessita comprovação antes de se tornar o sistema de gaseificação ideal para certos requerimentos. Reatores com esta tecnologia parecem bastante promissores mas carecem de banco de dados, tanto teóricos quanto experimentais. A figura 2 apresenta esquematicamente um reator de leito fixo *downdraft* estratificado. Podem-se observar as diferentes regiões, bem definidas, ao longo da coluna. Na parte superior, de alimentação de biomassa e entrada de ar, tem-se a região de secagem, seguida da região de pirólise e queima dos voláteis. Abaixo da zona de queima dos voláteis tem-se a região onde predominam as reações heterogêneas de

gaseificação do carvão.

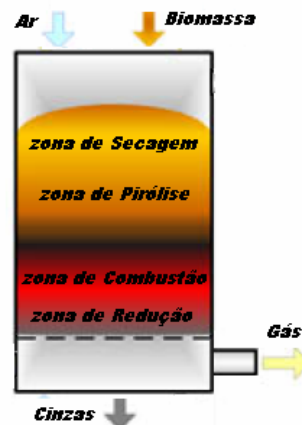


Figura 2. Gaseificador *downdraft* estratificado.



Figura 3. Linha de tratamento do gás de biomassa ao lado da bancada dinâmométrica de motores de combustão interna.

Como pode ser visto na figura 3, além do reator, o sistema necessita operar com equipamentos de tratamento do gás. Basicamente, empregaram-se, separadores centrífugos, lavadores de gases e filtros.

A figura 4 apresenta, esquematicamente, um dos reatores de gaseificação.

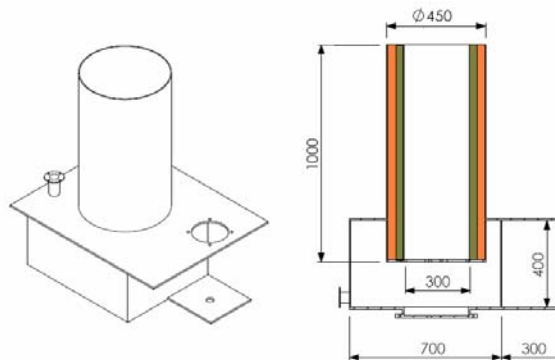


Figura 4. Linha de tratamento do gás de biomassa ao lado da bancada dinâmométrica.

Os cilindros de cimento refratário, onde ocorrem os processos termoquímicos possuíam 200 e 300 mm de diâmetro interno. Basicamente os reatores apresentam aspectos construtivos e operacionais bastante semelhantes, diferenciando-se apenas no tamanho global.

Foi incluído no reator um grelha excêntrica móvel, acionada por um moto-redutor cujo eixo atravessa o centro da porta inferior de visita. A movimentação suave da coluna reativa, pela base, é chave neste tipo de tecnologia. O espaço entre o cilindro refratário e o cilindro de aço de sustentação do reator foi preenchido com areia, para se evitar tensões térmicas excessivas que pudessem comprometer a integridade do reator. Na base, o reator foi vedado com uma camada de cimento refratário.

A TABELA 1 apresenta as principais características do motor diesel empregado nos testes. Foram utilizados dois motores com estas características, uma posicionado na bancada dinamométrica e um segundo num conjunto motogerador.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO MOTOR DIESEL EMPREGADO NOS
ENSAIOS, MODELO BTM 33, FABRICANTE YANMAR.

Potência DIN A (CV)	23,6 (1800 rpm)
Nº Cilindros	3
Diâmetro do Pistão x Curso (mm)	90 x 90
Cilindrada (cm ³)	1717
Taxa de compressão	17,3:1
Bico injetor pressão (kg/cm ²)	210 ± 10
Tempo de injeção (° a PMS)	26 ± 1 (F.I.C.)
Consumo específico de combustível (L/H) - (Pot. Nominal)	6,70

Os testes conduzidos na bancada dinamométrica (figura 5) tinham como propósito avaliar torque, potência e consumo específico de combustível em diversos regimes de rotação, com o motor operando na configuração original (100% diesel) e no modo duplo combustível (diesel + gás de síntese). A bancada possui um dinamômetro hidráulico Heenan & Froud (H&F) e alguns dispositivos auxiliares principais:

- Chave de ignição para acionar o motor.
- Tacômetro - indica velocidade de rotação da árvore de manivelas através de um mostrador analógico. Unidade rpm
- Rotâmetro - fornece vazão da água de arrefecimento do motor
- Balança Bextra - mede carga (kgf) aplicada ao motor através do eixo cardam.
- Bureta calibrada - indica o consumo de combustível.
- Caixa equalizadora e placa de orifício calibrada - para determinação da vazão de ar de entrada no motor com manômetro digital.
- Sensores de Temperatura - indicam a temperatura de entrada e saída da água de arrefecimento do motor.
- Termopares tipo K - para medição da temperatura de admissão do ar e de escape.

Os testes realizados no grupo gerador (figura 6) objetivavam avaliar a capacidade do sistema em perceber, automaticamente, a presença do gás de síntese no ar de

admissão e regular e a injeção de diesel para o nível de carga aplicado, valendo-se de um governador que controla a bomba injetora, típico destas instalações.



Figura 5. Motor diesel Yanmar BTM 33 na bancada dinamométrica.



Figura 6. Grupo gerador diesel, 20 kVA, com motor diesel Yanmar BTM 33.

Para o monitoramento das condições de operação do motor, mediu-se a pressão dinâmica no interior de um cilindro (número 1), bem como o ponto morto superior deste cilindro. A pressão no interior do cilindro foi adquirida através de um sensor piezométrico 6001 Kistler, instalado no cabeçote do motor. Para a coleta dos sinais provenientes do sensor utilizou-se o amplificador de carga Kistler tipo 5011.

O ponto morto superior foi obtido por um sensor ótico instalado no eixo do dinamômetro. Este dispositivo consiste em um emissor e um receptor ótico instalados em um disco perfurado preso ao eixo. O orifício no disco determina o ponto morto superior.

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

Para a medição de emissões foi utilizado o sistema de

análise de gases Modal 1011 da empresa “Napro”. Tal sistema é composto por um analisador de múltiplos gases ECO 6010 e de um opacímetro NA9000.

Foi construído um banco de resistência para simular diferentes níveis de carga no gerador. Tal sistema é composto por um painel com um disjuntor de 35A e nove chaves interruptoras. Cada chave do sistema acionava uma resistência com capacidade de 2000 W. Assim, o nível máximo de carga imposto ao gerador foi de 18 kW, ligeiramente menor que a potência nominal do grupo gerador que é de 20 kVA. As resistências utilizadas foram do tipo mergulhão, resfriadas pela água colocada num reservatório de 200 litros.

A alimentação do gaseificador foi realizada manualmente com inserção de carga total, ou seja, quantidade de biomassa equivalente a coluna de retenção.

Na determinação da taxa de consumo do combustível sólido operou-se o gaseificador com apenas uma carga (altura de coluna máxima – 800 mm) suficiente para funcionar o motor de combustão interna por alguns minutos e assim determinar o consumo médio da mesma. Nos ensaios de consumo, o motor operou entre 1800 a 2000 rpm.

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

TABELA II
ANÁLISE IMEDIATA E PODER CALORÍFICO DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS
TESTES DE GASEIFICAÇÃO

Amostra	Cedrinho	Babaçu	Açaí
Teor de Voláteis (%)	78,55	79,41	73,71
Teor de Carbono fixo (%)	19,19	18,28	25,36
Teor de Cinzas (%)	1,54	2,14	0,93
Umidade (%)	11,52	11,58	15,9
PCS (kcal/kg)	5004	4979	5029
PCI (kcal/kg)	4553	4529	4576

Pode-se verificar, com auxílio da TABELA II, que o açaí possui o mais alto teor de carbono e é, em tese, a opção ideal entre os três tipos de biomassa como insumo para gaseificadores. O açaí apresenta, também, o mais elevado poder calorífico entre as três amostras, bem como o menor teor de cinzas.

Além desses dados foi avaliada a densidade relativa aparente dos resíduos, denominada pela norma ISO de *Bulk Density* ou densidade a granel. Este parâmetro representa a massa ocupada por um determinado volume em um

equipamento térmico, ou seja, representa a massa da amostra que preenche um volume de um metro cúbico, sendo especificada em kg/m³. A densidade aparente do cedrinho (295,02 kg/m³) apresentou valores similares à semente de açaí (295,46 kg/m³). Já a casca do coco de babaçu apresentou densidade relativa alta, em torno de 631,54 kg/m³.

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

A biomassa foi obtida a partir do corte de tarugos cilíndricos de cedro, figura 7. A grande vantagem em se utilizar este combustível sólido reside no fato de apresentar uma granulometria uniforme, tendo, em média, 23 mm de diâmetro por 30 mm de comprimento. A forma geométrica cilíndrica da biomassa é apropriada, pois minimiza a criação de veios preferenciais de passagem de ar, os quais resultam em uma queima não uniforme no reator. Nestas condições, a qualidade do gás produzido no reator fica aquém do desejado.



Figura 7. Cilindros de cedro empregados como combustível no gaseificador.

No corpo do reator foram feitos sete orifícios ao longo do seu comprimento, espaçados a uma distância de 80 mm cada, como ilustra a figura 8. O emprego de termopares permitiu que os níveis de temperatura, nas regiões principais do reator, fossem medidos e monitorados. Assim, foi possível identificar as zonas de pirólise, combustão e gaseificação. Este procedimento também permitiu avaliar as temperaturas desenvolvidas no reator, principalmente para a zona de oxidação dos voláteis (superior a 900°C) e de gaseificação. Para a medição do foram utilizados termopares do Tipo K com bainha cerâmica e um sistema de leitura e aquisição de dados. Estes termopares são os mais recomendados para medições à altas temperaturas, como as que ocorrem no gaseificador. As leituras foram iniciadas quando ocorre certo nível de estabilização dos processos intrínsecos do reator.



Figura 8. Sistema de medida de temperatura no reator de 300 mm.

O desempenho do sistema de gaseificação foi avaliado através da queima do gás de síntese e motores do ciclo Diesel. A operação deste motor com gás de biomassa é facilitada uma vez que deve se injetar uma quantidade mínima de diesel como chama piloto. Esta pequena quantidade de diesel injetada realiza a da mistura ar/gás de síntese que se propaga de modo semelhante ao observado em motores do ciclo Otto. Outra vantagem na utilização deste tipo de motor decorre da alta taxa de compressão, típica de motores diesel, compensando, de certa forma, o baixo poder calorífico do gás de síntese.

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

Por se tratar de um motor estacionário, utilizados em geradores, as rotações de teste ficaram em torno da rotação nominal do gerador. Os testes foram realizados a 1700, 1800 e 1900 rpm, mais especificamente e o objetivo principal era recuperar a potência original do motor, operando no modo duplo combustível, com gás de síntese. Como consequência, foi possível caracterizar o nível de óleo diesel. Também foram realizados ensaios onde se reduziu o débito da bomba injetora de forma a permitir que o motor funcionasse apenas em regime de espera (marcha lenta) sem carga. A carga era aplicada somente após o motor iniciar a admissão de mistura ar/gás de síntese.

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

- O combustível auxiliar foi o gás de síntese ou de biomassa, produzido pela planta de gaseificação;
- A máxima quantidade de óleo diesel injetada foi estabelecida quando se detectava o fenômeno de detonação no motor, nos testes de recuperação de potência;
- Mapeamento do funcionamento do motor através das curvas de torque e potência para cada rotação em estudo;
- Mapeamento da pressão no interior do cilindro como forma de detectar a ocorrência de detonação e caracterização dos principais.

Os testes com o motor diesel operando no grupo gerador foram realizados seguindo como referência a norma NBR 6396, para motores alternativos de combustão interna não veicular. Naturalmente, pela natureza da pesquisa, os testes não seguiram fielmente aquilo que é sugerido, uma vez que se trabalhou no modo duplo combustível. A instrumentação para a realização do ensaio baseou-se num sensor indutivo para a verificação da rotação de trabalho, que é ajustada pelo próprio governador do motor, o banco de resistência para a simulação das cargas elétricas, a qual o sistema deveria ser submetido, uma bureta graduada para determinação do consumo volumétrico de óleo diesel no sistema original e no modo duplo combustível e o analisador ECO6010.

Nos testes de desempenho do grupo gerador foi fixada a rotação de 1800 rpm. Estabelecida a rotação foi feito o mapeamento de potência do grupo gerador para diversas cargas resistivas. O conjunto foi testado sem carga e com incrementos de carga de 2000 W até a carga máxima de 18 kW. Neste caso, nenhuma alternativa foi empregada para regular o débito da bomba injetora, sendo esta, totalmente ajustada pelo próprio governador do motor diesel.

Inicialmente os testes foram realizados com diesel puro, servindo de base para a posterior comparação. Os testes foram conduzidos para as condições descritas anteriormente tanto para a medição da emissão de poluentes quanto para o consumo de combustível para a verificação da percentagem de substituição do óleo diesel por gás de síntese. Em seguida, sem alterar nenhuma configuração do motor, procederam-se aos ensaios com o funcionamento no modo duplo combustível, permitindo que o mesmo, por meio do governador, alterasse o débito da bomba injetora na medida em que gás era adicionado. Como requerimento de operação, o sistema deveria manter velocidade angular constante, nos diferentes níveis de carga aplicados e de forma automática.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Medidas de Temperatura

Durante a operação do sistema de gaseificação foram coletadas as temperaturas ao longo da coluna do reator (figura 9). Essas medições foram realizadas em diferentes pontos no reator para que se pudesse conhecer o perfil de temperatura nas zonas de reação mais importantes, isto é, pirólise e redução. As medidas de temperatura foram feitas com termopares do tipo K. Os termopares foram nomeados de um a sete, sendo o primeiro localizado a aproximadamente 80 mm acima da grelha do reator. A parte superior da grelha está posicionada a aproximadamente 100 mm da base do mesmo. Este sensor foi posicionado na parte do reator que fica abaixo da base onde se encontra o moto redutor conforme ilustrado na figura 8. Logo acima desta base pode se identificar o termopar de número dois, e na sequência, o restante dos sensores, contados de baixo para cima.

A figura 9 apresenta o campo de temperatura obtido num

dos testes de gaseificação, com biomassa do tipo cedrinho. Na figura 9, as cotas em mm se referem a distância do termopar em relação a grelha. Quanto maior a medida, mais afastado está o termopar da grelha, na direção do topo do reator (entrada de biomassa e ar).

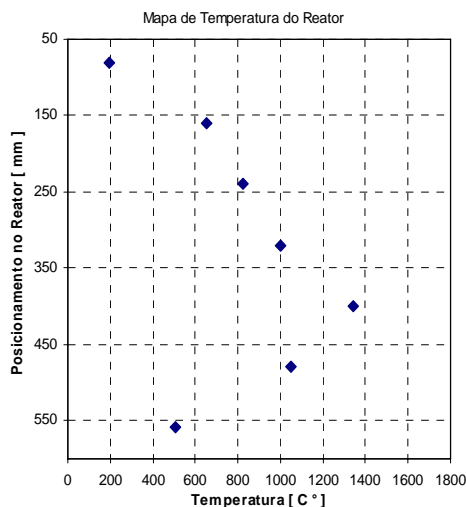


Figura 9. Campo de temperatura no reator de gaseificação.

Com o perfil apresentado na figura 9, pode-se concluir que a zona de combustão apresentou valor máximo de temperatura da ordem de 1350 °C, que ocorreu a uma altura de 400 mm acima da grelha. Esta zona de pirólise e combustão de voláteis pode ser delimitada pelas cotas 330 e 470 mm, acima da grelha, com temperaturas aproximadas de 1000 e 1050°C, respectivamente. Temperaturas da ordem de 1000 °C podem caracterizar o fim das reações de pirólise e o início das reações de redução do carbono (gaseificação). Assim, a partir da correspondente cota (370 mm) até o topo da grelha (80 mm) tem-se a região de gaseificação, que pelo perfil de temperatura se estendeu até aproximadamente 200 mm, onde o nível de temperatura é superior a 654 °C. Abaixo deste nível de temperatura a taxa de gaseificação decaiu a valores que podem ser considerados nulos. A figura 10 apresenta a fração mássica de CO no gás de biomassa, após a zona de redução, para diferentes níveis de temperatura desta região. Estes dados foram obtidos a partir de um código numérico desenvolvido para o estudo das reações de gaseificação em reatores do tipo *downdraft* [7]. Considerou-se apenas a reação de gaseificação do carbono com o CO₂, cuja fração mássica na entrada da zona de redução foi estabelecida em 15%. A altura da coluna da zona de gaseificação foi considerada longa o suficiente para que as reações atingissem um valor assintótico.

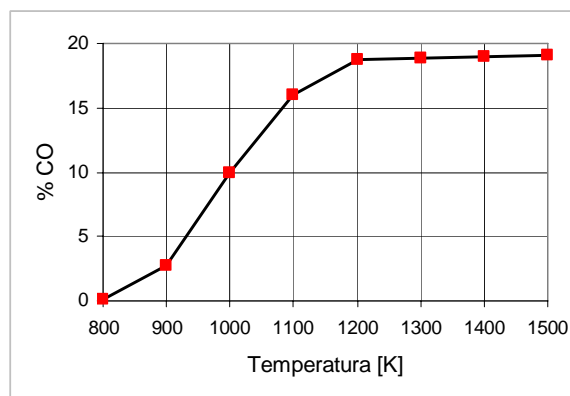


Figura 10. Valores teóricos de fração mássica na saída do reator para diferentes temperaturas da zona de gaseificação.

Como pode ser visto no gráfico da figura 10, ocorreu decaimento na produção e CO quando a temperatura da zona de reação estava abaixo dos 1200 K (927 °C). Acima deste valor não houve alteração na fração mássica de saída do CO, no gás de biomassa. Em torno de 900 K (627 °C), a fração mássica obtida foi de 2,74%, que torna o gás extremamente pobre. Assim, com base na figura 9, pode se confirmar que a zona de redução (gaseificação) se estendeu por aproximadamente 200 mm da coluna do reator.

B. Desempenho do grupo gerador

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

Quantitativamente observaram-se diferenças em relação ao consumo de diesel puro para as duas configurações testadas, em diferentes condições de carga. Conforme mostra a figura 11, o sistema R1, denominado nas legendas como o Duplo Combustível 1, apresentou valores inferiores de consumo de diesel e comportamento mais uniforme se comparado com os dados obtidos no reator de 200 mm

(Duplo Combustível 2). O baixo consumo comparativo de diesel observado, no modo R2 na faixa de potência entre 12 e 16 kW pode estar relacionado com a taxa de gaseificação específica. Tiangco e colegas identificaram valores ótimos de taxa de gaseificação específica e reatores do tipo *downdraft* na queima de casca de arroz [8]. Os autores apresentaram uma curva de eficiência do gás cujo pico na taxa de gaseificação específica se encontrava próxima de 200 kg/h m².

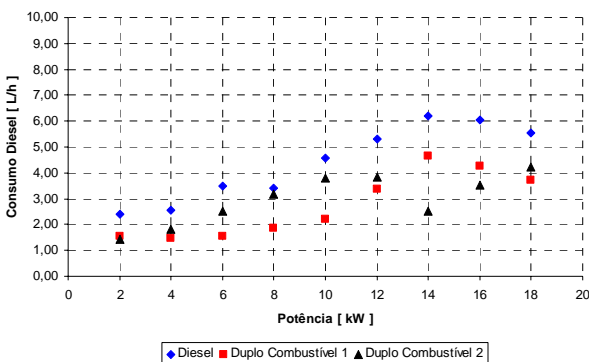


Figura 11. Consumo de diesel para as três condições de ensaio: Diesel, Duplo combustível 1 (R1) e Duplo Combustível (R2).

Com base nos dados da figura 11, foi possível calcular a taxa de substituição de óleo diesel para a operação do Grupo Gerador no modo duplo combustível para os sistemas R1 e R2. Pela análise dos dados, observou-se que os sistemas apresentam faixas de operação distintas. Para o sistema R1 o percentual de substituição do combustível variou entre 25 e 57%, sendo que o melhor desempenho ocorreu nas cargas de 6 e 10 kW. Já o sistema R2 (reator 200 mm) apresentou, na faixa de operação de 14 a 16 kW, resultados melhores de desempenho quando comparados ao R1. O nível de substituição do diesel, para este caso, foi da ordem de 60%. Estes testes foram realizados sem nenhuma alteração no motor. Os dados obtidos, portanto, encorajam o emprego desta tecnologia. O gás de síntese mostrou-se, desta forma, uma importante opção como combustível auxiliar em motores do ciclo diesel de grupos geradores de pequena escala.

A figura 12 apresenta os níveis de emissão de NO_x para a operação do motor no modo original e com gás de síntese. Os dados mostram que as emissões de NO_x associadas ao modo duplo combustível são em geral bem menores do que as emissões associadas ao consumo do sistema utilizando apenas diesel puro. A diminuição ocorreu para toda a gama de cargas resistivas aplicadas. A taxa de redução de emissões utilizando gás de síntese apresentou valores que variam de 73,4 a 92,8%, onde os melhores percentuais foram constatados com o motor operando sob baixas cargas. Esta redução se deve ao fato do gás de síntese possuir quantidades expressivas de nitrogênio, que atua como gás inerte na mistura. O nitrogênio em excesso faz com que os picos de temperatura ocorram em níveis que são inapropriados para a formação de NO_x pelo mecanismo térmico.

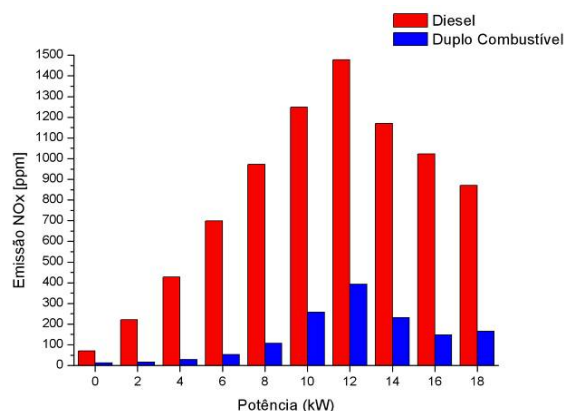


Figura 12. Emissão de NO_x para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.

Esta tendência de queda nas emissões não foi observada, contudo, para o monóxido de carbono, conforme ilustra a figura 13. De acordo com Kandpal et al. [9], esse comportamento deve-se principalmente a dois fatores: (i) à própria composição do gás de síntese que é rica em CO e (ii) devido à combustão incompleta. Como não se ajustou o ponto de injeção, é de se esperar que as emissões de CO aumentem. Outro fator que pode influenciar na maior emissão de CO está relacionada ao tempo mais longo de oxidação do CO, principalmente em baixos níveis de temperatura. Sabe-se que a expansão dos gases no interior do cilindro resfria a mistura. Desta forma, uma parcela do CO que seria passível de oxidação acaba por ser emitido nos gases de escape.

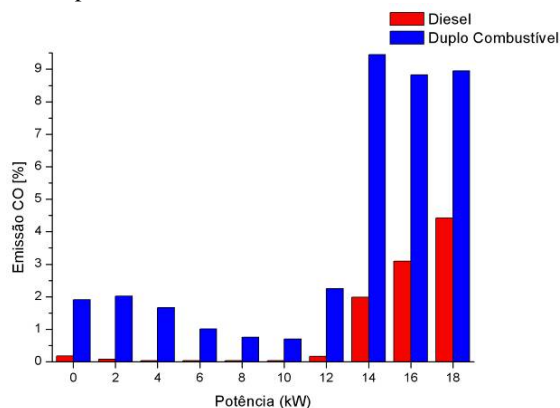


Figura 13. Emissão de CO para o motor Diesel com combustível original e no modo duplo combustível.

C. Desempenho do motor diesel – débito original

Nesta etapa, foram feitos testes de desempenho do motor diesel, na bancada dinamométrica, em duas condições operacionais. A primeira condição é semelhante à realizada no Grupo Gerador, onde se utilizou o débito da bomba injetora de combustível com a regulagem original do fabricante. Na segunda condição ajustou-se o débito da bomba para um valor mínimo de injeção que permitisse o motor operar com diesel puro em marcha lenta, sem carga. Este nível de injeção ainda é ligeiramente superior ao

informado na literatura [10] quando gás de síntese é misturado ao ar de admissão. Contudo, levando-se em consideração que o objetivo principal deste trabalho é aplicar a tecnologia de gaseificação evitando-se alterações importantes no conjunto motogerador. Estas alterações não devem dificultar a operação do conjunto no campo, principalmente em comunidades isoladas. Assim, o nível de injeção de diesel que se julgou adequado seria aquele que permitisse dar partida na unidade sem adição de gás de biomassa. Em alguns casos o ajuste do débito da bomba não pode ser efetuado com o motor em funcionamento. Portanto, buscou-se o nível mínimo de diesel capaz de dar partida e manter o motor em funcionamento apenas com o combustível original.

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

A figura 14 mostra o torque em função da rotação para o motor com solicitação máxima, nas duas condições de ensaio, isto é, com combustível original e no modo duplo combustível (diesel e gás de síntese). Como pode ser visto, utilizando-se o gás de síntese em rotações inferiores a 1700 rpm, ocorreu recuperação do torque com a substituição do combustível original, com acréscimo de 2,02% em relação ao seu valor na concepção original. Para rotações entre 1700 a 1800 rpm, a queda no torque varia de muito pouco, de 3,0 a 4,16%.

A figura 15 mostra o consumo específico de combustível (CEC) para o conjunto de rotações testado. Na figura podem ser vistos os níveis de consumo de diesel nas duas condições de ensaio, original e duplo combustível. Verifica-se que o CEC diminuiu, em todas as rotações quando se adiciona gás de síntese ao ar admitido pelo motor. Na faixa de rotação dos ensaios destacou o regime de 1700 rpm onde o motor teve o consumo específico de combustível reduzido de 0,71 litro/kWh para 0,433 litro/kWh. Como alertado, o elevado nível de consumo específico a 1900 rpm se deveu à queda acentuada de potência do motor, a despeito da diminuição na quantidade de diesel injetado.

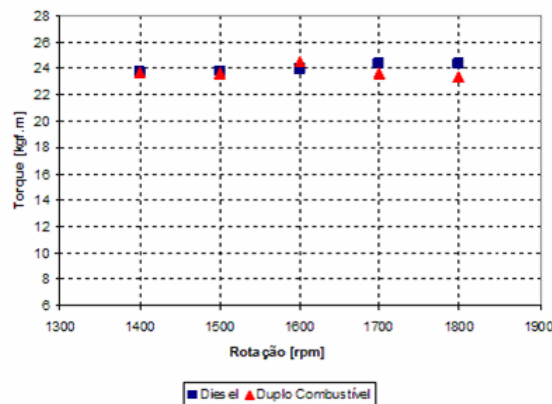


Figura 14. Torque versus rotação, a plena carga com débito original da bomba injetora nas duas condições de teste.

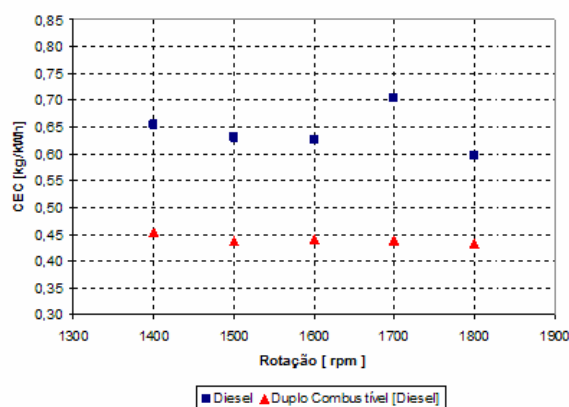


Figura 15. Consumo específico de combustível (litro/kWh) versus rotação a plena carga com débito original da bomba injetora nas duas condições de ensaio.

A figura 16 apresenta a curva de pressão no cilindro para o diesel puro e duplo combustível com gás de síntese a 1600 rpm e plena carga. Comparativamente, notam-se valores mais elevados de pressão com a utilização de pré-mistura arg-gás de síntese. No modo duplo combustível o cilindro monitorado apresentou pico de pressão da ordem de 81 bar. Em contrapartida, com diesel puro o máximo de pressão obtido foi próximo de 79 bar. Um segundo pico de pressão ocasionou um ligeiro afastamento entre as curvas, com a queda de pressão, devido ao processo de expansão, tendo início, no modo duplo combustível, após a queda com diesel puro. Níveis mais elevados e prolongados de pressão fazem com que o torque no modo duplo combustível seja ligeiramente superior se comparado com o torque obtido com diesel puro, neste nível de rotação. Novamente observou-se atraso na ignição com o emprego de gás de síntese. Este atraso tende a penalizar o torque do motor. Contudo, como discutido anteriormente, o nível de pressão mais elevado, no modo duplo combustível, foi suficiente para compensar e mesmo sobrepor possíveis quedas de desempenho. Neste nível de rotação específico, verifica-se que pequenos ajustes no tempo de injeção podem acarretar melhorias significativas de desempenho quando o motor operar com gás de síntese. Isto porque, o melhor sincronismo entre o momento da injeção e a posição relativa do pistão, ocasiona níveis de pressão muito mais elevados, acarretando

torque também elevado.

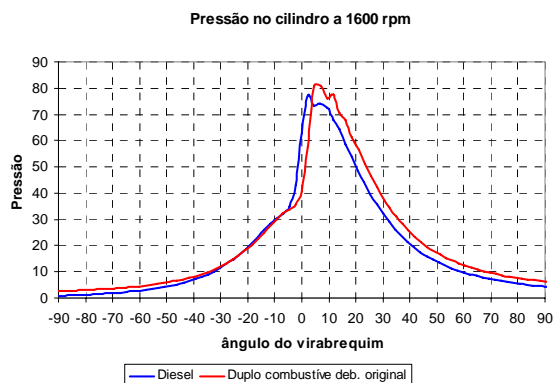


Figura 16. Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1600 rpm e plena carga.

D. Desempenho do motor diesel – débito reduzido

Nesta seção, apresentam-se os resultados dos ensaios de desempenho do motor, consumo específico de combustível (CEC) e pressão dinâmica na câmara de combustão, com alteração no débito da bomba injetora. Neste caso, ajustou-se o débito a um nível em que o motor era capaz de operar de maneira estável, sem carga. O débito ajustado permitia que o motor fosse ligado sem auxílio do gás de síntese, conforme discutido anteriormente.

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

A figura 17 apresenta a potência versus rotação, para diesel puro e para o gás de síntese. Os resultados indicaram queda de potência no modo duplo combustível, nos regimes de operação 1700 e 1800 rpm, variando de 29,25 a 30,76% em relação ao diesel. A estimativa da queda de potência teórica é esperada, levando-se em consideração a diferença entre os poderes caloríficos e massa que pode ser injetada. Esta diminuição no desempenho limita a potência que o motor pode fornecer quando opera com gás de síntese. A potência fornecida, portanto, gira em torno dos 70% se comparado com diesel puro. Estes valores estão de acordo com os dados divulgados pela FAO (1986). Os baixos valores de potência a 1900 rpm foram ocasionados pelo sistema de proteção automático do motor, para preservar possíveis danos em giros elevados.

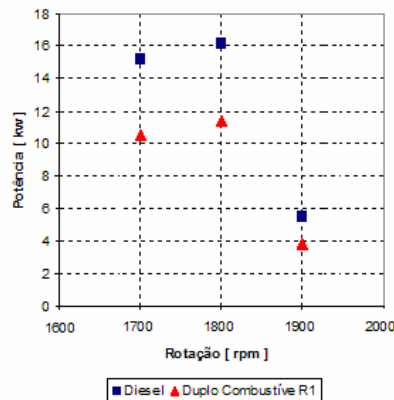


Figura 17. Torque versus rotação, a plena carga com débito reduzido da bomba injetora nas duas condições de teste a.

Foram realizadas medidas de consumo específico (CEC) do motor nos modos de operação, com diesel puro e diesel e gás de síntese, com débito da bomba injetora reduzido. Na condição padrão operacional, 1800 rpm, o consumo específico de diesel foi da ordem de 0,116 litro/kWh, comparado com 0,60 litro/kWh com diesel puro. Esta redução no consumo específico, da ordem de 73,3% torna atrativa a tecnologia, a despeito dos 30% de redução na potência disponibilizada.

Este nível de redução no consumo específico poderia ser ainda mais acentuado caso se ajustasse o tempo de injeção. Nas outras rotações, 1700 e 1900 rpm, a taxa de substituição foi de 68 e 49%, respectivamente.

A figura 18 apresenta a pressão dinâmica no interior do cilindro versus o ângulo de virabrequim em relação ao ponto morto superior (PMS), a 1800 rpm e a plena carga, para o sistema usando óleo diesel puro e no modo duplo combustível com a bomba injetora com débito reduzido de combustível. Na rotação de 1800 rpm o pico de pressão apresentou valores próximos a 60 bar enquanto que com diesel puro foi de 80,5 bar. Esta diferença acentuada nos níveis de pressão máximos, bem como no perfil das curvas explica a queda de potência com o emprego de gás de síntese e diminuição no débito da bomba injetora.

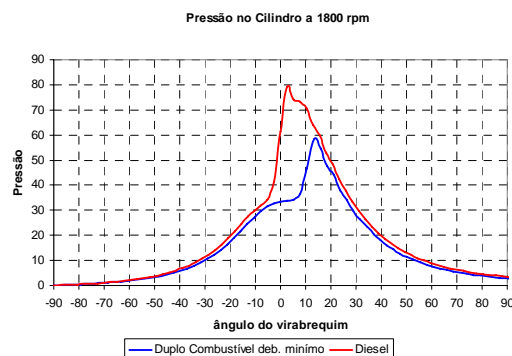


Figura 18. Pressão dinâmica no interior do cilindro versus ângulo do virabrequim, 1800 rpm e plena carga - débito reduzido da bomba injetora.

O perfil da curva de pressão dinâmica do motor, no modo duplo combustível com débito reduzido, ilustra o atraso

acentuado na ignição da mistura que ocorre após, aproximadamente 20° após a o início da injeção. O ajuste no tempo da ignição certamente acarretará melhoria de desempenho. Cabe lembrar, contudo, que possíveis avanços são limitados pelo fenômeno de detonação.

IV. CONCLUSÕES

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

A biomassa pode produzir até 60% de alcatrão quando submetida a degradação térmica. Níveis elevados de concentração de alcatrão no gás de síntese são indesejados. Análise detalhada dos componentes após o reator indica que a tecnologia *downdraft* apresentou baixíssimos índices deste composto nos gases de descarga da unidade. Os filtros foram examinados e não apresentaram depósitos de alcatrão, bem como o coletor de admissão do motor. Uma inspeção detalhada do motor não foi efetuada neste trabalho, visto que a tanto o conjunto motogerador e o motor da bancada dinâmométrica não operaram por um grande número de horas. Tal inspeção deve ser efetuada após, aproximadamente, 100 horas de operação.

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

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

- Redução média de 80% nas emissões de NO_x usando o gás de síntese, comparativamente ao diesel puro;
- Aumento de 9,61% nas emissões de CO usando o gás de síntese, comparativamente ao diesel puro;
- Aumento de 4,3% nas emissões de CO₂ usando o gás de síntese para baixas cargas, comparativamente ao diesel puro.

Não foram avaliadas, rigorosamente, as emissões de material particulado. A avaliação foi feita por observação visual e não se identificou aumento nos níveis de emissão de fumaça com o emprego de gás de síntese.

A análise dos resultados obtidos neste trabalho permite afirmar que a utilização do gás de síntese, produzido por

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

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Warren, T.J.B., Poulter, R. and Parfitt, R.I., Converting Biomass to Electricity on a Farm-sized Scale using Downdraft Gasification and a Spark-ignition Engine, *Bioresource Technology*, Vol. 52, pp.95-98, 1995.
- [2] Midilli, A., Dogru, M., Howarth, C.R. and Ayhan, T., Hydrogen Production from Hazelnut Shell by Applying air-blown downdraft Gasification Technique, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, pp. 29-37, 2001.
- [3] Jayah, T.H., Aye, L., Fuller, R.J. and Stewart, D.F., Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, pp. 459-469, 2003.
- [4] Wander, P.R., Altafini, C.R. and Barreto, R.M., Assessment of a Small Sawdust Gasification Unit, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, pp. 467-476, 2003.
- [5] Hanaoka, T., Inoue, S., Uno, S., Ogi, T. and Minow, T., Effect of Woody Biomass Componentes on Air-steam Gasification, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 28, pp. 69-76, 2005.
- [6] T. B. Reed e A. Dass, *Handbook of Biomass Downdraft gasifier Engine Systems*, SERI, 1988.
- [7] C.A.G., Veras, Numerical Modelling of downdraft gasifiers, to be submitted, 2007.
- [8] V.M., Tingco, B.M., Jenkins, J.R., Gross, Optimum Specific Gasification rates for static bed rice hull gasifiers, *Biomassa nd Bioenergy* Vol. 11, No. 1, pp. 51-62, 1996.
- [9] Kandpal,T.C. Uma, R. Nishore, V.V.N , Emission characteristics of na electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes, *Biomass and energy* 27 pag 195-203, (2004)
- [10] FAO, Forest Paper 72, *Wood gas as Engine Fuel*, ONU, 1986.