

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE LEITO FIXO COM DUPLO ESTÁGIO ACOPLADO UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE IGNIÇÃO POR CENTELHA PARA CONVERSÃO DE BIOMASSA EM ENERGIA ELÉTRICA.

Rubenildo Vieira Andrade, ruben@unifei.edu.br¹

René Lesme Jaen, lesme3258@yahoo.es²

Electo Eduardo Silva Lora, esl43@yahoo.com¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303 Pinheirinho, Itajubá - MG,

²Universidade de Oriente, Cuba, Ave. de las Américas s/n y calle I. C.P. 90900.

Resumo: *O artigo apresenta os resultados de testes experimentais em um gaseificador de duplo estágio de gaseificação de 50 kWt para o qual foi avaliada a sua operação e do conjunto gaseificador/motor de combustão interna onde se buscou as melhores condições operacionais. O motor gerador de 10 kWe, teve o motor, que inicialmente era de ignição por compressão, modificado para ignição por centelha. Esse motor foi avaliado quanto as suas emissões quando operado com gás proveniente da gaseificação. O gás fornecido pelo gaseificador apresentou poder calorífico de 5 MJ/Nm³ para uma concentração de CO de 21%, de H₂ de 16% e CH₄ de 1,8%. Para essa condição de gás a potência obtida foi de 5,64 kWe. Os principais poluentes considerado foram o CO e o NO_x, onde os valores medidos de CO foram altos, em media acima de 2000 mg/Nm³@5%O₂, e os de NO_x abaixo de 180 mg/Nm³@5%O₂.*

Palavras-chave: *gaseificação, biomassa, duplo estágio de gaseificação, motor de combustão interna, geração distribuída.*

1. INTRODUÇÃO

Os testes realizados tiveram como objetivo avaliar a operação do gaseificador de duplo estágio de gaseificação de forma a identificar detalhes peculiares de seu funcionamento. O conjunto gaseificador/motor também é avaliado, onde se buscou o ajuste mais adequado para se obter o máximo de carga de forma estável e constante.

As emissões do motor operando com gás de biomassa, também são avaliadas, onde se percebeu que a concentração de CO são elevadas comparativamente aos limites sugeridos por órgão ambientais e em comparação com valores de equipamentos que usam combustível fóssil. Em contra partida, os valores de SO_x não são detectados e de hidrocarbonetos também não. Os valores de NO_x são baixos apresentados valores abaixo de 180 mg/Nm³ @5%O₂ estando de acordo com legislação disponível.

A biomassa gaseificada foi o eucalipto onde o valor do poder calorífico médio do gás obtido foi de 5 MJ/Nm³, correspondendo a concentração de 21% de CO, 16 % de H₂ e 1,8 % de CH₄.

2. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

2.1. Gaseificador

O gaseificador é um reator de leito fixo tipo co-corrente de duplo estágio de gaseificação de 50 kWt, construído em aço carbono, revestido por material refratário e isolante. Tem uma altura de 2200 mm, considerando o silo de armazenamento da biomassa e o compartimento de descarga das cinzas. O diâmetro interno é de 300 mm, não possuindo garganta. A injeção de ar é feita por bico dispostos radialmente e de forma equidistantes. A Figura 2.1 apresenta um desenho esquemático e uma foto do gaseificador.

A fim de reduzir a formação de canais preferenciais e vazios no interior do reator, são utilizados dois vibradores temporizados, um localizado na parte superior na região do silo de alimentação da biomassa e outro na parte inferior do equipamento, que permite o movimento da grelha ajudando, assim, com a descarga das cinzas.

Ao longo do reator são dispostos termopares do tipo K, os quais permitem ajustar a vazão de ar que é fornecida ao gaseificador através do monitoramento da temperatura do leito do reator. Desta forma, é possível ajustar as condições de melhor desempenho no processo de transformação termoquímica da biomassa.

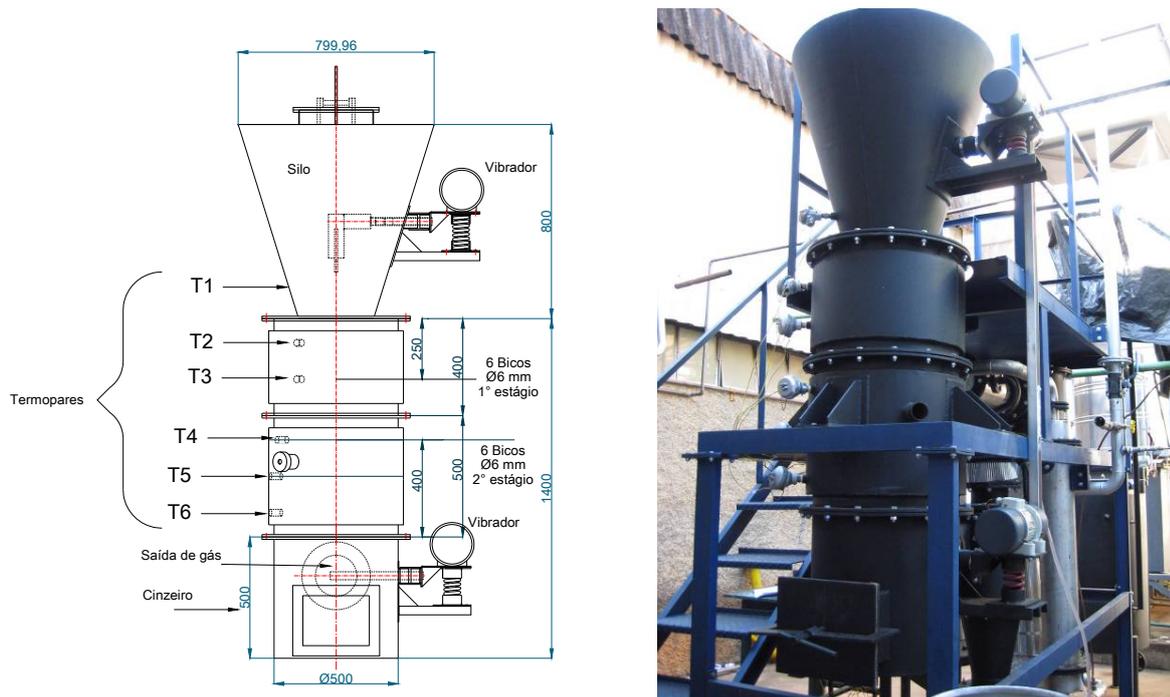


Figura 2.1 – Desenho esquemático e foto do gaseificador

2.2. Sistema de limpeza do gás

O sistema de limpeza dos gases é composto por um ciclone para separação do material particulado pesado que é arrastado do gaseificador pelo fluxo de gases, um trocador de calor para retirada da umidade, um reator de reforma catalítica para quebra e conversão do alcatrão, um filtro manga para retirar as partículas que não foram retiradas no ciclone.

Ainda faz parte do sistema um reservatório pulmão que favorece o funcionamento do motor mantendo uma alimentação constante de gás evitando flutuações extremas no fluxo de gás. A qualidade do gás ainda é favorecida pela sua permanência nesse recipiente devido possibilidade de algum tipo de deposição de material.

Antes da entrada do gás no motor ainda há um filtro de papel a fim de melhorar ainda mais a qualidade do gás que irá alimentar o motor.

2.3. Análise de gases do gaseificador

A análise de gases do gaseificador foi realizada de através de um conjunto composto por: um sistema de tratamento da amostra gasosa, um sistema de condicionamento e secagem da amostra e um conjunto de analisadores contínuos de gases. Esses analisadores medem a concentração em volume de monóxido de carbono, metano e hidrogênio do gás.

2.4. Motogerador

O motor utilizado no motogerador era, originalmente, a diesel (ignição por compressão), que foi modificado para funcionar por ignição por centelha para poder operar com gás. Essa modificação foi realizada pela empresa GET (Global Energy Telecom), tendo a relação de compressão ficado em 12,5:1, com ponto de ignição de 15° APMS (Antes do ponto morto superior). Sua potência nominal funcionando com gás GLP é de 10 kWe para uma rotação constante da máquina de 1800 rpm. Trata-se de um motor de quatro tempos, dois cilindros e de fabricação da YANMAR (Fig. 2.2). Ele pode operar com gás GLP, que é utilizado para seu aquecimento, antes de introduzir o gás de biomassa.



Figura 2.2 - Foto do motogerador.

2.5. Bancada de simulação de carga

Foi utilizada uma bancada de simulação de carga, onde foi possível variar a carga imposta ao motogerador, a fim de verificar a sua resposta trabalhando em carga parcial e plena carga. A bancada possui mostradores de grandezas elétricas, bem como possibilita a conexão com a rede distribuidora. A carga resistiva é simulada através de lâmpadas.

2.6. Analisador portátil de emissões

Para determinar a concentração das emissões no gás de escape do motor utilizado nos testes, foi usado um analisador portátil de gases, que fornece a leitura das concentrações em ppm e % vol. de diferentes gases, como: CO, CO₂ (calculado), NO_x, SO_x, O₂. Fornece ainda as leituras da temperatura do gás [° C], e fator de ar (λ) e hidrocarbonetos não queimados.

2.7. Sistema de aquisição de dados e medição de temperatura e vazão

O sistema de aquisição de dados é composto de módulos de oito canais, completamente configurável por software, capaz de receber sinais de corrente, resistência e tensão sem a necessidade de realização de configuração física, sendo, portanto, extremamente versátil. O sinal aqusitado é transferido via porta RS/485 convertido para uma porta USB podendo ser visto em tempo real em um computador através de um software que gerencia as informações aqusitadas.

Os termopares utilizados são do tipo k e a velocidade do ar fornecido ao gaseificador é medida a partir de placas de orifício. As velocidades do ar e do gás combustível são medidas a partir de um tubo de pitot e de uma placa de orifício, respectivamente.

3. BIOMASSA UTILIZADA:

A biomassa utilizada no teste foi a lenha de eucalipto cuja dimensão foi adequada a um tamanho no qual possa ser contida num cubo de aproximadamente 6 cm de lado (aresta). Esse procedimento foi adotado a fim de favorecer o processo de gaseificação e evitar grandes espaços vazios dentro do reator o que poderia contribuir para formação de canais preferenciais no interior do reator.

A determinação do poder calorífico da biomassa foi realizado em um calorímetro no laboratório de NEST/UNIFEI. Ele fornece o poder calorífico superior da biomassa em MJ/kg. O valor obtido para biomassa utilizada (eucalipto) foi de 18,14 MJ/kg.

A umidade da biomassa foi determinada a partir de um analisador automático de umidade, também nos laboratórios do NEST/UNIFEI. O valor obtido para biomassa utilizado foi 10,32 %.

4. METODOLOGIA

Foram realizados experimentos em laboratório do comportamento operacional do funcionamento do gaseificador, desde o procedimento de partida até o de parada. A análise contemplou do monitoramento de parâmetros operacionais como temperatura, ao longo do reator, para as diferentes zonas de reação; fluxos do agente de gaseificação e concentração dos gases combustíveis do gás gerado, para os quais foram realizados gráficos com relação ao tempo de funcionamento.

Foram realizadas análises para o gaseificador partindo desde a condição ambiente e para ele partindo já, previamente, aquecido; a fim de verificar o ganho com relação ao tempo gasto até atingir a condição de funcionamento útil, ou seja, gerando gás adequado para utilização e com as zonas de reação bem definidas, sendo o maior indicativo a temperatura lida para a zona de oxidação em torno de 750 °C.

Quando o gaseificador atingia a condição de operação útil o gás gerado, que inicialmente durante a partida era incinerado em um “flare”, era direcionado ao sistema de limpeza para posteriormente ser utilizado no motor.

Estando o gás disponível para utilização, o motor deveria ser aquecido com gás GLP, para poder receber o gás de biomassa, o qual era introduzido no motor diretamente no carburador. Sendo que, todo esse processo era realizado, obviamente, sem impor carga ao motor.

Estando o motor operando de forma constante era imposta carga a ele através da bancada de simulação e realizada as leituras das grandezas operacionais, para posterior tratamento e análise.

Tendo-se realizadas as variações de cargas e realizada as medidas necessárias, o motor permanecia em funcionamento em plena carga até a parada do gaseificador, quando se realizava a operação do motor novamente com GLP para prevenir alguma deposição de material indesejável que pudesse ainda permanecer no gás de biomassa.

A análise das emissões foi realizada a partir da amostragem dos gases de exaustão do motor, através de um analisador portátil da empresa ECIL, modelo ecoline 6000. A amostragem foi realizada de forma contínua para diferentes valores de carga, imposta ao motor através de uma bancada de simulação.

Os valores lidos no equipamento foram anotados em uma planilha para posterior tratamento dos dados. Não foram feitos registros através de sistema de aquisição.

Os dados obtidos são corrigidos para as condições normais de temperatura e pressão (0 °C e 101.325 Pa) e 5% de oxigênio para que possam ser comparados aos valores de limites impostos pela legislação e com valores obtidos por outros autores.

A vazão de gases foi considerada como sendo a vazão de combustível mais a vazão de ar, as quais foram determinadas através da medida da velocidade de seus fluxos através de uma placa de orifício e de um pitot, respectivamente. A temperatura dos gases de exaustão é medida através de um termopar já acoplado a sonda de amostragem do gás do analisador portátil de gases.

5. RESULTADOS

5.1. Partida Desde a Temperatura Ambiente

O gráfico da Fig. 5.1 apresenta o comportamento do gaseificador relacionado às temperaturas das zonas operacionais desde sua condição a frio até atingir uma condição onde já é possível dizer que ele se encontra em regime de gaseificação. Também é possível verificar o comportamento das temperaturas medidas ao longo do gaseificador. Os termopares são posicionados e identificados de acordo com as zonas de reação. Dessa forma, é possível observar o comportamento operacional de cada uma delas.

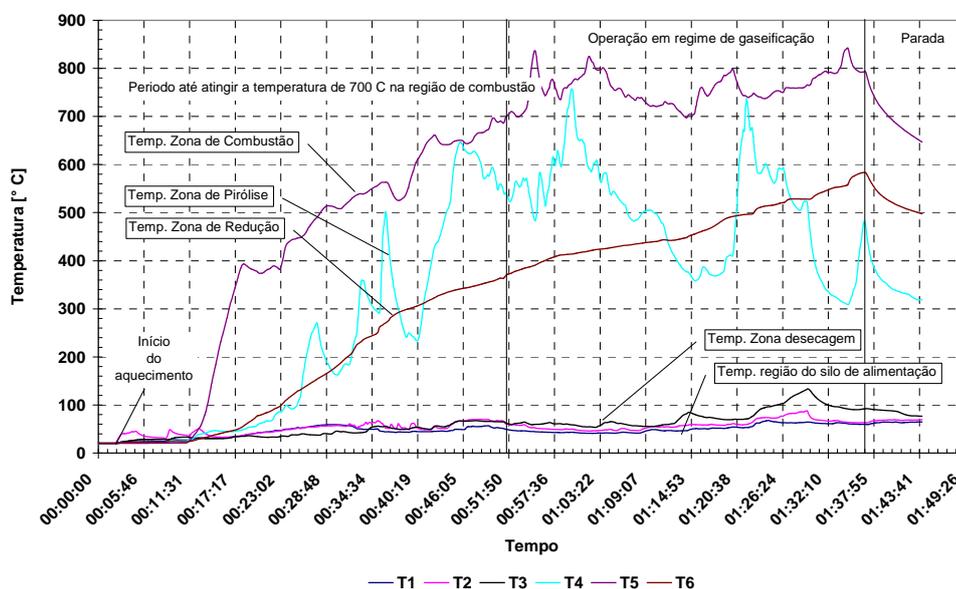


Figura 5.1 – Gráfico de partida do gaseificador desde a temperatura ambiente

A temperatura da zona de combustão (região onde é injetado o ar de segundo estágio) é indicada pelo sensor identificado por “T5”, sendo a temperatura que mais rapidamente aumenta até atingir a sua condição de regime em torno de 700 a 850 °C, aproximadamente. Seu comportamento apresenta grande variação ao longo de toda a operação.

A região de pirólise é identificada através da temperatura indicada pelo sensor identificado por “T4”. A temperatura da zona de pirólise tem uma variação maior do que a temperatura da zona de combustão, apresentando variações da ordem de 400 °C. Esse fenômeno pode ser explicado pela queima, em determinados momentos, de material liberados durante a volatilização criando regiões de temperatura elevada e também pela maior movimentação de material.

A temperatura indicada pelo sensor “T6” identifica a zona de redução. Nessa região a temperatura apresenta um comportamento estável, sendo a que menos apresenta variação, não se observando picos de temperatura. Observando-se o gráfico é possível verificar que o comportamento da curva de arranque para a zona de redução se assemelha a uma parábola.

O gráfico da Fig. 5.2 apresenta o comportamento dos gases combustíveis na saída do gaseificador. O início da análise ocorreu a cerca de uma hora e doze minutos após a partida do gaseificador. No início da amostragem há um pico nas concentrações, mas que é apenas uma interferência no sinal do sistema de aquisição devido à entrada de funcionamento do amostrador.

Após o sistema entrar em regime, o teor de CO, H₂, e CH₄ apresentaram valores de 15%; 15% e 1,7; respectivamente.

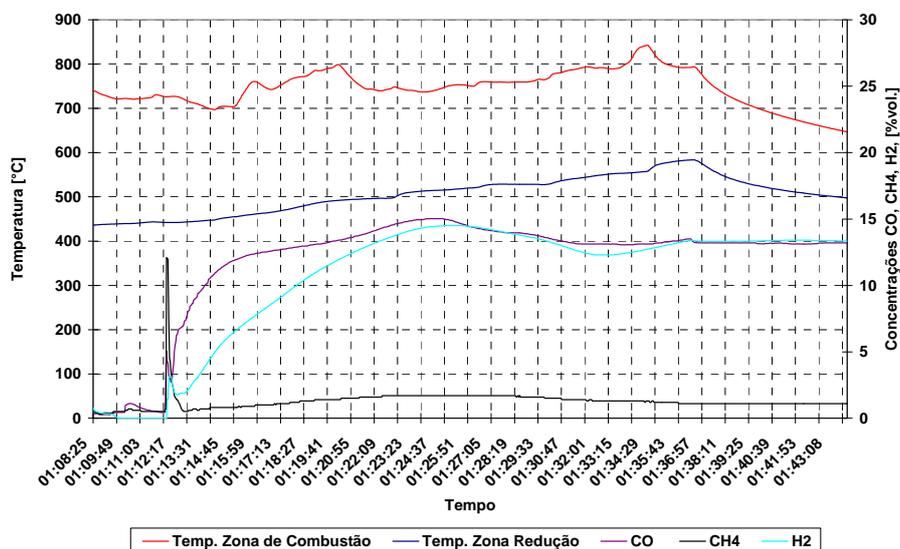


Figura 5.2 – Análise de gases combustíveis do gaseificador.

5.2. Partida com aquecimento prévio

O comportamento operacional do gaseificador é apresentado no gráfico da Fig. 5.3. Nele é possível observar a partida do reator com pré-aquecimento, pois a temperatura da zona de combustão e redução está a aproximadamente 300 °C. A essa temperatura, ao se introduzir o agente de gaseificação o equipamento já retoma o processo.

O tempo de partida até atingir o regime é reduzido em aproximadamente 20 minutos comparando-se o gráfico das Fig. 5.1 e Fig. 5.3.

O tempo de operação útil em regime de gaseificação, para esse caso, foi de 52 minutos, para uma carga no gaseificador de 30 kg. Deve-se ter claro que a carga mencionada considera desde a partida a quente.

No gráfico, também, é possível observar o momento da necessidade de carga do gaseificador, caracterizada pelo aumento da temperatura indicada pelos sensores T1; T2 e T3, na região do silo e de secagem da biomassa.

Outro indicativo de necessidade de carga do gaseificador é a redução da concentração de hidrogênio no gás, com ligeiro aumento da concentração de monóxido de carbono como visto na Fig. 5.4, todavia isso também pode indicar a ocorrência de vazios do leito do reator, ocasionado pela interrupção do fluxo natural da biomassa no interior dele. Esse fenômeno causa o consumo do gás produzido nessa região e conseqüente diminuição das concentrações desses gases.

Esses indicativos podem ser utilizados para automação de reatores desse tipo. É importante mencionar que durante os testes não foi possível a realização da alimentação constante do gaseificador, já que o mesmo foi construído para alimentação por batelada, não havendo mecanismos que possibilitem essa tarefa. No entanto, para se garantir uma perfeita condição de gaseificação em duplo estágio é necessário que o gaseificador opere com a região silo sempre com determinada carga, a fim de manter as zonas no interior do reator.

Durante o intervalo operacional do gaseificador, é possível a alimentação do motogerador em carga constante. Na região de funcionamento incipiente o motor pode funcionar, todavia em carga reduzida, podendo falhar a qualquer momento.

Durante o teste que se refere o gráfico da Fig. 5.4, as condições em que foi realizada a operação do gaseificador não permitiram a operação dele em carga máxima de forma constante. Essa condição de operação do gaseificador foi de fornecimento de 20 Nm³/h de agente de gaseificação sendo 20% de vazão no primeiro estágio e 80% no segundo estágio, que foi a condição para qual se obteve a maior eficiência a frio. Todavia, a vazão mássica de gás gerada é insuficiente para atingir a condição máxima do motogerador, dessa forma, em outro teste, essa condição foi alterada a fim de se obter maior potência do reator.

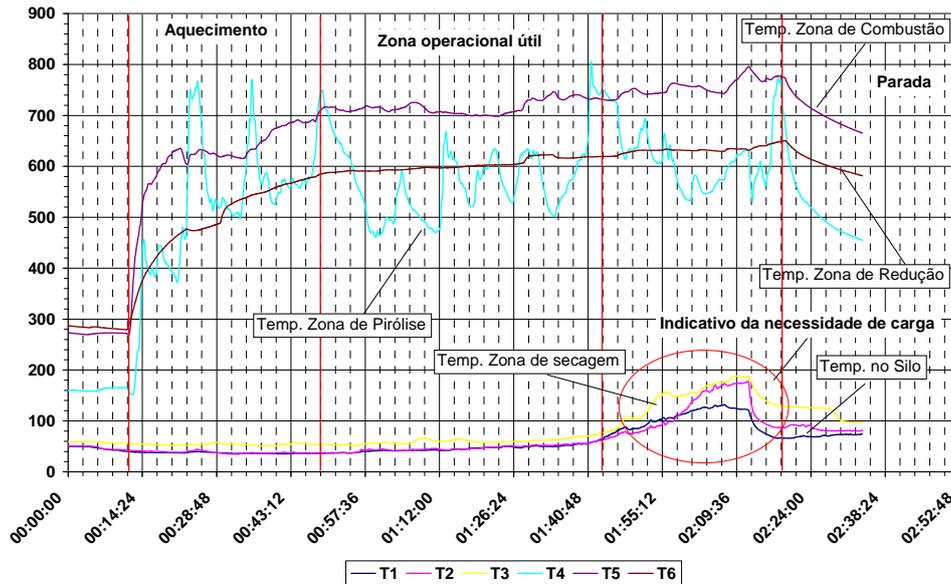


Figura 5.3 – Gráfico da funcionamento do gaseificador da partida com aquecimento prévio

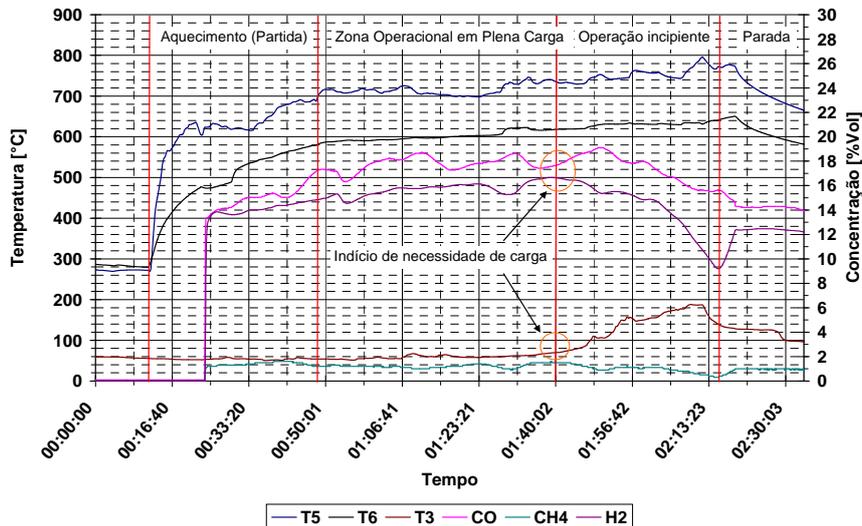


Figura 5.4 – Gráfico das concentrações dos gases combustíveis na saída do gaseificador e principais temperaturas operacionais.

Foi realizado um teste com o leito pré-aquecido e tendo-se esgotado todo material do interior do gaseificador, restando apenas um pouco de carvão em cima da grelha. Procedeu-se a carga de 40 kg de lenha e passou-se a injeção de ar. Houve, então, o aumento instantâneo das temperaturas das zonas de combustão e redução. O gráfico da Fig. 5.5 ilustra esse teste, nele é possível verificar que a temperatura da zona de redução, inicialmente, é superior a zona de combustão, isso devido a região da grelha estar a uma temperatura mais elevada que as regiões superiores, sendo que logo após um determinado tempo essa condição se inverte para condição normal de operação.

O gaseificador está em condição operacional após cerca de 30 minutos, permanecendo assim por aproximadamente 2 horas e 30 minutos, quando aparecem os indicativos de necessidade de nova carga.

Durante o período operacional o gás gerado foi utilizado no motogerador. Para a condição de fornecimento de ar de 20 Nm³/h, não foi possível atender a carga máxima que pode ser atingida pelo motogerador. Para essa condição o poder calorífico do gás fornecido pelo gaseificador foi da ordem de 4 MJ/Nm³. Optou-se, posteriormente, por aumentar a vazão de ar para procurar obter uma maior quantidade de gás, a fim de verificar se haveria a possibilidade de se atingir uma melhor condição de funcionamento do conjunto.

Aumentando-se a vazão de ar, houve uma resposta do gaseificador com aumento do poder calorífico do gás que chegou a valores em torno de 5 MJ/Nm³, como poder visualizado na Fig. 5.5. Para essa condição foi possível operar o motogerador em carga máxima de forma estável e constante, com potência de 5,3 kWe. Foi ainda possível obter valores de 5,64 kWe.

Essa condição também é favorável a operação do pulmão, que permanece com carga e estável, o que favorece o bom funcionamento do motor.

Os melhores resultados para o funcionamento do gaseificador foram quando a temperatura da zona de combustão trabalha com valores em torno de 800 a 850 °C.

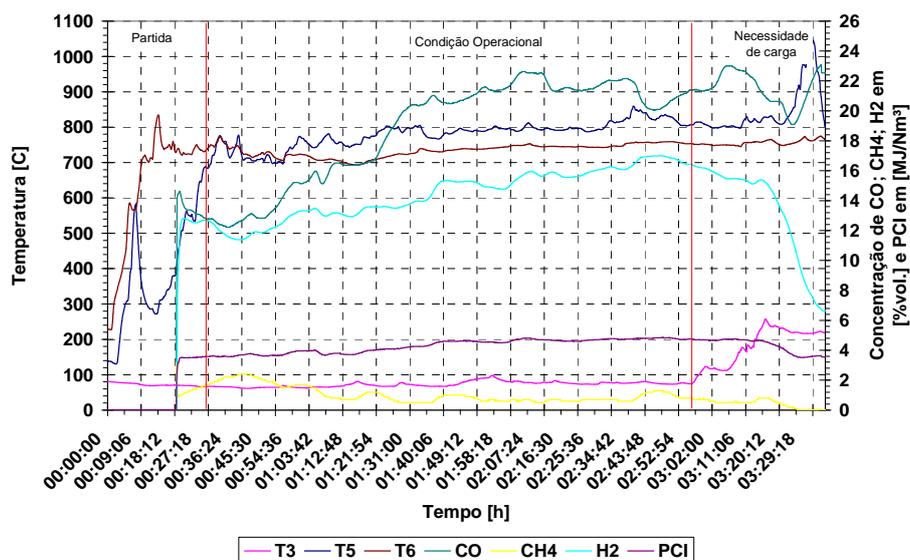


Figura 5.5 – Comportamento do gaseificador quanto a temperatura, concentração de gases combustíveis e PCI.

5.3. Funcionamento e Características do Motogerador.

Foram realizados testes preliminares do motor funcionando com gás de biomassa, todavia a perda de potência com relação à potência nominal do motor era grande, tendo-se atingido um valor em torno de 3 kWe. Dessa forma, foi necessário fazer ajustes e modificações no motor. Um dos principais itens que foram modificados foi o avanço da ignição para que o motor pudesse melhorar a sua eficiência trabalhando com gás de biomassa. O avanço ficou em 24 ° APMS, valor para o qual o motor pode operar em carga máxima de 5,64 kWe.

O gás foi introduzido no motor diretamente no carburador, onde é realizada a mistura ar/combustível. A admissão do gás e do ar é regulada por válvulas que são operadas manualmente e estão dispostas antes da entrada do carburador.

A quantidade de mistura ar/gás admitida pelo motor é regulada por uma válvula borboleta que, por sua vez, é controlada por um motor de passo o qual recebe sinal de uma sonda lambda instalada na descarga do motor. Esse sistema permite a regulação da rotação possibilitando manter estável os parâmetros elétricos como corrente, tensão das três fases e frequência segundo a carga imposta ao sistema.

Para avaliar o motor foi necessário medir algumas grandezas, como a vazão de gás e ar alimentada ao motor, emissões e grandezas elétricas.

Mesmo com todo o sistema de limpeza ainda chegou alcatrão suficiente no motor para ocasionar deposição de material na válvula borboleta, o que obrigou a colocação de outro filtro na linha de gás.

5.4. Análise das Emissões do Motor

Os dados de principal interesse são a análise de emissões são o CO, CO₂, NO_x (NO + NO₂), O₂, e a temperatura dos gases de exaustão. Pelo fato da biomassa não apresentar percentuais consideráveis de enxofre, os valores de SO_x, não são apreciáveis, como de fato não foi constatado na análise. Também não foram detectados valores de hidrocarbonetos não queimados.

Alguns autores têm realizado experiências com a utilização de gás de baixo poder calorífico aplicados em acionamento de motores de combustão interna, seja ele sozinho ou em combinação com outros combustíveis como o diesel (Ahrenfeldt, 2010; Uma, 2004; Singh, 2007).

Esses trabalhos reportam que a concentração de CO nos gases de escape do motor tende a ser maiores quanto maior for o fator de ar, ou seja, para misturas pobres. Isso, segundo Knoef (2005), deve-se em grande parte ao combustível não queimado devido à extinção da chama do gás antes dele ser completamente queimado.

Outro fator responsável pela grande quantidade de CO nos gases de emissão é o fato de que o combustível se prende em fendas na câmara de combustão, onde a propagação da chama não penetra durante o processo de combustão.

Uma (2004) comenta que a alta concentração de CO é devido ao baixo poder calorífico do gás, baixa temperatura adiabática de chama e baixa pressão efetiva. Além disso, os motores, em sua maioria, não foram projetados para operar com esse tipo de combustível.

As emissões de CO para combustíveis fosseis são menores em comparação ao gás de biomassa, em contrapartida as emissões de NO_x são maiores para os combustíveis fosseis.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as emissões do motor operando com gás de biomassa que são condizentes com os resultados obtidos por outros autores, dando ênfase as emissões de CO e NO_x.

5.4.1. Resultados e análises das emissões do motor

Os resultados obtidos da análise de emissões são comparados com os valores obtidos em outras plantas que usam o gás em motores de combustão interna. Na Tabela 5.1 são apresentados os valores de composição do gás gerado por essas plantas e a que é fornecida pelo gaseificador do NEST, para fins comparativos.

Os valores apresentam alguma diferença em termos de composição, por não utilizarem gaseificadores de mesma tecnologia. O gaseificador Viking é de uma planta piloto de duplo estágio de gaseificação do tipo co-corrente da Universidade técnica da Dinamarca (DTU) diferindo da planta do NEST, por separar a pirólise da gaseificação, sendo que na planta do NEST utiliza-se uma dupla entrada de ar. Sendo assim, As concentrações de gases combustíveis são mais próximas diferindo apenas no percentual de hidrogênio.

O gaseificador da planta de Harboore na Dinamarca é de tecnologia Babcock & Wilcox, sendo do tipo contracorrente. A planta de Güssing utiliza gaseificador de leito circulante e usa vapor como agente de gaseificação, a energia térmica para sustentar as reações endotérmicas da gaseificação com vapor é fornecida a partir de outra câmara onde ocorre a combustão da biomassa com ar.

Tabela 5.1 - Dados da composição do gás de diferentes plantas de gaseificação e a do NEST

Plantas	Composição elementar do gás [%Vol]			
	Viking ¹	Harboore ¹	Güssing ¹	NEST
Base	B.S	B.S.	B.U	B.S.
CO	18	23	29	20
CH ₄	1	5	9	1,8
H ₂	31	19	35	16
CO ₂	15	12	16	-----
N ₂	35	41	3	-----

As emissões de CO obtidas são conforme mencionado por outros autores (Uma, 2004; Ahrenfeldt, 2010), relativamente altas principalmente quando se leva em consideração os limites de impostos por órgãos governamentais como os de países como a Alemanha que já possuem regulamentação para motores de combustão interna, seja de compressão ou centelha, operando com gás pobre. A Tabela 5.2 apresenta valores de limites impostos por alguns países para a emissão de CO.

Obtiveram-se valores de 2749 a 3822 mg/Nm³ @ 5% O₂, comparando esses valores com de outras plantas conforme Tab. 5.3, pode-se verificar que essas concentrações estão compatíveis com outras plantas, todavia ficam bastante fora da regulamentação (Tab. 5.2). Nesse caso seria aconselhável a adoção de um catalisador para converter o CO e baixar a sua concentração, a fim de deixá-lo em níveis adequados a legislação. Essa solução pode ser interessante, mas deve-se observar que a umidade presente nos gases de exaustão é alta podendo ocasionar problemas ao catalisador podendo interferir no seu bom funcionamento.

Tabela 5.2 - Limites de emissão para o CO para motores novos operando com gás pobre. (Knoef, 2005).

Pais	limite CO [mg/Nm ³]	Capacidade da planta [MWt]	Ref. O ₂ %
Dinamarca	500	0,125	5
Alemanha	300	Todos	5
Holanda	250	1,55	5
Suíça	650		11
Itália	800	0-3	5
Brasil	Sem regulação		

Tabela 5.3 - Dados comparativos de emissão de três plantas e a planta do NEST.

Plantas	λ [-]	Emissão CO [mg/Nm ³] _{@5%O₂}
Viking	1,2-1,8	670-1850
Güssing	2,2-2,4	2000-4500
Harboore	2,2-2,4	1800-3100
NEST	1,06-1,16	2749-3822

O gráfico da Fig. 5.6a apresenta a variação da emissão de CO em função da potência elétrica, onde se percebe um aumento relacionado ao aumento da potência, isso é justificado pelo maior consumo de combustível considerando-se o aumento de combustível não queimado.

O consumo específico de energia do motor é apresentado no gráfico da Figura 5.6b juntamente com a emissão de CO em g/kWh. Nesse gráfico é possível verificar um aumento do consumo específico de energia para baixas cargas com conseqüente aumento das emissões de CO indicando perda de eficiência em baixas cargas. Esses resultados estão em conformidade com os resultados obtidos por Uma (2004).

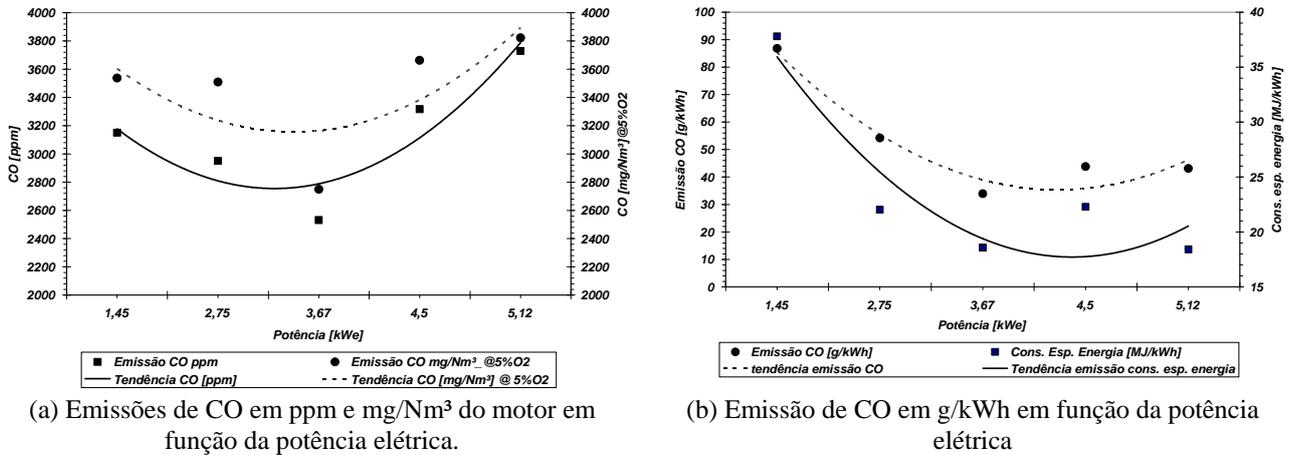


Figura 5.6 – Emissões de CO em função da potência elétrica

As emissões de NO_x obtidas são apresentadas no gráfico da Figura 5.7a. As concentrações são baixas atendendo ao limite estabelecido para motores de combustão interna operando com gás de biomassa pela TA Luft do ministério de meio ambiente da Alemanha que estabelece o limite de 500 mg/Nm³@5%O₂ para as emissões de NO_x. Também para baixas cargas a concentração de NO_x no gás de exaustão tende a ser maior quando considera-se o consumo específico de energia como pode ser visto no gráfico da Fig. 5.7b.

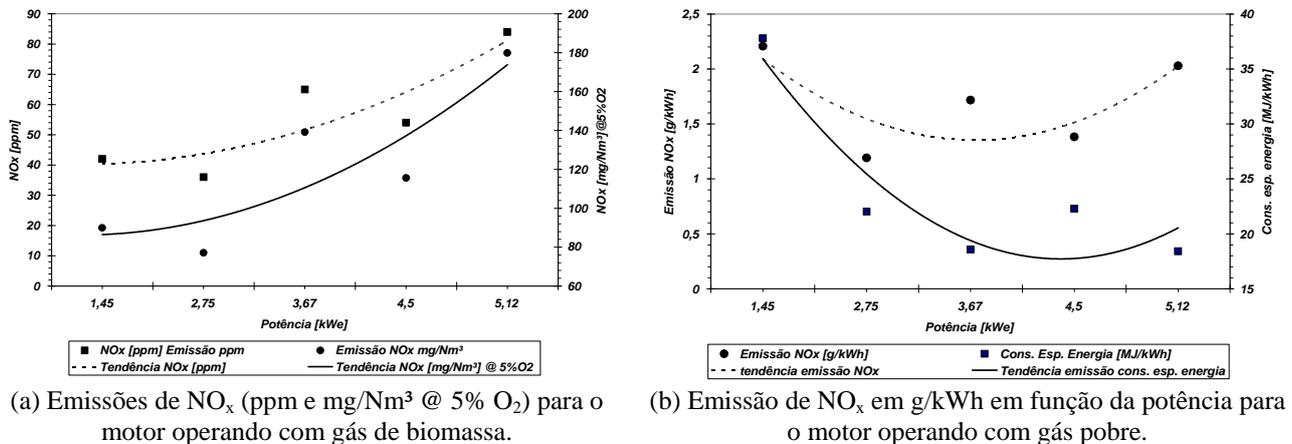


Figura 5.7 – Emissões de NO_x

6. CONCLUSÕES

As etapas pelos quais o gaseificador de duplo estágio passa durante a sua operação foram bem caracterizadas, possibilitando uma visão mais clara de seu funcionamento, sendo que foi possível identificar características operacionais que permitem ajustar o funcionamento do gaseificador, bem como, podem servir de base para a instrumentação e automação do processo, como, por exemplo, o a diminuição de produção de hidrogênio, e aumento da temperatura da região do silo o que representa um indicativo de necessidade de carga.

Para os testes realizados a melhor condição de fornecimento de gás foi de 21 % CO, 16% H₂ e 1,8 % de CH₄ o que fornece um gás de poder calorífico de 5 MJ/Nm³.

A operação do conjunto gaseificador motor são facilitadas quando se mantém um nível constante do reservatório pulmão, o que permite ao motor operar sem flutuações e de forma estável. A potência máxima obtida com o motor operando com gás foi de 5,64 kWe, todavia foram registrados picos de 6 kWe.

As emissões de CO são consideradas altas e estão acima dos limites impostos para emissão em países como Alemanha, Itália e Suíça. Todavia, os valores obtidos são condizentes com a literatura sendo comparáveis a algumas plantas que funcionam com gás de biomassa (gás de baixo poder calorífico). O Brasil não apresenta legislação para motores operando com gás pobre dessa forma, aconselha-se a adoção de valores menos rigorosos, que poderiam ser na faixa de 2000 a 3000 mg/Nm³@5%O₂.

As concentrações obtidas para o NO_x estão condizentes com os limites impostos pelo o órgão ambiental da Alemanha, que um país que tem legislação para emissão de motores de combustão interna operando com gás de baixo poder calorífico, estando, inclusive, bem abaixo do valor estabelecido que é $500 \text{ mg/Nm}^3@5\% \text{O}_2$.

Não foram detectados valores de SO_2 , o que era esperado considerando a análise elementar da biomassa. Também, não foram encontrados valores de hidrocarbonetos não queimados.

7. AGRADECIMENTOS

À Companhia Paulista de Força e Luz CPFL (Piratininga e Paulista), Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro e à UNIFEI/NEST, pela disponibilidade dos equipamentos de laboratório, sem os quais esse trabalho não poderia ser realizado.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- KNOEF, H. *Handbook biomass Gasification*. Netherlands: BTG biomass technology groupm, 2005, 378 p.
- Ahrenfeldt, J.; Jensen, T. K.; Henriksen, U.; Schramm, J.; Gobel, B. *CO emissions from engines operating on biomass producer gas*. Disponível em <<http://orbit.dtu.dk/getResource?recordId=155729&objectId=1&versionId=1>>. Acesso em 25/02/2010.
- UMA, R.; KANDPAL, T.C.; KISHORE, V. V. N. *Emission Characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes*. Biomass and bioenergy, v. 27, p. 195 - 203, 2004.
- SINGH, R.N.; SINGH, S.P.; PATHAK, B.S. *Investigations on operation of CI engine using producer gas and rice bran oil in mixed fuel mode*. Renewable Energy, v. 32, p. 1565 -1580. jul. 2007.
- CONAMA. Resolução n° 382, de 26 de dezembro de 2006. *Estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas*. Publicada no DOU n° 1, seção 1, p. 131 -137, jan. 2007.

OPERATIONAL ANALYSIS OF A FIXED BED TWO STAGE GASIFIER COUPLED TO SPARK ENGINE FOR BIOMASS POWER ENERGY CONVERSION.

Rubenildo Vieira Andrade, ruben@unifei.edu.br¹

René Lesme Jaen, lesme3258@yahoo.es²

Electo Eduardo Silva Lora, esl43@yahoo.com¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303 Pinheirinho, Itajubá - MG,

²Universidade de Oriente, Cuba, Ave. de las Américas s/n y calle I. C.P. 90900.

Abstract: *The aim of this paper is to show the experimental tests results of 50 kWt fixed bed two stage gasifier working alone and coupled with an engine. The engine, that in beginning was use compression ignition system, was change to work with a spark ignition. The emission from de engine was rated when his running used producer gas from gasification process. The low heat value of producer gas was 5 MJ/Nm³ for a concentration of the 21% CO, 16% H₂ and 1.8 % CH₄, from this gas quality was possible to generated 5.64 kWe. The results obtained for a emission of the CO it was above to 2000 mg/Nm³@5%O₂ and for NO_x it was below to 180 mg/Nm³@5%O₂.*

Keywords: *gasification, biomass, two stage gasification, internal combustion engine, distributed power generation.*