



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado – Doutorado

**EFEITO DOS TAMANHOS PADRONIZADOS DE
RETALHOS DE MADEIRA NA MELHORIA DO
FUNCIONAMENTO DE UM GASEIFICADOR DE
BIOMASSA**

por

Fernanda de Souza Silva

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica*

FERNANDA DE SOUZA SILVA

**EFEITO DOS TAMANHOS PADRONIZADOS DE
RETALHOS DE MADEIRA NA MELHORIA DO
FUNCIONAMENTO DE UM GASEIFICADOR DE
BIOMASSA**

*Dissertação de Mestrado apresentada ao
curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.*

Orientador: Professor Dr. Emerson Freitas Jaguaribe

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586e Silva, Fernanda de Souza.
Efeito dos tamanhos padronizados de retalhos de madeira
na melhoria do funcionamento de um gaseificador de
biomassa / Fernanda de Souza Silva. - João Pessoa,
2017.
55 f. : il.

Orientação: Emerson Freitas Jaguaribe.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica. 2. Gaseificador de biomassa. 3.
Motor do ciclo Otto. 4. Geração de energia elétrica. 5.
Retalhos de madeira. I. Jaguaribe, Emerson Freitas. II.
Título.

UFPB/BC

**EFEITO DOS TAMANHOS PADRONIZADOS DE
RETALHOS DE MADEIRA NA MELHORIA DO
FUNCIONAMENTO DE UM GASEIFICADOR DE
BIOMASSA**

por

FERNANDA DE SOUZASILVA

Dissertação aprovada em 27 de outubro de 2017


Prof. Dr. ENERSON FREITAS JAGUARIBE
Orientador – UFPB


Prof. Dr. RODINEI MEDEIROS GOMES
Examinador Interno – UFPB


Prof. Dr. MAURÍCIO ALVES DA MOTTA SOBRINHO
Examinador Externo – UFPE

Agradecimentos

À Deus, por me guiar em todos os momentos da minha vida. Aos meus pais, M^a do Socorro e João, por todo o amor e dedicação, por me apoiarem e ampararem em todas as decisões da minha vida, não medindo esforços para o meu sucesso e felicidade. À minha irmã, Gabriele, pelo apoio, carinho, compreensão e todos os conselhos. Ao meu orientador Emerson Freitas Jaguaribe, por me apoiar durante a realização deste trabalho, me incentivando e ensinando sempre. Ao professor Adriano Sitônio Rumão, pelos ensinamentos cotidianos e essenciais para vivência no Laboratório de Inovação. Aos amigos que fiz durante esse Mestrado, em especial a Herculano, André, Bráulio, Anderson, Marcos e Wendell que sempre estiveram comigo e me ajudaram imensamente nessa formação. À todos que fazem a Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela atenção dispensada.

EFEITO DOS TAMANHOS PADRONIZADOS DE RETALHOS DE MADEIRA NA MELHORIA DO FUNCIONAMENTO DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA

RESUMO

O principal objetivo do presente trabalho é evidenciar aspectos teóricos e experimentais de um aparato que serve à produção de energia elétrica a partir da gaseificação da biomassa residual. De fato, ganha destaque nessa abordagem os efeitos do tamanho das peças, ou blocos de biomassa de alimentação do gaseificador, no seu desempenho funcional e consequentemente no de todo o sistema (gaseificador/motor ciclo Otto/gerador). O gaseificador utilizado neste trabalho é do tipo leito fixo, co-corrente. O gás pobre produzido no gaseificador alimenta um motor do ciclo Otto, à gasolina, que foi adaptado para funcionar com gás. Esse motor está acoplado a um gerador TOYAMA. Utilizou-se quatro tamanhos de retalhos de biomassa, semelhantes à forma de cubos, sendo eles com aresta de aproximadamente, 13 mm, 16 mm, 20 mm e 27 mm. Dentre os tamanhos testados, destacou-se aquele com dimensão de 27 mm de aresta, que produziu menor consumo, melhor aproveitamento energético, traduzido em PCI mais elevado, e maior eficiência do sistema (10,59 %), quando gerou 2,16 kW de potência elétrica. Esse resultado auferido confirma que o uso dos gaseificadores de biomassa se constitui uma excelente alternativa aos combustíveis fósseis na geração de energia elétrica, além de ser um sistema ecologicamente correto.

Palavras chave: Gaseificador de biomassa; Motor do ciclo Otto; Tamanho de retalhos de madeira; Geração de energia elétrica.

EFFECT OF STANDARD SIZES OF WOOD PIECES IN IMPROVING THE OPERATION OF A BIOMASS GASIFIER

ABSTRACT

The main objective of this paper is to point out the theoretical and experimental aspects of an equipment that produces electrical energy from the gasification of residual biomass. In fact, this approach focuses on the impact produced by the size of the biomass used to feed the gasifier, on its functional performance and consequently on the system as a whole (gasifier/Otto cycle engine/generator). The gasifier used in this work is a co-current downdraft gasifier. The poor gas there produced, feeds an Otto cycle engine, originally fed with gasoline, but has been modified to run on poor gas produced. This engine is coupled to a Toyama generator. Four different sizes of biomass, in the shape of cubes, were used with an edge approximately 13 mm, 16 mm, 20 mm and 27 mm. Among the sizes tested, the one with the edge of 27 mm resulted in lower consumption and better energy efficiency, translated into higher PCI and higher system efficiency (10.59%) when it generated 2.16 kW of electrical power. This result confirms that the use of biomass gasifiers constitutes an excellent alternative to fossil fuels when it comes to the generation of electrical energy, besides being an ecologically correct system.

Keywords: Biomass gasifier, Otto cycle engine, Size of biomass, electrical energy generation.

Lista de Figuras

Figura 1. Gaseificador utilizado neste trabalho.	27
Figura 2. Esquema do gaseificador e seus componentes (Figueiredo, 2017).	28
Figura 3. Acúmulo de cinzas acima da grelha (Autor).	29
Figura 4. Sistema de desobstrução da grelha. (A) Alavanca de acionamento no topo do reator; (B) Hastes de penetração na camada de cinzas (Autor).	30
Figura 5. Motor utilizado no presente trabalho.	31
Figura 6. Motor acoplado ao gerador.	31
Figura 7. Serra de bancada elétrica (Rumão, 2013).	32
Figura 8. Banco de Lâmpadas.	32
Figura 9. Analisador de qualidade de energia portátil (GETROTECH, 2016).	33
Figura 10. Analisador de gases veiculares (Rumão, 2013).	34
Figura 11. Balança digital (Autor).	34
Figura 12. Termobalança (Figueiredo, 2017).	35
Figura 13. Termopar cerâmico tipo K (Autor).	35
Figura 14. Termo-anemômetro digital (Figueiredo, 2017).	36
Figura 15. Dimensões de biomassa utilizadas na alimentação do gaseificador.	36
Figura 16. Indicação de um dos orifícios laterais do reator (Autor).	37
Figura 17. Chama piloto acionada.	38
Figura 18. Controlador de fluxo manual da mistura ar/gás (Autor).	38
Figura 19. Visualização dos pontos de medição de temperatura.	40
Figura 20. Níveis de CO, CO ₂ e O ₂ no gás pobre.	43
Figura 21. Níveis de CO, CO ₂ e O ₂ nos gases de escape.	44
Figura 22. Poder calorífico inferior do gás pobre.	45
Figura 23. Perfil de temperatura no interior do reator.	46
Figura 24. Consumo específico da biomassa.	47
Figura 25. Eficiência do sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador	48

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores (Bridgwater, 1991),.....	21
Tabela 2. Dados referentes ao teor de umidade da biomassa utilizada.	41
Tabela 3. Dados referentes à massa específica da biomassa utilizada.	41
Tabela 4. Medidas de temperaturas verificadas durante os testes.	42
Tabela 5. Dados referentes ao PCI da biomassa utilizada.	44

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	12
1. INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO II.....	16
2. CONCEITOS E CORRELAÇÕES RELACIONADOS A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO.....	16
2.1. Introdução	16
2.2. Gaseificação.....	16
2.2.1. Gaseificação do Carvão de Pedra	17
2.2.2. Gaseificação da Biomassa	17
2.3. Princípios do Processo de Gaseificação.....	18
2.3.1. Reações de Gaseificação	19
2.4. Gaseificador	20
2.4.1. Tipos de Gaseificadores.....	20
2.5. O Gás Produzido	21
2.6. Geração de Energia Elétrica	21
2.7. Alguns Conceitos e Correlações Físico-Matemáticas Pertinentes.....	22
2.7.1. Poder Calorífico Inferior do Gás Pobre Produzido	22
2.7.2. Poder Calorífico Inferior da Biomassa (Madeira)	23
2.7.3. Poder Calorífico Inferior do Gás, Determinado a Partir de Sua Composição	23
2.7.4. Consumo de Biomassa	24
2.7.5. Eficiência do Gaseificador.....	24
2.7.6. Eficiência do Grupo Gerador (Motor/Gerador).....	24
2.7.7. Eficiência do Sistema Gaseificador/Motor Otto/Gerador	25
CAPÍTULO III	26
3. EXPERIMENTAÇÃO	26
3.1. Introdução	26
3.2. Equipamentos.....	26
3.2.1. O Gaseificador Utilizado Neste Trabalho	26
3.2.2. Motor do Ciclo Otto	30
3.2.3. Gerador Elétrico	31
3.2.4. Aparato Experimental Complementar	31
3.3. Testes no Sistema Gaseificador/Motor do ciclo Otto/Gerador	36
CAPÍTULO IV	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. Introdução	41

4.2.	Teor de Umidade e a Massa Específica da Biomassa.....	41
4.3.	Medidas de Temperaturas	42
4.4.	Determinação da Massa de Cinzas Produzidas.....	43
4.5.	Composição do Gás Pobre	43
4.6.	Composição dos Gases de Escape	43
4.7.	Poder Calorífico Inferior (PCI).....	44
4.7.1.	Determinação do PCI da Biomassa	44
4.7.2.	Determinação do PCI do Gás Pobre Produzido.....	45
4.8.	Perfil de Temperaturas no Interior do Reator	45
4.9.	Consumo Específico da Biomassa	46
4.10.	Eficiência do Sistema Gaseificador/Motor Otto/Gerador	47
CAPÍTULO V		49
5.	CONCLUSÕES.....	49
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		52
REFERÊNCIAS		53

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade está entrelaçado à utilização da energia. Desde os primórdios, quando o homem descobriu o fogo e começou a utilizar sua energia, essa tem sido obtida através de atividades extrativistas, aproveitando-se dos recursos da natureza. Segundo Silva (2006), dentre os caminhos evolutivos que permearam o uso da energia feito pelo homem, diversos passos foram tomados desde o primeiro contato até o estabelecimento de sistemas complexos de geração e distribuição de energia.

A partir da metade do século XX, com a evolução dos processos industriais e o contínuo progresso da sociedade, a demanda de energia sofreu um aumento sistemático. Com isso, começou-se a perceber os impactos do consumo crescente vis-à-vis de reservas finitas. No final do século XX, a preocupação em se preservar o meio ambiente ganhou destaque, de modo que, diversos países implantaram legislações ambientais. Questões como aquecimento global e emissões de carbono se tornaram tópicos de relevância em projetos de geração de energia. Além disso, a conscientização das limitações de reservas de fonte energéticas, sobretudo, a petrolífera, vem causando, de tempos em tempos, sobressaltos em todo o mundo industrializado. Dessa forma, é que já ocorreram cinco crises relacionadas a produção/consumo de petróleo (1956, 1973, 1979, 1991 e 2008), revelando os graves impactos econômicos e sociais causados pela dependência de uma única fonte de energia (Cardoso, 2012).

São, portanto, essas crises que têm norteado a humanidade na busca de fontes alternativas, que possam, um dia substituir, completamente, o petróleo. Até o momento, todavia, dois obstáculos têm impedido o adoção de uma tal fonte: a indissociável contaminação ambiental que o uso pode gerar, como é o caso da energia nuclear, ou os custos elevados exigidos para disponibilizá-la, a exemplo das energias, solar, eólica, maremotriz, etc.

Alheia a tais restrições, a biomassa reafirma-se, a cada dia, como a única energia renovável capaz de substituir, em muitas situações aquela do petróleo, com custos competitivos até com a hidrelétrica e sem causar danos ao ambiente.

Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia (ANEEL, 2002). Por ser considerada uma fonte de energia limpa e

renovável, a utilização da biomassa ganhou espaço no mercado energético, sendo considerada uma boa alternativa para a diversificação da matriz mundial. Quando utilizada para fins de produção de energia, a biomassa é classificada em três categorias: florestal, agrícola e rejeitos urbanos (Cardoso, 2012).

A conversão energética da biomassa pode ser feita por processos biológicos, como a fermentação alcoólica e a biodigestão, processos termoquímicos, como a combustão, a pirólise e a gaseificação, ou ainda pelo processo de extração mecânica (IEA, 2007). A escolha do método de conversão utilizado baseia-se na viabilidade técnica e econômica de cada tipo de biomassa e da tecnologia a ser empregada visando a otimização dos resultados. Dentre os tipos de biomassa disponíveis para a geração de energia incluem-se: madeira (galhos, raízes, cascas e serraduras), carvão, resíduos agrícolas (espigas de milho, casca de coco, palhas de cereais, casca de arroz, etc) e turfa.

A forma mais antiga conhecida para se produzir gás a partir de materiais orgânicos é denominada de destilação seca (dry distillation), ou seja, a pirólise do combustível sólido a uma temperatura de 600 a 1100 °C, que se assemelha às técnicas usadas hoje em dia. De acordo com Dasappa et al. (2003a) a gaseificação de biomassa para uso em motores de combustão interna, constitui uma importante fonte renovável de energia para geração de potência, ou de eletricidade.

Gaseificação pode ser definida como: o processo de oxidação parcial, onde a fonte de carbono, de origem mineral, como o carvão de pedra, ou gasosa, como o gás natural, ou mesmo qualquer biomassa de natureza vegetal, é quimicamente transformada em gás, ou mistura de gases. Os principais resultados dessa transformação compreendem a formação do monóxido de carbono, CO, do hidrogênio, H₂, do dióxido de carbono, CO₂, e de moléculas de hidrocarbonetos, como as de metano, CH₄. A gaseificação de combustíveis sólidos teve origem no final do século XVIII. As inovações acumuladas até o final da Segunda Guerra Mundial, desde então, estacionaram. No início da década de 70, com a repercussão da crise do petróleo (ocorrida entre 1973 e 1979), o interesse pela gaseificação voltou a surgir. Nesse período, um grupo de pesquisadores do Combustion Gasification and Propulsion Laboratory do Indian Institute of Sciences, CGPL/IISc, em Bangalore, Índia, liderados pelo Prof. H. Mukunda ganhou destaque no mundo. Depois de trinta anos de pesquisa, esse grupo formulou uma nova concepção para os gaseificadores, isto é, os de última geração, onde os gases são lavados para alimentar motores, que acoplados a grupos geradores podem gerar energia elétrica.

No que diz respeito ao processo de gaseificação, é relevante a discussão sobre o comportamento do gaseificador utilizando-se diferentes dimensões de retalhos de biomassa na alimentação do mesmo. Segundo Rumão (2013), a padronização dos tamanhos garante queima mais uniforme no reator, por não dar lugar a canais preferenciais ao ar admitido (essencial a reação de pirólise). Um dos aspectos de grande interesse para o bom funcionamento do gaseificador é se ter a biomassa de alimentação apresentando massa específica superior a 300 kg/m^3 e com umidade inferior a 15% (Bezerra, 2016). Uma vez que, na maioria das vezes, o processo de alimentação de um gaseificador se dá por gravidade, a massa específica dos blocos, ou retalhos de biomassa assume um papel de relevância no seu funcionamento.

O volume do retalho de biomassa também influencia na reação de gaseificação. Segundo Bezerra (2016), o emprego dos tamanhos recomendados por Dasappa et al. (2003b) favorece a zona de redução (gaseificação), permitindo reações químicas mais eficientes, melhorando assim a produtividade. De acordo com Kaupp e Goss (1981), no que diz respeito a capacidade de armazenamento de carga, o volume ocupado pelo combustível não depende apenas da massa específica e do teor de umidade de um único retalho de biomassa, mas também de como a carga de combustível é empacotada e da forma dos retalhos. Além disso, o volume da biomassa está relacionado ao projeto da grelha, tendo em vista que esse componente deva permitir que a cinza se mova livremente para o compartimento de cinzas, e ao mesmo tempo, evite que os retalhos de biomassa deixem o reator ao acompanharem as cinzas.

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica, com isso, as propriedades termodinâmicas da biomassa têm influência no processo. Com relação ao teor de energia dos combustíveis sólidos, os valores obtidos na literatura estão relacionados com o poder calorífico. O poder calorífico da biomassa também é relatado com base na umidade e cinzas livres (Kaupp e Goss, 1981). A temperatura de ignição é uma propriedade importante da biomassa, pois, a reação de combustão só se torna alto-sustentável acima dela. Em um gaseificador, é necessária a ocorrência da combustão para que se tenha energia de secagem e da pirólise, como também para que haja a reação de gaseificação em si (redução). Dessa maneira, é imprescindível que se disponha de informações sobre as características de ignição do combustível. Quando o combustível é aquecido por algum meio externo, a taxa de reação exotérmica aumenta com um aumento correspondente na taxa de geração de calor. Acima de certa temperatura, a taxa de geração de calor excede a taxa de perda de calor. Quando isso acontece, o processo torna-se auto-sustentável e essa temperatura é chamada temperatura de

ignição. Esta temperatura é geralmente menor para combustíveis com maior conteúdo de material volátil. Como a biomassa possui um teor de material volátil maior do que o do carvão, ela apresenta temperatura de ignição significativamente menor (285°C para a madeira e 795°C para o carvão). A temperatura de ignição, no entanto, não é uma propriedade única da biomassa, dependendo de outros fatores como pressão parcial do oxigênio, tamanho da biomassa e taxa de aquecimento (Basu, 2010). É importante ressaltar a diferença entre esta temperatura e o ponto de fulgor da biomassa. Este último, corresponde a temperatura mínima, na qual o combustível começa a liberar seus vapores inflamáveis, vapores estes que não sustentam a queima. Para a madeira, a temperatura de ignição é aproximadamente 285 °C e o ponto de fulgor ocorre a aproximadamente 150 °C.

A forma concebida no trabalho para examinar a correlação dimensão dos tamanhos da biomassa com a melhoria no funcionamento do gaseificador, que é o objeto deste estudo, se deu a partir de testes realizados em um gaseificador de “topo aberto”, co-corrente, estando esse acoplado a um grupo gerador, com motor do ciclo Otto. Os testes foram realizados no Laboratório de Inovação do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Para tornar didática a apresentação desse texto, acrescenta-se a essa Introdução os seguintes capítulos II, III, IV e V, com os seguintes títulos: Cap. II – Conceitos e Correlações Relacionados a Geração de Energia Elétrica a Partir da Gaseificação; Cap. III – Experimentação; Cap. IV – Resultados e Discussões; Cap. V – Conclusões.

CAPÍTULO II

2. CONCEITOS E CORRELAÇÕES RELACIONADOS A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO

2.1. Introdução

No presente capítulo são apresentados alguns termos pertinentes ao tema discutido, tais como biomassa, gaseificação e energia elétrica no Brasil. Bem como, as correlações físico-matemáticas utilizadas para avaliação dos dados experimentais advindo dos testes com o sistema gaseificador/motor ciclo Otto/gerador.

2.2. Gaseificação

O processo de gaseificação foi descoberto de forma independente na França e na Inglaterra em 1798. Já em 1850 a tecnologia tinha sido desenvolvida a tal ponto que era possível iluminar grande parte de Londres com gás manufaturado (Reed e Das, 1988).

Segundo Sánchez (2010), gaseificação é um processo químico que converte materiais carbonáceos em combustíveis gasosos ou também matéria-prima química (que pode ser queimada para liberar energia, ou utilizada para produção de produtos químicos). A grande atração da gaseificação é que esta pode converter resíduos ou combustíveis de baixo preço em produtos químicos.

O processo de gaseificação requer um meio gaseificante (ar e oxigênio são os principais), necessário para rearranjar a estrutura molecular da matéria-prima e, posteriormente, converter essa matéria-prima sólida em gases ou líquidos, por meio de reações químicas. Os agentes gaseificantes reagem com o carbono sólido e hidrocarbonetos mais pesados, convertendo-os em gases de baixo peso molecular, como CO e H₂ (Basu, 2010). O oxigênio é o agente gaseificante mais comum, seja ele apresentado na sua forma pura ou como o próprio ar. Pode influenciar fortemente o poder calorífico e a composição do gás produzido, a depender da natureza e quantidade utilizada deste agente. Com isso, o processo de gaseificação é considerado como sendo resultado de uma combustão parcial da biomassa, visto que o volume de ar (agente gaseificante) utilizado é inferior aquele necessário para queima completa da biomassa.

A mistura de gases produzida pelo processo de gaseificação é conhecida por gás de

baixo poder calorífico, gás pobre ou manufaturado. Seus principais componentes são: CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono), H₂ (hidrogênio) e, dependendo das condições de operação, CH₄ (metano), hidrocarbonetos leves e vapor de água em diferentes proporções (Rumão, 2013).

As cinzas produzidas no processo de gaseificação são definidas por Rumão (2013) como sendo resíduo inorgânico remanescente da queima da matéria orgânica ao se transformar em CO₂ e H₂. De acordo com 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 cinzas de madeira se situa entre 0,14 a 2,73 % (VALE et al, 2002).

Pirólise, oxidação parcial e hidrogenação são processos relacionados à gaseificação. A combustão também converte materiais carbonáceos em produtos gasosos. Porém, há algumas diferenças importantes. Por exemplo, a gaseificação armazena energia em ligações químicas, enquanto a combustão libera energia. O processo de gaseificação ocorre em ambientes com pouco oxigênio, que requerem calor e a combustão acontece em ambientes oxidantes, emitindo calor (Basu, 2010). Segundo Reed e Das (1988), na prática, a gaseificação pode converter de 60 até 90 % da energia da biomassa em gás combustível.

2.2.1. Gaseificação do Carvão de Pedra

No processo de gaseificação, é também comum o uso do carvão de pedra (conhecido como hulha). O carvão de pedra é um material sólido, poroso, de fácil combustão e capaz de gerar calor. Este tipo de carvão origina-se de um longo processo natural, denominado encarbonização, pelo qual, substâncias orgânicas, sobretudo vegetais, sustentam a ação da temperatura terrestre por aproximadamente 300 milhões de anos. É composto por carbono, restos vegetais parcialmente conservados, elementos voláteis, detritos minerais e água. A gaseificação do carvão de pedra é praticada desde a primeira metade do século XIX e tem a finalidade de converter o carvão em combustível sintético de aplicação direta na produção de energia (CEPA, 1999).

Segundo Sánchez (2010), dependendo da composição do carvão mineral e das características próprias do processo de gaseificação realizado, componentes indesejáveis como alcatrão, material particulado, sulfeto de hidrogênio e amônia, podem acompanhar os compostos do gás produzido.

2.2.2. Gaseificação da Biomassa

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de

crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina (ANEEL, 2008).

Segundo Nogueira e Lora (2003), as características técnicas mais importantes para a utilização da biomassa são o teor de umidade, o poder calorífico e composição química. Além disso, granulometria e massa específica aparente também influenciarão nas características de projeto de uma unidade de gaseificação de biomassa.

A madeira é considerada um recurso energético que tem potencial para diminuir as dependências externas de outras fontes de energia. Os resíduos de madeira podem ser utilizados para geração de energia elétrica, através da gaseificação, e são comumente encontrados em indústrias de serraria e propriedades agrícolas que trabalham com cultivo de reflorestamento (Chaves, 2012).

No que diz respeito aos tamanhos dos retalhos de biomassa a serem utilizados no gaseificador, segundo Dasappa et al. (2003c) a dimensão da biomassa influi no movimento da mesma no reator, na qualidade do gás e na formação de alcatrão, a regra típica é que se deva usar biomassa com dimensões de um sexto a um duodécimo do diâmetro do reator.

2.3. Princípios do Processo de Gaseificação

O processo de gaseificação pode ocorrer de forma direta (utilizando-se ar ou oxigênio para gerar calor através de reações exotérmicas) ou indireta (utilizando-se uma fonte externa de calor).

Segundo Rezaiyan e Cheremisinoff (2005), na gaseificação, a biomassa é submetida à pirólise parcial em condições subestequiométricas com o fornecimento de ar controlado, utilizando de 1,5 a 1,8 kg de ar por kg de biomassa. A mistura resultante de gases produzidos durante o processo de gaseificação é chamado de gás pobre, sendo composto por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e água (H₂O) junto com outros compostos como alcatrão e material particulado, que dependendo da aplicação, devem ser removidos.

O processo de gaseificação ocorre em uma série de etapas que envolvem diversas reações químicas, esses processos podem ser descritos como:

- **Secagem:** é o primeiro estágio do processo de gaseificação e se dá na parte superior do reator. Nessa etapa ocorre a evaporação da água contida na

biomassa, a qual é produzida pela transferência de calor fornecido pela zona de combustão.

- **Pirólise:** é a desvolatilização, ou simplesmente a decomposição térmica da biomassa. Em síntese, a pirólise é o resultado da transformação térmica da biomassa a uma temperatura inferior a 600 °C, ou seja, mediante o calor, o sólido original é decomposto em uma mistura de sólido (carvão ou carbono), líquido (alcatrão, hidrocarbonetos pesados e água) e gás (CO_2 , H_2O , CO , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_6H_6 , etc.). As proporções destas partes dependem da composição química da biomassa e das condições de operação do gaseificador (Basu, 2010).
- **Combustão:** é a reação do material com oxigênio. Esse processo é 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 (Rumão, 2013).
- **Redução:** ocorre quando o carbono e os hidrocarbonetos do combustível reagem parcialmente com o oxigênio, dando origem a combustíveis como o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H_2). Esse processo ocorre na zona de redução.

2.3.1. Reações de Gaseificação

No decorrer do processo de gaseificação há algumas reações químicas complexas, sendo elas exotérmicas de oxidação (combustão) e endotérmicas de redução, envolvendo fases sólidas e gasosas. As reações de gaseificação dividem-se como segue.

- Reações Heterogenias Gás – Sólido
 - Oxidação do Carbono
 - Reação de Boudouard
 - Reação Gás d'água
 - Metanação
- Craqueamento do alcatrão

Todas essas reações são descritas e podem ser vistas em Rumão (2013).

2.4. Gaseificador

Gaseificador é um equipamento composto por um reator e seus componentes. No reator, a biomassa passa por diversos processos: perde umidade, aquece, sofre pirólise, oxida e se reduz, tendo como produto final uma mistura de combustíveis gasosos (gás pobre).

O reator é a principal elemento do gaseificador. É nele que os retalhos de biomassa reagem com o ar para gerar o gás pobre. Os primeiros reatores construídos na Europa eram topo fechado. Em contraste a este projeto, uma configuração em topo aberto, baseada em um modelo de laboratório criado por Reed e Markson (1982), foi desenvolvida no Indian Institute of Science, essencialmente para superar a operação não confiável do projeto de topo fechado, particularmente quando a biomassa tem alto teor de umidade (cerca de 25% ou mais) e também proporcionar melhores reações na zona de redução, com baixo teor de alcatrão (Mukunda et al., 1993). Essa configuração permite que 60% da quantidade de oxigênio necessária a carbonização da biomassa entre pela parte superior e os outros 40% entrem pelos orifícios laterais do reator. A alimentação de biomassa no gaseificador é feita pelo topo, segundo Bezerra (2016), no primeiro funcionamento do gaseificador, se faz necessário alimentá-lo com 50% de carvão e 50% de biomassa.

Dentre os componentes do gaseificador, a grelha é o item responsável por separar o compartimento de cinzas da zona de redução e suportar toda a coluna de combustível. É considerado um componente crítico na construção do gaseificador. A grelha deve permitir que a cinza flua livremente, através dela, para o compartimento de cinzas, e ao mesmo tempo, evite que o material acompanhe as cinzas (Kaupp e Goss, 1981).

Segundo Basu (2010), o projeto de um gaseificador requer um entendimento do processo de gaseificação e de como a matéria-prima e os parâmetros operacionais podem influenciar no desenvolvimento da planta.

2.4.1. Tipos de Gaseificadores

A escolha do gaseificador ideal depende da aplicação final do gás e do tipo de combustível utilizado. Gaseificadores podem ser classificados de acordo com alguns fatores como: poder calorífico do gás produzido, tipo do agente gaseificador, pressão de trabalho, tipo de biomassa utilizada e direção do movimento relativo da biomassa com relação ao agente de gaseificação. Este último condicionante é o mais utilizado, e de acordo com a classificação baseada nesse parâmetro, os gaseificadores podem ser: Contracorrente, Co-corrente, de Fluxo Cruzado e de Leito Fluidizado (Sánchez, 2010).

2.5. O Gás Produzido

Comparando-se as características do gás produzido por diferentes tipos de gaseificadores, pode-se perceber que o tipo de gaseificador influi sobre as características do gás produzido (composição, poder calorífico e qualidade) (Bridgwater, 1991). Na Tabela 1, têm-se algumas características do gás de diferentes tipos de gaseificadores.

Gaseificador	Composição do gás, % vol.					PCS MJ/Nm³	Qualidade do gás
	Base seca						
	H2	CO	CO2	CH4	N2		
Leito fluidizado	9	14	20	7	50	5,4	Média
Contracorrente	11	24	9	3	53	5,5	Pobre
Concorrente	17	21	13	1	48	5,7	Boa

Tabela 1. Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores (Bridgwater, 1991).

A composição química do gás produzido contém hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano, além de traços de outros hidrocarbonetos, água, nitrogênio e contaminantes, como cinzas, alcatrões, particulados, ácidos, entre outros. Essa composição é bastante variável de acordo com o tipo e condições de operação (temperatura e pressão) do gaseificador, características da biomassa utilizada, uso ou não de agentes catalisadores e do tipo de agente oxidante (Haryanto et al., 2009).

Segundo Nogueira e Lora (2003), o gás produzido pelo processo de gaseificação se classifica em 3 tipos de acordo com o poder calorífico inferior, sendo de baixo poder calorífico (até 5 MJ/Nm³), médio poder calorífico (5 à 10 MJ/Nm³) ou alto poder calorífico (10 à 40 MJ/Nm³).

2.6. Geração de Energia Elétrica

A utilização da biomassa como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, principalmente em sistemas de cogeração (obtenção de energia térmica e elétrica). De acordo com o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), atualmente existem 4.713 empreendimentos em operação, totalizando, aproximadamente, 154 GW de potência instalada. Dentro desses empreendimentos 535 unidades são usinas termelétricas, que utilizam biomassa como fonte de energia, totalizando, cerca de 14 GW de

potência instalada, representando 8,75 % da capacidade de geração de energia elétrica total do Brasil. Houve um crescimento significativo na geração de energia a partir do uso da biomassa no Brasil, mais precisamente, 40,7 % nos últimos 9 anos (Nogueira, 2012).

De acordo com Muñoz et al. (2000), o uso de combustíveis não-convencionais em motores de combustão interna é uma forma de diversificar as fontes de energia utilizadas para geração de energia elétrica, enquanto ao mesmo tempo, potencialmente, reduz as emissões e o uso do carbono fóssil. Com isso, a utilização da gaseificação de biomassa em conjunto com grupo gerador, utilizando motores de combustão interna, se torna viável, especialmente em áreas isoladas onde a conexão com a rede elétrica não é possível ou de alto custo.

A geração de energia elétrica a partir de uma fonte qualquer, inclui um gerador e no presente caso, o gaseificador produz um gás pobre que alimenta um motor acoplado a esse gerador. Com isso, o emprego de pequenas centrais de geração de potência, integradas a um gaseificador com um motor de combustão interna, do ciclo Otto e adaptado para operar com gás de baixo poder calorífico, constitui uma alternativa interessante e economicamente viável, que possibilita a produção independente de energia elétrica e térmica (Marcelo, 2000 apud Muraro, 2006).

Segundo Martins (2006), é possível a utilização de gás pobre em motores a gasolina com simples modificações. Para isso, a razão de mistura gás/ar geralmente utilizada é de 1:1, podendo ser introduzida diretamente no carburador. Entretanto, os motores a diesel não conseguem operar somente com o gás de biomassa, podendo apenas substituir o diesel em até 90%, devendo-se realizar a partida com diesel e introduzir o gás de gaseificação gradativamente ou, ainda, fazer sua modificação para ciclo Otto (Ottolização).

No presente trabalho, para geração de energia elétrica, utilizou-se um motor do ciclo Otto, à gasolina, adaptado para funcionar com gás pobre. A esse motor acoplou-se um gerador elétrico. Todo o sistema constitui o que se chama: sistema gaseificador/motor ciclo Otto/gerador.

2.7. Alguns Conceitos e Correlações Físico-Matemáticas Pertinentes

Na avaliação dos dados experimentais advindos dos testes, se faz necessário a utilização de algumas correlações físico-matemáticas, descritas nos próximos itens.

2.7.1. Poder Calorífico Inferior do Gás Pobre Produzido

O poder calorífico de um combustível pode ser definido como a quantidade de energia, na forma de calor, liberada durante sua combustão completa, por unidade de massa ou

volume. Caso esta quantidade de energia inclua o calor liberado pela condensação da água formada durante a combustão, o poder calorífico é SUPERIOR (PCS). Logo, o poder calorífico INFERIOR (PCI) é a energia efetivamente disponível, após serem deduzidas as perdas com a evaporação da água (Rumão, 2013).

Com o intuito de determinar o poder calorífico inferior do gás produzido na gaseificação, $PCI_{Gás}$ (J/Nm³), Rumão (2013) deduziu a Eq. (1), que correlaciona o poder calorífico inferior com o monóxido de carbono proveniente da gaseificação da madeira.

$$PCI_{Gás} = -0,004738 \cdot (\%CO)^2 + 0,3149 \cdot (\%CO) - 0,1057 \quad (1)$$

Onde:

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

2.7.2. Poder Calorífico Inferior da Biomassa (Madeira)

O poder calorífico inferior da madeira, PCI_{Mad} (kcal/kg), foi calculado a partir da Eq. (2) (Garcia, 2002).

$$PCI_{Mad} = 4756 - 53,418 \cdot (\%UM) \quad (2)$$

Onde:

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

2.7.3. Poder Calorífico Inferior do Gás, Determinado a Partir de Sua Composição

O poder calorífico inferior do gás combustível produzido no gaseificador, pode ser calculado também, a partir da sua composição, $PCI_{Gás/comp.}$ (kcal/Nm³), através da fórmula empírica de Dulong, Eq. (3), levando em consideração o percentual de cada composto presente no gás (ITEGAN, 2011).

$$PCI_{\frac{Gás}{comp.}} = 3050 \cdot (\%CO) + 2580 \cdot (\%H_2) + 8500 \cdot (\%CH_4) + 13500 \cdot (\%C_2H_2) + 14050 \cdot (\%C_2H_4) \quad (3)$$

Onde:

%H₂ é o teor, em percentual, de hidrogênio no gás;

%CH₄ é o teor, em percentual, de metano no gás;

%C₂H₂ é o teor, em percentual, de etino no gás;

%C₂H₄ é o teor, em percentual, de eteno no gás.

2.7.4. Consumo de Biomassa

O consumo de biomassa, C_{Bio} (kg/h), do gaseificador, é dado por:

$$C_{Bio} = \frac{M_{Bio}}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde:

M_{Bio} é a quantidade de biomassa adicionada ao gaseificador em um determinado intervalo de tempo (kg);

Δt é o intervalo de tempo em que a biomassa foi adicionada ao gaseificador (h).

2.7.5. Eficiência do Gaseificador

Segundo FAO (1993), quando o gás pobre é utilizado em motores, a eficiência do gaseificador pode ser definida pela Eq. (5).

$$\eta_G = \frac{PCI_{Gás} \cdot Q_{Gás}}{PCI_{Bio} \cdot M_S} \cdot 100(\%) \quad (5)$$

Onde:

Q_{Gás} é o fluxo volumétrico de gás (m³/s);

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

M_S é a vazão mássica de biomassa utilizada no gaseificador (kg/s).

2.7.6. Eficiência do Grupo Gerador (Motor/Gerador)

A eficiência do grupo gerador, η_{GG} (%), é definida como sendo a razão entre a potência elétrica útil e a potência disponível, expressa na Eq. (6).

$$\eta_{GG} = \frac{P_e}{Q_{Gás} \cdot PCI_{Gás}} \cdot 100(\%) \quad (6)$$

Onde:

P_e é a potência elétrica útil (W).

2.7.7. Eficiência do Sistema Gaseificador/Motor Otto/Gerador

A eficiência geral do sistema gaseificador/motor Otto/gerador, η_s (%), é definida pela Eq. (7).

$$\eta_s = \eta_G \cdot \eta_{GG} \cdot 100(\%) \quad (7)$$

CAPÍTULO III

3. EXPERIMENTAÇÃO

3.1. Introdução

No presente capítulo são apresentados os equipamentos e a instrumentação utilizados nos testes com o sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador. Descreve-se ainda a realização dos testes e as melhorias implantadas para assegurar melhor desempenho na operação.

3.2. Equipamentos

Dentre os equipamentos utilizados nos testes do presente trabalho pode-se destacar o sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador. Nesse sistema o gaseificador produz o gás pobre que alimenta o motor do ciclo Otto acoplado ao gerador, obtendo-se assim, energia elétrica.

3.2.1. O Gaseificador Utilizado Neste Trabalho

O gaseificador utilizado neste trabalho (Figura 1) é do tipo leito fixo, co-corrente, “topo aberto”, importado da Índia, do Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL. Possui capacidade térmica de 4 kW e inicialmente, capacidade elétrica de 1 kW.



Figura 1. Gaseificador utilizado neste trabalho.

No reator, o gás pobre é produzido a partir do processo de gaseificação. A princípio, um lavador, com efeito “Venturi”, estabelece uma queda de pressão a jusante do reator, ocorrendo assim a entrada de ar atmosférico pelos furos laterais e pelo topo do mesmo. O oxigênio contido no ar reage com o carbono na zona de combustão, o O_2 que não reagiu, passa para a zona de redução e para zona de pirólise, reagindo com carbono e outros gases, respectivamente. Na zona de redução, CO_2 e H_2O reagem para formar os gases combustíveis CO , CH_4 e H_2 que seguem na corrente gasosa do gaseificador. A alimentação do gaseificador com biomassa acontece pelo topo do reator, descendo por ação da gravidade a medida que a madeira é consumida. O reator possui 800 mm de comprimento e 160 mm de diâmetro interno. Outros componentes complementam o reator (ver Figura 2), formando o sistema do gaseificador, estes tem a função de limpar e resfriar a mistura gasosa antes dessa ser alimentada no motor.

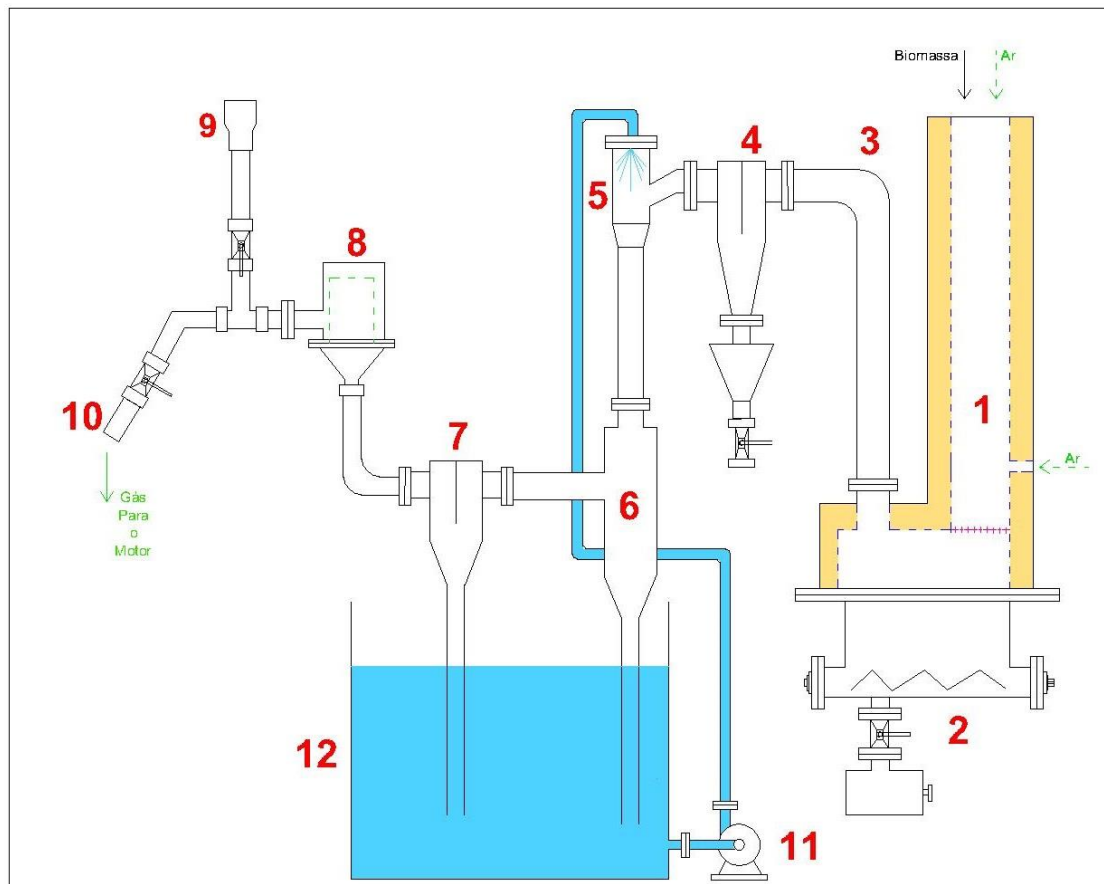


Figura 2. Esquema do gaseificador e seus componentes (Figueiredo, 2017).

Sendo eles:

- (1) – Reator;
- (2) – Cinzeiro;
- (3) – Tubo de saída do gás;
- (4) – Purgador de alcatrão;
- (5) – Lavador com efeito “Venturi”;
- (6) – Difusor;
- (7) – Placa de condensação de umidade do gás;
- (8) – Filtro “manga”;
- (9) – Chama piloto;
- (10) – Tubo de saída do gás para o motor;
- (11) – Bomba centrífuga;
- (12) – Reservatório de água.

Como dito anteriormente, alguns dos componentes do gaseificador têm por função a

lavagem do gás produzido, que possibilita a remoção de resíduos provenientes da gaseificação, com o objetivo de limpar esse gás, antes da alimentação do motor. O sistema de lavagem é constituído por um bico injetor com água a temperatura ambiente (lavador com efeito “Venturi”). O bico de esguicho direciona água ao lavador (item 5 da Figura 2). O efeito “Venturi”, através de um estreitamento na secção transversal do tubo, aumenta a velocidade da mistura do gás com a água. No difusor (item 6 da Figura 2), o aumento na secção transversal do tubo faz com que ocorra a separação de alguma partícula de água ainda existente no gás. A parte final deste tubo fica inserido na água estabelecendo um selo d’água, impedindo que o gás desça com o líquido.

3.2.1.1. Implantação de um Sistema de Desobstrução da Grelha

Nos testes preliminares, após certo período de tempo em operação (aproximadamente 2 horas), podia-se verificar interrupção no funcionamento do motor e posteriormente sua parada. Ao final desses testes, com a retirada do cinzeiro, observava-se uma camada significativa de cinzas acima da grelha (Figura 3), que certamente interferia no funcionamento do gaseificador, pois era responsável pela diminuição da oxigenação no reator. Segundo Kaupp e Goss (1981) um ponto importante a ser observado no funcionamento da grelha está relacionado com a camada de cinzas que pode servir de proteção à grelha, ou no caso dessa camada ser muito espessa, produzir aumento na queda de pressão e a consequente redução na produção de gás.



Figura 3. Acúmulo de cinzas acima da grelha (Autor).

Com o objetivo de solucionar este problema, foi implantado, na área entre a grelha e o cinzeiro, um sistema de desobstrução, como pode ser visto na Figura 4. Ao se acionar a alavanca no topo do reator, hastes perforatrizes penetram a camada de cinzas situada acima da grelha, removendo-a para o cinzeiro, voltando a permitir a oxigenação da zona de carbonização do sistema. Em consequência, não há solução de continuidade na produção do gás pobre.

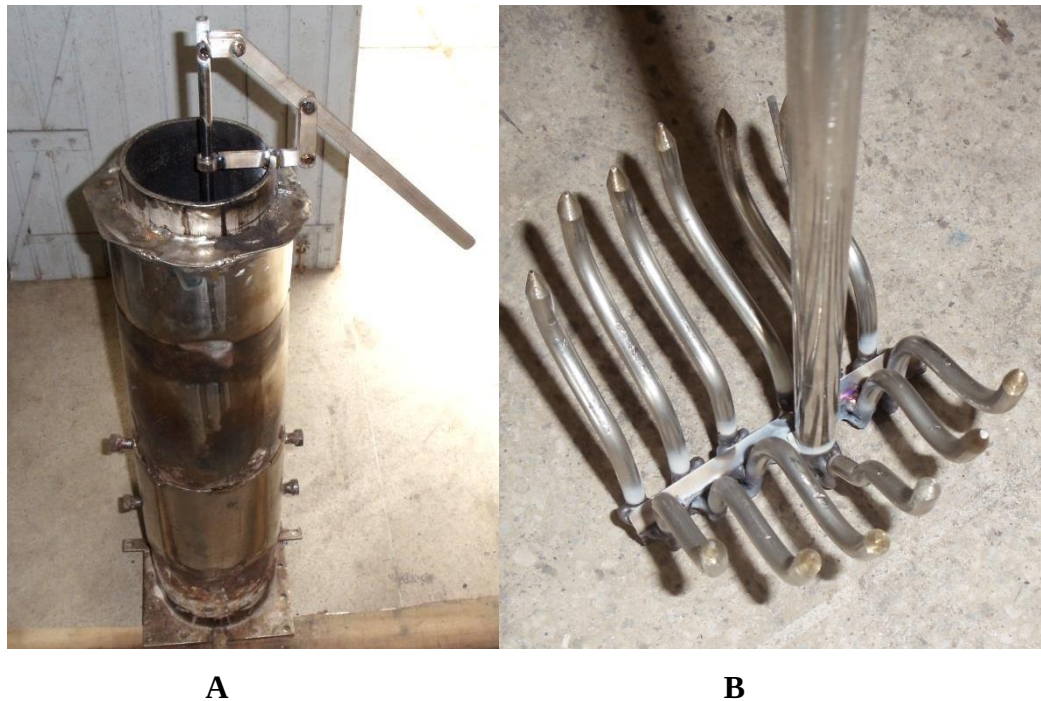


Figura 4. Sistema de desobstrução da grelha. (A) Alavanca de acionamento no topo do reator; (B) Hastes de penetração na camada de cinzas (Autor).

3.2.2. Motor do Ciclo Otto

Para geração de energia elétrica, o gás pobre produzido no gaseificador alimenta um motor (acoplado a um gerador) do ciclo Otto, à gasolina, que foi adaptado para funcionar com gás. O motor disponibilizado pelo Laboratório de Inovação (Figura 5) é do tipo VANGUARD V-Twin, 2 cilindros em V e potência nominal de 18 Hp.



Figura 5. Motor utilizado no presente trabalho.

3.2.3. Gerador Elétrico

O gerador elétrico foi acoplado ao motor por um alinhamento de eixos. O gerador é da marca Toyama (modelo TG2500MX), monofásico, 220 V e frequência de 60 Hz (ver Figura 6).



Figura 6. Motor acoplado ao gerador.

3.2.4. Aparato Experimental Complementar

Além do sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador, outros instrumentos e equipamentos serviram de suporte à realização dos testes deste trabalho.

3.2.4.1. Serra de Bancada Elétrica

A serra de bancada (Figura 7) foi utilizada no corte e formatação dos retalhos da biomassa de alimentação do gaseificador.



Figura 7. Serra de bancada elétrica (Rumão, 2013).

3.2.4.2. Banco de Lâmpadas

Durante os testes, utilizou-se um sistema resistivo formado por seis lâmpadas de 250 - 280 W e duas de 150 - 180 W (ver Figura 8). O banco de lâmpadas foi construído no próprio LI, para servir como simulador de carga do grupo gerador.



Figura 8. Banco de Lâmpadas.

3.2.4.3. Analisador de Energia

Para verificação da potência instantânea utilizou-se um analisador de qualidade de energia portátil HIOKI 3197, mostrado na Figura 9. Esse é um equipamento de teste eletrônico usado na análise das características de desempenho de redes elétricas ativas.



Figura 9. Analisador de qualidade de energia portátil (GETROTECH, 2016).

3.2.4.4. Analisador de Gases Veiculares

A análise dos gases fez-se com o uso do analisador de gases veiculares Discovery G4 da Alfatest, constituído de quatro componentes: central de análise eletrônica, sonda, compressor de ar e regulador de pressão (ver Figura 10).

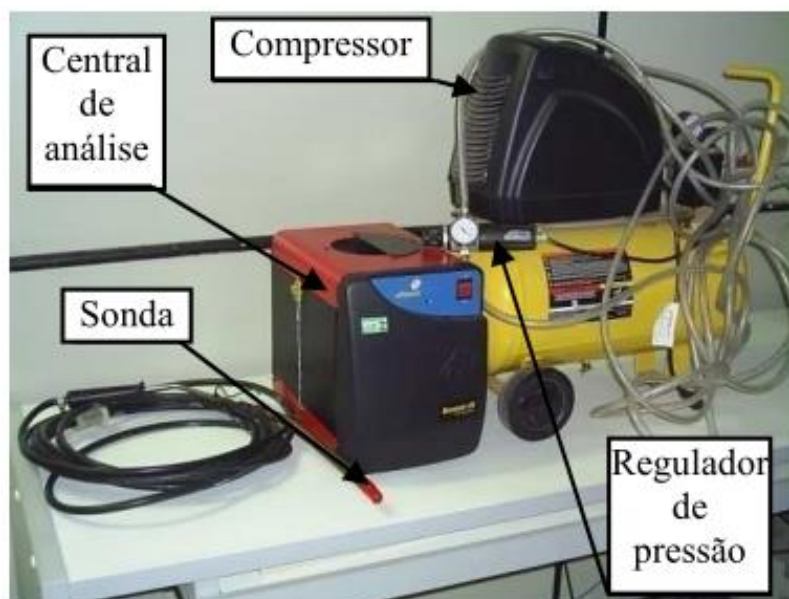


Figura 10. Analisador de gases veiculares (Rumão, 2013).

3.2.4.5. Balança Digital

Com a finalidade de verificar o peso da biomassa de alimentação do gaseificador, utilizou-se uma balança digital TOMATE, especificação SF – 400, com capacidade de 10 kg (Figura 11).



Figura 11. Balança digital (Autor).

3.2.4.6. Termobalança

Para verificação do teor de umidade da biomassa de alimentação do gaseificador, utilizou-se a termobalança analítica (Figura 12) RADWAG, tipo MAC 210, resolução de

0,001% de umidade e 1 mg de massa, disponibilizada pelo Laboratório de Tecnologia Química (LTQ), da UFPB.

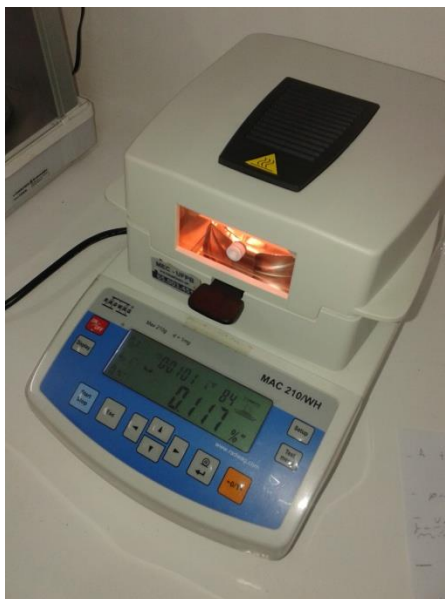


Figura 12. Termobalança (Figueiredo, 2017).

3.2.4.7. Termopar Tipo K

Para medição de temperatura nas zonas do reator, utilizou-se um termopar tipo K, cerâmico, de 80 cm de comprimento (Figura 13). A leitura da medida de temperatura foi feita no termo-anemômetro mostrado no item posterior.



Figura 13. Termopar cerâmico tipo K (Autor).

3.2.4.8. Termo-anemômetro

Na medição das temperaturas da água do sistema de limpeza do gás e do gás pobre,

utilizou-se o termo-anemômetro digital YK2005AH, com sensor de temperatura tipo K, como mostra a Figura 14.



Figura 14. Termo-anemômetro digital (Figueiredo, 2017).

3.3. Testes no Sistema Gaseificador/Motor do ciclo Otto/Gerador

O gaseificador utilizado no Laboratório de Inovação, possui reator de 160 mm de diâmetro interno, com isso, escolheu-se quatro dimensões aproximadas, dentro dos recomendados por Dasappa et al. (2003d), para realização dos testes. A biomassa foi cortada em cubos, com a utilização da serra de bancada (Figura 7), com aresta de aproximadamente 13 mm, 16 mm, 20 mm e 27 mm, constituindo as amostras 1, 2, 3 e 4, respectivamente, como mostra a Figura 15. Em cada amostra, se atingiu uma potência máxima, sendo 2,15 kWe para a amostra 1, 2,17 kWe para a amostra 2 e 2,16 kWe para as amostras 3 e 4. A biomassa utilizada foi obtida através de rejeitos de madeira (mesas, cadeiras, etc.) oriundos da UFPB (amostras 1, 3 e 4) e pallets (amostra 2).



Figura 15. Dimensões de biomassa utilizadas na alimentação do gaseificador.

Com todo o aparato (gaseificador, motor Otto, banco de lâmpadas, instrumentação e equipamentos de aquisição de dados) instalado, iniciou-se os procedimentos para realização dos testes. O gaseificador foi então alimentado com biomassa e posteriormente foi verificado os níveis de água de lavagem do gás nos reservatórios, acionou-se a bomba e posteriormente com a ajuda de um maçarico a gás (GLP), pelos orifícios laterais do reator (Figura 16), a biomassa foi inflamada.



Figura 16. Indicação de um dos orifícios laterais do reator (Autor).

Assim que tem início a produção de gás, o canal que alimenta o motor encontra-se fechado e o gás encaminha-se para a “chama piloto”, onde é inflamado para verificação da chama (Figura 17).



Figura 17. Chama piloto acionada.

Após cerca de 15 minutos em funcionamento, além de se verificar a intensidade e coloração da chama, verificou-se também, através do analisador de gases, o teor de CO do gás. Estando este acima de, aproximadamente, 10%, o gás já tem poder calorífico suficiente para dar partida no motor. Então, o canal que encaminha o gás para o motor foi aberto e a chama piloto fechada. Antes do carburador, a proporção de alimentação da mistura ar/gás é feita manualmente através de um controlador de fluxo (Figura 18).



Figura 18. Controlador de fluxo manual da mistura ar/gás.

Com o motor em funcionamento, acendeu-se a primeira lâmpada, após aproximadamente 5 minutos (tempo necessário para estabilização dos parâmetros), colheu-se todos os dados pertinentes, como: potência, corrente elétrica, voltagem e frequência (dados coletados no analisador de energia, com a carga aplicada), temperatura da água de lavagem, temperatura do gás na entrada do motor, temperatura do gás na saída do reator, composição do gás na entrada do motor, composição dos gases de escape e o consumo. Para fazer a avaliação do consumo, iniciou-se com o reator completamente cheio de biomassa. A medida que a biomassa foi sendo consumida, encheu-se um balde com biomassa e esse foi pesado com uso da balança digital. Então, cronometrou-se-se um tempo decorrido. Após esse tempo, completou-se novamente o reator e o balde foi pesado posteriormente. Com a diferença de massa e o tempo decorrido, calculou-se o consumo, em kg/h, utilizando-se a Eq. (4). Depois de todos os dados colhidos, acendeu-se a segunda lâmpada, sempre controlando a mistura ar/gás para que essa pudesse ficar próxima da estequiométrica. Todo o procedimento de coleta de dados descrito foi repetido para o acendimento de todas as lâmpadas do banco de lâmpadas. Na máxima potência alcançada (última lâmpada) fez-se a medição de temperatura nas zonas do reator. Introduzindo-se o termopar (Figura 13) no tubo de acionamento do sistema de desobstrução da grelha (mostrado na Figura 4(A)). A medição foi feita em quatro pontos, como visto na Figura 19, uma única vez, na potência máxima. Tomando o topo do reator como referência, os pontos 1, 2, 3 e 4 se encontram à, respectivamente, 335, 485, 630, 790 mm do topo.

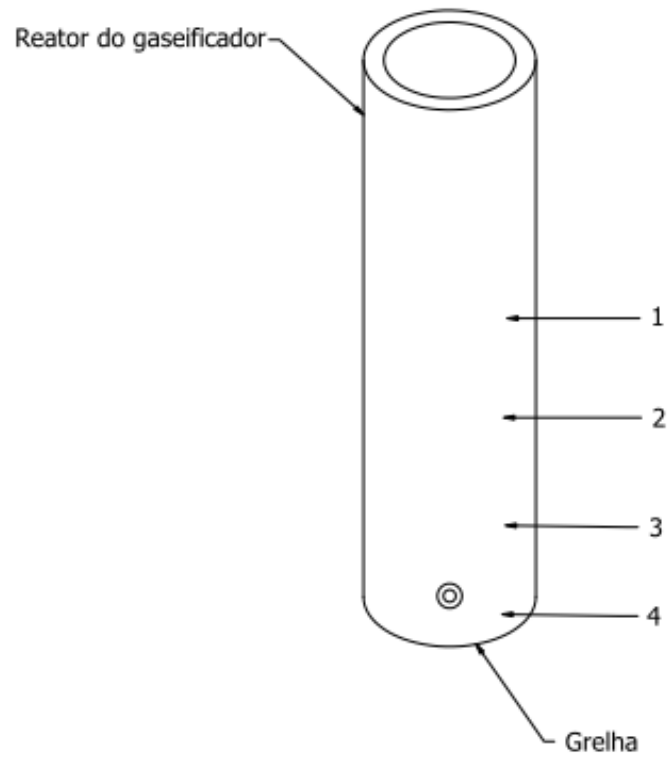


Figura 19. Visualização dos pontos de medição de temperatura.

O relato descrito acima constitui os procedimentos de funcionamento do gaseificador para um único tamanho de retalho de madeira, ocorrendo então, quatro testes como este, abrangendo os tamanhos escolhidos.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e suas análises, advindos dos testes realizados com o sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador, utilizando como biomassa, rejeitos de madeira.

4.2. Teor de Umidade e a Massa Específica da Biomassa

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos na determinação do teor de umidade da biomassa. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com relação a massa específica.

Amostras	Teor de Umidade 1 (%)	Teor de Umidade 2 (%)	Teor de Umidade 3 (%)	Média (%)
1	10,992	10,442	9,042	10,159
2	8,280	10,149	9,304	9,244
3	9,868	9,793	10,670	10,110
4	8,274	9,752	9,544	9,190

Tabela 2. Dados referentes ao teor de umidade da biomassa utilizada.

Amostras	Massa Específica 1 (kg/m ³)	Massa Específica 2 (kg/m ³)	Massa Específica 3 (kg/m ³)	Média (%)
1	1083,754	1073,243	1063,308	1073,435
2	704,696	743,469	796,531	748,238
3	814,968	863,694	908,6684	862,444
4	762,917	664,674	802,483	743,358

Tabela 3. Dados referentes à massa específica da biomassa utilizada.

Como pode ser visto na Tabela 1, os valores referentes ao teor de umidade da

biomassa utilizada são todos similares, tendo magnitudes menores que 10,2 %. Na Tabela 2 nota-se que a amostra 1 apresenta massa específica 19,7 % maior que a da amostra 3, a que possui a segunda maior massa específica entre todas as amostras. As amostra 2 e 4 apresentaram massas específicas similares.

4.3. Medidas de Temperaturas

Foi possível tomar medidas de temperatura em alguns pontos do sistema, mostrados na Tabela 4. Sendo $T_{Gás_1}$ a temperatura do gás na saída do reator, $T_{Água}$ a temperatura da água de lavagem do gás e $T_{Gás_2}$ a temperatura do gás na entrada do motor (após a lavagem).

Amostras	Potência (kW)	$T_{Gás_1}$ (°C)	$T_{Água}$ (°C)	$T_{Gás_2}$ (°C)
1	0,87	187,2	29,3	29,7
	1,36	190,9	28,8	30,7
	1,97	190,7	30,9	32,8
	2,15	195,8	33,4	36,2
2	0,86	172,0	29,8	29,4
	1,37	215,4	32,0	34,7
	1,87	211,7	36,4	36,9
	2,17	217,0	37,6	37,7
3	0,69	165,8	32,7	33,2
	1,28	167,2	33,1	34,0
	1,87	168,8	34,0	36,2
	2,16	172,9	36,2	37,5
4	0,66	201,8	28,5	30,3
	1,25	221,5	31,6	33,0
	1,85	231,7	32,3	34,8
	2,16	281,4	34,0	37,7

Tabela 4. Medidas de temperaturas verificadas durante os testes.

A água do sistema de lavagem se situou entre 28,5 e 37,6 °C. Pode-se verificar, que, independente do tamanho e tipo da biomassa, a elevação da potência faz aumentar a temperatura do gás pobre na saída do reator. Na máxima potência, para a amostra 1, houve uma redução na temperatura do gás (entre a saída do reator e a entrada do motor, passando pela lavagem), em torno de 160 °C, e para a amostra 4, essa redução foi de,

aproximadamente, 244° C.

4.4. Determinação da Massa de Cinzas Produzidas

Na produção de gás pobre, no teste com a amostra 2, após consumir 20,760 kg de biomassa, o gaseificador gerou 2,495 kg de cinzas. Com a amostra 3, após consumir 35,789 kg de biomassa, gerou-se 3,291 kg de cinzas, ou seja, 12,018 e 9,196 %, respectivamente.

4.5. Composição do Gás Pobre

A Figura 20 mostra os níveis de CO, CO₂ e O₂, verificados na máxima potência, para as quatro dimensões analisadas.

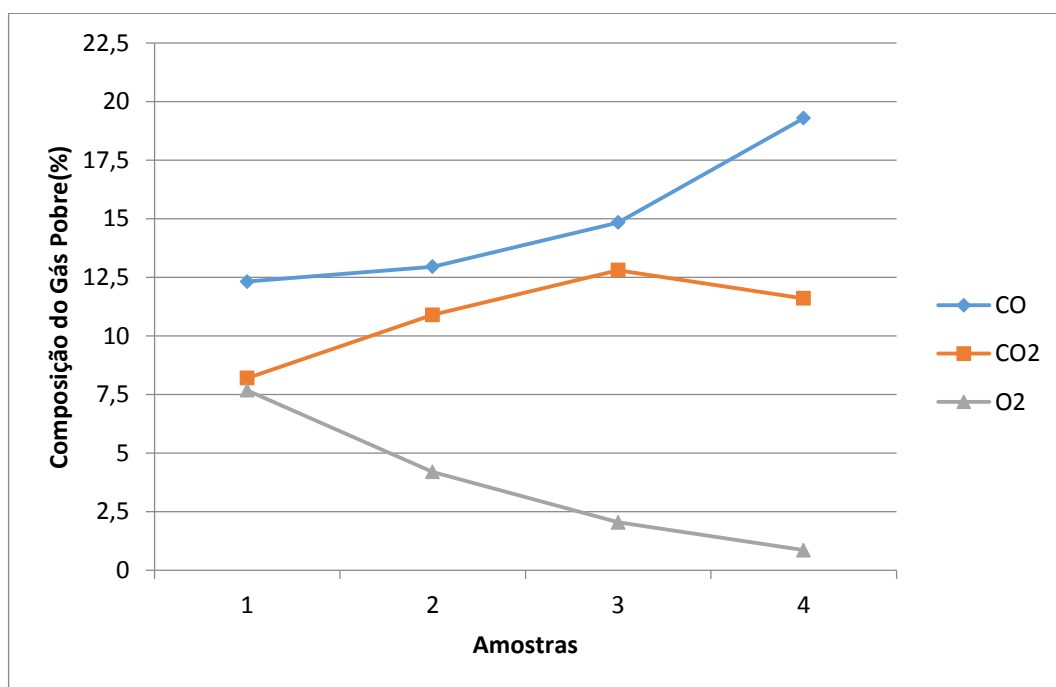


Figura 20. Níveis de CO, CO₂ e O₂ no gás pobre.

A variação do nível de CO aumentou de 12,32 para 19,29 %. Os níveis referentes ao CO₂ variaram de 8,2 a 12,8% e os de O₂ de 0,86 a 7,68%.

4.6. Composição dos Gases de Escape

Os níveis de CO, CO₂ e O₂ dos gases de escape, verificados na máxima potência, para as quatro amostras selecionadas, são notados na Figura 21.

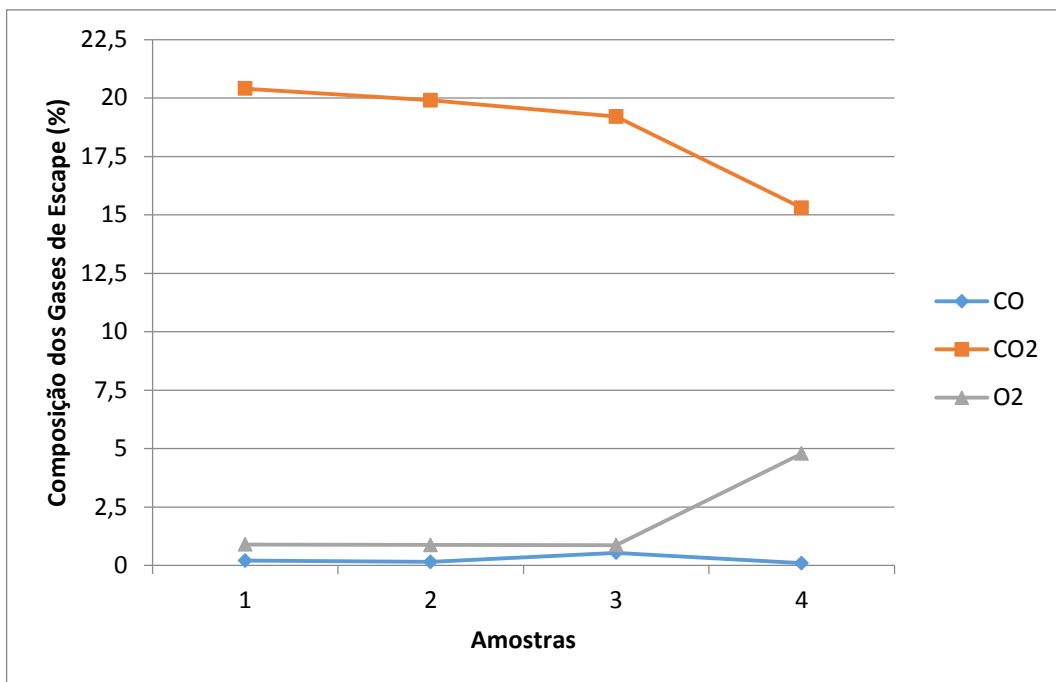


Figura 21. Níveis de CO, CO₂ e O₂ nos gases de escape.

O nível de CO permaneceu baixo em todos os tamanhos de retalho de biomassa utilizados, não ultrapassando 0,54 %. O nível de CO₂ diminuiu com o aumento do tamanho da biomassa, variando de 20,4 % a 15,3 %. O nível de O₂ só obteve aumento significativo na amostra 4.

4.7. Poder Calorífico Inferior (PCI)

4.7.1. Determinação do PCI da Biomassa

Os valores referentes ao poder calorífico da biomassa utilizadas nos testes podem ser vistos na Tabela 4. Os resultados obtidos foram determinados a partir da Eq. (2) e encontram-se dentro dos valores recomendados por Quirino et al. (2004).

Amostras	PCI _{Mad} (kJ/m ³)
1	17628,63
2	17832,99
3	17639,44
4	17845,13

Tabela 5. Dados referentes ao PCI da biomassa utilizada.

4.7.2. Determinação do PCI do Gás Pobre Produzido

Na Figura 22 são apresentados os valores referentes ao PCI do gás pobre produzido, determinados a partir da Eq. (1), em função da potência elétrica gerada, variando-se as dimensões de biomassa.

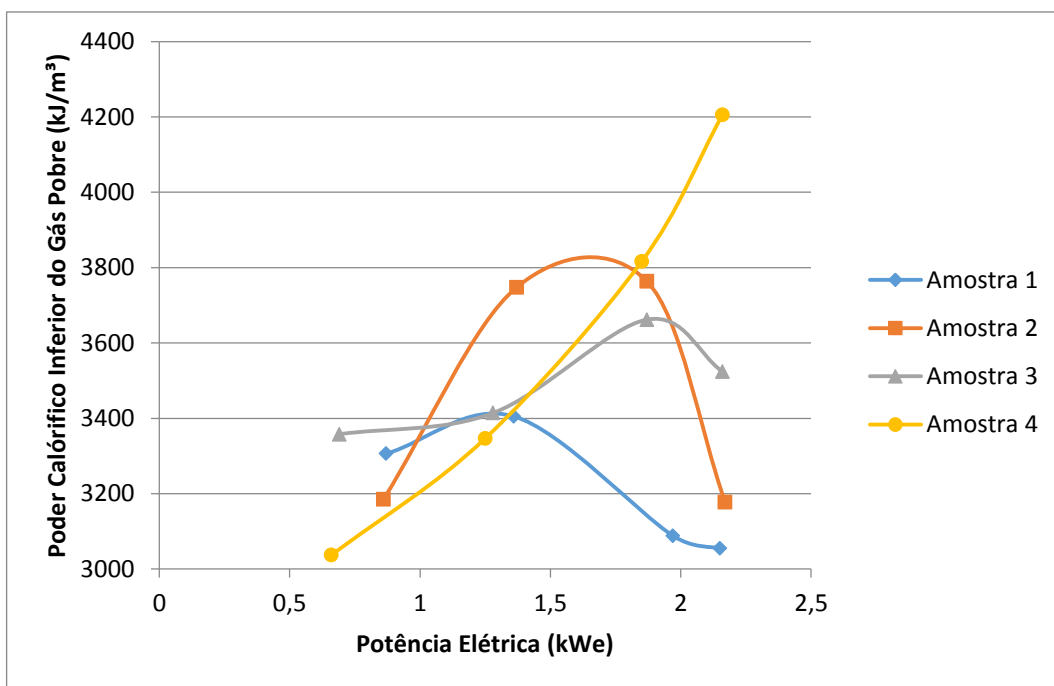


Figura 22. Poder calorífico inferior do gás pobre.

Como visto na Eq. (1), o poder calorífico inferior é diretamente proporcional ao nível de CO, como este cresceu com o aumento do tamanho da biomassa (na máxima potência), o mesmo acontece com o PCI do gás produzido. Variando de 3054,72 kJ/m³ para a biomassa da amostra 1 até 4205,69 kJ/m³ para a amostra 4, na máxima potência. Os maiores valores de PCI foram observados nas amostras 2 e 4, deve-se salientar que estas amostras apresentam menor valor de massa específica e teor de umidade, sendo a amostra 4 de maior volume.

4.8. Perfil de Temperaturas no Interior do Reator

A Figura 23 mostra os resultados obtidos da medição de temperatura em função do tamanho da biomassa utilizada.

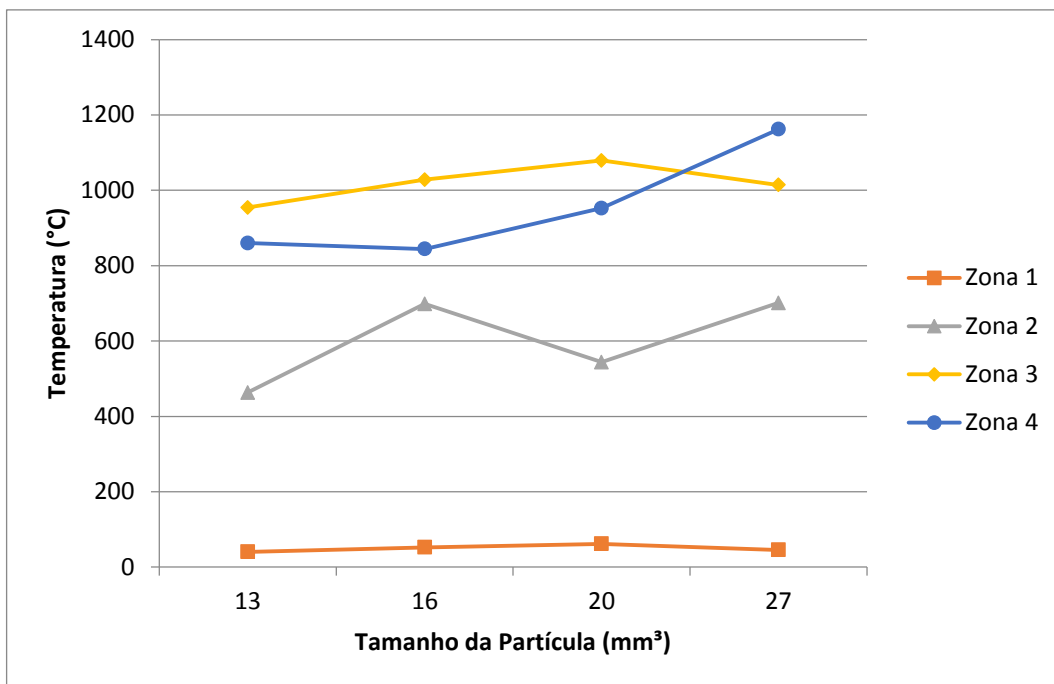


Figura 23. Perfil de temperatura no interior do reator.

A partir das temperaturas verificadas na Figura 23, tem-se que a zona 1 está mais próxima à zona de secagem, com variação de temperatura de 40,5 a 61,5 °C. A zona 2 encontra-se mais próxima a zona de pirólise, com variação de temperatura de 463,2 a 701 °C. A zona 3 refere-se a zona de combustão, até por ser o ponto mais próximo ao furo lateral do reator, por onde a biomassa é inflamada, com temperaturas variando de 954 a 1079 °C. E a zona 4, ponto mais próximo a grelha, referente a zona de redução, com variação de temperatura de 844 a 952,7 °C. Na amostra 4, a temperatura na zona 4 se mostrou maior do que na zona 3. Pode ter ocorrido o fato de que, ao medir este último ponto, a biomassa ainda estivesse na zona de combustão, e sua redução ocorrendo abaixo da grelha.

4.9. Consumo Específico da Biomassa

A Figura 24 apresenta os dados referentes ao consumo específico da biomassa em função da potência elétrica gerada, para os diferentes tamanhos de biomassa utilizados.

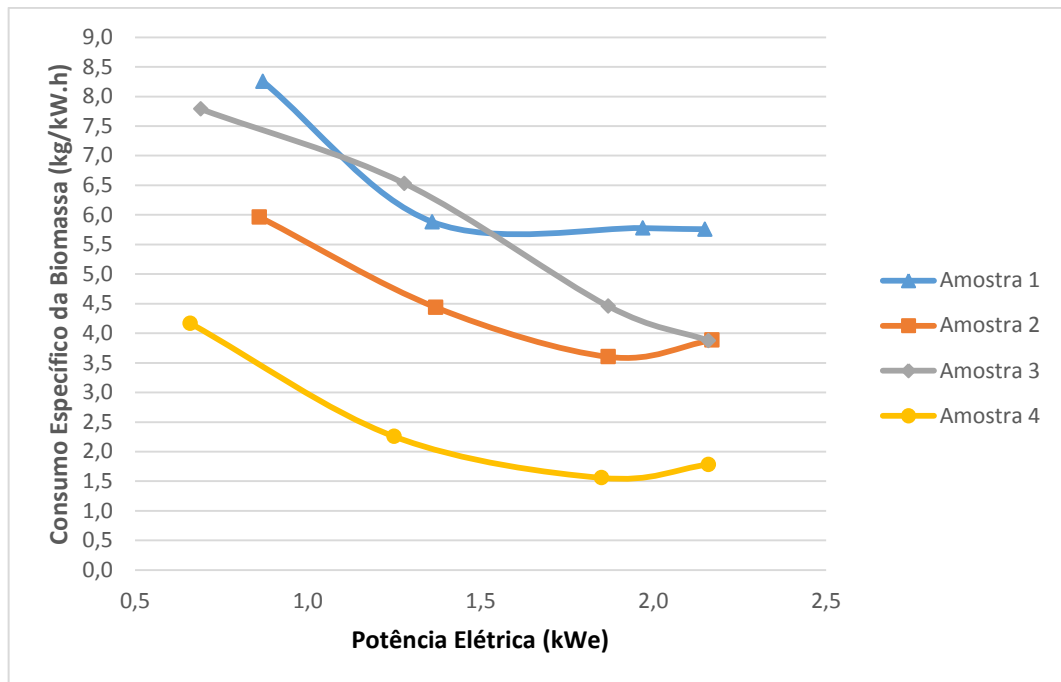


Figura 24. Consumo específico da biomassa.

Em todos os casos, o consumo específico da biomassa decresce com o aumento da potência gerada. O menor consumo foi visto na amostra 4, seguido da amostra 2, com isso, percebe-se que o menor consumo parece ser mais dependente da massa específica do que do volume da amostra. Na potência máxima, o consumo específico variou de 1,78 kg/kW.h na biomassa de maior tamanho até 5,76 kg/kW.h na biomassa de menor tamanho.

4.10. Eficiência do Sistema Gaseificador/Motor Otto/Gerador

A relação eficiência do sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador com a potência gerada é relatada na Figura 25.

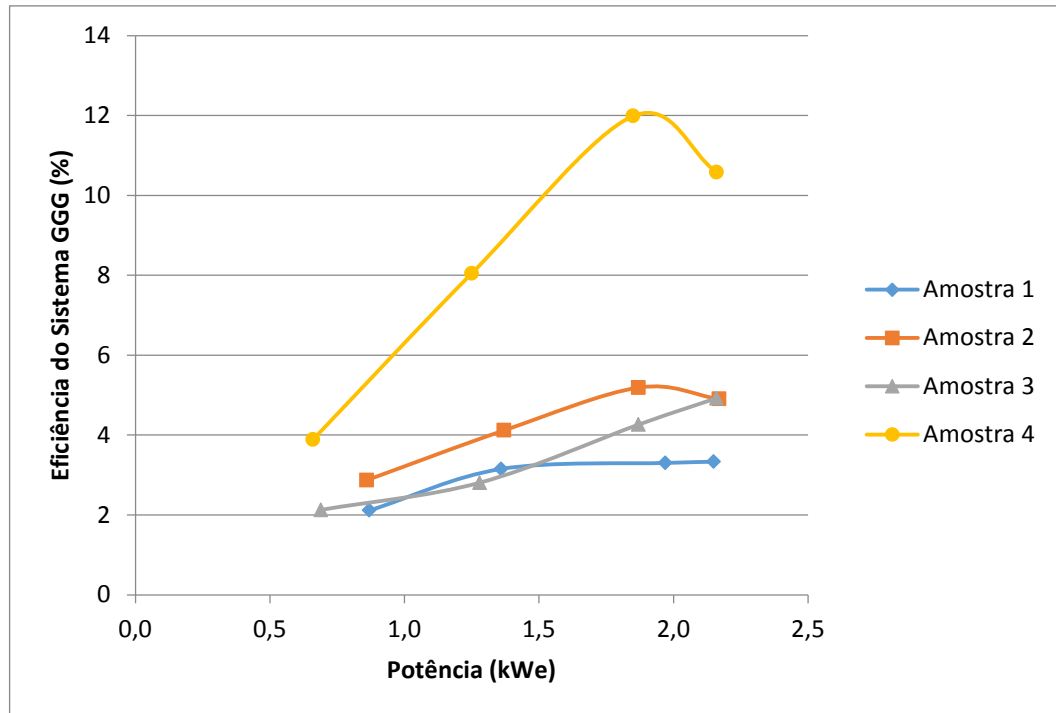


Figura 25. Eficiência do sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador

A eficiência do sistema gaseificador/motor Otto/gerador é calculada pela Eq. (7). Pode-se observar pela Figura 25 que, independente da amostra, a eficiência aumenta com o aumento da potência elétrica gerada. A maior eficiência obtida (11,99%) foi verificada na amostra 4, com potência de 1,85 kWe.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos testes, apresentados no item anterior, pode-se concluir que:

- Com relação à umidade, os teores das amostras de biomassa mantiveram-se abaixo do recomendado pela literatura (15%), enquanto suas massas específicas estiveram sempre acima da mínima recomendada, o que garantiu gaseificação adequada dos rejeitos de madeira;
- A água utilizada no sistema de lavagem reduz, significativamente, a temperatura do gás, antes da entrada no motor, porém, esta redução não é suficiente. Segundo Mukunda et al. (1994), o gás pobre deve ser arrefecido até a temperatura ambiente para aplicação em motores;
- Sobre o percentual verificado de cinzas, nos casos registrados no presente trabalho, o excedente ao recomendado pela literatura pode ser justificado pela implantação do sistema de desobstrução da grelha, que além de incitar a fluidez das cinzas, faz com que parte do material (biomassa) da zona de redução atravesse a grelha. Além disso, a diferença nos valores relatados de 9,196 e 12,018 % nas amostras analisadas são justificados tanto pela variação no tamanho do retalho quanto pela origem da biomassa;
- No que diz respeito a composição do gás pobre produzido, têm-se que, na máxima potência, o nível de CO cresceu com o aumento do tamanho da biomassa. Segundo Yin et al. (2012), o aumento do nível de CO está relacionado com a temperatura na zona de combustão, que também aumentou com o aumento do tamanho de biomassa, como pode ser visto na Figura 20. De fato, quanto maior o volume da amostra, mais lenta é a taxa de alimentação (ver Figura 24) e, conseqüentemente, aumenta-se o tempo de residência dos gases, permitindo uma gaseificação mais eficiente, indicada também pela baixa concentração de O₂. Os níveis de CO₂ também cresceram com o aumento do tamanho da biomassa, com uma pequena redução da amostra 3 para amostra 4. De acordo com Billaud et al. (2016), a formação de CO₂ acontece a partir das reações de combustão e está diretamente ligada a quantidade de O₂. Na Figura 20, percebe-se que o aumento do nível de CO₂ é proporcional a diminuição do nível de O₂.

- Analisando a composição dos gases de escape, verifica-se que os níveis de CO permaneceram baixos, independente do tamanho da biomassa, mostrando boa combustão do gás pobre no motor. Os níveis de O₂ indicam condição de mistura pobre (Manavella, 2017), quanto mais pobre a mistura, maior o nível de O₂, onde, até 2% o motor funciona sem anomalias. A partir da Figura 21, verifica-se aumento do nível de O₂ apenas na amostra 4, onde o lambda teve valor mais elevado (1,21). Para bom funcionamento do motor, a literatura indica nível de CO₂ acima de 12%, o que ocorreu durante todos os testes do presente trabalho.
- Os valores medidos nos gases de escape do motor do ciclo Otto, relacionados aos limites exigidos pelo CONAMA 418/2009, se mostraram inferiores, podendo-se admitir assim, que o conjunto de geração de energia elétrica, gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador, além de reduzir a quantidade de rejeitos de madeira do meio ambiente, não causa poluição significativa através dos gases de escape.
- O PCI do gás pobre é função do nível de CO, este, por sua vez, cresce com o aumento da temperatura na zona de combustão, como já foi dito. Na potência máxima, o PCI do gás cresceu com o aumento do tamanho da biomassa.
- Com relação aos valores de temperatura medidos no interior do reator, as zonas 1 e 2 (secagem e pirólise) não mostraram variação significativa com os diferentes tamanhos de biomassa. Já as zonas de combustão e redução, aumentaram a temperatura à medida que se aumentou o tamanho da biomassa utilizada. A amostra 4 apresentou maior temperatura na zona de combustão. Analisando os valores médios de teor de umidade, massa específica e PCI da biomassa, e comparando-os com as outras amostras, é compreensível que estas não poderiam ser responsáveis por transmitir uma temperatura comparável.
- O consumo específico cresceu com a diminuição do tamanho da biomassa, isso se dá pelo fato de que, a área exposta do retalho de madeira aumenta com a sua fragmentação, fazendo com que a queima ocorra de forma mais rápida na biomassa de menor tamanho do que na biomassa de maior tamanho.
- Com relação ao lambda (relação da mistura ar/combustível admitida pelo motor), esse permaneceu entre 1,02 e 1,03 para as amostras 1, 2 e 3. Na amostra 4, verificou-se o nível mais elevado (mistura mais pobre), atingindo

1,21.

- A amostra 4 apresentou a maior eficiência do sistema gaseificador/motor Otto/gerador, operando à máxima potência, atingindo 10,58 %.

Os resultados obtidos mostram-nos que o uso da energia da biomassa, a partir da gaseificação, para geração de energia elétrica é uma alternativa eficaz, ecologicamente correta e de baixo custo, principalmente quando a biomassa utilizada advém de rejeitos. A utilização do gás pobre no sistema gaseificador/motor do ciclo Otto/gerador ocorreu de forma satisfatória, gerando mais que o dobro da capacidade elétrica inicial do gaseificador.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de se ampliar a melhoria no sistema gaseificador/motor Otto/ gerador, são mencionadas algumas sugestões para continuação dessa pesquisa:

- Utilização de diferentes biomassas. Verificou-se que quanto maior a massa específica, maior será o consumo da biomassa utilizada. Pode-se então, utilizar uma biomassa de menor massa específica, dentro dos limites recomendados por Bezerra (2016).
- Constata-se no presente trabalho, a necessidade de se melhorar o sistema de limpeza do gás, impedindo que as frações de alcatrão possam atrapalhar o funcionamento das partes móveis do motor. Em vista disso, pode-se aumentar o contato gás/água, com o aumento do lavador de efeito “Venturi” e do difusor (mostrados na Figura 2). Ou até a implantação de um filtro de carvão ativado, que ajudaria na contenção do alcatrão presente no gás pobre.
- Em vista da diminuição da temperatura do gás pobre na entrada do motor, pode-se aumentar o volume da água de lavagem do gás, visando maior troca térmica.

REFERÊNCIAS

ANNEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008, “Atlas: Parte II – Fontes Renováveis”, Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf

ANNEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017, “Banco de Informações de Geração”, Disponível em: www.aneel.gov.br

Basu, P., 2010, “Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design”, Kidlington, Oxford, ELSEVIER, 375p.

Bezerra, A. F., 2016, “Aprimoramento da Eficiência de um sistema de Geração de Energia Elétrica por Grupo Gerador Alimentado com Gás Pobre”, Universidade Federal da Paraíba, Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.

Billaud, J.; Valin, S.; Ratel, G.; Peyrot, M.; Weiland, F.; Hedman, H.; Salvador, S., 2016, “Biomass Gasification in Entrained Flow Reactor: Influence of Wood Particle Size”, CET – Chemical Engineering Transactions, v. 50, p. 37-42.

Bridgwater, A. V., 1991, “Review of Thermochemical Biomass Conversion”. Estub1202, Crown.

Cardoso, B. M., 2012, “Uso da Biomassa Como Alternativa Energética”, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica, Monografia, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro.

CEPA – Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 1999, “Energia - A Essência dos Fenômenos”, Programa Pró Ciências – FAPESP, Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/carvao.html>

Chaves, L. I., 2012, “Microgeração de Energia Elétrica com Gás de Síntese de Um Gaseificador Co-corrente Utilizando *Mazilaurus Itaúba*”, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Paraná.

Dasappa, S.; Mukunda, H. S.; Paul, P. J.; Rajan, N. K. S., 2003, “Biomass to Energy: The Science and Technology of the IISc Bio-energy Systems”, ABETS – Indian Institute of Science, 1ed. Índia.

Figueiredo, D. L. S., 2017, “Desempenho e Obtenção de Energia Elétrica em um Sistema Gaseificador de 1 kWe e Grupo Gerador”, Universidade Federal da Paraíba. Dissertação (Mestrado) não defendida, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.

Figueiredo, F. A. B., 2009, “Pirólise e Gaseificação de Casca de Castanha de Caju: Avaliação da Produção de Gás, Líquidos e Sólidos”, Universidade Estadual de Campinas, Tese (Doutorado), Comissão de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

Garcia, R., 2002, “Combustíveis e Combustão Industrial”, Rio de Janeiro: Interciência.

GETROTECH, 2016, Analisador de Qualidade de Energia Portátil HIOKI. Disponível em: <https://www.getrotech.com.br/3197-analisador-de-qualidade-de-energia-portatil-hioki.html>

Haryanto, A.; Fernando, S. D.; Pordesimo, L. O.; Adhikari, S., 2009, “Upgrading of Syngas Derived from Biomass Gasification: A Thermodynamic Analysis”, Biomass and Bioenergy, v. 33, p. 882–889.

Kaupp, A.; Goss, J. R., 1981, “State of the Art Report for Small Scale (to 50 kW) Gas Producer – Engine Systems”, University of California, Monografia, Departament of Agricultural Engineering, Davis.

Manavella, H. J., 2017, “Análise de Emissões de Escape”, HM Autotrônica. Disponível em: <http://www.hmautotron.eng.br/artigos/Gases&EmissoesPM.pdf>

Martins, L. S., 2006, “Geração de Energia através de Biomassa”, Universidade Federal do Espírito Santo, Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Elétrica Vitória.

MMA, Ministério do Meio Ambiente – Resoluções do CONAMA, DOU nº 226, de 26/11/2009, p. 81-84. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=618>

Mukunda, H.S.; Dasappa, S.; Paul, P. J.; Rajan, N. K. S.; Shrinivasa, U., 1994, “Gasifiers and

Combustors for Biomass – Technology and Field Studies”, *Energy for Sustainable Development*, v. 1, nº 3, p. 27-38.

Mukunda, H.S.; Dasappa, S.; Shrinivasa, U., 1993, “Open Top Wood Gasifiers”, *Renewable Energy, Sources for Fuels and Electricity*, Island Press , p. 699-728.

Muñoz, M.; Moreno, F.; Morea-roy, J.; Ruiz, J.; Arauzo, J., 2000, “Low Heating Value Gas on Spark Ignition Engines”, *Biomass and Bioenergy*, v. 18, p. 431 – 439.

Muraro, W., 2006, “Avaliação do Funcionamento de Motor Ice com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação da Casca de Arroz”, Universidade de São Paulo, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo.

Nogueira, L. A. H.; Lora, E. E. S., 2003, “Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações”, Rio de Janeiro: Interciência, 2ª Edição, 199p.

Nogueira, A. L. G., 2012, “Análise dos Efeitos das Condições Operacionais de um Gaseificador Concorrente de Duplo Estágio na Qualidade do Gás”, Universidade Federal de Itajubá. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Minas Gerais.

Quirino, W. F.; Vale A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevedo, A. C. 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”, Golden, Colorado, SERI, 148p.

Reed, T. B.; Markson, M., 1982, “Biomass Gasification Reaction Velocities”, *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*, Elsevier Applied Science, New York, p. 951-965.

Rezaiyan, J.; Cheremisinoff N. P., 2005, “Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists”, Taylor & Francis Group. New York, 336p.

Rumão, A. S., 2013, “Geração de Potência e Energia Elétrica a Partir da Gaseificação de Rejeitos de Biomassa”, Universidade Federal da Paraíba. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.

Silva, N. F., 2006, “Fontes de Energia Renováveis Complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese (Doutorado), Programa de Planejamento Energético – COPPE, Rio de Janeiro.

Yin, R.; Liu, R.; Wu, J.; Wu, X.; Sun, C.; Wu, C., 2012, “Influence of Particle Size on Performance of a Pilot-Scale Fixed-Bed Gasification System”, *Bioresource Technology*, v. 119, p. 15-21.