

LUIZ INÁCIO CHAVES

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GÁS DE SÍNTESE
DE UM GASEIFICADOR CONCORRENTE UTILIZANDO *Mazilaurus*
*Itaúba***

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
SETEMBRO – 2012

LUIZ INÁCIO CHAVES

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GÁS DE SÍNTESE
DE UM GASEIFICADOR CONCORRENTE UTILIZANDO *Mazilaurus*
*Itaúba***

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura para obtenção do título de Mestre.

Professor Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Professor Co-orientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
SETEMBRO – 2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

C439m Chaves, Luiz Inácio
Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um
gaseificador concorrente utilizando *Mazilaurus Itaúba*— Cascavel, PR:
UNIOESTE, 2012.
58 p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Biomassa. 2. Gás de síntese. 3. Energia renovável. I. Universidade
Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 333.95

LUIZ INÁCIO CHAVES

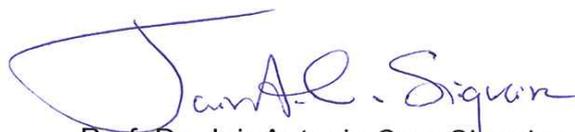
**“Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador
concorrente utilizando *Mazilaurus Itaúba*”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Nathan Mendes
Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC/Curitiba

Cascavel, 17 de setembro de 2012.

*Dedico este trabalho aos meus pais
Osmar e Marta.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a capacidade de atingir mais um objetivo em minha vida e a minha família, que sempre me apoiou e incentivou.

Ao Professor Orientador Samuel Nelson Melegari de Souza, que neste período me auxiliou a buscar respostas para o estudo proposto.

Aos Professores do programa de pós-graduação em Energia na Agricultura que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico.

A todos os responsáveis pelo programa de pós-graduação, servidores e professores, pela dedicação e comprometimento com o programa.

A Unioeste, por oferecer o programa de Mestrado.

A Fundação Parque Tecnológico de Itaipu – Brasil, FPTI-BR, por meio da Área de Ciência e Tecnologia – PTI C&T, pelo incentivo através da bolsa de pesquisa.

Aos amigos que fiz durante o período de estudo na Unioeste.

Agradeço enfim, a todos que contribuíram para a realização do trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gaseificador de leito fixo do tipo contracorrente.	15
Figura 2 - Gaseificador de leito fixo do tipo concorrente	17
Figura 3 - Gaseificador de leito fixo do tipo fluxo cruzado.	18
Figura 4- Gaseificador de leito fluidizado	19
Figura 5- Concentração de alcatrão e particulados produzido em gaseificadores	20
Figura 6- Aplicações do gás de síntese em função do poder calorífico	22
Figura 7- Unidade de gaseificação instalada no laboratório de Bioenergia.....	25
Figura 8 – Motor-gerador utilizado no ensaio.....	26
Figura 9 – Banco de resistências.	27
Figura 10 – Montagem do experimento.....	28
Figura 11 - Recipiente adiabático (a); Pressurizador (b); calorímetro (c).	29
Figura 12 - Controle de entrada da mistura ar/combustível.	33
Figura 13 - Consumo de madeira X Tempo de utilização do gaseificador.	37
Figura 14 - Produção de gás de síntese X Tempo de utilização do gaseificador	39
Figura 15 - Rendimento de gás em diferentes ensaios	40
Figura 16 – Potência de saída do gerador.	42
Figura 17- Consumo específico de gás de síntese.	44
Figura 18 - Consumo específico de madeira.....	45
Figura 19 - Eficiência global do conjunto motor-gerador.	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipo de sistema usando biomassa e granulometria recomendada. 10

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimento para madeira serrada e resíduos.	6
Tabela 2 – Volume de serragem e outros resíduos por espécie e por classe.	7
Tabela 3 – Análise elementar da madeira com 15% de umidade.	8
Tabela 4 – Características da lenha seca em estufa.	9
Tabela 5 – Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores.	13
Tabela 6 – Classificação do gás quanto ao poder calorífico.	13
Tabela 7– Especificações do motor-gerador utilizado.	32
Tabela 8 – Poder calorífico da madeira utilizada no gaseificador.	36
Tabela 9 - Quantificação da produção de gás e consumo de madeira.	38
Tabela 10 - Eficiência de gaseificação em diferentes ensaios.	41
Tabela 11 - Desempenho do motor-gerador utilizando gás de síntese.	43

CHAVES, Luiz. I. MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Agosto de 2012. **Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador concorrente utilizando *Itaúba mazilaurus***. Professor Orientador Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

O uso da biomassa como fonte de energia é uma das formas mais promissoras, pois contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera e possibilita a geração descentralizada de energia. A gaseificação é uma tecnologia de transformação energética da biomassa num biocombustível gasoso de baixo poder calorífico. O gás pode ser utilizado em motor ciclo Otto para geração de energia elétrica em comunidades isoladas. Este trabalho avaliou a capacidade de produção de gás de gaseificação em um gaseificador concorrente de leito fixo de dois estágios, o consumo de madeira, a eficiência do gaseificador, a eficiência e o consumo de gás num motor-gerador ciclo Otto. O gaseificador utilizado foi da marca TERMOQUIP, modelo CD 40. O motor-gerador avaliado foi da marca BRANCO, com injeção direta e potência de 13 cv acoplado a um gerador elétrico de 5,5 cv. O gás de gaseificação foi injetado no motor misturado com o ar de admissão. O gerador foi submetido a cargas que variaram entre 0,5 kW e 2,5 kW, com o auxílio de um banco de resistências elétricas. A produção de gás do gaseificador e o consumo de gás pelo motor foram medidos por meio de um gasômetro. A produção de gás média resultante da gaseificação de madeira apresentada durante os testes foi de 14,28 m³ h⁻¹. O consumo de madeira apresentou uma média de 5,61 kg h⁻¹. A média de rendimento de gás por unidade de massa foi de aproximadamente 2,55 m³ kg⁻¹. A eficiência de gaseificação média foi de 57,2 %. Quando alimentado com gás de síntese, a tensão de saída do gerador se manteve dentro dos padrões estabelecidos pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2008), variando somente entre 221 e 223 V. Em relação aos testes com o motor-gerador, a melhor condição ocorreu para a maior carga, 2,5 kW, onde o consumo de gás foi cerca de 10,6 m³ h⁻¹ e o consumo específico de combustível de 4,8 m³ kWh⁻¹. Para essa condição, a média de consumo específico equivalente de madeira foi de 1,9 kg kWh⁻¹ e a eficiência global do motor-gerador foi de 16,6 %.

PALAVRAS-CHAVE: gás de síntese, biomassa, energia renovável

CHAVES, Luiz I. MSc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, August, 2012.
Microgeneration of electricity with syngas from a downdraft gasifier using Itaúba mazilaurus. Adviser Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

The use of biomass as energy source is one of the most promising, because it contributes to reduce emissions of carbon dioxide in the atmosphere and allow the decentralized energy generation. Gasification is a technology of processing biomass energy into a gaseous biofuel of low calorific value. The gas can be used in Otto cycle engine for power generation in isolated communities. This study evaluated the capacity of the gasification gas in a fixed bed gasifier downdraft of two stages, the wood consumption, the efficiency of the gasifier and the gas consumption and efficiency in a power-generator Otto cycle. The gasifier used was a TERMOQUIP brand, model CD 40. The evaluated power-generator was a BRANCO brand, direct injection and power of 13 cv coupled to an electric generator of 5.5 cv. The gasification gas was injected into the engine mixed with the intake air. The generator was subjected to loads ranging from 0.5 kW to 2.5 kW, with the aid of a bank of electrical resistances. The production of gas from the gasifier and gas consumption by the motor were measured by means of a gasometer. The average gas production resulting from the gasification of wood presented during testing was $14.28 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Wood consumption averaged 5.61 kg h^{-1} . The average yield of gas per unit weight was approximately $2.55 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. The gasification efficiency averaged 57.2%. When fed with synthesis gas, the output voltage of the generator was kept within the standards established by Companhia Paranaense de Energia (Copel, 2008), varying only between 221 and 223 V. For tests with the power-generator the best condition occurred for the highest load, 2.5 kW, where the gas consumption was about $10.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ and specific fuel consumption of $4.8 \text{ m}^3 \text{ kWh}^{-1}$. For this condition, the average specific fuel consumption of equivalent wood was 1.9 kg kWh^{-1} and the overall efficiency of power-generator was about 16.6%.

KEYWORDS: synthesis gas, biomass, renewable energy.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE QUADROS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA.....	3
2.2 BIOMASSA.....	5
2.2.1 Características da biomassa	8
2.2.1.1 Composição química elementar	8
2.2.1.2 Composição química imediata	8
2.2.1.3 Teor de umidade	9
2.2.1.4 Granulometria.....	10
2.2.1.5 Massa específica aparente.....	10
2.2.1.6 Poder calorífico	11
2.3 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.....	11
2.3.1 Caracterização do gás de gaseificação.....	12
2.3.2 Produção de gás em gaseificadores	13
2.3.3 Tipos de gaseificadores.....	14
2.3.3.1 Gaseificadores de fluxo ascendente ou contracorrente.....	15
2.3.3.2 Gaseificadores de fluxo descendente ou co-corrente.....	15
2.3.3.3 Gaseificador de fluxo cruzado	18
2.3.3.4 Gaseificador de leito fluidizado.....	18

2.3.4 Purificação do gás	19
2.3.5 Utilização do gás de gaseificação em motores de combustão interna.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	24
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA UTILIZADA.....	28
3.3 METODOLOGIA PARA CONSUMO DE MADEIRA DO GASEIFICADOR.....	30
3.4 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE GÁS DO GASEIFICADOR.....	30
3.5 RENDIMENTO DE GÁS.....	31
3.6 METODOLOGIA PARA EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR.....	31
3.7 MOTOR UTILIZADO	32
3.8 DESEMPENHO DO MOTOR-GERADOR COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO	33
3.9 METODOLOGIA PARA O CONSUMO ESPECÍFICO DE MADEIRA.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 PODER CALORÍFICO DA MADEIRA.....	36
4.2 CONSUMO DE MADEIRA NO GASEIFICADOR	36
4.3 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE GÁS NO GASEIFICADOR.....	37
4.4 RENDIMENTO DE GÁS.....	39
4.5 EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR.....	40
4.6 DESEMPENHO DO MOTOR-GERADOR COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO	41
5. CONCLUSÕES	48
6. REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento social e tecnológico, acompanhado pelo aumento da população mundial, tem resultado em uma grande demanda de energia e aumento da poluição. Essas emissões são provenientes da utilização de combustíveis minerais considerados não renováveis como o óleo diesel e outros derivados do petróleo. Uma fonte estratégica de energia que pode auxiliar na demanda de combustível é a biomassa.

A biomassa é uma das maiores fontes de energia disponível na área rural e nas agroindústrias. A mesma aparece na forma de resíduos vegetais e animais, tais como restos de colheita, esterco animal, plantações energéticas, efluentes agroindustriais e resíduos de serrarias. Além de uma fonte alternativa para a obtenção de energia, a biomassa pode oferecer benefício econômico e ambiental pelo fato de dispensar a utilização de combustíveis derivados do petróleo.

Os principais meios de aproveitamento da energia da biomassa são o uso direto, *in natura*, ou uso de subprodutos provenientes da conversão química da matéria. No caso da madeira, o aproveitamento direto é o mais comum. Outra forma de aproveitar a energia da mesma é através da tecnologia de gaseificação, que transforma parte da matéria em gás, também conhecido como gás de síntese. Esse processo é indicado quando se pretende aproveitar a energia da biomassa em motores de combustão interna, turbinas ou outros equipamentos que permitem a utilização de combustível gasoso para o funcionamento.

Sabe-se que em pequenas propriedades, distantes da rede elétrica, encontradas principalmente na região norte do Brasil e em um menor número em outras regiões, há uma grande dependência de geradores para a produção de energia elétrica. Esses equipamentos utilizam, na maioria das vezes, combustível derivado de petróleo. Além de ter um alto preço, a produção de energia através desse meio promove a emissão de toxinas na atmosfera através dos gases de combustão liberados pelo motor. Uma forma de diminuir essas emissões e oferecer uma alternativa para a produção de energia através de outro combustível, não derivado do petróleo, é a gaseificação de biomassa.

A tecnologia de gaseificação de biomassa utiliza equipamentos denominados gaseificadores que transformam a matéria (madeira), por exemplo, em um combustível gasoso que pode ser utilizado como fonte alternativa em motores

ciclo Otto e motores ciclo diesel. No primeiro caso, é possível utilizar o gás de síntese como único combustível. Já no segundo, é necessário utilizar o Diesel como combustível piloto, assegurando apenas a redução de consumo de combustível com a inserção do gás de gaseificação.

A partir daí, é possível aproveitar resíduos florestais provenientes de corte de árvores de reflorestamento, de indústrias madeireiras como serrarias e indústrias de móveis para a produção de energia, que normalmente estão presentes em várias regiões do país. Com a utilização de um sistema de geração próprio de energia, esses estabelecimentos podem utilizar os seus resíduos para diminuir os gastos com a conta de luz, reduzindo a dependência de energia proveniente da rede.

Na região Oeste do Paraná existem muitas agroindústrias integradas com produtores rurais e muitas indústrias de móveis e serrarias. O meio rural e as indústrias madeireiras geram uma grande quantidade de resíduos, os quais poderiam ser convertidos em energia através de um sistema de gaseificação acoplado a um gerador.

No Brasil existem incentivos tímidos na pesquisa e disseminação de algumas formas de aproveitamento da biomassa como a gaseificação, ao contrário do que fazem os países desenvolvidos. Apenas o biodiesel e o etanol, dentro do programa de uso de biomassa, vem recebendo incentivos do governo.

Neste estudo propõe-se a avaliação de um sistema térmico de geração de energia elétrica em pequena escala, com um sistema de gaseificação de biomassa acoplado a um motor ciclo Otto, para geração de energia elétrica.

Este trabalho tem por objetivos avaliar: a capacidade de produção de gás de gaseificação no gaseificador concorrente, o consumo de madeira, a eficiência de gaseificação, a eficiência de combustão e o consumo de gás de gaseificação num motor-gerador ciclo Otto utilizando como matéria prima resíduos de madeira que podem ser encontrados em propriedades rurais e indústrias de serrarias.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

A crescente demanda mundial por energia contrapõe-se, atualmente, com a conscientização social sobre as conseqüências do aquecimento global causado pela emissão dos gases de efeito estufa (GEE), em grande parte pela queima de combustíveis fósseis, com a instabilidade nos preços do petróleo e também política em grande parte das regiões produtoras, e ainda com barreiras econômicas ou de receio público à implantação de novas grandes centrais geradoras. Há um consenso de que a atual matriz elétrica deva ser modificada visando a redução na dependência dos combustíveis fósseis, principalmente carvão, petróleo e gás, que em 2007 correspondiam à aproximadamente 67% da energia elétrica gerada no mundo, sendo que para o ano de 2030 prevê-se um aumento de aproximadamente 74% no consumo de eletricidade mundial, impulsionado principalmente pelos países em desenvolvimento (Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Económico/IEA, 2009).

O uso da biomassa como fonte alternativa de energia tem destaque, pois é uma fonte de energia menos intermitente, quando comparada à eólica e à solar, e por apresentar um “balanço nulo” de CO₂, ou seja, o CO₂ emitido na queima da biomassa é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta, pelo processo da fotossíntese (GALVÃO, 2006).

A biomassa, como tal, pode ser convertida em energia por meio de queima direta (conversão termoquímica) e reações bioquímicas. Uma das formas de conversão termoquímica da biomassa num biocombustível é a tecnologia de gaseificação, onde se obtém um gás pobre. O processo de gaseificação é um processo no qual a biomassa é submetida a uma secagem, pirólise, oxidação (combustão) e redução. Na zona de secagem a biomassa perde sua umidade e ao passar pela zona de pirólise é decomposta em gases voláteis, carvão vegetal, alcatrão e ácidos. Os produtos da pirólise reagem com o oxigênio em alta temperatura na zona de combustão e são convertidos em gás de síntese na zona de redução (SHARMA, 2009).

As fontes não renováveis de energia (petróleo, carvão mineral e gás natural e energia nuclear) foram responsáveis por aproximadamente 87,4% do consumo

mundial de energia primária em 2007, o equivalente a 10,5 Gtoe, enquanto a biomassa representou apenas 1,18 Gtoe, aproximadamente 10% do total. Levando-se em conta apenas suprimento de eletricidade no mundo, sendo a biomassa responsável por aproximadamente 1,6% do total de eletricidade (OECD/IEA, 2009). Como conseqüência, nota-se um aumento das temperaturas médias na superfície terrestre em razão do aumento da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, devido principalmente à queima de combustíveis fósseis (ESCOBAR *et al*, 2009).

Em 2007, 46% de toda a oferta de energia no Brasil foi de fontes renováveis de energia, onde a biomassa representou aproximadamente 28%, sendo que os produtos da cana corresponderam a 16%. Logo o Brasil é um país que tem uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo (MME, 2007). No Brasil, em 2003, a contribuição da biomassa para a geração de eletricidade foi de 3,5%, com a geração de 12,8 TWh (IEA, 2006). Naquele ano, o Brasil foi o quarto país com maior participação da biomassa na geração de eletricidade, atrás da Finlândia (11,2%), Suécia (3,9%) e Dinamarca (3,6%).

As soluções encontradas pelos países pertencentes à Agência Internacional de Energia (IEA) para possibilitar a redução das emissões dos GEE foram a substituição dos combustíveis fósseis, a introdução de medidas que aumentem as eficiências do uso e da conversão da energia, a criação progressiva de medidas legislativas de contenção de emissões nas grandes cidades e investimentos pesados no desenvolvimento das fontes renováveis de energia (como a energia solar e a eólica) e na produção de combustíveis “limpos” (como os derivados de biomassa e o hidrogênio) (SILVA *et al*, 2003).

Apesar do Brasil possuir uma situação privilegiada em razão de seu grande potencial hidrelétrico, que representa 74% da geração elétrica, com cerca de 95% da população tendo acesso à eletricidade, em função dos altos custos de implantação das linhas de transmissão e da baixa densidade demográfica a geração de eletricidade na região Norte do país é feita por sistemas isolados, que utilizam em sua maioria combustíveis fósseis como matéria prima em pequenas centrais termelétricas. Estes abrangem uma área de 45% do território brasileiro e abastecem cerca de 3% da população (ANEEL, 2008), com uma geração estimada, a partir de combustíveis fósseis, na ordem de 8,7 milhões de MWh no ano de 2009, sendo 2,9 milhões de MWh gerados a partir de óleo diesel a um custo médio de 554,92

R\$.MWh⁻¹ apenas com combustível, representando um consumo de 831 milhões de litros (ELETROBRÁS, 2009). Apesar dos grandes subsídios feitos pelo governo, da ordem de 2,9 bilhões de reais em 2007 a tarifa média de fornecimento de energia elétrica na região Norte é a maior do país, 291,82 R\$.MWh⁻¹ no período de 2009 (ANEEL, 2008).

O surgimento do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia), criado com base na lei nº 10.438/02, teve como objetivo o aumento da participação da energia elétrica gerada por Produtores Independentes Autônomos a partir de fontes renováveis (SOUZA *et al*, 2004).

Neste cenário de mudanças, a biomassa, quando utilizada de forma sustentável, tem um papel muito importante pela sua abundância, também por suas formas de conversão energética já serem estudadas há muito tempo e ainda por apresentar um balanço “nulo” na emissão de dióxido de carbono (HAN & KIM, 2008). O uso sustentável da energia propõe os recursos naturais e seus benefícios à humanidade (REIJNDERS, 2006).

2.2 BIOMASSA

Por biomassa entende-se toda a matéria vegetal criada pela fotossíntese e seus derivados, tais como resíduos animais, agrícolas e florestais (biomassa tradicional) e a matéria orgânica presente em resíduos domésticos e industriais (biomassa moderna) (LORA, 1997).

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). Por gaseificação entende-se a conversão de biomassa, ou qualquer combustível sólido, em um gás combustível através da oxidação parcial a temperaturas elevadas (MCKENDRY, 2002).

Combustíveis de biomassa disponíveis para gaseificação incluem a madeira, carvão e resíduos de madeira (galhos, raízes, cascas e serradura), bem como uma multiplicidade de resíduos agrícolas (espigas de milho, casca de coco, palhas de cereais, cascas de arroz, etc) e turfa.(FAO, 1993). Os resíduos lignocelulósicos além de apresentarem uma relevante capacidade calorífica, são

fonte energética potencialmente capaz de substituir algumas formas de combustíveis fósseis, o que pode tornar esta atividade vantajosa (SILVA, 2001).

Resíduos de madeira podem ser utilizados para geração de energia e são comumente encontrados em indústrias de serraria e propriedades agrícolas que trabalham com cultivo de reflorestamento. A madeira é um recurso energético que tem potencial para diminuir dependências externas de fontes energéticas. Um exemplo é a produção do carvão vegetal, que substitui o carvão mineral no processo de obtenção do ferro gusa. Também, graças ao potencial produtivo e renovável, pode representar uma fonte ambientalmente mais correta e socialmente mais justa, visto que possibilita uma das maiores taxas de geração de emprego por recurso investido (BRITO, 2007). As vantagens da biomassa como fonte energética do ponto de vista sócio-ambiental são inúmeras, segundo Soares *et al.* (2006) quando a biomassa provém de forma sustentável, por exemplo, ainda pode ser utilizada como mecanismo promotor de desenvolvimento nas áreas rurais.

Os resíduos de indústrias que trabalham com madeira também podem ser uma fonte de energia. Em relação à quantidade de cada tipo de resíduo, Borges *et al.* (1993), correlacionam os índices de rendimento para costaneiras, aparas, serragem e madeira serrada, de acordo com o diâmetro mínimo da tora e os procedimentos de desdobro das mesmas, conforme a tabela abaixo:

Tabela 1 – Rendimento para madeira serrada e resíduos.

Madeiras e Resíduos	RENDIMENTO (%)			
	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
Madeira serrada	38,98	51,91	53,31	64,87
Costaneiras	20,63	18,71	23,23	14,29
Aparas	30,03	16,43	9,68	6,17
Serragem	10,36	12,95	13,78	14,66

Fonte: BORGES *et al.* (1993).

Como visto o trabalho com madeira produz grande quantidade de resíduos. A madeira serrada possui o rendimento máximo, de apenas 64,87%. A serragem também é proveniente do trabalho com a madeira. É o principal resíduo de serrarias e indústrias de móveis. Nos outros casos, os resíduos são provenientes de podas que na maioria das vezes acontecem em áreas agrícolas de reflorestamento. Os

resíduos poderiam ser utilizados para gerar energia elétrica para a própria indústria ou propriedade. Além disso, o excedente de energia poderia ser vendido para rede de energia, constituindo em uma fonte de renda.

De acordo com Nogueira e Lora (2003) os resíduos florestais incluem os subprodutos das atividades silviculturais, como pontas e caules deixados no campo, e que, em função da finalidade da madeira produzida, industrial ou energética, apresentam distintas produções específicas à cerca de 33% para o caso da madeira cortada com fins industriais e 5% quando cortada para ser utilizada como combustível. Observa-se que a geração total de resíduos na exploração florestal, incluindo-se os resíduos de serragem, pode ser muito superior à produção de madeira trabalhada.

Com relação ao desdobro de espécies tropicais, pesquisas referentes às espécies Cedrinho (*E. uncinatum*), Cambará (*Q. albiflora*) e Itaúba (*M. itauba*) feitas por Biasi (2005), foram obtidos dados referentes ao rendimento em madeira serrada e porcentagem de resíduos gerados (Tabela 2).

Tabela 2 – Volume de serragem e outros resíduos por espécie e por classe.

Espécie	Classe Diâmetro	Volume médio de resíduos (%)		
		Serragem	Outros resíduos	TOTAL (%)
Cedrinho	1	9,34	33,36	42,7
	2	9,86	29,61	39,7
	3	10,7	27,42	37,9
	4	9,64	31,25	40,9
Cambará	1	9,65	31,18	40,3
	2	10,2	27,09	37,1
	3	10,3	26,3	36,3
	4	10,4	24,07	34,1
Itaúba	1	8,11	42,17	50,8
	2	9,22	34,23	43,5
	3	9,32	33,47	42,9
	4	8,5	39,37	47,7

Fonte: (BIASI, 2005).

Como visto, entre as espécies analisadas, o trabalho com a Itaúba gera maior quantidade de resíduos. Em função disso, haveria maior volume de matéria

prima de Itaúba para utilização em um sistema de aproveitamento de resíduos para a produção de energia.

2.2.1 Características da biomassa

Segundo Nogueira & Lora, (2003), as características técnicas mais importantes para a utilização da biomassa são o teor de umidade, o poder calorífico e composição química elementar e imediata.

Também influenciarão nas características de projeto de uma unidade de gaseificação de biomassa a granulometria e a massa específica aparente do combustível.

2.2.1.1 Composição química elementar

Diz respeito à porcentagem em massa dos principais elementos, como C, H, S, O, N e cinzas, que estão presentes na biomassa (NOGUEIRA & LORA, 2003). Seu conhecimento é importante para a quantificação da relação ar-combustível ideal e para prever a composição dos gases produzidos no processo de gaseificação (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

Tabela 3 – Análise elementar da madeira com 15% de umidade.

Biomassa	Análise elementar				
	C	H	O	N	S
Pedaço de madeira	48,03	5,98	45,67	0,08	0
Eucalipto	45,97	5,81	44,42	0,3	0
Blocos de madeira	49,07	5,09	43,45	0,48	0,02

Fonte: (Parikh *et al.* 2005).

2.2.1.2 Composição química imediata

Refere-se ao conteúdo percentual de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade. A quantidade de materiais voláteis diz respeito à facilidade de combustão da biomassa (NOGUEIRA & LORA, 2003), enquanto que o teor de cinzas é importante para se avaliar o potencial de possíveis reações químicas entre

os gases produzidos e os equipamentos, evitando-se possíveis danos (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

2.2.1.3 Teor de umidade

O teor de umidade é considerado o fator que exerce a maior influência sobre a queima de materiais combustíveis. Além de ser uma característica que não possui dificuldades para ser mensurado, o conteúdo de umidade é sempre um parâmetro importante para ser avaliado na madeira e em resíduos que serão destinados ao uso energético. (WOOD HANDBOOK, 1968)

Em indústrias de celulose, o conteúdo de umidade é baseado no peso original da amostra, caracterizando assim o teor de umidade na base úmida (WOOD HANDBOOK, 1968).

Tabela 4 – Características da lenha seca em estufa.

Biomassa	Teor de água (Umidade) (%)		Poder Calorífico Inferior
	Base seca	Base úmida	(MJ/kg)
Lenha seca em estufa	20	17	15,2

Fonte: (ONU, 1987).

Em árvores vivas o teor de água diz respeito à massa de água livre presente na biomassa, podendo ser expresso em base úmida ou base seca (NOGUEIRA & RENDEIRO, 2008). Combustíveis com teor de umidade superior a 30% têm dificuldades em sua ignição e diminuem o poder calorífico do gás produzido devido ao gasto de energia causado pela evaporação da água antes que a combustão e a gaseificação possam ocorrer. Um teor de umidade elevado do combustível reduz a temperatura na zona de oxidação, resultando numa quebra incompleta dos hidrocarbonetos provenientes da zona de pirólise e, combinada com presença de CO, produz H₂ pela reação do gás com a água. O acréscimo na quantidade de H₂ presente no gás causa uma maior produção de metano (CH₄), contudo, o ganho obtido nas quantidades de H₂ e CH₄ presentes no gás acaba não compensando devido à perda de energia sofrida na redução do CO e ainda produz um gás com menor poder calorífico (MCKENDRY, 2002).

2.2.1.4 Granulometria

A granulometria ideal do combustível a ser gaseificado é extremamente variável em função principalmente do tipo de reator utilizado, Nogueira e Trossero (2000) apresentaram um quadro com a granulometria recomendada em função do tipo de reator, apresentada a seguir:

Quadro 1 – Tipo de sistema usando biomassa e granulometria recomendada.

Tipo de Sistema de Utilização de biomassa	Granulometria recomendada (mm)
Leito Fixo	50 – 100
Queima em Suspensão	< 6,0 - 7,0
Leito Fluidizado Borbulhante	20 - 30
Leito Fluidizado Circulante	< 6,0 - 7,0

Fonte: (NOGUEIRA & TROSSERO, 2000).

A aplicação adequada do tamanho dos resíduos com o sistema de gaseificação permite maior eficiência do processo.

2.2.1.5 Massa específica aparente

É a razão entre a massa total de combustível e o volume ocupado pelo mesmo, considerando-se a descontinuidade (porosidade) da massa (NOGUEIRA & RENDEIRO, 2008). Esse fator é importante para a seleção de tipos de resíduos.

Segundo Tavares (2010), a massa específica influencia diretamente nas propriedades de resistência mecânica e instabilidade dimensional do material. Oliveira *et al.* (2007), complementa que a massa específica é uma das propriedades da madeira que mais fornece características do material.

Sudam (1983) apud Dutra *et al.* (2005), afirmam que no caso de resíduos de madeira há uma variação muito grande da massa específica que vai de 0,16 a 1,3 g/cm³, para madeiras consideradas leves podemos encontrar massa específica entre 0,49 e 0,55 g/cm³ seca ao ar, para madeiras moderadamente pesada tem-se entre 0,63 a 0,71 g/cm³ também seca ao ar e para madeiras pesadas encontramos valores

a cima de $0,76 \text{ g/cm}^3$ seca ao ar.

2.2.1.6 Poder calorífico

O poder calorífico de um determinado combustível refere-se à quantidade de calor que pode ser liberada em sua queima por unidade de massa ou de volume. Quando se considera que a água presente no combustível condensa e permanece em estado líquido, tem-se o poder calorífico superior (PCS). O poder calorífico inferior (PCI) é calculado quando se considera que a água presente na biomassa fique na forma de vapor. Na prática pode-se dizer que o PCI é a quantidade de calor que pode efetivamente ser extraído do combustível, sendo em média 10 a 20% menor que o PCS (NOGUEIRA & RENDEIRO, 2008).

A determinação do poder calorífico superior de materiais combustíveis é feito de modo direto e experimental (JUVILLAR, 1984). Normalmente utiliza-se uma bomba calorimétrica para a determinação do poder calorífico de um material combustível, obtendo-se o poder calorífico superior, pois a água contida no combustível é evaporada e condensada durante sua combustão (FONTES, 1994).

2.3 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

De acordo com Nogueira & Lora (2003), as reações químicas mais importantes do processo de gaseificação são: Pirólise, oxidação do carbono, gaseificação, craqueamento do alcatrão e oxidação parcial dos produtos da pirólise.

A gaseificação é a tecnologia disponível em mais alto grau de amadurecimento entre as formas termoquímicas de conversão de biomassa (HARYANTO *et al*, 2009). É uma tecnologia relativamente antiga, a gaseificação de carvão mineral em escala comercial iniciou-se no começo do século XIX (HIGMAN & BURGT, 2007). A gaseificação pode ser considerada uma alternativa sustentável para a geração de energia, tanto pela baixa emissão de poluentes e por apresentar um equilíbrio entre o consumo e a produção de gás carbônico quanto pela elevada eficiência do processo, estimada entre 75 e 80% (MCKENDRY, 2002). Segundo Mathieu e Dubuisson (2002) o uso desta tecnologia tende a reduzir a grande pressão sobre as fontes não-renováveis de energia, principalmente nos países em desenvolvimento.

Durante a segunda guerra mundial, os estoques de produtos de petróleo na Europa tornaram-se escassos, o que levou à necessidade de serem desenvolvidas fontes alternativas de energia para o suprimento de veículos motorizados. A tecnologia escolhida por alguns países foi a gaseificação de madeira, usando-se uma gaseificador de cama fixa acoplado à frente do veículo. Como consequência à segunda guerra mundial, países como Suécia e Finlândia tornaram-se referências no desenvolvimento de gaseificadores de madeira para veículos motorizados (MCKENDRY, 2002).

A secagem da biomassa ocorre em temperaturas superiores a 120 °C, a desvolatilização do material volátil em temperaturas de até 350 °C e a gaseificação dos compostos orgânicos em temperaturas acima de 350 °C. Por isso, o processo da gaseificação é normalmente classificado em secagem, desvolatilização e gaseificação (KIRUBAKARAN *et al.*, 2007). A gaseificação pode ocorrer por dois processos distintos: a gaseificação catalítica e a não-catalítica. A gaseificação não-catalítica ocorre em duas etapas: na primeira a biomassa sofre uma pirólise, que é a decomposição do combustível sob o efeito do calor, produzindo coque com elevado teor de carbono (até 90%), produtos solúveis (ácido pirolenhoso), produtos insolúveis (alcatrões) e gases (hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e nitrogênio). A segunda etapa é a gaseificação, que é a oxidação do carbono presente no coque a monóxido de carbono, craqueamento com simultaneamente o produtos dos solúveis e insolúveis (VELÁZQUEZ, 2006). O processo gera também metano e outros hidrocarbonetos superiores em quantidades variáveis entre diferentes gaseificadores e/ou condições de operação. A gaseificação catalítica, por sua vez, ocorre com a adição de elementos catalisadores, como níquel, por exemplo, para converter o alcatrão e outros hidrocarbonetos em gás, aumentando a eficiência do processo e o teor de hidrogênio (FERNANDES, 2000).

2.3.1 Caracterização do gás de gaseificação

Uma comparação das características do gás de diferentes tipos de gaseificadores mostra que o tipo de gaseificador influi sobre as características do gás produzido (composição, poder calorífico e qualidade) (BRIDGWATER, 1991).

Tabela 5 – Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores.

Gaseificador	Composição do gás, % vol.					PCS MJ/Nm ³	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

Fonte: (BRIDGWATER, 1991)

* Particulados e alcatrão

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. Esta 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 utilizado (oxigênio, ar, vapor d'água ou hidrogênio) (HARYANTO *et al.*, 2009).

Segundo Nogueira & Lora, (2003), o gás produzido pelo processo de gaseificação se classifica em 3 tipos de acordo com o poder calorífico (Tabela 6).

Tabela 6 – Classificação do gás quanto ao poder calorífico.

Tipo de gás	Poder calorífico (MJ/Nm ³)
Gás de baixo poder calorífico	até 5
Gás de médio poder calorífico	5 – 10
Gás de alto poder calorífico	10 – 40

Fonte: (NOGUEIRA & LORA, 2003)

2.3.2 Produção de gás em gaseificadores

Para a combustão completa da madeira cerca de 4,5 m³ de ar é necessária por kg. A gaseificação de biomassa consome apenas cerca de 33% da razão de estequiometria teórica para a queima de madeira (GOSWAMI, 1986).

Em média a temperatura do gás que deixa o gaseificador é de cerca de 300 a 400 °C (SKOV, 1974). Se a temperatura for superior a isso (~ 500°C) é uma

indicação de que a combustão parcial do gás estará ocorrendo. Isto geralmente acontece quando a taxa de fluxo de ar através do gaseificador é maior do que o valor de projeto. (GOSWAMI, 1986):

2.3.3 Tipos de gaseificadores

Para produção de gás combustível, os gaseificadores são mais simples e subdivididos em leito fixo (contracorrentes ou concorrentes) e leitos fluidizados (OLIVEIRA, 2008). Existem três tipos comuns de gaseificadores de leito fixo, que são classificados quanto ao movimento relativo entre o combustível sólido e o gás produzido: o de circulação de gases contracorrente ou fluxo ascendente, o co-corrente ou fluxo descendente, e o de fluxo cruzado.

Há ainda sistemas mais avançados como os gaseificadores de dupla queima e de multi-estágio. São geralmente utilizados em projetos de produção de energia em pequena escala (< 10 MW), são viáveis somente onde há um estoque ajustado de matéria-prima que possa garantir um fluxo estável de combustível. Alguns gaseificadores de leito fixo estão em operação, de forma bem sucedida, em países como Finlândia e Suécia desde a década de 80 (OPET FINLAND, 2002). Nos gaseificadores de leito fixo, a biomassa move-se somente por ação da gravidade. É uma tecnologia adaptada para processar quantidades relativamente pequenas de biomassa. (APOLINARIO, 2006). Os sistemas de leito fixo apresentam a vantagem de utilizar uma tecnologia simples, porém há um limite de dimensionamento à planta de 10-15 ton biomassa seca por hora, e normalmente opera numa temperatura de 1000°C (SALES *et al.* 2005).

Para Nogueira & Lora, (2003), os gaseificadores podem ser classificados levando em consideração a direção do movimento relativo da biomassa como:

- Leito em movimento a contrafluxo com o gás (contracorrente);
- Leito em movimento a fluxo direto com o gás (concorrente);
- Leito em movimento perpendicular ao fluxo de gás (fluxo cruzado);
- Leito fluidizado.

A classificação mais utilizada para os gaseificadores considera o tipo de leito utilizado, há os gaseificadores de leito fixo, leito fluidizado e os de leito arrastado, com algumas variações dentro de cada tipo (LETTNER *et al.*, 2007).

2.3.3.1 Gaseificadores de fluxo ascendente ou contracorrente

Segundo Apolinario (2006), o gaseificador de fluxo ascendente (para a queima de carvão) é o de projeto mais simples e antigo em operação, inclusive no Brasil, em fornos de calcinação de algumas empresas de produtoras de cal (CaO). Em um gaseificador de fluxo ascendente o combustível é introduzido pelo topo do gaseificador, passando lentamente pelo corpo do gaseificador e pelas zonas de secagem, pirólise, gaseificação e combustão. Os gases produzidos contêm elevados teores de óleos e alcatrões pelo fato de que os gases gerados nas zonas de secagem e pirólise são direcionados diretamente ao gás de produto final, sem reações secundárias de decomposição. O processo gera um gás de temperatura baixa, entre 80 e 300 °C se o combustível for biomassa e entre 300 e 600 °C se for carvão. Normalmente o gás produzido contém uma quantidade muito reduzida de particulados devido às baixas velocidades do gás e aos “efeitos filtrantes” das zonas de secagem e pirólise (OPET FINLAND, 2002).

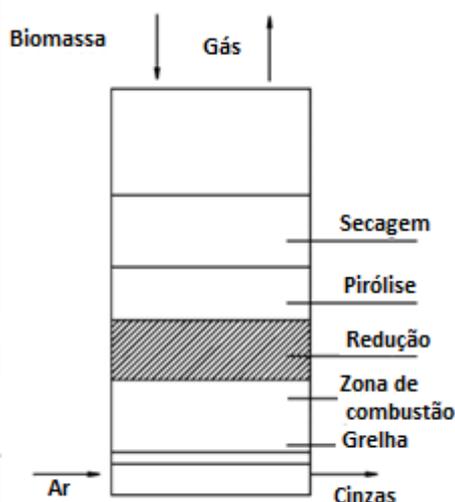


Figura 1 - Gaseificador de leito fixo do tipo contracorrente (QUAAK *et al.*1999).

2.3.3.2 Gaseificadores de fluxo descendente ou co-corrente

Nos gaseificadores de fluxo descendente, o combustível e o fluxo de ar movimentam-se na mesma direção. Os gases produzidos deixam o gaseificador somente após passarem pela zona de combustão, ativando o craqueamento parcial dos alcatrões formados durante a gaseificação, gerando um gás com menores teores de alcatrão, mas com maiores percentuais de particulados, se comparado aos

gaseificadores de fluxo ascendente. Porém, devido às altas temperaturas que os gases deixam o gaseificador (entre 900 e 1000 °C) a eficiência do processo é menor devido ao calor retirado pelos gases (MCKENDRY, 2002). Esse tipo de gaseificador pode ser de dois estágios.

No primeiro estágio o agente de gaseificação (ar) é alimentado através de bicos orientados no sentido radial, em direção ao centro e queima parcialmente o resíduo de madeira, gerando energia para as etapas de secagem e pirólise acima da zona de combustão e várias reações endotérmicas até o final deste estágio (TERMOQUIP LTDA, 2007).

A etapa de secagem ocorre a partir do topo do gaseificador onde a energia incidente sobre o resíduo de madeira provoca a remoção de umidade e destilação de parte dos compostos muito leves. Logo abaixo se inicia a etapa de pirólise formando inicialmente material tostado para em seguida, com grande evolução de materiais voláteis formar carvão vegetal. Na zona de oxidação, o carvão vegetal e os voláteis são parcialmente queimados, com forte liberação de energia, atingindo temperatura da ordem de 1300°C. No gaseificador co-corrente a tiragem do gás combustível é feita pela parte inferior. Assim, o fluxo gasoso se dá de cima para baixo, no mesmo sentido do fluxo do material sólido, de forma que todos os produtos gasosos produzidos pela oxidação parcial e remanescentes da pirólise e da secagem são forçados a atravessar o leito de carvão vegetal incandescente onde ocorrem etapas de redução em uma extensa região endotérmica, com formação de hidrogênio, monóxido de carbono, metano e eteno, que se encerra no início do segundo estágio (TERMOQUIP LTDA, 2007).

O segundo estágio tem por finalidade principal realizar destruição adicional do alcatrão com o objetivo de eliminá-lo ou reduzir o seu teor abaixo de 75 mg/Nm³. Isso é feito com uma nova injeção de ar através de bicos orientados para a parede evitando que haja "by pass" de alcatrão por alguma zona morta entre os bicos e próxima da parede. Na parte mais alta do segundo estágio ocorre nova oxidação parcial, seguida de etapas endotérmicas, inclusive com reações de reforma catalítica tanto com vapor de água como com dióxido de carbono (TERMOQUIP LTDA, 2007).

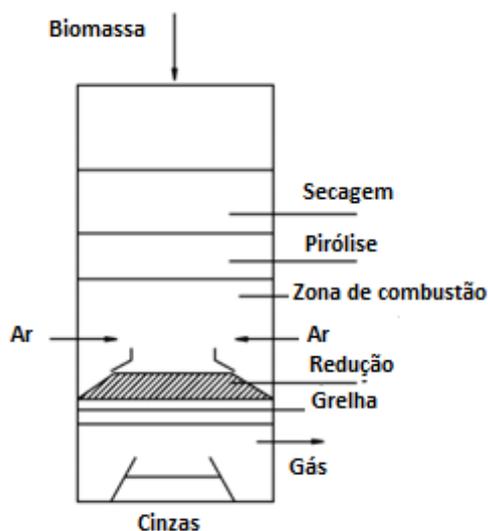


Figura 2 - Gaseificador de leito fixo do tipo concorrente (QUAAK *et al.*1999).

A grande vantagem dos gaseificadores de fluxo descendente é o fato de que os gases produzidos na zona de pirólise têm de fluir através das zonas de combustão e presente no gás. Este tipo de gaseificador é o mais utilizado para aplicações em motores gaseificação, ocorrendo o craqueamento e a oxidação de praticamente todo o alcatrão de combustão interna (SHARMA, 2008), nele o agente gaseificador pode queimar até 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível (APOLINARIO, 2006), assim, o gás produzido precisa passar apenas por um processo de filtragem e resfriamento para ser usado em um motor de combustão interna (OPET FINLAND, 2002). Mesmo com estas vantagens, na prática ainda não se observa um reator de fluxo descendente produzindo gases isentos de alcatrão. Isto se deve principalmente ao uso de biomassa com características impróprias como morfologia, umidade, granulometria e escoamento desuniforme. O escoamento desuniforme da biomassa cria canais preferenciais para o escoamento dos gases causando uma desuniformidade na temperatura interna do reator. O período transiente (partidas e paradas) também aumenta o teor de alcatrão nos gases (RENDEIRO *et al.*, 2008). É importante salientar que a eficiência neste modelo está intimamente ligada ao teor de umidade do combustível utilizado, apresentando ótimos resultados a 20% (SHARMA, 2008).

2.3.3.3 Gaseificador de fluxo cruzado

Em um gaseificador de fluxo cruzado a biomassa move-se em fluxo descendente enquanto o ar é introduzido pela lateral, os gases são retirados pelo lado oposto do gaseificador no mesmo nível. A zona de combustão e gaseificação é formada ao redor da entrada de ar, enquanto as zonas de pirólise e secagem são formadas em um nível mais alto do gaseificador. A temperatura dos gases produzidos gira em torno de 900 °C, razão pela qual a eficiência do processo é baixa e o gás produzido possui um elevado nível de alcatrão (MCKENDRY, 2002).

Pelo fato de que o tempo de residência dos gases no interior do gaseificador é muito pequeno, se o combustível a ser gaseificado tiver altos teores de voláteis não há tempo para a queima do alcatrão, sendo assim que este desenho de reator é mais apropriado para a gaseificação do carvão (RENDEIRO *et al.*, 2008).

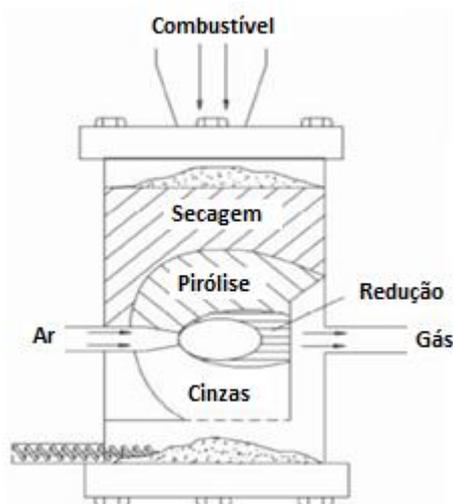


Figura 3 - Gaseificador de leito fixo do tipo fluxo cruzado (OLOFSSON *et al.*, 2005).

2.3.3.4 Gaseificador de leito fluidizado

A tecnologia da gaseificação em leito fluidizado foi desenvolvida antes da Segunda Guerra Mundial para sistemas de gaseificação de carvão mineral de grandes capacidades (CENBIO, 2002), possui a vantagem, se comparada à gaseificação em leito fixo, de permitir uma homogeneidade da temperatura na zona de gaseificação (MCKENDRY, 2002).

Em gaseificadores de leito fluidizado um leito de partículas inertes (óxido de alumínio, areia ou cinzas) é fluidizado e mantido em suspensão com o combustível

por meio de um fluxo de ar, criando melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura no interior do gaseificador. Nessas condições, a maior parte dos voláteis está em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação completa e limpa, melhorando a eficiência do equipamento. O leito inerte é inicialmente aquecido por outro combustível (processo de pré-aquecimento do reator). A alta temperatura do leito após o aquecimento permite a manutenção do processo de gaseificação apenas utilizando-se da biomassa, sem necessidade de mais consumo do combustível usado no pré-aquecimento (FERNANDES, 2000).

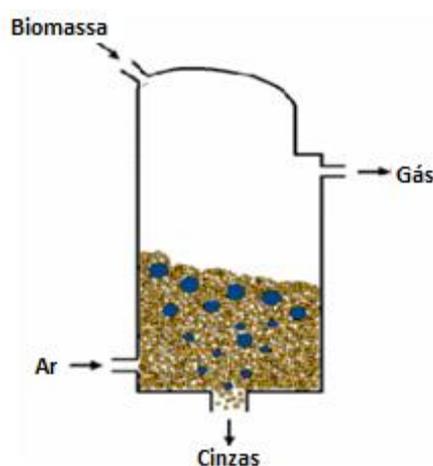


Figura 4- Gaseificador de leito fluidizado (KINTO *et al.*, 2003).

2.3.4 Purificação do gás

O gás de gaseificação possui compostos que são prejudiciais aos motores de combustão, como por exemplo, o alcatrão e os particulados sólidos. Milne *et al.* (1998) definem o alcatrão como “os orgânicos produzidos em regimes térmicos ou de oxidação parcial (gaseificação) de aromáticos”. O gaseificador do tipo concorrente caracteriza-se por produzir um gás com menor teor de alcatrão. A figura 5 mostra a concentração de alcatrão e particulados no gás de gaseificação em diferentes gaseificadores.

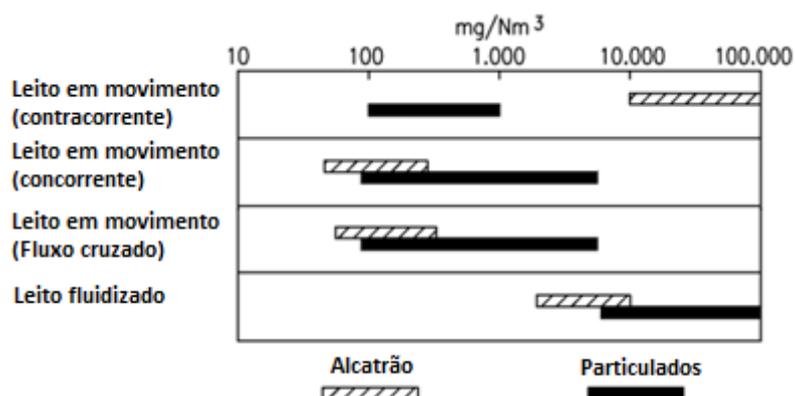


Figura 5- Concentração de alcatrão e particulados produzidos em gaseificadores (GUIGON & LARGE, 1990).

Considerando-se a viabilidade econômica de cada processo e a finalidade prevista para o gás, faz-se necessária a implementação de um sistema de purificação do gás produzido em maior, para a produção de hidrogênio, ou menor grau, para processos de combustão direta, por exemplo. As principais impurezas comumente presentes nos gases de gaseificação de biomassa são os particulados, alcatrões, compostos de nitrogênio, compostos de enxofre e compostos alcalinos (MCKENDRY, 2002). A purificação do gás pode ser feita tanto pela adoção de medidas durante o processo de gaseificação, como adição de catalizadores, seleção adequada do desenho e das condições de operação do gaseificador, quanto pela sua limpeza após a produção como a instalação de ciclones, filtros, precipitadores eletrostáticos entre outros (WANG *et al.* 2008).

2.3.5 Utilização do gás de gaseificação em motores de combustão interna

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, enquanto ao mesmo tempo, potencialmente reduz as emissões e o uso do carbono fóssil (MUÑOZ *et al.* 2000). Sendo o Brasil um país com grandes áreas agricultáveis e alto potencial de produção vegetal, tem também grande capacidade para a utilização da gaseificação de biomassa em conjunto com grupo gerador, utilizando motores de combustão interna, para a produção de energia elétrica a partir de biomassa, especialmente em áreas isoladas onde a conexão com a rede elétrica não é possível ou é de alto custo (WALTER *et al.*, 2005 apud CORTEZ *et al.*, 2008).

O emprego de pequenas centrais de geração de potencia integradas a um gaseificador com um motor de combustão interna (Integrated Gasefication Combustion Engine - IGCE) 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). Uma fonte de energia renovável é a utilização de resíduos agrícolas e florestais em um gaseificador de leito fixo concorrente, para fornecer um gás de baixo valor de aquecimento (PCI) para substituir a gasolina em motores de ignição por centelha (GUIBET, 1997).

Segundo Electo *et al.*(2004), a geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo de vapor, utilizando o gás da biomassa diretamente em um motor de combustão interna ou, em perspectiva, num motor Stirling, microturbina a gás ou célula combustível. Deve se destacar que é possível obter eficiências comparáveis com as de centrais térmicas a carvão, fato este que constitui uma quebra de paradigmas. A utilização de combustíveis gasosos pode dar-se via queima em caldeiras, o Ciclo Brayton e o Ciclo Rankine para turbinas, ou em motores de combustão interna, os Ciclo Otto e Ciclo Diesel (CORREA NETO, 2001). O Grupo Moto Gerador (GMG), quando empregado em sistemas estacionários, geralmente utiliza como combustível o gás natural, o gás liquefeito de petróleo (GLP), o óleo Diesel ou óleos pesados residuais e também o gás de síntese (LORA e HADDAD, 2006).

Para a utilização do gás de biomassa em motores a gasolina, não é necessário fazer grandes modificações neles, podendo funcionar somente com o gás. Dessa forma, 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 (MARTINS, 2006).

Os carburadores convencionais estão projetados para combustíveis gasosos que apresentam altas relações estequiométricas como o gás natural. Desta forma, é evidente a necessidade de um dispositivo adequado que permita uma ótima mistura e dosagem a fim de melhorar o desempenho do motor.

A máxima potência gerada com o gás produzido é menor do que a gerada utilizando um combustível líquido convencional, fenômeno conhecido como derating (modo operacional que visa aumentar a vida útil do material). A eficiência dos motores de gás produzido é, ainda, teoricamente a mesma para motores Otto e diesel. Dependendo um pouco do tamanho, motores Otto podem ter sua eficiência variando entre 20 e 24% enquanto motores diesel variam entre 28 e 32% (HENRIQUES, 2009).

Existem diversas aplicações para o uso dos gases produzidos pelo processo da gaseificação, o uso como combustível em fornos de cal, fornos cerâmicos, motores de combustão interna, turbinas a gás, caldeiras, o uso como reductor direto em fornos siderúrgicos, como matéria-prima para a produção de gás de síntese de metanol ou de amônia, ou ainda para a geração de eletricidade (CENBIO, 2002). A aplicação mais utilizada no mundo é visando à geração de eletricidade com co-geração de calor (BOERRIGTER & RAUCH, 2006).

Segundo Wander (2001) um certo volume contendo gás de madeira mais a quantidade certa de ar contém 70% da energia contida no mesmo volume gasolina ou propano também misturado corretamente com o ar.

Dentre os parâmetros que devem ser considerados para a escolha correta na aplicação do gás de gaseificação o poder calorífico do gás influi significativamente sobre a possível aplicação do mesmo, como indicado na figura 6 (BRIDGEWATER, 2003). Esse fator será primordial na escolha da finalidade do sistema de gaseificação. Sem ele, o rendimento do sistema estará comprometido.

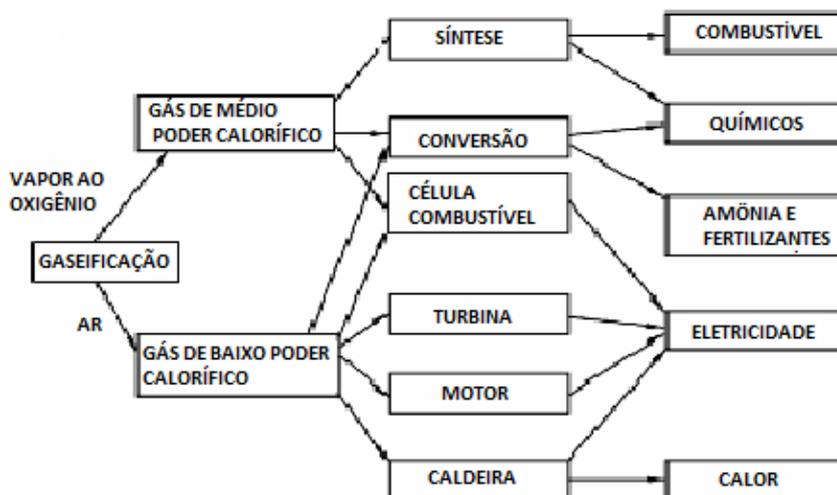


Figura 6- Aplicações do gás de síntese em função do poder calorífico (BRIDGEWATER, 2003).

A aplicação dos motores a gás vem dos anos 1944 com o Sr J. C. Clugniac que fez a adaptação de veículos da época para funcionar com gasogênio, o gás pobre (Silva e Ruggero, 2003). Em ambos os motores a diesel e gasolina a introdução do gás é por uma válvula do tipo T, onde, a partir de uma secção o ar é aspirado. Assim o carburador é simplificado através do referido regime. Muitos Arranjos têm sido desenvolvidos para a introdução de ar / gás da mistura no motor.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado na unidade de gaseificação/geração de energia elétrica que está instalada no Laboratório de Bioenergia, localizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) campus de Cascavel PR, a uma latitude 24° 59' Sul, longitude de 53°26' Oeste com altitude de 682 metros. Os ensaios ocorreram no período de 01 de junho a 30 de julho de 2012.

Os testes foram realizados num conjunto motor-gerador ciclo Otto utilizando apenas gás de gaseificação. Possibilitando a obtenção do consumo de gás de gaseificação.

O gaseificador é do tipo concorrente, o qual produz índices mínimos de alcatrão, que é um composto presente no gás e que em grandes proporções restringe a utilização em motores de combustão interna, pois causa agressão ao motor quando se condensa nas partes móveis do motor.

Para controle do processo em temperaturas recomendadas pelo fabricante, próximas a 900 °C, existem 2 (duas) válvulas reguladoras da entrada de ar para os dois estágios do equipamento. Esse controle era feito manualmente conforme a variação da temperatura do leito.

O gaseificador utilizado nos experimentos foi de leito fixo, fluxo concorrente e de dois estágios, da Marca TERMOQUIP, modelo CD 40.

A Figura 7 mostra a unidade de gaseificação instalada na UNIOESTE.



Figura 7- Unidade de gaseificação instalada no laboratório de Bioenergia

A biomassa utilizada no gaseificador foi resíduos de madeira de uma serraria localizada na cidade de Cascavel, PR. A madeira utilizada foi a *Mazilaurus Itaúba*, mais conhecida como Itaúba. O valor calorífico da Itaúba, de acordo com QUIRINO *et al.* (2005) é de 22kJ kg^{-1} . Algumas especificidades na geração de gás foram seguidas, como a umidade da madeira conduzida para o sistema de gaseificação, que, de acordo com Fávero *et al.* (2007), não deve ser superior a 20%, para evitar grandes perdas na eficiência energética do gás produzido. Outra especificação foi relacionada com as dimensões das peças de madeira que alimentam o reator, não sendo menor do que 5,0 centímetros e nem maior que 10 centímetros para garantir um bom fluxo no reator.

O motor gerador ciclo Otto utilizado foi da marca BRANCO de 13 cv de potência e 6,5 kVA/5,5 KVA de potência nominal, com tensão de saída de 120/240 V monofásico. Para que o motor-gerador trabalhasse com gás como combustível foi necessário realizar uma adaptação junto à aspiração do ar com um venturi. Assim o motor recebe na fase de admissão juntamente ar + gás de gaseificação.

A Figura 8 mostra o motor-gerador utilizado no ensaio.



Figura 8 – Motor-gerador utilizado no ensaio.

A simulação da carga no gerador foi realizada por meio de um banco de resistências, cujas potências foram controladas por meio de um painel. O banco simulou as seguintes faixas de potência: 0,5 kW; 1,0 kW; 1,5 kW; 2,0 kW; 2,5 kW. As cargas para os testes com gasolina foram elevadas até 5,0 kW. O aumento das cargas ocorreu para os dois combustíveis até o movimento de pré-ignição.

A Figura 9 mostra o banco de resistência utilizado para a simulação das cargas.



Figura 9 – Banco de resistências.

O gás de síntese era produzido no gaseificador, passava pelo ciclone e por um filtro de manga para a retirada de material particulado. Segundo a Termoquip Ltda (2007), a quantidade de material particulado é menor que 10 mg/Nm^3 , na saída do filtro de mangas, compatível com aplicações em motores alternativos de combustão interna. Logo após, era encaminhado ao resfriador. Nesse componente, o gás era resfriado para ser encaminhado ao gasômetro.

A Figura 10 mostra a montagem do experimento no laboratório de bioenergia.

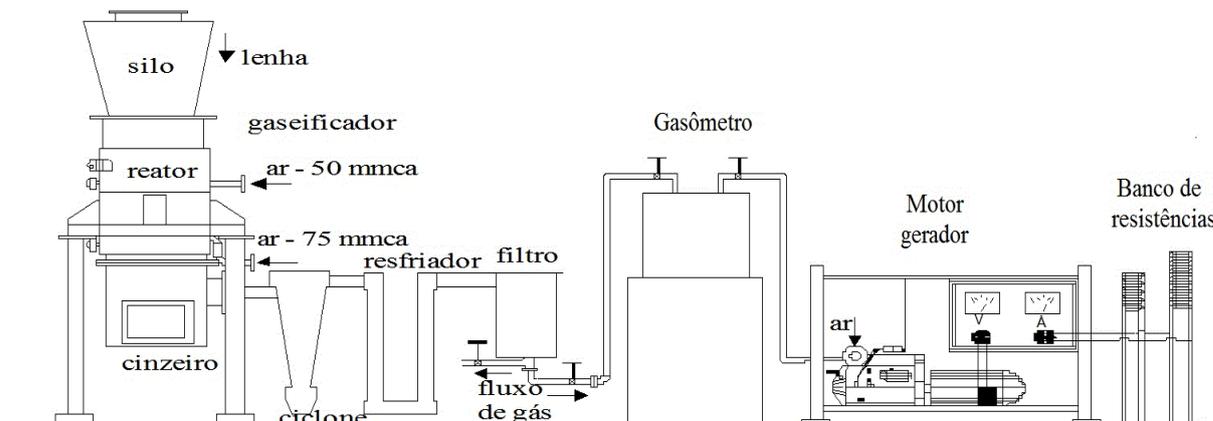


Figura 10 – Montagem do experimento

O gasômetro armazenava o gás para controle de fluxo tanto no movimento de enchimento quanto de esvaziamento, para determinação tanto da produção quanto do consumo de gás de síntese. O gás era direcionado para o motor através de uma válvula do tipo T que era responsável pela mistura ar/gás.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA UTILIZADA

O teor de umidade da madeira pode ser definido como a quantidade de água presente na madeira expressa em percentagem com relação ao peso da madeira seca (WOOD HANDBOOK, 1968), e pode ser escrita como:

$$U = \frac{W_u - W_o}{W_o} \times 100 (\%) \quad \text{Eq. 1}$$

onde,

W_u - representa o peso do material com o conteúdo de umidade (%);

U – original (kg) e;

W_o - o peso do material após secagem (kg).

Desta forma obteve-se o conteúdo de umidade na base seca. Para determinação da umidade em base úmida, a diferença entre o peso da amostra antes e depois da secagem foi dividida pelo peso inicial da madeira.

O levantamento do valor calorífico do combustível foi realizado no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Cascavel/PR.

Para determinação da umidade e do poder calorífico da madeira a mesma foi processada em pequenas partículas e seca numa estufa a uma temperatura de 105 °C, até peso constante. Para a determinação do poder calorífico da madeira foi utilizado um calorímetro de bomba modelo E2K. Sendo o procedimento descrito a seguir:

- Preparação da amostra: as amostras foram separadas em aproximadamente 0,5 g do combustível analisado em um recipiente adiabático (Figura 11a);
- Após o preparo inicial da amostra o recipiente metálico foi pressurizado por uma bomba (Figura 11b) à pressão de 30 atm (3,04 MPa);
- Com o recipiente pressurizado levou-se ao calorímetro E2K (Figura 11c). O recipiente com a amostra foi acoplado em um fio de ignição, chamado de fio de queima.

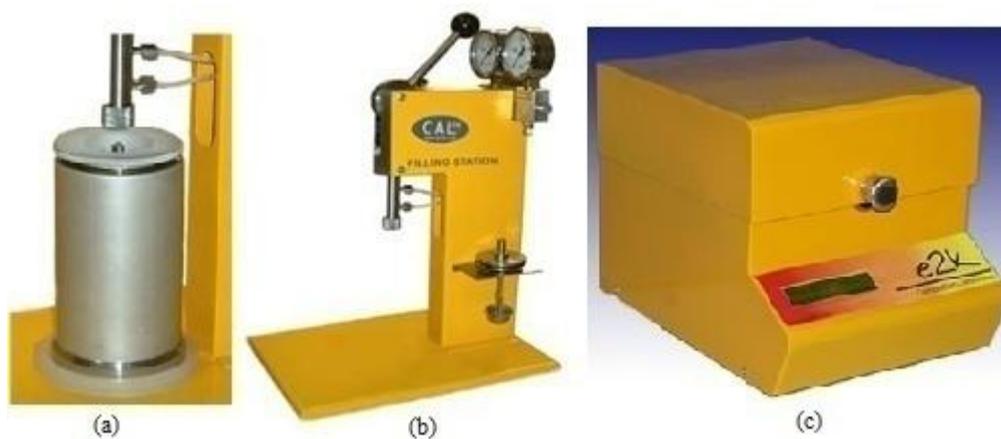


Figura 11 - Recipiente adiabático (a); Pressurizador (b); calorímetro (c).

Deste modo se determinou o poder calorífico superior do combustível. Os ensaios em que a combustão foi incompleta foram desprezados. O poder calorífico inferior em base de trabalho (PCI) foi determinado a partir da equação, apresentada por Cortez *et al.* (2008).

$$PCI = PCS - X.(W + 0,09.H.(1 - W)) \quad \text{Eq. 2}$$

onde,

PCI - Poder calorífico inferior em base de trabalho, em kJ kg^{-1} .

PCS - Poder calorífico superior em base de trabalho, em kJ kg^{-1} .

X - Calor latente da água (2310 kJ/kg a 25°C).

W - Umidade da biomassa em base de trabalho em %.

H - Conteúdo de hidrogênio no combustível em base seca, em % mássica.

O poder calorífico inferior em base de trabalho (PCI), foi determinado considerando para seu cálculo, um conteúdo de hidrogênio em base seca de 6% (SILVA, 2001).

3.3 METODOLOGIA PARA CONSUMO DE MADEIRA DO GASEIFICADOR

O consumo de madeira foi determinado com a utilização de uma balança de precisão e um cronômetro digital. A madeira era pesada antes de ser colocada no gaseificador. A cada teste, o nível máximo de capacidade de madeira do gaseificador era preenchido de maneira que o consumo era determinado durante a reposição. O tempo de funcionamento do gaseificador era cronometrado enquanto ocorria a produção de gás. A equação mostra o cálculo utilizado para obtenção do consumo de madeira do gaseificador em relação ao intervalo de tempo:

$$Cm = \frac{M}{\Delta t} \quad \text{Eq. 3}$$

em que,

Cm – Consumo de madeira em relação ao tempo, kg s^{-1} ;

M – Quantidade de madeira consumida, kg ;

Δt – Tempo de funcionamento do gaseificador, s ;

3.4 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE GÁS DO GASEIFICADOR

Para obtenção da capacidade de produção média de gás do gaseificador e o consumo de gás durante os testes com o conjunto motor-gerador, foi utilizado um tanque de armazenamento (gasômetro), o qual possui suas dimensões volumétricas

especificadas. Conforme ocorre o enchimento e o esvaziamento foi possível verificar a produção e o consumo de gás, respectivamente. Com um cronômetro digital mediu-se o tempo entre um intervalo de medição e outro, a fim de obter o fluxo de volume horário de gás. Para análise da produção de gás considerou-se o enchimento do gasômetro. A equação mostra o cálculo utilizado para obtenção da produção de gás de gaseificação num intervalo de tempo durante o teste:

$$P = \frac{V_f - V_i}{\Delta t} \quad \text{Eq.4}$$

em que,

P – Produção média de gás, m^3/s^{-1} ;

V_f – Volume final do gasômetro, m^3 ;

V_i – Volume inicial do gasômetro, m^3 .

Δt – Intervalo de tempo, s.

3.5 RENDIMENTO DE GÁS

O rendimento de gás diz respeito a quantidade de gás produzido pelo gaseificador por unidade de massa da madeira consumida. Esse valor depende do tipo de gaseificador, das condições de operação do mesmo e das condições da biomassa utilizada.

A equação mostra o cálculo utilizado para obtenção da produção média de gás de gaseificação em relação ao consumo médio de madeira do gaseificador para um intervalo de tempo:

$$PMG = \frac{P \times \Delta t}{M} \quad \text{Eq.5}$$

em que,

PMG – Produção média de gás em relação à quantidade de madeira consumida, m^3/kg ;

P - Produção média de gás, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$;

T – Tempo de funcionamento do gaseificador, s;

M – Massa de madeira consumida, kg.

3.6 METODOLOGIA PARA EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR

Um fator importante na determinação do funcionamento de um sistema de gaseificação, bem como a viabilidade econômica de utilizar um sistema gaseificador, é a eficiência da gaseificação. Para o cálculo da eficiência considerou-se a média de produção de gás no gaseificador. O PCI utilizado do gás foi o mesmo que Martinez (2009) em estudo semelhante obteve, $4,53 \text{ MJ Nm}^{-3}$. Para obtenção dos resultados da eficiência considerou-se a variação do consumo de madeira em 3 (três) ensaios. Uma definição útil da eficiência de gaseificação se o gás é utilizado para aplicações de motores é a seguinte (FAO, 1993):

$$n = \frac{H_g \times M_g}{H_s \times M_s} (\%) \quad \text{Eq.6}$$

na qual,

n = Eficiência de gaseificação = (%) (mecânica);

H_g = Valor de aquecimento do gás (kJ m^{-3});

Q_g = Fluxo de volume de gás ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

H_s = Aquecimento inferior da biomassa (kJ kg^{-1});

M_s = Consumo de combustível sólido (kg s^{-1});

3.7 MOTOR UTILIZADO

A tabela abaixo mostra as especificações do motor utilizado no experimento. O modelo do equipamento é Geradores 4T - B4T-6500 L / B4T-6500 LE.

Tabela 7– Especificações do motor-gerador utilizado.

Equipamento	Motor-gerador Branco
Motor	13 cv 4 tempos
Combustível	Gasolina
Potência máxima	5,5 kVA
Potência nominal	5,0 kVA (regime contínuo)
Tensão de saída	110 ou 220 V
Capacidade do tanque	25 litros
Peso	82 kg
Fases	Monofásico
Ruído	76 DbA
Dimensões(CxLxA)	680x540x550 mm

3.8 DESEMPENHO DO MOTOR-GERADOR COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO

A avaliação operacional do motor com o gás pobre de gaseificação de biomassa foi desenvolvida com base na identificação do ponto de maior rendimento do gaseificador em termos de estabilidade e qualidade do gás produzido, condições que ocorrem para temperatura do leito próxima a 900 ° C. Assim, uma vez que o gaseificador atingia o regime, procedia-se à operação de enchimento do gasômetro, onde era armazenado o gás produzido, para logo depois utilizá-lo no motor.

O controle de fluxo de gás na entrada do motor era variado manualmente conforme a carga, através de duas válvulas. Uma para controle de entrada de gás e a outra para a entrada de ar. Isso permitiu o controle de entrada da mistura ar/combustível adequada, de acordo com a necessidade da carga aplicada ao motor.

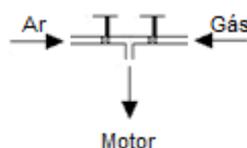


Figura 12 - Controle de entrada da mistura ar/combustível.

Para obtenção do consumo de gás durante os testes com conjunto motor-gerador, foi utilizado um tanque de armazenamento (gasômetro), o qual possuía suas dimensões volumétricas especificadas conforme ocorria o deslocamento. Com um cronômetro digital contou-se o tempo entre um intervalo de medição e outro, a fim de obter o consumo horário de gás (fluxo de volume). A equação mostra o cálculo do consumo de gás de gaseificação num intervalo de tempo durante o teste:

$$Cons = Vi - Vf \quad \text{Eq.7}$$

em que,

Cons – Consumo de gás, m³;

Vi – Volume inicial do gás, m³, medido no gasômetro;

Vf – Volume final do gás, m³, medido no gasômetro.

A avaliação do consumo específico de gás (CEG) foi determinada em função

da variação da carga do motor gerador utilizando como combustível o gás de gaseificação de madeira. A equação mostra o cálculo do consumo específico de gás de gaseificação num intervalo de tempo:

$$CEG = \frac{3600 \times Cons}{V \times I \times \Delta t} \quad \text{Eq.8}$$

em que,

CEG – Consumo Específico de gás, $\text{m}^3 \text{kWh}^{-1}$;

Cons – Consumo do gás para um determinado tempo, m^3 ;

V – Tensão de saída, V;

I – Corrente elétrica A;

Δt – Período de tempo de um ensaio, s.

A entrada de energia total para o gerador para cada potência foi quantificada como o produto da taxa de fluxo e o poder calorífico inferior do combustível. A capacidade energética do gás utilizada no cálculo foi de $4,53 \text{ MJ m}^{-3}$, obtido por Martinez (2009) que realizou experimento semelhante. Assim, a eficiência global do gerador foi determinada para cada potência.

$$E = \frac{P}{P_{c.F}} (\%) \quad \text{Eq.9}$$

em que,

E - Eficiência global – (%);

P - Potência elétrica de saída – kW;

P_C - Poder calorífico inferior do combustível – kJ m^{-3} ;

F - Fluxo de combustível – $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

3.9 METODOLOGIA PARA O CONSUMO ESPECÍFICO DE MADEIRA

Com a determinação da produção média de gás em relação à quantidade de madeira consumida (PMG) e do consumo médio de gás (*Cons*), para as cargas aplicadas ao motor-gerador, foi possível a determinação do consumo de madeira equivalente ao gás consumido pelo motor. A equação mostra o cálculo do consumo equivalente de madeira num intervalo de tempo em relação ao volume de gás

consumido:

$$CEM = \frac{3600 \times M}{V \times I \times \Delta t} \quad \text{Eq.10}$$

em que,

CEM – consumo específico equivalente de madeira consumida, kg kWh⁻¹;

M - Consumo médio de madeira para um determinado volume de gás consumido pelo motor, kg;

V – Tensão de saída, V;

I – Corrente elétrica A;

Δt – Tempo de funcionamento do motor, s.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PODER CALORÍFICO DA MADEIRA

Os ensaios foram realizados com amostras de madeira que foram ensaiadas no gaseificador. Na Tabela 8, apresentam-se os resultados da determinação do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e umidade obtidos nos ensaios de três amostras de biomassa.

Tabela 8 – Poder calorífico da madeira utilizada no gaseificador.

Ensaio	UMIDADE (%)	UMIDADE (%)	PODER CALORÍFICO SUPERIOR	PODER CALORÍFICO INFERIOR
	(Base úmida)	(Base seca)	(MJ kg ⁻¹)	(MJ kg ⁻¹)
1	16,3	19,48	18,247	17,786
2	16,81	19,6	18,13	17,667
3	16,8	19,21	18,281	17,827

Os resultados para o poder calorífico da biomassa utilizada foram semelhantes para as amostras. O poder calorífico inferior médio foi de 17,76 MJ kg⁻¹. O teor de umidade está adequado ao recomendado pela literatura, menor que 20%. Martinez (2009) em seu trabalho sem especificar o tipo de madeira encontrou um valor de PCI semelhante, um valor médio 18,24 MJ kg⁻¹ para o poder calorífico superior e 10,32 % de umidade em base úmida.

4.2 CONSUMO DE MADEIRA NO GASEIFICADOR

O consumo de madeira no gaseificador foi medido com base no tempo de utilização do gaseificador em cada operação. A figura abaixo mostra a curva de tendência obtida com os dados dos ensaios, demonstrando o consumo de madeira em relação ao tempo, conforme o coeficiente de correlação da reta.

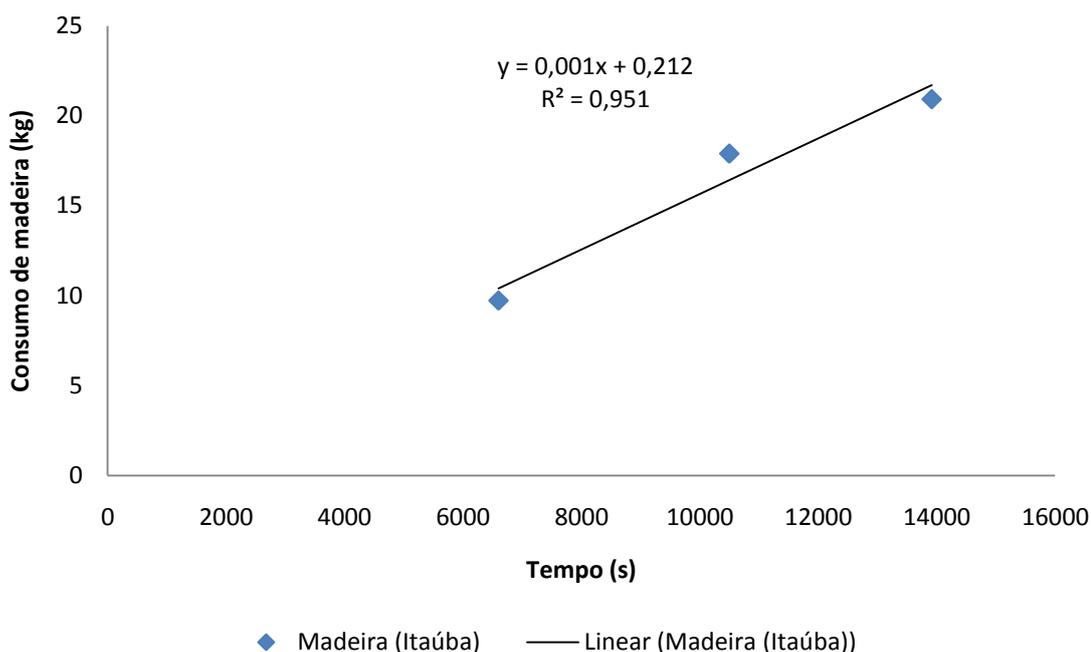


Figura 13 - Consumo de madeira X Tempo de utilização do gaseificador.

Observa-se através da figura que o consumo de madeira é explicado linearmente pelo tempo em 95,1 % ($R^2 = 0,951$). O consumo variou entre 5,3 kg h⁻¹ e 6,1 kg h⁻¹. O consumo de madeira médio foi de 5,61 kg h⁻¹.

Desta forma, pode-se interpretar que houve a ocorrência de diferença para o consumo de madeira entre os ensaios. Essa diferença pode ser explicada pela variação constante da entrada de ar no gaseificados para o controle da temperatura.

Figueiredo (2012), testando um gaseificador de maior capacidade, concorrente e de dois estágios, obteve diferentes consumos de madeira variando a entrada de ar. Em seus ensaios, o mesmo autor obteve médias de consumo de 40 kg h⁻¹, 46,36 kg h e 50 kg h⁻¹.

4.3 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE GÁS NO GASEIFICADOR

A tabela 9 apresenta os testes para a determinação da produção de gás de gaseificação num intervalo de tempo.

Tabela 9 - Quantificação da produção de gás e consumo de madeira.

Ensaio	Volume (m³)	Tempo (s)	Produção de gás (m³ h⁻¹)	Consumo de Madeira (kg h⁻¹)
1	1,1455	279	14,76	6,1
	0,9939	265	13,68	
	0,6975	184	13,68	
2	0,6539	173	13,68	5,3
	1,4647	360	14,76	
	0,6626	162	14,76	
3	1,0113	254	14,4	5,4
	0,837	213	14,04	
	0,8544	210	14,76	

O fluxo de gás foi dado pelo volume preenchido no gasômetro em relação ao tempo. Durante os testes, a produção de gás variou entre 13,68 m³ h⁻¹ e 14,76 m³ h⁻¹. A média de produção de gás foi de 14,28 m³h⁻¹.

A figura abaixo mostra a curva de tendência obtida com os dados dos ensaios, demonstrando a linearidade da produção de gás de gaseificação em relação ao tempo, conforme o coeficiente de correlação da reta.

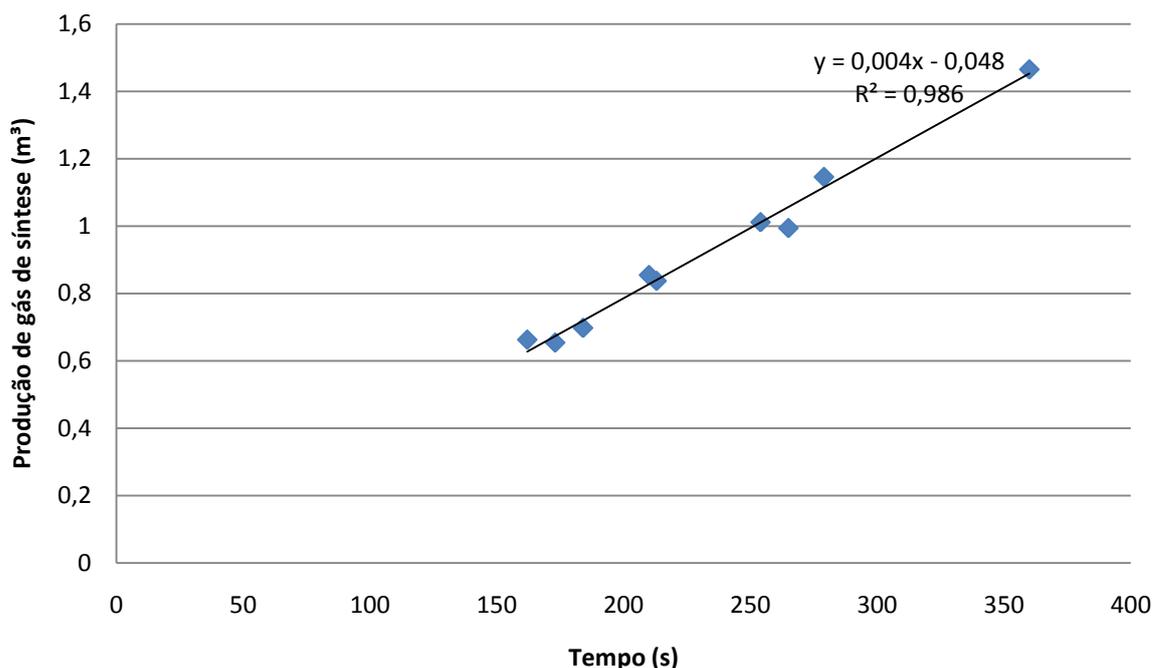


Figura 14 - Produção de gás de síntese X Tempo de utilização do gaseificador

Observou-se que a produção de gás de gaseificação é explicada linearmente pelo tempo em 98,6% ($R^2 = 0,986$). Verificou-se pequena variação na produção de gás, que pode ser explicada pela alteração constante no fluxo de ar de entrada para o controle da temperatura dentro do leito.

Durante os ensaios não se avaliou o desempenho do gaseificador quanto a variação da produção de gás e a relação ar-combustível. Essas alterações na entrada de ar são as causas mais prováveis para os resultados de produção de gás variáveis. Segundo Natarajan *et al.* (1998), a produção de gás tem uma relação diretamente proporcional com a vazão de ar alimentada.

Zainal *et al.* (2002) em seu experimento com um gaseificador concorrente verificou que a produção de gás varia com a alteração na quantidade de ar fornecido para o processo. Em seus estudos, o mesmo autor verificou que a taxa de produção de gás diminui com o aumento da razão de equivalência ar-combustível.

4.4 RENDIMENTO DE GÁS

O rendimento de gás para unidade de massa consumida em função do tempo em diferentes ensaios está mostrado na figura 15.

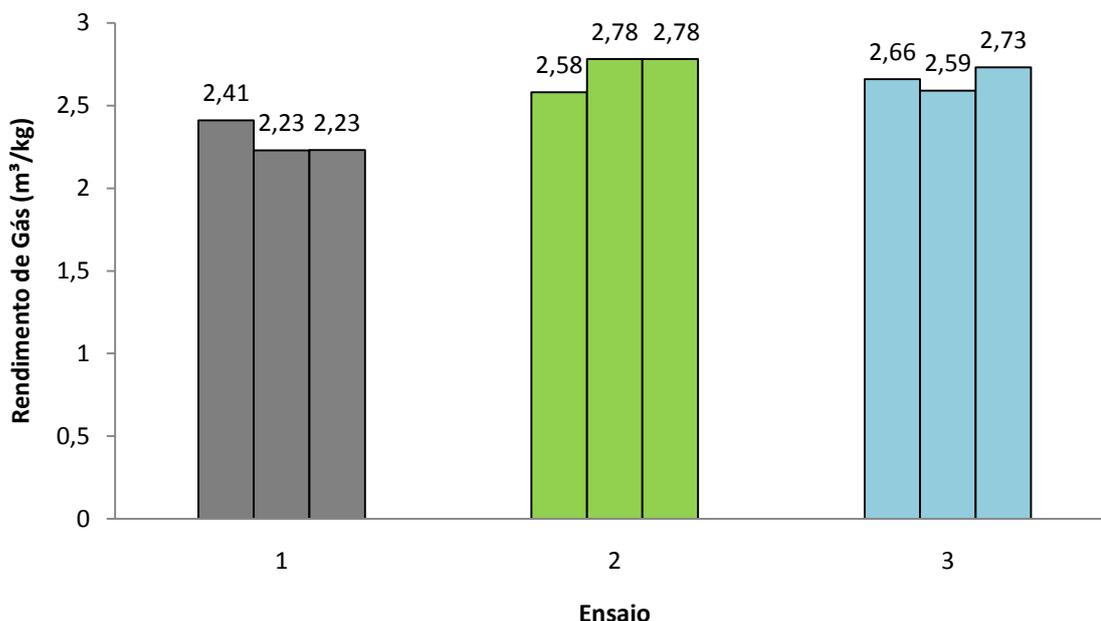


Figura 15 - Rendimento de gás em diferentes ensaios

Houve uma variação de rendimento de gás entre $2,23 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e $2,78 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. A média de rendimento foi de aproximadamente $2,55 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Com isso podemos verificar que durante os ensaios a produção de gás de síntese por unidade de massa (kg) variou.

Segundo Zainal *et al.* (2002) a taxa de produção de gás por unidade de peso do combustível varia conforme altera-se a relação de equivalência do ar-combustível. Em seus estudos com um gaseificador concorrente, o mesmo verificou que a taxa de gaseificação aumenta linearmente com o aumento do fornecimento de ar por unidade de peso do combustível. Como nos experimentos o fluxo de alimentação de ar foi variável obteve-se rendimentos diferentes.

O resultados obtidos nesse experimento também são próximos aos encontrados por Martinez *et al.* (2011) que realizaram experimento semelhante, apresentaram rendimento entre $2,6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e $2,8 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Shapfer e Tobler (1937) que em média 1 kg de biomassa produziu cerca de $2,5 \text{ m}^3$ de gás nas CNTP. Já num gaseificador contracorrente, Fontes (1981), apud nascimento (1991), a quantidade de gás produzido foi cerca de 2,2 a $2,4 \text{ m}^3$ de gás por quilo de madeira seca. Reed e Das (1988) realizaram testes com protótipos de gaseificadores concorrente variando a entrada de ar e o tamanho do equipamento. O rendimento de

gás calculado a partir da produção média de gás e o consumo médio de madeira variaram entre 2,09 e 2,14 m³ kg⁻¹.

4.5 EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR

A eficiência de gaseificação da madeira obtida nos ensaios está apresentada na figura abaixo.

Tabela 10 - Eficiência de gaseificação em diferentes ensaios.

Ensaio	Eficiência (%)
	61,3
1	56,8
	56,8
	65,7
2	70,9
	70,9
	67,8
3	66,1
	69,5

A eficiência de gaseificação variou entre 56,8 % e 70,9 %. A eficiência média ficou em aproximadamente 57,2 %. Os melhores resultados para a eficiência de gaseificação foram obtidos nos ensaios 2 e 3.

Para o cálculo da eficiência também utilizou-se o poder calorífico do gás da literatura. Sendo assim, a variação da eficiência dependeu do poder calorífico da madeira, do fluxo de volume do gás e do consumo de madeira que variam com a relação de ar-combustível do processo. O poder calorífico da madeira foi praticamente constante nos 3 (três) ensaios. Por isso, como pode ser visto nos ensaios, a eficiência teve o mesmo comportamento de variação que o rendimento de gás.

Segundo Goswami (1986) a eficiência de conversão de

energia média de gaseificadores de madeira é de cerca de 60-70%. Sheth & Babu. (2009), testando um gaseificador concorrente com madeira residual obteve uma eficiência de 55%. Já Wander *et al.* (2004) testou madeira (sawdust) num gaseificador concorrente e atigiu 62,5% de eficiência. Já Martinez *et al.* (2011) obtiveram uma eficiência média de gaseificação de aproximadamente 67%.

4.6 DESEMPENHO DO MOTOR-GERADOR COM GÁS DE GASEIFICAÇÃO

A figura 16 mostra o desempenho do gerador em relação à variação das cargas com o auxílio do banco de resistências. Os ensaios com o grupo gerador foram efetuados tanto com a gasolina quanto para o gás de síntese.

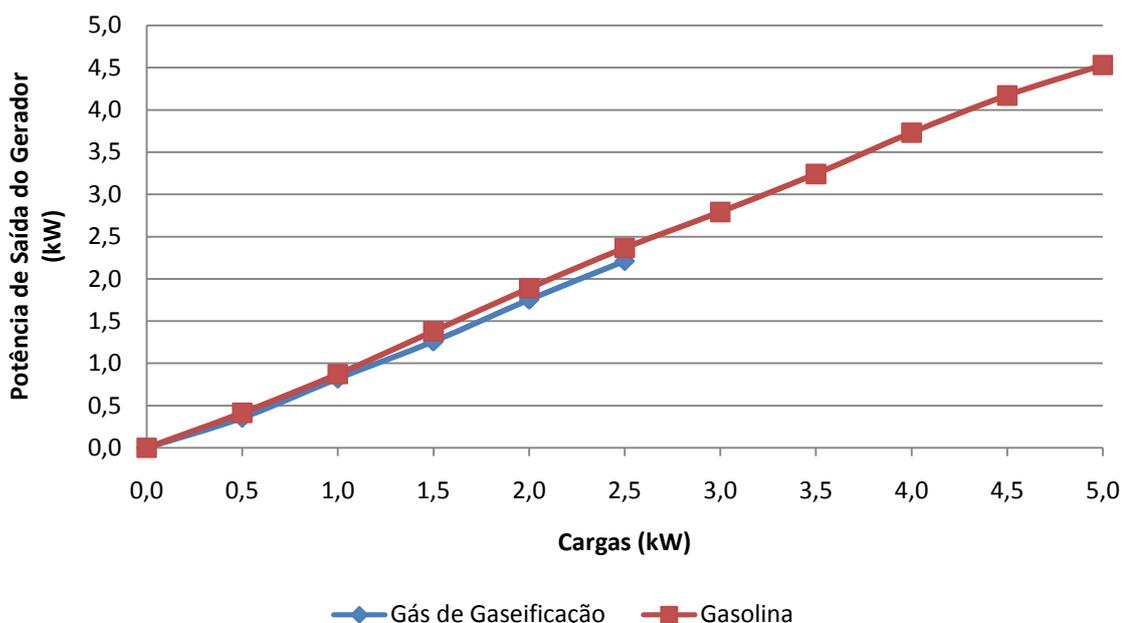


Figura 16 – Potência de saída do gerador.

Através do gráfico, pode-se observar a variação máxima de 0,16 kW entre os dois combustíveis até a carga de 2,5 kW. A potência de saída do gerador utilizando gás de gaseificação, até a carga de 2,5 kW, foi em média 8,5% menor que utilizando gasolina. Com uso do gás a potência de máxima atingida foi 2,21 kW aplicando-se a carga de 2,5 kW. A potência máxima atingida com gasolina foi de 4,53 kW, para uma carga de 5,0 kW. A carga que o gerador suportou enquanto o motor utilizava gás de síntese foi de 50% em relação a capacidade máxima do gerador. Para o ensaio não

foram feitas alterações no motor. A potência máxima gerada com uso de gás de síntese representou 48,7% da atingida com a gasolina, uma redução de 51,1 % de capacidade de geração de energia.

Segundo Figueiredo (2012), o motor de ignição a centelha (Ciclo Otto), não é necessário um combustível auxiliar para a combustão do gás, mas o motor tem seu desempenho muito prejudicado se sua taxa de compressão não for adequada ao gás. Segundo Sridhar (2003), em geral, a perda de potência quando é utilizado o gás de gaseificação de biomassa num motor alternativo de combustão interna (MACI), é atribuída à redução no poder calorífico da mistura gás/ar, e o número de moléculas dos produtos da combustão. Do mesmo modo e de acordo com Lapuerta *et al.* (2001), a potência no motor está limitada pelo volume da mistura gás/ar que entra no cilindro do motor.

Em experimento com um motor adaptado a ciclo Otto e com um gerador acoplado, utilizando gás de síntese, Figueiredo (2012) obteve resultados próximos, atingiu 54,1% da capacidade máxima do gerador (FOSSUM *et al.* 2001 apud MURARO, 2006) quantificam a redução em aproximadamente 30% e sugerem modificações para otimizar o seu uso, como aumentar o diâmetro das válvulas, a altura dos pistões e a taxa de compressão, por exemplo.

A tabela 11 mostra o desempenho do motor-gerador com gás de síntese.

Tabela 11 - Desempenho do motor-gerador utilizando gás de síntese.

Carga (kW)	Tensão(V)	Corrente (A)	Consumo (m³h⁻¹)
0	223,0	0,0	6,1
0,5	222,0	1,6	6,8
1	221,0	3,7	9,3
1,5	221,0	5,7	9,7
2	222,0	7,9	10
2,5	221,0	10,0	10,6

Verificou-se comportamento ascendente do consumo de gás. Para a maior carga, 2,5 kW, o consumo de gás foi de 10,6 m³ h⁻¹. Quando alimentado com gás de síntese, a tensão se manteve dentro dos padrões estabelecidos pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2008), variando somente entre 221 e 223 V, quando é permitida a variação entre 221 a 229 V. A frequência esteve sempre

dentro do recomendado em 60 Hz.

O aumento do consumo de gás apresentou comportamento crescente conforme o aumento das cargas. A produção de gás de gaseificação foi suficiente para fornecer combustível ao motor-gerador. Houve um excedente de $3,68 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, que poderia ser usado para outro fim. Uma alternativa seria dimensionar um motor com maior capacidade para ter melhor aproveitamento do gás.

A figura 17 mostra o Consumo específico de gás de gaseificação (CEG) para as cargas indicadas.

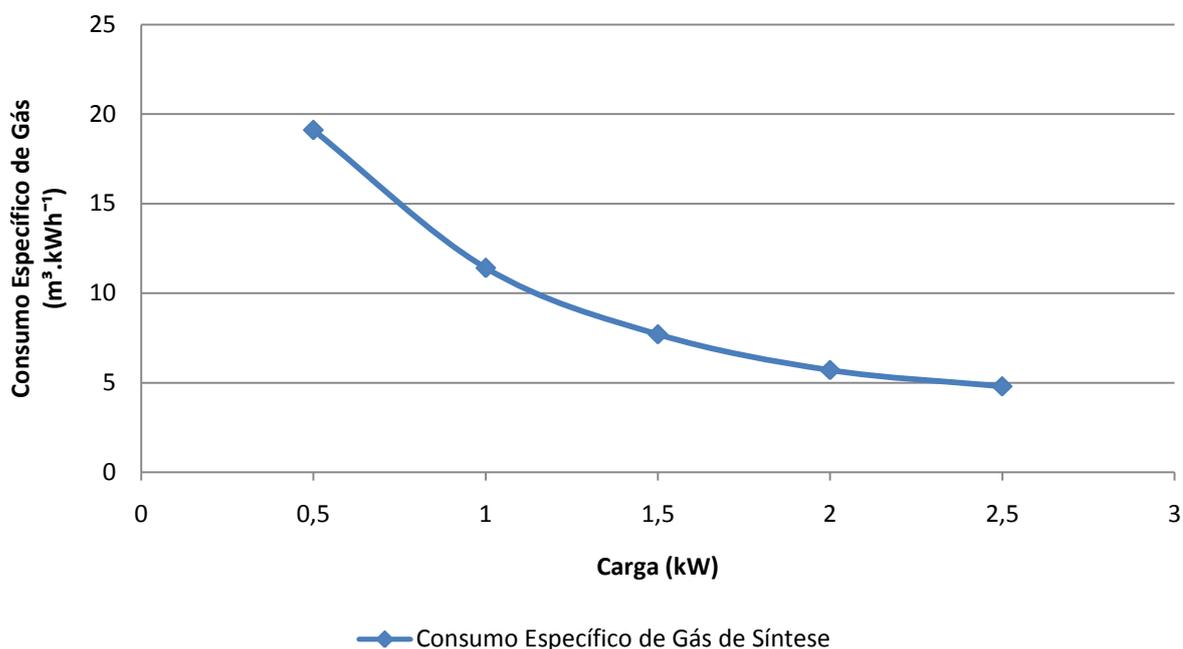


Figura 17- Consumo específico de gás de síntese.

Foi observado que para cargas maiores o consumo específico foi menor, ou seja, o desempenho do motor em cargas baixas é pior. O melhor resultado foi observado para a carga de 2,5 kW, com uma média de consumo específico de gás de $4,8 \text{ m}^3 \text{ kWh}^{-1}$.

Tendo em vista que a capacidade de produção de gás do gaseificador em relação ao consumo de madeira foi, em média, de $2,55 \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$ foi possível obter o consumo específico equivalente de madeira para as cargas aplicadas ao gerador. A figura 18 mostra a relação do consumo específico equivalente de madeira consumida com a potência de saída do gerador.

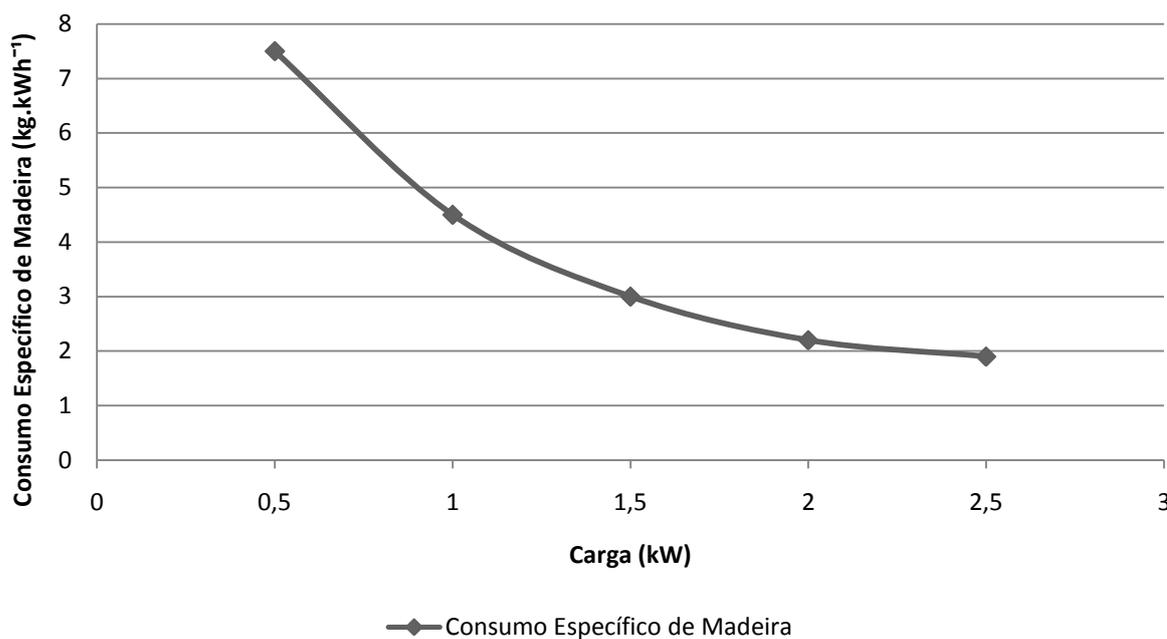


Figura 18 - Consumo específico de madeira.

Foi observado que para cargas maiores o consumo específico foi menor, ou seja, consegue-se ter um melhor aproveitamento da energia do gás proveniente da madeira. O melhor resultado foi observado para a carga de 2,5 kW, com consumo específico de madeira de aproximadamente 1,9 kg kWh⁻¹.

Como observado nas figuras 17 e 18, os valores de consumo específico tanto do gás quanto da madeira tiveram um comportamento descendente em relação ao aumento das cargas no gerador. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da eficiência do motor-gerador, que pode ser visto na figura 19. Sendo assim, a obtenção de bons resultados dependeu do aumento das cargas.

Cargas maiores, mais próximas da potência nominal do gerador não estabilizaram os valores de tensão e corrente, condição apropriadamente atribuída à dificuldade de encontrar a relação adequada ar + gás de gaseificação e ao baixo poder calorífico do gás, sendo observado nestas circunstâncias o comportamento de pré-ignição.

O resultado é semelhante ao encontrado por Figueiredo (2012), que testou um gaseificador concorrente e um motor-gerador de grande capacidade e encontrou 1,88 kg kWh⁻¹.

Para um sistema gaseificador/motor de combustão de 10-25 kW desenvolvido pela empresa Community Power Corporation (CPC), conjuntamente

com o National Renewable Energy Laboratory (NREL) do Departamento de Energia dos Estados Unidos, o consumo específico de biomassa foi de $1,5 \text{ kg kWh}^{-1}$ (TMU, 2003).

A figura abaixo mostra a eficiência global do motor-gerador em função da potência gerada.

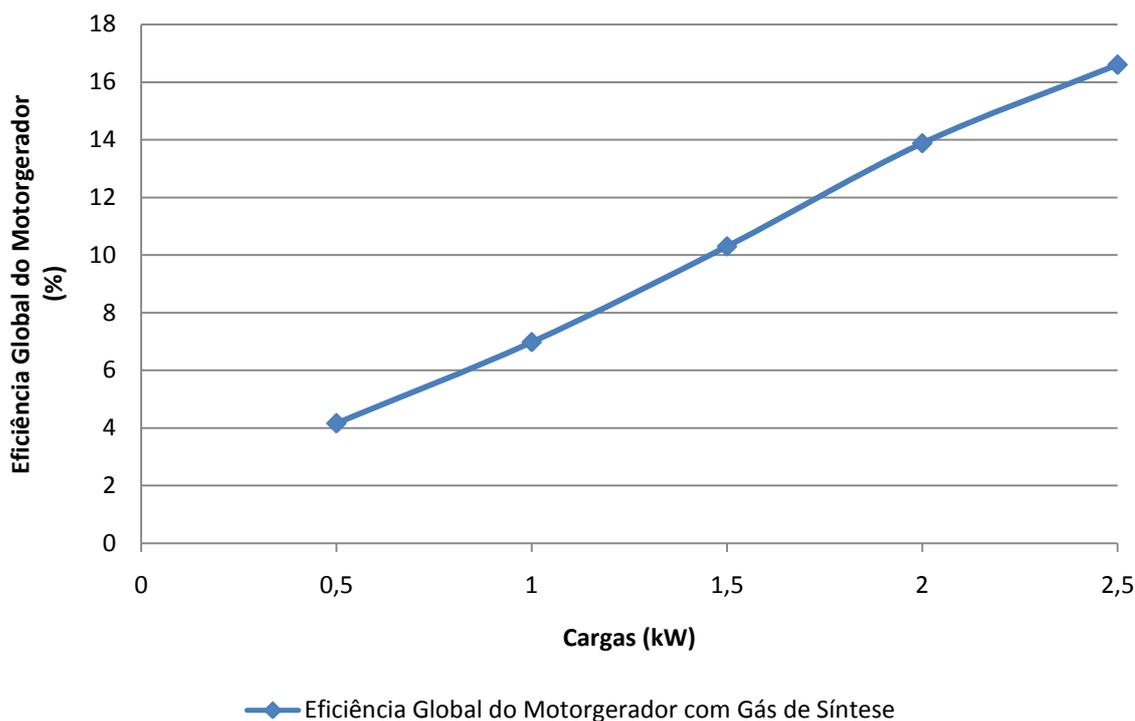


Figura 19 - Eficiência global do conjunto motor-gerador.

A eficiência global do conjunto motor-gerador teve um comportamento ascendente em função do aumento da carga. A eficiência variou de 4,2% para a menor carga e 16,6 % para a maior carga atingida, 2,5 kW, que representou o melhor desempenho.

A baixa densidade energética do gás de síntese e a dificuldade em encontrar uma relação ar-combustível ideal podem ter sido a principal causa dos resultados de eficiência.

Para Goswami (1986), um valor de 15-20% pode ser usado como a eficiência de motores de ignição quando alimentados com gás de gaseificação.

Esse tipo de sistema pode ser utilizado para gerar energia elétrica em pequenas propriedades e em locais não servidos por rede de energia. Poderia ainda

substituir outros combustíveis como a gasolina ou gerar energia em indústrias que apresentam resíduos de madeira caracterizando um sistema de racionalização de energia.

5. CONCLUSÕES

A utilização de madeira do tipo *Itaúba Mazilaurus* com umidade e granulometria recomendada pela literatura, permitiu a obtenção de bons resultados nos ensaios.

A produção de gás média resultante da gaseificação de madeira apresentada durante os testes foi de $14,28 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

O consumo de madeira apresentou uma média de $5,61 \text{ kg/h}$.

A média de rendimento de gás por unidade de massa foi de aproximadamente $2,55 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$.

A eficiência de gaseificação média foi de $57,2 \%$.

Quando alimentado com gás de síntese, a tensão de saída do gerador se manteve dentro dos padrões estabelecidos pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2008), variando somente entre 221 e 223 V.

Em relação aos testes com o motor-gerador, a melhor condição ocorreu para a maior carga, $2,5 \text{ kW}$, onde o consumo de gás foi cerca de $10,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e o consumo específico de combustível de $4,8 \text{ m}^3 \text{ kWh}^{-1}$. Para essa condição, a média de consumo específico equivalente de madeira foi de $1,9 \text{ kg kWh}^{-1}$ e a eficiência global do motor-gerador foi de $16,6 \%$.

6. REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição. Brasília, 2008. 236p.

APOLINARIO, Sandra Maria. **Geração de eletricidade em comunidades isoladas na região amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 185p.

BIASI, C.P.; **Rendimento e eficiência no desdobro de três espécies tropicais**. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BOERRIGTER H., RAUCH R. **Review of applications of gases from biomass gasification**. ECN Biomass, Coal and Environmental Research, Holanda, 2006.

BORGES, A.S. ET alli, 1993, **“Considerações Energéticas e Econômicas sobre Resíduos de Madeira processada em Serraria”** – in: Anais do 1 Congresso Florestal Pan-americano e 7 Congresso Florestal Brasileiro (1993). Curitiba, PR: SBS – SBEF, 603-606p.

BRIDGEWATER, A.V., **“Review of thermochemical biomass Conversion”**. ESTU B1202. Crown. 1991.

BRITO, O. J. **O uso energético da madeira**. Estudos avançados 21 (59), 2007. Disponível em: www.scielo.br/pdf/%0d/EA/v21n59/a14v2159.pdf; Acesso em: 14 fev. 2012.

CENBIO – CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Estado da arte da gaseificação**. São Paulo, 2002, 108p.

COPEL. NTC 901100. **Fornecimento em tensão secundária de distribuição**. Normas Técnicas COPEL; Coordenação de Comercialização de Energia - CCD, Coordenadoria de Procedimentos e Tecnologia de Medição – CNMD, 2008.

Disponível

em:<[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/159BA3974D2CFCBE032575CF00456FD6/\\$FILE/revisao_06042009-bt.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/159BA3974D2CFCBE032575CF00456FD6/$FILE/revisao_06042009-bt.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2012.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP. Editora da UNICAMP, 2008.

CORREA NETO, V., **Análise de viabilidade da Cogeração de Energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana de açúcar e gás natural**. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético /COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 2001.

DUTRA, R.I.J.P.; NASCIMENTO, S.M.; NUMASAWA, S. **Resíduos de Indústria Madeireira: Caracterização, Consequências sobre o Meio Ambiente e Opções de Uso**. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, V. 5, 2005.

ELECTO, E. S. L., ANDRADE, R.V. A. , ARADAS, E. C.A. (2004). **Geração Elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa**. V Encontro de Energia no Meio Rural p. 1-10.

ELETROBRÁS. **Plano Anual de Combustíveis – Sistemas Isolados**. Rio de Janeiro, 2009. 16p

ESCOBAR, J. C., LORA, E. S., VENTURINI, O. J., YÁÑEZ, E. E., CASTILLO, E. F., ALMAZAN, O. **Biofuels: Environment, technology and food security. Renewable And Sustainable Energy Reviews**. 13, 1275-1287. 2009.

FAO. **Wood gas as engine fuel**. FAO Forestry paper 72. 1993.

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M. **Análise Térmica de um Sistema de Combustão de Alcatrão em Fornos Retangulares para Secagem da Madeira**. In: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, 2007.

FERNANDES, Marcelo Côrtes. **Avaliação Tecno-econômica da Gaseificação do Capim-elefante para Eletrificação Rural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. 77p.

FIGUEIREDO, F. L. **Avaliação de uma unidade autônoma de produção de energia elétrica composta por sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em engenharia de edificações e saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

FONTES, P.J.P. **Auto-suficiência energética em serraria de Pinus e aproveitamento de resíduos.** 93f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 1994.

GALVAO, L. C. R. **Aspectos Energéticos da Biomassa como Recurso no Brasil e no Mundo.** In: AGRENER GD 2006 – 6o Congresso Internacional sobre Geracao Distribuida e Energia no Meio Rural, 2006, Campinas. 2006.

GOSWAMI, Y.D. **Alternative Energy in Agriculture.** CRC press,1986, pgs. 83-102.

GUIBET, J.C. **Carburantes moteurs et,** vol. 2Technip, Paris (1997)

GUIGON, P., LARGE, J.F., **“Environmental Aspects of gasification”**, Report for the Comission of European Communities, EUR 12736, 1990, pp 115-131.

HAN, J., KIM, H. **The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: an overview.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 397–416. 2008.

HARYANTO, A., FERNANDO, S. D., PORDESIMO, L. O., ADHIKARI, S. **Upgrading of syngas derived from biomass gasification: A thermodynamic analysis.** Biomass and Bioenergy 33, 882–889, 2009.

HENRIQUES, R. M. **Potencial para geração de energia elétrica no brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação.** Dissertação (Doutorado em

planejamento energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009. p.Doutorado.

HIGMAN, C., BURGT, M.V. **Gasification**. 2 edition. 2007. 428p.

IEA – International Energy Agency. World Energy Investment Outlook Natural Gas Market Review 2006, Paris: OECD, 2006.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Biomass for Power Generation and CHP**. Energy Technology Essentials, 1-4. 2007.

JUVILLAR. J.B. A madeira como combustível. CNI. **Biomassa coadjuvante na oferta total de energia**. Brasília, v.8, p. 45-53, 1984.

KINTO, O. T.; GRIMONI, J. A. B.; GALVÃO, L. C. R.; MORALES UDAETA, M. E. **Energia da gaseificação de biomassa um recurso não convencional para o desenvolvimento limpo**. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, São Pedro, 2003. Proceedings. Guaratinguetá: FEG/UNESP, 2003. p. 1-7.

KIRUBAKARAN, V., SIVARAMAKRISHNAN, V., NALINI, R., SEKAR, T., PREMALATHA, M., SUBRAMANIAN, P. **A review on gasification of biomass**. In: Elsevier Applied Science, Tamil Nadu, Índia, 2007.

LAPUERTA, M., HERNÁNDEZ, J. J., TINAUT, F. V., HORRILLO, A. (2001), **“Thermochemical Behavior of Producer Gas from Gasification of Lignocellulosic Biomass in SI Engines”**. SAE paper, 2001-01-3586.

LETTNER, F., TIMMERER, H., HASELBACHER, P. **Biomass gasification - State of the art description**. Graz University of Technology - Institute of thermal engineering, Austria, 2007. 91p.

LORA, E. S.; HADDAD, J. **Geração Distribuída Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

LORA, E.E.S. **Conceito de biomassa, classificação, disponibilidade e características.** In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 26, 1997, Campina Grande, Anais. CONBEA/SBEA, 1997. p. 97-128.

MARTINS, Lydimilla Santos. **Geração de Energia através de Biomassa.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES: UFES, 2006.

MARTÍNEZ, J. D., **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna.** Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. , Itajubá. 2009. p193.

MARTINEZ, J. D. , LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., JAEN, R. L., “**Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor,**” Biomass and Bioenergy, vol. 35, pp. 3465-3482, 2011.

MATHIEU, P., DUBUISSON, R. **Performance analysis of a biomass gasifier.** Energy Conversion and Management Vol. 43, pp. 1291-1299, 2002.

MCKENDRY, Peter. **Energy production from biomass (part 3): gasification technologies.** Bioresource Technology, Vol. 83, pp. 55-63. 2002.

MME – Ministerio da Minas e Energia, Plano Nacional de Energia 2030, **Geração termelétrica biomassa,** Brasília: EPE – Empresa de Pesquisa Energetica, V.8, 250p, 2007.

MILNE, T.A., ABATZOGLOU, N. EVANS, R.J., **Biomass Gasifier Tars: Their Nature, Formation and Conversion,** NREL/TP-570-25357,1998.

MUÑOZ, M. MORENO, F. Morea-roy, J. Ruiz, J. Arauzo, J. **Low heating value gas on spark ignition engines.** Biomass and Bioenergy, 18 (2000), pp. 431–439.

MURARO, Wilson. **Avaliação do Funcionamento de Motor Ice com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação da Casca de Arroz**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2006.

NASCIMENTO, J. W. B. **Secagem de milho utilizando energia térmica de um gasogênio de fluxo transversal descendente**. 1991. 186 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

NATARAJAN, E., NORDIN, A., RAO, A. N. (1998), “**Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in a Fluidized Bed Reactors**”, Biomass and Bioenergy, vol. 14, pp. 533-546.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199p.

NOGUEIRA, L. A., TROSSERO, M. A. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Brasília, 2000.

NOGUEIRA, M. F. M., RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**. In : MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia. 1ª Edição. Brasília, 2008. p. 52-63.

OECD/IEA – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT / INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2009**. Paris, 2009. 698p.

OLOFSSON, I; NORDIN, A.; SÖDERLINDU . **Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuel**, 2005.

OLIVEIRA, J.T.S.; FIELDLER, N.C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias Aplicadas ao Setor Madeireiro**. Cerne, v..16, número das páginas, 2007.

OLIVEIRA, E. S. DE. **Gaseificação da macaúba**. Itapetinga-BA: UESB, 2008. 77p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia de Alimentos - Fenômenos de Transferência na Agroindústria).*

ONU, **Department of international Economic and Social Affairs, Energy statistics: Definitions, Units of Measure and Conversion Factors, Studies in Methods**, Series F, N 44, United Nations, New York, 1987.

OPET FINLAND. **Review of Finnish Biomass Gasification Technologies**. Espoo, 2002. 21p.

PARIKH, J., CHANNIWALA, S.A., GHOSAL, G.K. (2005). **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels**. *Fuel*, 84, 487-494.

QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H.; **Energy from Biomass – A Review of combustion and Gasification technologies**. World Bank Technical Paper n° 422. Energy Series. Washington D.C., EUA, Março, 1999.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos**. Revista da Madeira, n° 89, 2005 p. 100-106, 2005.

REIJNDERS, L. **Conditions for the sustainability of biomass based fuel use**. Energy Policy 34, 863–876. 2006.

REED, T.B., DAS, A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems: Solar Energy Research Institute. US Department of Energy (1988).

RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M. F. M., ZÁRATE, H. **Centrais Térmicas por Gasificação**. In : MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia. 1ª Edição. Brasília, 2008. p. 88-105.

SALES, C. A. V. B; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. **Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa**. Biomassa & Energia, Campinas, SP, v. 2, n. 3, p. 145-204, 2005.

SHETH, P. N., BABU, B. V. (2009), “**Experimental Studies on Producer Gas Generation from Wood Waste in a Downdraft Biomass Gasifier**”, Bioresource Technology, vol. 100, pp. 3127–3133.

SCHAPFER, P., TOBLER, J., **Theoretical and practical investigations upon the driving of motor vehicles with good gas**. Bern, 1937.

SHARMA, A. **Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) gasifier**. Energy Conversion And Management. 49, 832-842. 2008.

SHARMA, K. A. **Experimental study on 75 kW downdraft (biomass) gasifier system**. Renewable Energy, v. 34, p.1726-1733, 2009.

SILVA, E. P., CAMARGO, J. C., SORDI, A., SANTOS, A. M. R. **Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento**. Multiciência, UNICAMP, v. I, 2003.

SILVA, M. da S.; RUGGERO, P.A. **Efeitos da Utilizacao da Energia deBiomassa sobre o meio Ambiente. 2003**.

SILVA, D. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados**. 182f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2001. (Published as a Chapter (No. 4) in book “Alternative Energy in Agriculture”, Vol. II, Ed. D. Yogi Goswami, CRC Press, 1986, pgs. 83-102.).

SRIDHAR, G. (2003), **Experiments and Modelling Studies of Producer Gas Based Spark-Ignited Reciprocating Engines**, Tese de Doutorado, Instituto Indiano de Ciência, IISc, 149 p.

SKOV, N.A., and paperworth, M.L., **The Pegasus Unit**. Pegasus Publishers, Olympia, Washington, 1974, Chap IX.

SOARES, T.S; CARNEIRO, A.C.O; GONÇALVES, E.O.; LELLES, J. G. **Uso da biomassa florestal na geração de energia** . In: Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, n 08. Garça – SP, 2006.

SOUZA, S. N. M., PEREIRA, W. C., NOGUEIRA, C. E. C., PAVAN, A. A., SORDI, A. **Custo da Eletricidade Gerada em Conjunto Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura**. Acta Scientiarum, Maringá - PR, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.

TAVARES, G.C. **Análise dos resíduos da madeira de Pinus sp. gerados na produção de beliches**. 2010. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Federal de Pelotas.

TERMOQUIP LTDA, (2007), **“Gaseificador Tipo Co-Corrente com Dois Estágios”**, Protocolo de Venda do Equipamento.

U.S.D.A. **Wood Handbook**. Wasington: U.S. Government Printing Office, 1968.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás**. Tese (Doutorado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 263p.

ZAINAL, Z.A. RIFAU, A., QUADIR, G.A., SEETHARAMU, K.N. **Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier**. Biomass and Bioenergy, 23 (2002), pp. 283–289

WANDER, P. R. **Utilização de Resíduos de Madeira e Lenha como Alternativas de Energias Renováveis para o Desenvolvimento Sustentável da Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, RGS, 2001. 119f.

Dissertação (doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

WANDER, P. R., ALTAFINI, C. R., BARRETO, R. M. (2004), "**Assessment of a Small Sawdust Gasification Unit**", Biomass and Bioenergy, vol. 27, pp. 467-476

WANG, L., WELLER, C., JONES, D., HANNA, M. **Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production, Biomass And Bioenergy.** 32, 573-581. 2008.