

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado -

**PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA
GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR: ESTUDO DE UM
CASO**

por

Daniel Lira da Silva Figueiredo

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção de grau de Mestre.*

DANIEL LIRA DA SILVA FIGUEIREDO

**PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA
GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR: ESTUDO DE
UM CASO**

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

Orientador: Professor Dr. Emerson Freitas Jaguaribe

F475p Figueiredo, Daniel Lira da Silva.

Produção de energia elétrica via gaseificador/grupo gerador: estudo de um caso / Daniel Lira da Silva Figueiredo. - João Pessoa, 2018.

63 f. : il.

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

1. Engenharia mecânica. 2. Gaseificação de biomassa. 3. Energia elétrica - Produção. I. Jaguaribe, Emerson Freitas. II. Título.

UFPB/BC

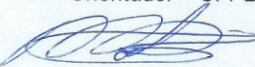
**PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA
GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR:
ESTUDO DE UM CASO**


por

DANIEL LIRA DA SILVA FIGUEIREDO

Dissertação aprovada em 10 de maio de 2018


Prof. Dr. EMERSON FREITAS JAGUARIBE
Orientador – UFPB


Prof. Dr. RODINEI MEDEIROS GOMES
Examinador Interno - UFPB


Prof. Dr. ADRIANO SITÔNIO RUMÃO
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus. Dedico também este Mestrado a minha esposa Luzia Soares de Abreu, aos meus pais, Bento Lira de Figueiredo e Rita Rosenilda da Silva Figueiredo, aos meus irmãos Artur Lira da Silva Figueiredo, George José Lira da Silva Figueiredo e Denise Lira da Silva Figueiredo pelo exemplo de integridade, honestidade, dedicação e fé em DEUS sobre tudo que realizam.

AGRADECIMENTOS

Uma palavra de agradecimento a todos aqueles que, de formas diversas, e em momentos diferentes, foram importantes para a realização deste trabalho, sobretudo:

A Deus, em todo o trabalho;

Um agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe, que, foi sempre solidário, honesto e contribuiu bastante através de seus conhecimentos e discussões, o qual ajudou, na conclusão deste mestrado.

Aos professores, que contribuíram com suas participações na banca examinadora;

Aos amigos e colegas de trabalho do Laboratório de Inovação, André, Herculano, Professor Dr. Adriano, Fernanda, Alexandre, Anderson, Marcos, Denner, Ítalo, Rafael e Bráulio, pela honestidade, esforço e fé, e no auxílio incansável prestado ao longo da realização deste trabalho;

A minha família e a minha esposa Luzia Soares de Abreu, pelo entendimento dos vários momentos que tive de estar ausente;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo ao desenvolvimento científico do país e pela bolsa concedida;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade e pelos serviços prestados.

PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR: ESTUDO DE UM CASO

RESUMO

É notório que a biomassa se apresenta como uma extraordinária opção energética, capaz de substituir, em muitas situações a energia do petróleo. Há várias formas de se aproveitar a energia química dessa fonte renovável, uma delas é através da gaseificação. Por gaseificação se deve entender a queima controlada de material sólido, que pode ser a biomassa ou o carvão mineral, através da oxidação parcial a elevadas temperaturas, isto é, entre 800 a 1100 °C. Tem-se como resultado, a formação de um gás combustível, possibilitando sua aplicação em motores de combustão interna. Buscou-se neste trabalho o estudo de um sistema composto por um gaseificador de biomassa, de 4 kW_t e um motor de 18 hp, acoplado a um gerador de 2 kW, visando a produção de energia elétrica. Para isso, foi necessário fazer uma ampliação no sistema de lavagem e refrigeração do gás pobre, proceder ao aumento na taxa de compressão do motor, e introduzir um misturador ar/gás pobre na admissão. O gaseificador com eficiência entre 79 e 89% foi testado com rejeitos de madeira em formato cúbico de 2 cm de aresta, produzindo gás pobre com teor volumétrico de CO entre 12,39 e 14,38%. O gerador foi submetido a cargas que variaram entre 0,27 e 1,17 kW, com auxílio de um banco de resistências elétricas. Destaca-se que a eficiência do sistema (gaseificador/motor Otto/gerador) se eleva com o aumento da geração da potência elétrica. Na máxima potência a eficiência global do sistema (gaseificador/motor Otto/gerador) foi de 2,23%, consumindo 10,5 kg/h de biomassa.

Palavras chave: Rejeitos de biomassa; Gaseificação de biomassa; Motor do ciclo Otto; Geração de energia elétrica; Eficiência do gaseificador/grupo gerador.

ELECTRIC ENERGY PRODUCTION VIA GASIFIER/GENERATOR GROUP: STUDYING A CASE

ABSTRACT

The biomass renewable source usually presents a good alternative for replacing the use of oil. The gasification process is used to extract chemical energy from biomass from controlled burning of solid material through partial oxidation at high temperatures (800° - 1100°C), resulting in gas fuel which may be used in internal combustion engines. In this work, a detailed study of the electric energy process by means of a 4 kWt gasifier and an 18 hp motor system connected to a 2 kW generator was performed. In this way, it was necessary to expand the washing and cooling system of poor gas, increase the engine compression rate and inject a mixer air/poor gas in admission. The gasifier with efficiency between 79 and 89% was tested with wood chips in cubic format of 2 cm edge, producing poor gas with a CO volumetric content between 12.39 and 14.38%, and resistance loads of 0.27 to 1.17 kW were applied to the generator. From the obtained results, it is noted that the system (gasifier/Otto engine/generator) efficiency increases with higher electric power generation, reaching 2.23% at maximum power, being the biomass consumption 10.5 kg/h.

Keywords: wood chips; biomass gasifier; Otto cycle engine; electricity generation; gasifier/generator group efficiency.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	3
SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA	3
2.1 A BIOMASSA	3
2.2 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA	4
2.2.1 Zonas de um Gaseificador e algumas reações correntes	5
2.2.2 Craqueamento do Alcatrão e Limpeza do Gás Pobre	6
2.2.3 Tipos de Gaseificadores	7
2.2.4 Poder Calorífico	9
2.2.4.1 Poder Calorífico Inferior da Biomassa (Madeira)	9
2.2.4.2 Poder Calorífico Inferior do Gás Pobre Produzido	9
2.3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA POR CENTELHA PARA FUNCIONAMENTO COM GÁS POBRE	10
2.3.1 Taxa de Compressão em Motores ICE	10
2.3.2 Mistura Ar/Combustível e Fator Lambda	12
2.3.3 Admissão do Gás Pobre em Motores ICE	14
2.4 EFICIÊNCIA TÉRMICA	14
2.4.1 Eficiência do Gaseificador	14
2.4.2 Eficiência do Gaseificador Grupo Gerador	15
CAPÍTULO III	16
MONTAGEM EXPERIMENTAL E ENSAIOS DO SISTEMA FORMADO PELO GASEIFICADOR E GRUPO GERADOR	16
3.1 INTRODUÇÃO	16
3.2 O GASEIFICADOR USADO NESTE TRABALHO	16
3.2.1 Funcionamento do Sistema Gaseificador	17

3.2.2 Modificações no Sistema Gaseificador	19
3.2.2.1 Alteração no Diâmetro Interno do Reator	20
3.2.2.2 Ampliação do Efeito da Lavagem e da Refrigeração do Gás Pobre	20
3.3 O MOTOR E O GERADOR UTILIZADOS NESTE TRABALHO	22
3.3.1 O Misturador e Regulador de Fluxo Ar-Gás Pobre.....	24
3.3.2 O Governador Mecânico de Velocidade	25
3.3.3 Aumento da Taxa de Compressão no Motor VANGUARD	26
3.4 APARATO EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR	26
3.4.1 Serra de Bancada Elétrica.....	27
3.4.2 Balança Digital.....	27
3.4.3 Termobalança	28
3.4.4 Anemômetro Digital	28
3.4.5 Analisador de Gases.....	29
3.4.6 Manômetro em U.....	29
3.4.7 Termômetro.....	30
3.4.8 Banco de Lâmpadas.....	30
3.4.9 Analisador de energia.....	31
3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	31
3.5.1 Seleção da Biomassa	31
3.5.2 Carga aplicada ao Grupo Gerador	33
3.5.3 Medição das Temperaturas	33
3.5.4 Medição da Composição dos Compostos Gasosos	34
3.5.5 Vazão do Gás Pobre	34
3.5.6 Procedimento de Realização dos Ensaios	34
 C A P Í T U L O IV.....	 36
RESULTADOS E ANÁLISES.....	36
4.1 INTRODUÇÃO	36
4.2 TESTES PRELIMINARES	36
4.2.1 Gaseificador	36
4.2.2 Eficiência do Grupo Gerador usando Gasolina como Combustível.....	37
4.3 MASSA ESPECÍFICA E UMIDADE DA BIOMASSA.....	38
4.4 TEMPERATURAS	38

4.5 PRESSÃO NA LINHA DO GASEIFICADOR.....	39
4.6 COMPOSIÇÃO DOS GASES DURANTE O FUNCIONAMENTO DO GASEIFICADOR GRUPO GERADOR	40
4.7 CONSUMO DE BIOMASSA E CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOMASSA	40
4.8 EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR GRUPO GERADOR	41
C A P Í T U L O V.....	43
5. CONCLUSÕES	43
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Rota de conversão da energia da biomassa em elétrica.....	4
Figura 2-2: Ilustração do gaseificador Contracorrente e Co-corrente.....	8
Figura 2-3: Volumes compreendidos na câmara de combustão.....	11
Figura 2-4: Comportamento do rendimento térmico com a taxa de compressão.....	12
Figura 2-5: Relação do teor de CO ₂ e CO diante a falta ou excesso de oxigênio.....	13
Figura 3-1: Gaseificador usado neste trabalho.....	16
Figura 3-2: Ilustração do gaseificador utilizado e seus equipamentos periféricos.....	17
Figura 3-3: Aspecto da deformação plástica no interior do reator.....	19
Figura 3-4: a-) Cilindro disforme retirado; b-) Reator modificado.....	20
Figura 3-5: Ilustração do sistema de lavagem e resfriamento do gás.....	21
Figura 3-6: Ilustração do sistema gaseificador definitivo diante às mudanças.....	22
Figura 3-7: Motor VANGUARD V-Twin de 18 hp.....	23
Figura 3-8: Motor e gerador montados.....	24
Figura 3-9: Misturador e regulador de fluxo ar-combustível.....	24
Figura 3-10: Governador mecânico de velocidade.....	25
Figura 3-11: a-) Cabeçotes desmontados; b-) Operação de fresagem no cabeçote; c-) Resultado da usinagem feita no cabeçote.....	26
Figura 3-12: Serra de Bancada.....	27
Figura 3-13: Balanças utilizadas para obtenção da massa de biomassa.....	27
Figura 3-14: Termobalança para medição da umidade.....	28
Figura 3-15: Anemômetro.....	28
Figura 3-16: Analisador de gases.....	29
Figura 3-17: Manômetro em U.....	30
Figura 3-18: Medidor de temperatura.....	30
Figura 3-19: Banco de lâmpadas.....	31
Figura 3-20: Analisador de energia.....	31
Figura 3-21: a-) Tamanho e formato cúbico da biomassa utilizada, b-) Topo do gaseificador e aspecto relativo da dimensão biomassa e diâmetro do reator projetados.....	32
Figura 3-22: Visor do analisador de energia.....	33
Figura 3-23: Estrutura montada e a localização das medições das temperaturas.....	34
Figura 4-1: Eficiências do grupo gerador usando como combustível a gasolina.....	37

Figura 4-2: Pressão do gás pobre na linha de distribuição do gaseificador relacionado à potência elétrica gerada	39
Figura 4-3: Consumo específico de biomassa.....	41
Figura 4-4: Eficiência do Gaseificador Grupo Gerador	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Poder calorífico dos principais componentes do gás pobre	5
Tabela 2-2: Tipos ou classificação dos gaseificadores.....	7
Tabela 2-3: Composição volumétrica e poder calorífico, do gás de síntese nos gaseificadores contracorrente e co-corrente, que utilizam ar como agente de gaseificação.	10
Tabela 3-1: Alguns dados técnicos do motor VANGUARD.	23
Tabela 4-1: Dados do reator e da gaseificação.....	36
Tabela 4-2: Valores da umidade e massa específica da biomassa.....	38
Tabela 4-3: Temperaturas observadas diante a obtenção de potência elétrica.....	39
Tabela 4-4: Composição dos gases produzidos pelo Gaseificador e emitidos pelo escapamento do motor, relacionados às potências obtidas.....	40
Tabela 4-5: Consumo da biomassa utilizada e a eficiência global.....	40

LISTA DE SÍBOLOS E ABREVIACÕES

A/C – proporção de Ar/Combustível.
bar – bar (unidade de medida de pressão).
 cm^3 – centímetro cúbico
 C_2H_2 – Gás acetileno.
 C_2H_4 – Gás etileno.
 C_2H_6 – Gás etano.
CGPL – The Combustion, Gasification and Propulsion Laboratory
 CH_4 – Gás metano.
CO – Gás monóxido de carbono.
 CO_2 – Gás dióxido de carbono.
COP – Conferência das Partes.
CT – Centro de Tecnologia.
 d – Diâmetro interno no local da medição da vazão de gás pobre.
 dm^3/s – decímetro cúbico por segundo.
g – Grama (unidade de medida de massa).
GG – Grupo Gerador.
GGG – Gaseificador Grupo Gerador.
 h – altura compreendida pelo selo de água com o difusor.
hp – horse power (unidade de potência).
 H_2 – Gás hidrogênio.
 H_2O – Vapor de água.
Hz – Hertz (unidade de medida de frequência).
ICE – Ignição por Centelha.
J/kg – Joule por quilograma.
 J/m^3 – Joule por metro cúbico.
kcal/kg – Quilocaloria por quilograma.
kg – Quilograma.
kg/s – Quilograma por segundo.
kg/h – Quilograma por hora.
 kg/m^3 – Quilograma por metro cúbico.
kJ/mol – Quilo Joule por mol.

kVA – Quilo Volt Ampere.
kWe – Quilo Watt elétrico.
kW_t – Quilo Watt térmico.
l – litro.
LI – Laboratorio de Inovação.
m – Metro.
mm – Milímetro.
m/s – Metro por segundo.
mg/m³ – miligrama por metro cúbico.
m³ – Metro cúbico.
m³/min – Metro cúbico por minuto.
m³/s – Metro cúbico por segundo.
 M_b – Consumo de biomassa pelo gaseificador.
MCI – Motor de Combustão Interna.
MJ/Nm³ – MegaJoules por metro cúbico.
N₂ – Gás Nitrogênio.
NO_x – Gases de óxidos de nitrogênio.
O₂ – Gás oxigênio.
OHV – Over Head Valve.
PCI – Poder Calorífico Inferior.
 PCI_b – Poder Calorífico Inferior da biomassa
 PCI_g – Poder Calorífico Inferior do gás pobre.
 P_e – Potência elétrica.
PCS – Poder Calorífico Superior.
PMI – Ponto Morto Inferior.
PMS – Ponto Morto Superior.
rpm – Rotações por minuto.
SO_x – Gases de óxidos de enxofre
 T_a – Temperatura da água no reservatório.
 T_g – Temperatura do gás pobre.
 T_m – Temperatura da mistura ar e gás pobre.
TC – Taxa de Compressão.
UFPB – Universidade Federal da Paraíba.

V – Volt (unidade de medida de diferença de potencial).
 V_{cb} – Volume da cavidade do cabeçote.
 V_{cc} – Volume da câmara de combustão.
 V_{cin} – Volume da cilindrada unitária.
 V_{cp} – Volume da câmara de combustão.
 v_g – Velocidade do gás na saída de uma determinada tubulação.
 V_g – Vazão de gás pobre.
 V_j – Volume formado na câmara de combustão em decorrência da espessura da junta.
 V_{PMI} – Volume total que está acima do pistão no Ponto Morto Inferior.
 V_{PMS} – Volume total que está acima do pistão no Ponto Morto Superior.
 W – Watt (unidade de medida de potência).
 ΔH – Diferença de entalpia.
 $^{\circ}C$ – Graus Celsius.
 ρ_b – Massa específica da biomassa.
 λ – Fator lambda.
 $\%CO$ – Percentual volumétrico de monóxido de carbono no gás pobre.
 $\%CO_{esc.}$ – Percentual volumétrico de monóxido de carbono no escapamento do motor.
 $\%CO_2$ – Percentual volumétrico de dióxido de carbono no gás pobre.
 $\%CO_{2esc.}$ – Percentual volumétrico de dióxido de carbono no escapamento do motor.
 $\%O_2$ – Percentual volumétrico de gás oxigênio no gás pobre.
 $\%O_{2esc.}$ – Percentual volumétrico de gás oxigênio no escapamento do motor.
 $\%Um$ – Teor de umidade.
 η_{gf} – Eficiência do gaseificador.
 η_{ggg} – Eficiência do gaseificador grupo gerador.
 η_{gg} – Eficiência do grupo gerador.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A busca da redução da poluição ambiental e de custos de geração tem feito da Energia Renovável, ponto de convergência e de expectativa de solução de especialistas em energia, em todo o mundo.

É sabido e até racional o entendimento de que quanto maior o desenvolvimento de um país, maior o seu consumo de energia. Verifica-se, todavia, que a escassez das fontes energéticas tem levado os países industrializados a usar a energia de forma eficiente, fazendo emprego, inclusive, da cogeração. Também nesse sentido, observam-se tentativas de se utilizar energias renováveis. A exemplo foi firmado pelo Brasil durante a COP 21 (Conferência das Partes) em 2015, de elevar para pelo menos 23% a fatia de energias renováveis (além da hídrica) na matriz elétrica até 2030, visando principalmente diminuir os gases promovedores do efeito estufa (PORTAL BRASIL, 2017).

Por sua vez, em nosso País, tem-se oportunidade de se ver confirmar a grande potencialidade da biomassa como uma fonte de recursos naturais, capaz de gerar energia à nível, quantitativo, qualitativo e custo, comparável ao da hidroeletricidade. Destaca-se, ainda, nesse sentido, a existência de biomassa residual abundante, cujo uso beneficia o próprio meio ambiente.

Há várias formas de se proceder ao aproveitamento da energia da biomassa, mas, a gaseificação se destaca como sendo a mais eficiente. A taxa de conversão da matéria prima em gás chega a 85%, sendo o rendimento do sistema gaseificador/grupo gerador, maior do que aquele obtido quando a mesma quantidade de biomassa é usada em um vapor, DIAS (2004).

Por gaseificação se deve entender a queima controlada de material sólido, que pode ser a biomassa ou o carvão mineral, através da oxidação parcial a elevadas temperaturas, isto é, 800 a 1100 °C. Tem-se como resultado a produção de uma mistura gasosa, denominada gás produzido ou gás pobre, dado ao seu baixo poder calorífico. Uma vantagem dessa mistura é não conter poluentes atmosféricos como o SO_x ou NO_x.

Os gaseificadores considerados de última geração são aqueles que promovem a lavagem do gás produzido. O alvo principal da lavagem é a redução dos particulados e do alcatrão, este último de natureza viscosa, com elevado poder corrosivo e aglutinante. O alcatrão é capaz de obstruir condutos de passagens nos motores de combustão interna, chegando até a imobilizar suas partes móveis, como pistões e válvulas.

O grupo do Prof. Mukunda do Instituto de Ciência da Índia (DASAPPA; MUKUNDA; PAUL; RAJAN, 2003) após mais de trinta anos de estudos concebeu tais gaseificadores, sendo que dois deles foram adquiridos pelo Laboratório de Inovação em Conversão Térmica do CT/UFPB, LI, em 2004. No CGPL, na Índia, o gás pobre era combinado com o diesel e usado em motores duais. No LI, porém, desde o primeiro momento buscou-se a geração de eletricidade apenas empregando-se o gás pobre. Para tanto, desenvolveu-se um processo autóctone de otolização de motores Diesel, para serem acoplados a geradores.

O emprego de um sistema de gaseificação da biomassa, alimentando um grupo gerador (motor e gerador de eletricidade acoplados por um eixo) já é uma realidade no LI, e vem sendo divulgado através de trabalhos de dissertação, de teses de doutorados e de trabalhos em revista especializada (BEZERRA, 2016; RUMÃO, 2013).

Este trabalho tem por objetivo discutir a produção de energia elétrica através da utilização de um sistema composto por um gaseificador de 4 kW_t e um motor de 18 hp, acoplado a um gerador de 2,2 kVA.

Além deste capítulo, essa dissertação se desenvolve em mais outros cinco capítulos. No Capítulo II apresentam-se os aspectos teóricos relacionados à biomassa, à gaseificação, e à motores de combustão interna, de interesse à compreensão do trabalho como um todo; no Capítulo III discute-se toda a parte experimental relacionada a esse estudo; no Capítulo IV são apresentados os resultados mais significativos desse trabalho, acompanhados das análises pertinentes. Por fim, o Capítulo V arremata o texto com as principais conclusões amalhadas sobre o tema desenvolvido.

CAPÍTULO II

SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Neste capítulo serão feitas algumas considerações sobre a fonte de energia da gaseificação utilizada nesse trabalho, isto é, a biomassa. E tendo em vista se utilizar um tipo específico de gaseificador, entendeu-se, como necessário, discutir as principais características que distinguem os gaseificadores mais utilizados.

Verificando, ainda, que foi preciso se adaptar um motor do ciclo Otto, a gasolina, para ser alimentado com o gás oriundo do gaseificador, alguns conceitos relacionados com a adequação de motores que funcionam originalmente com um combustível a outro serão, também, aqui considerados.

2.1 A BIOMASSA

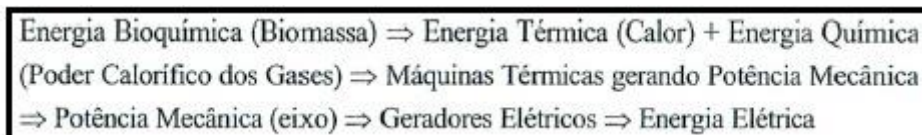
Historicamente, a biomassa, matéria orgânica, sobretudo, de origem vegetal, é tida como uma das primeiras fontes naturais de energia empregada pelo homem. Abrange resíduos agrícolas, podas de árvores, esterco de animal, bagaço de cana-de-açúcar, etc., de maneira que a energia dela advinda não polui o meio ambiente. É constituída de carboidratos, lipídios (óleos vegetais), proteínas, dentre outras substâncias (RUMÃO, 2013). Tem como principais elementos químicos o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O), o nitrogênio (N) e o enxofre (S), além de, umidade e cinzas (LORA e VENTURINNI, 2012).

Segundo ALVES (2010), o uso da energia de biomassa é uma extraordinária opção energética, motivada pela “descarbonização da economia”, isto é, a gradual substituição das fontes de energia não renovável (combustíveis fósseis).

Uma das formas de se aproveitar (converter) a energia química da biomassa é através de reações termoquímicas que ocorrem nos gaseificadores. A gaseificação dessa matéria prima resulta na formação de um gás combustível, possibilitando sua utilização em motores do ciclo Otto ou Diesel na forma dual, para a produção de potência mecânica, ou elétrica caso se utilize um gerador.

A rota de conversão da energia da biomassa em energia elétrica se dá da seguinte forma:

Figura 2-1: Rota de conversão da energia da biomassa em elétrica.



Fonte: SÁNCHEZ, 2010.

2.2 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

A gaseificação é definida como a conversão de qualquer combustível sólido ou líquido (que contém carbono em sua composição) em um gás energético, pela oxidação parcial a temperaturas elevadas (800 a 1100 °C). A formação do gás acontece no reator através de reações termoquímicas. No reator se dá, inicialmente, o processo de secagem da biomassa, com a perda da matéria volátil (GODINHO, 2006). Essa conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores que podem ser de leito fixo ou de leito fluidizado. O gás produzido tem muitas aplicações práticas, desde a geração direta de calor em queimadores e fornalhas, ou como fonte para produção de matéria-prima em sínteses químicas. Uma outra possibilidade é se alimentar motores de combustão interna para se gerar potência mecânica, ou energia elétrica (SANCHEZ, 2010).

A gaseificação consegue converter de 60 a 90% da energia da biomassa em energia interna do gás (REED e DAS, 1988). Os reatores são projetados de forma a não permitir a oxidação completa do carbono e do hidrogênio em CO₂ e H₂O, respectivamente. A gaseificação da matéria orgânica é transformada em gases (total ou parcialmente) em uma mistura de: nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄); pequenas quantidades de hidrocarbonetos leves (acetileno (C₂H₂), etileno (C₂H₄) e etano (C₂H₆)), vapor de alcatrão, vapor mineral, vapor de água, poeira (carbono e cinzas). E ainda pode conter algumas quantidades de O₂. Destes, CO, H₂, CH₄ (principalmente), C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ (em pequenas quantidades) e vapor de alcatrão são combustíveis. O restante é corrosivo, incluindo o alcatrão, e interferem negativamente na operação de motores de combustão interna (KAUPP e GOSS, 1981).

Os gases de maior interesse são o CO, o H₂ e o CH₄ (SÁNCHEZ, 2010). A Tabela 2-1 demonstra o poder calorífico das mais relevantes moléculas combustíveis que estão contidas no gás pobre.

Tabela 2-1: Poder calorífico dos principais componentes do gás pobre.

Gás	Poder Calorífico [kJ/kg]
CO	282,99
H ₂	285,84
CH ₄	890,36

Fonte: Adaptado de HOLMAN (1980) apud KAUPP e GOSS (1981).

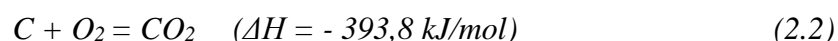
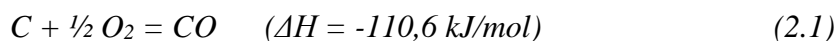
2.2.1 Zonas de um Gaseificador e algumas Reações Correntes

Durante o processo, a matéria prima (o combustível) se move por gravidade, em direção à região de maior temperatura. Em seu percurso, passa por quatro zonas, caracterizadas por temperaturas e reações bem determinadas, que podem variar com o tipo do reator (Figura 2-2). Essas zonas são de:

1. secagem (da biomassa), situada próximo ao topo do reator. É caracterizada por reduzir a umidade da biomassa. Os vapores úmidos seguem na corrente gasosa.

2. pirólise, que se segue imediatamente à de secagem, e pode se iniciar entre 280 a 450 °C (BEZERRA, 2016). É, também, nessa região onde se dá a decomposição térmica da biomassa, resultando no carvão, e na produção de gases (CO, CO₂, CH₄, H₂ e H₂O) e do alcatrão. As proporções desses produtos dependem da composição química da biomassa e das condições de operação do gaseificador.

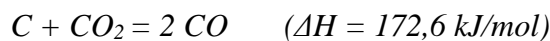
3. combustão: É a região de temperatura elevada (com limite até 1300 °C) em virtude da maior presença do oxigênio do ar, em contato com a biomassa. É responsável pelo fluxo de calor que corrobora a formação e manutenção das outras zonas (KAUPP e GOSS, 1981). Nessa região o carbono da biomassa e o gás de oxigênio reagem da seguinte maneira:



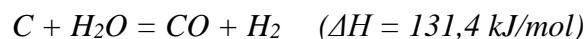
Nas Eqs. (2.1) e (2.2) os valores negativos da entalpia de combustão ($\Delta H < 0$) se referem ao desprendimento de calor da formação de um mol do óxido (por exemplo, 393,80 kJ de calor na formação de CO_2). Esta energia térmica liberada das reações exotérmicas é a força motriz da gaseificação.

4. redução: É onde tem lugar a gaseificação propriamente dita. Com temperaturas próximas e menores do que as da etapa de combustão (entre 400 a 900°C), nela ocorre a reação parcial do carbono da biomassa com o O_2 , com o vapor de água (H_2O) e com o CO_2 . Gera combustíveis gasosos, principalmente o monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2) (RUMÃO, 2013). A princípio, nessa região acontecem as seguintes reações:

Reação de Boudouard:



Reação de gás d'água:

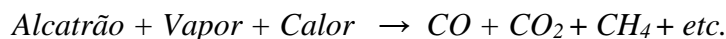


2.2.2 Craqueamento do Alcatrão e Limpeza do Gás Pobre

Além do gás combustível, o produto da gaseificação contém impurezas sólidas e líquidas finamente divididas, que são carregadas pela corrente gasosa, dentre elas: cinzas, fuligem, poeiras, alcatrões, etc.

Para a aplicação em Motores de Combustão Interna (MCI) é indispensável o uso de dispositivos e tecnologias a fim de remover tais particulados, com grande atenção ao alcatrão que deve ser reduzido pelo menos a 100 mg/m^3 (REED e DAS, 1988). O alcatrão é um subproduto da gaseificação produzido na zona de pirólise. Ele proporciona um pequeno acréscimo no poder calorífico do gás, mas pode se condensar aderindo-se às partes sólidas e frias como, por exemplo, as tubulações e aos elementos de motores de combustão interna (turbinas, válvulas de admissão e anéis dos pistões), dificultando e até interrompendo seu funcionamento. Uma das formas de reduzir o gás alcatroado é fazê-lo percorrer o leito do gaseificador cruzando-o por regiões de elevadas temperaturas (cerca de 1000 °C). Com o devido "tempo de residência" (tempo referente

para "quebrar" o alcatrão a uma dada temperatura), ocorre degradação térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão, sendo transformados em compostos de menor peso molecular, ao reagir da seguinte forma:



O restante de alcatrão e impurezas que saem do reator podem, ainda, ser diluídos com dispositivos de lavagens, filtros, entre outros, possibilitando eficiência de até 90% na limpeza do gás (LORA e VENTURINNI, 2012).

2.2.3 Tipos de Gaseificadores

Os gaseificadores são classificados por suas características construtivas e operacionais (Tabela 2-2).

Tabela 2-2: Tipos ou classificação dos gaseificadores.

Parâmetro	Característica
Poder calorífico do gás produzido	<ul style="list-style-type: none"> Gás de baixo poder calorífico: até 5 MJ/Nm³ Gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm³ Gás de alto poder calorífico: acima de 10 MJ/Nm³
Tipo de agente gaseificador	<ul style="list-style-type: none"> Ar Vapor de água Oxigênio Hidrogênio (Hidrogaseificação)
Direção do movimento relativo dos sólidos e do agente gaseificante	<ul style="list-style-type: none"> Contrafluxo (Contracorrente) Fluxo direto (Concorrente) Fluxo cruzado Leito fluidizado-arrastado
Pressão de trabalho	<ul style="list-style-type: none"> Atmosféricos Pressurizados (até 2000 kPa)
Tipo de combustível	<ul style="list-style-type: none"> Combustível fóssil (Carvão, derivados do petróleo) Combustível não fóssil (Biomassas)

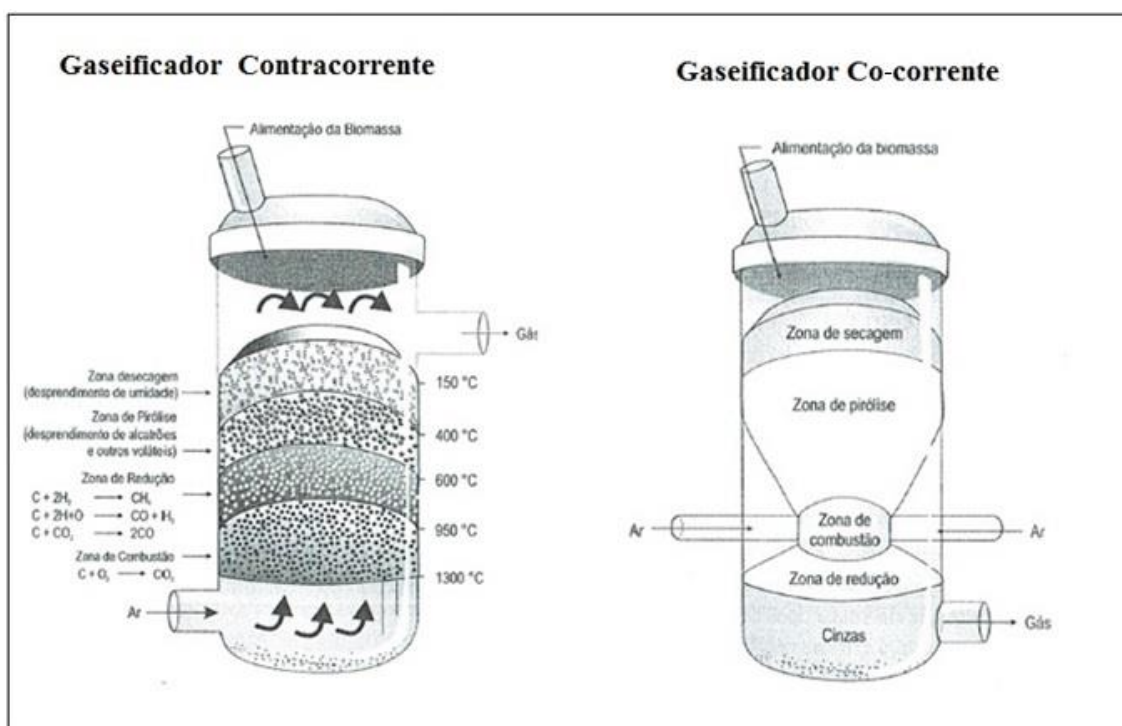
Fonte: SÁNCHEZ, 2010.

Uma outra classificação, que é a mais comum, é dada pelo tipo de leito do reator (fixo ou fluidizado). Os gaseificadores de leito fixo são agrupados de acordo com o sentido do movimento relativo entre a biomassa e do agente de gaseificação que entra no reator (ar, vapor de água, oxigênio, hidrogênio, ou a combinação deles).

No gaseificador de leito fixo contracorrente (corrente ascendente) a biomassa desce a partir do topo do reator, e percorre em sentido contrário ao agente gaseificador.

A extração do gás produzido se dá na parte de cima do reator (Figura 2-2). Nele é produzido um gás com alto teor de alcatrão, devido aos gases da zona de pirólise não atravessarem a zona de combustão, retirando a possibilidade de "craqueamento". Tem alta eficiência térmica, pois, os gases quentes da zona de combustão pré-aquecem a carga de biomassa reduzindo a umidade, e são mais aplicados em queimadores para aquecimento direto (RUMÃO, 2013).

Figura 2-2: Ilustração do gaseificador Contracorrente e Co-corrente.



Fonte: Adaptado de SÁNCHEZ (2010).

No gaseificador co-corrente a alimentação do combustível é feita pelo topo e segue na mesma direção do ar (que entra pelo topo e laterais do reator) em fluxo descendente. O gás formado sai por baixo do reator. As zonas de combustão e de redução são invertidas em relação ao gaseificador do tipo contracorrente (Figura 2-2).

O gaseificador co-corrente de topo aberto produz um gás de melhor qualidade para alimentar motores de combustão interna. Na operação, se percebe um perfil de temperatura no reator, que favorece a quebra do alcatrão (que fora formado na zona de pirólise) ao atravessar as zonas de combustão e de redução. Também, apresenta um tempo de resposta rápido, adequado para alimentar motores com cargas variáveis ou fixas (DASAPPA et al, 2003).

2.2.4 Poder Calorífico

Segundo LORA e VENTURINI (2012), por poder calorífico se denomina a quantidade de calor que um material combustível irá liberar durante a combustão completa na unidade de massa ou de volume de um dado combustível. O poder calorífico pode ser superior, PCS, ou inferior, PCI. A diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível. Na maioria das vezes se utiliza o PCI, pois, o calor latente referente à evaporação da umidade do combustível, não é aproveitável nos processos térmicos.

A umidade da biomassa interfere de forma negativa no PCI da biomassa (DASAPPA et al, 2003). E o teor de CO, interfere diretamente no PCI do gás pobre.

Em geral, o poder calorífico é medido através de uma bomba calorimétrica adiabática. Porém, RUMÃO (2013) e BEZERRA (2016) conseguiram obter resultados satisfatórios fazendo uso de equações semi-empíricas.

2.2.4.1 Poder Calorífico Inferior da Biomassa (Madeira)

O PCI da biomassa (PCI_b) [kcal/kg] pode ser determinado através da Eq. (2.3) (GARCIA 2002 apud RUMÃO, 2013).

$$PCI_b = 4756 - 53,418.(\%Um) \quad (2.3)$$

Onde:

$\%Um$ é o percentual em umidade contido na biomassa.

2.2.4.2 Poder Calorífico Inferior do Gás Pobre Produzido

Nesse trabalho, para se determinar o PCI do gás (PCI_g) [MJ/m³] será utilizada a Eq. (2.4). Tal equação foi deduzida por RUMÃO (2013), a partir de dados experimentais de YOSHIKAWA (2006), e da curva de GARCIA (2002), que correlacionam o PCI_g com o teor, em percentual, do monóxido de carbono (%CO) advindo dos produtos da gaseificação.

$$PCI_g = -0,004738.(\%CO)^2 + 0,3149.(\%CO) - 0,1057 \quad (2.4)$$

Onde:

$\%CO$ é o percentual volumétrico de monóxido de carbono presente no gás.

O agente gaseificante, o tipo do gaseificador, a composição ou tamanho da biomassa, os equipamentos a jusante do reator, etc. interferem bastante na composição, na quantidade do gás produzido e no seu poder calorífico (FIGUEIREDO, 2012). A Tabela 2-3 quantifica a influência do tipo de reator (contracorrente e co-corrente) na composição dos gases produzidos e no poder calorífico do gás.

Tabela 2-3: Composição volumétrica e poder calorífico, do gás de síntese nos gaseificadores contracorrente e co-corrente, que utilizam ar como agente de gaseificação.

	Contracorrente	Co-corrente
CO, % em vol.	15 – 20	10 – 22
H₂, % em vol.	10 – 14	15 – 21
CH₄, % em vol.	2 – 3	1 – 5
CO₂, % em vol.	8 – 10	11 – 13
Poder Calorífico, [MJ/kg]	3,7 – 5,3	4,0 – 5,6

Fonte: Adaptado de KALTSCHIMITT E HARTMANN (2001). Energie aus Biomassa, apud LORA e VENTURINI (2012).

2.3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA POR CENTELHA PARA FUNCIONAMENTO COM GÁS POBRE

Considerando que foi utilizado um motor do ciclo Otto de ignição por centelha (ICE) que, originalmente, funcionava a gasolina como parte do sistema de geração de energia, alguns aspectos relacionados a adaptação que foi requerida, são aqui discutidos.

2.3.1 Taxa de Compressão em Motores ICE

Quando o pistão desce do Ponto Morto Superior, PMS, até o Ponto Morto Inferior (PMI), admite um volume de mistura, que corresponde a do cilindro com área circular igual àquela do pistão, sendo sua geratriz correspondente ao curso do pistão.

Esse volume é denominado de cilindrada unitária (V_{cin}). No momento em que o pistão se apresenta no PMS, existe um volume confinado pelas paredes do cabeçote (V_{cb}), pela cavidade do pistão (V_{cp}) e pelo espaçamento das juntas (V_j), que juntos formam o volume morto ou câmara de combustão (V_{cc}) (ver Figura 2-3).

A Taxa de Compressão (TC) pode ser calculada pela razão entre o volume total que está acima do pistão no PMI (V_{PMI}), e o volume acima do pistão no PMS (V_{PMS}) (BRUNETTI, 2012), dada pela Eq. (2.5):

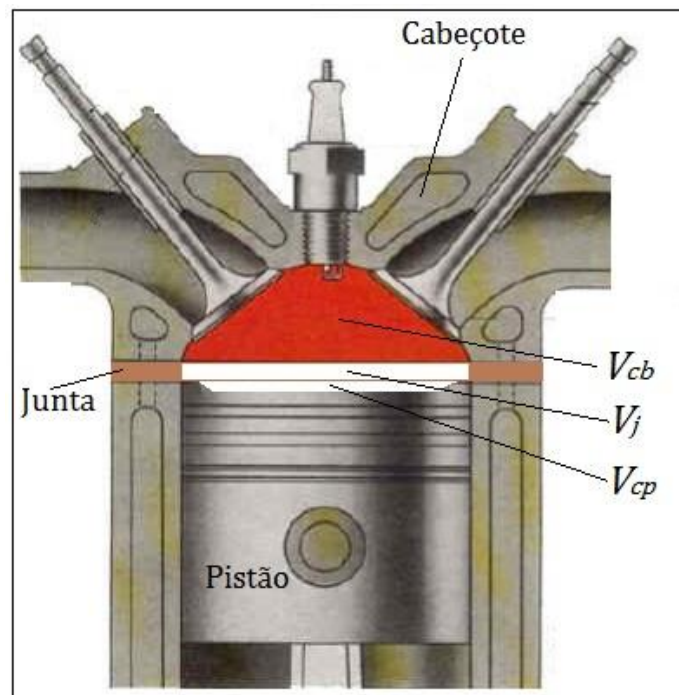
$$TC = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_{cin} + V_{cc}}{V_{cc}} \quad (2.5)$$

Onde:

V_{cin} é a cilindrada unitária ou volume percorrido pelo pistão;

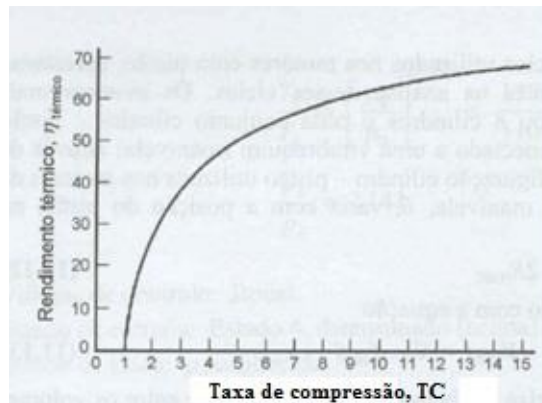
V_{cc} é o volume da câmara de combustão.

Figura 2-3: Volumes compreendidos na câmara de combustão.



A TC indica o quanto o volume aspirado pelo motor é comprimido na câmara de combustão. Essa razão é diretamente proporcional ao rendimento térmico do motor (WYLEN ET al, 2003) (ver Figura 2-4).

Figura 2-4: Comportamento do rendimento térmico com a taxa de compressão.



FONTE: Adaptado de WYLEN et al (2003).

O aumento da TC pode ser feito com a diminuição da câmara de combustão. Todavia, depende bastante da estrutura física do motor e da característica química do combustível a ser usado. No primeiro, o aumento da taxa pode ser feito com diminuição do volume formado pelo cabeçote, ou troca da junta (cabeçote/bloco motor) por uma menos espessa, contanto sua estrutura deve permitir em resistência ou alocação dos componentes do motor àquela mudança. No segundo, o aumento da TC é limitado ao tipo de combustível, permitindo a "taxação" até onde a detonação é evitada.

Cada combustível possui um nível de octanagem, que pode ser definido como a capacidade que o combustível tem, em mistura com ar, de resistir a altas temperaturas na câmara de combustão, sem sofrer detonação. Quantificado de 0 a 100, quanto maior esse número, a um dado combustível, menor a sua tendência de ocorrer a autoignição na câmara de combustão. Com relação ao gás pobre, sua resistência é alta devido à octanagem ser próxima do máximo 100, quando há baixo teor de hidrogênio (SÁNCHEZ, 2010).

2.3.2 Mistura Ar/Combustível e Fator Lambda

Para uma combustão completa, os MCI necessitam de uma proporção correta nas quantidades de ar e combustível a ser admitido. Quando a quantidade de combustível é totalmente queimada usando todo o ar disponível, diz-se que a mistura é estequiométrica (MARTINS, 2006).

A avaliação da combustão (se essa está acima ou abaixo da estequiométrica) é feita numericamente pelo fator lambda (λ), Eq. (2.6), podendo ser definida como a proporção entre a razão ar/combustível real e a razão estequiométrica (ALVES, 2016).

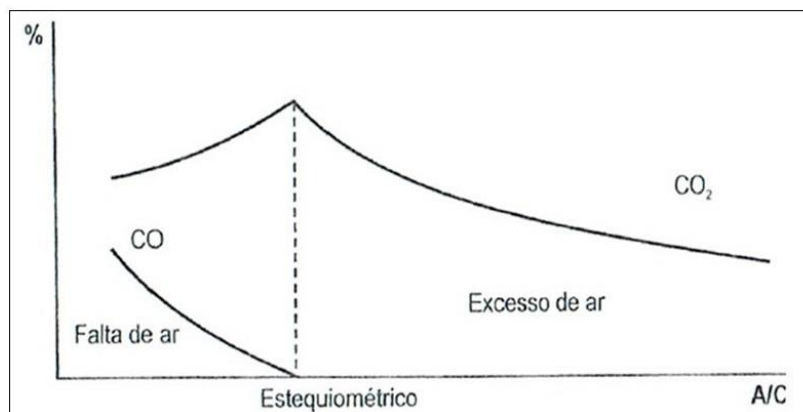
$$\lambda = \frac{\left(\frac{ar}{combustível}\right)_{real}}{\left(\frac{ar}{combustível}\right)_{esteq.}} \quad (2.6)$$

Considerando a Eq. (2.6), os possíveis valores e condições associados ao fator lambda para os motores são:

- $\lambda = 1$, a mistura é estequiométrica;
- $\lambda > 1$, a mistura tem excesso de ar, conhecida como mistura pobre;
- $\lambda < 1$, a mistura tem excesso de combustível, conhecida como mistura rica.

Um combustível específico requer teoricamente uma quantidade determinada de ar para atingir a combustão completa. Na prática, uma quantidade adicional de ar é estabelecida para garantir essa combustão. A queima incompleta pode ser reconhecida pelo aparecimento de quantidades excessivas de CO no gás de combustão, indicando desperdício de combustível. Já com o excesso de ar ($\lambda > 1$), o calor é perdido junto com o excesso dos produtos da combustão (combustão ineficiente), o que é reconhecido pelo excesso de O₂ nos gases de exaustão. A medida do teor de CO₂ no gás de exaustão também nos indica uma dimensão útil do rendimento da combustão. A proporção máxima de CO₂ nos produtos da combustão será encontrada quando a relação for estequiométrica ($\lambda = 1$), como observado na Figura 2-5 (SÁNCHEZ, 2010).

Figura 2-5: Relação do teor de CO₂ e CO diante a falta ou excesso de oxigênio.



FONTE: SÁNCHEZ (2010).

2.3.3 Admissão do Gás Pobre em Motores ICE

É racional que as proporções de Ar/Combustível (A/C) difiram a depender do combustível utilizado. Por exemplo, para a oxidação do gás pobre a relação A/C é de 1, sendo até 10 vezes menor quando comparado aos combustíveis usuais (diesel, gasolina, gás natural), o que justifica sua baixa densidade energética (DASAPPA et al, 2003). Portanto, um mecanismo regulável de mistura ar/gás pobre deve ser projetado para ser adicionado ou substituído ao sistema de admissão original da máquina, podendo introduzi-la antes do carburador (FIGUEIREDO, 2012).

Os gaseificadores desenvolvidos pela equipe do Prof. Mukunda (DASAPPA et al, 2003), dentre outros dispositivos, contam com um sistema de lavagem que também viabiliza o arrefecimento do gás pobre. Sendo relevante, pois, se garante que a massa específica do gás, antes de se combinar com o ar, seja maior (BEZERRA, 2016).

2.4 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência de um motor é a proporção de potência de eixo que se obtém relativo ao potencial energético de combustível aplicado para tal efeito. Os motores ICE movidos a gasolina alcançam cerca de 25 a 30 % em eficiência térmica. O mesmo motor, funcionando com gás pobre atinge de 15 a 25 %. A maior eficiência de um motor, para uma dada velocidade constante, ocorre na maior potência quando há combustão completa ($\lambda = 1$) (REED e DAS, 1988).

Os gaseificadores podem, na prática, oferecer valores de 60 a 90 % da energia da biomassa em energia do gás pobre. A eficiência que envolve o sistema gaseificador/motor Otto/gerador (eficiência global), aumenta à medida que se aumenta a geração elétrica (RUMÃO (2013), BEZERRA (2016)).

As eficiências calculadas neste trabalho foram o do gaseificador e do sistema formado pelo gaseificador/grupo gerador.

2.4.1 Eficiência do Gaseificador

Segundo FAO (1986), quando o gás pobre é utilizado em motores, a eficiência do gaseificador pode ser definida pela Eq. (2.7).

$$\eta_{gf} = \frac{PCI_g \cdot V_g}{PCI_b \cdot M_b} \cdot (100\%) \quad (2.7)$$

onde,

V_g é a vazão de gás pobre, [m³/s];

M_b é o consumo de biomassa no reator, [kg/s];

PCI_b é obtido pela equação (2.3), [J/kg];

PCI_g pode ser obtido pela equação (2.4), [J/m³].

2.4.2 Eficiência do Gaseificador Grupo Gerador

É a proporção entre a potência elétrica útil, P_e [W], em relação à potência disponível (proveniente da vazão mássica de biomassa), expressa na Eq. (2.8).

$$\eta_{ggg} = \frac{P_e}{PCI_b \cdot M_b} \cdot (100\%) \quad (2.8)$$

CAPÍTULO III

MONTAGEM EXPERIMENTAL E ENSAIOS DO SISTEMA FORMADO PELO GASEIFICADOR E GRUPO GERADOR

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a instalação experimental e as adaptações realizadas no sistema Gaseificador/Grupo Gerador (GGG), culminando com a descrição dos testes realizados.

3.2 O GASEIFICADOR USADO NESTE TRABALHO

O gaseificador utilizado nos ensaios é do tipo leito fixo, co-corrente, "topo aberto", importado da Índia, do Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, ver Figura 3-1. Sua capacidade térmica máxima é de 4 kW, tendo sido designado originalmente, para produzir 1 kW de potência elétrica. Sendo considerado de última geração, esse gaseificador possui um sistema de lavagem dos gases por água.

Figura 3-1: Gaseificador usado neste trabalho.

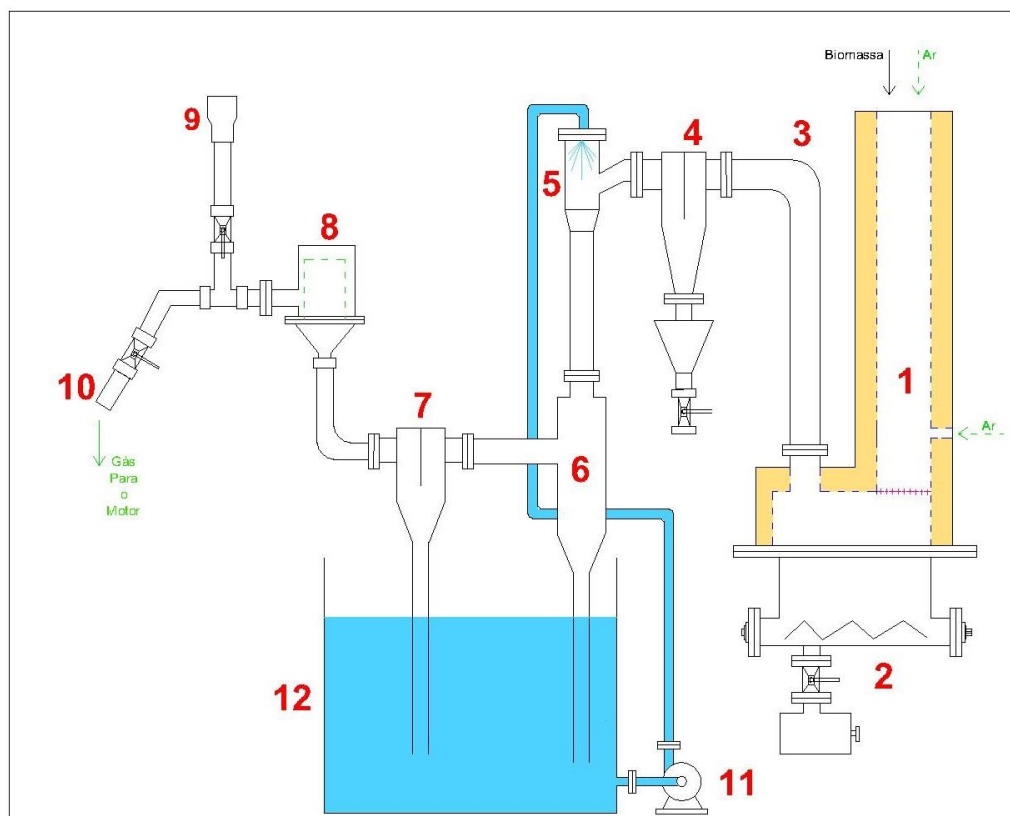


3.2.1 Funcionamento do Sistema Gaseificador

A alimentação da biomassa se dá a partir do topo do reator. Particularmente, o sistema de lavagem, com o deslocamento da água, cria uma depressão que promove o arrasto do ar comburente para dentro do reator, por meio de três pequenos orifícios laterais e pela própria área no topo. O oxigênio carregado pelo ar, e as moléculas de água, reagem com o carbono da biomassa, liberado na zona de combustão do reator, gerando os gases CO_2 e H_2O os quais reagem na zona de redução formando os gases combustíveis CO , CH_4 e H_2 .

Outros componentes complementam o reator, formando o sistema do gaseificador (Figura 3-2), estes tem a função de limpar e resfriar a mistura gasosa antes dessa ser admitida pelo motor.

Figura 3-2: Ilustração do gaseificador utilizado e seus equipamentos periféricos.



A descrição dos itens numerados na Figura 3-2 são feitas a seguir:

1. Reator. Parte do gaseificador onde se dão as reações termoquímicas e, portanto, a degradação térmica da biomassa. Através de seu topo é feita a alimentação

da biomassa, servindo também, como a principal entrada de ar de processo. Nas suas laterais, existem, pontos de acesso ao fluxo de ar. Limitando, sua parte inferior, existe uma grelha, que dá sustentação ao carvão, em formação, e à própria biomassa. Essa grelha, tem as funções complementares de permitir a passagem do gás formado, de particulados e das cinzas destinadas ao cinzeiro.

2. Cinzeiro. Montado sob o reator, ele armazena cinzas e pequenos restos de carvão que ultrapassam pela grelha projetada. Contém um parafuso sem fim, que com uso de um volante se arrasta e retira este material quando houver o acúmulo.

3. Tubo de saída do gás. Transporta o gás a 275 °C, formado no reator.

4. Purgador de alcatrão. Alguns particulados vindos da gaseificação colidem num anteparo e acumulam logo abaixo, até que sejam retirados, ao se proceder a abertura de uma válvula.

5. Lavador e resfriador do gás. É onde se inicia o contato do gás produzido com a água. Um sistema com um bico de esguicho direciona água a um dispositivo chamado Venturi. O efeito Venturi (através de um estreitamento na secção transversal do tubo) aumenta a velocidade da mistura do gás com a água, retirando parte das impurezas e resfriando o gás com água a temperatura ambiente, e também excita o reator (sucção do gás).

6. Difusor. Uma expansão no volume do tubo efetua a separação do gás que houvera misturado com a água. Parte do difusor fica imerso na água estabelecendo o selo de água impedindo de o gás acumulado descer junto com o líquido (empuxo). O gasoso segue pela lateral do difusor.

7. Placa de condensação de água no gás. Um tubo vertical contendo em seu interior uma aleta como obstáculo ao gás. Esta promove uma troca térmica, condensando um pouco da umidade contida no gás. A parte líquida desce até um pequeno reservatório.

8. Filtro de "manga". Fazendo parte do sistema de limpeza, o gás passa por um filtro de tecido (feltro).

9. Chama Piloto. Compreendido por uma tocha onde há saída de gás, e também, onde se verifica o aspecto da chama.

10. Tubulação para saída do gás pobre para o motor. Através do fechamento da válvula do gás que queima na chama piloto e abrindo a válvula do gás que vai por essa tubulação, estabelece a alimentação no motor.

11. Bomba centrífuga. De 117 W, faz a circulação da água a uma vazão de

2400 l/h, objetivando a etapa 5 supracitada.

12. Reservatório de água. Contidos em tanques, serve como reservatório térmico, trocando calor com o ambiente e com o gás ao se misturar no lavador de Venturi.

Para o acionamento do sistema gaseificador, alguns detalhes são observados e executados, sendo esses:

1. Encher os reservatórios de água e verificar possíveis vazamentos de água nas conexões, junções e vedações;
2. Fazer a retirada das cinzas do cinzeiro;
3. Adicionar biomassa no reator, até o topo;
4. Ligar a bomba centrífuga;
5. Inflamar a biomassa (com auxílio de um maçarico a gás) por meio dos orifícios laterais;
6. Inflamar o gás produzido, na chama piloto. Essa etapa demanda cerca de 10 minutos, referente ao tempo de formação completa das zonas de: redução, pirólise e secagem.

3.2.2 Modificações no Sistema Gaseificador

A biomassa que é abastecida pelo topo do reator, desce por ação da gravidade a medida que é consumida na gaseificação. É de suma importância que esse fluxo não seja interrompido. Entretanto, diante do uso frequente, foi percebido cada vez mais que ocorria o encalhamento da madeira no reator, prejudicando o desempenho da gaseificação, o que era perceptível quando a intensidade da chama diminuía ou essa apagava-se. Portanto, ao examinar o interior do reator, observou-se que o mesmo encontrava-se deformado plasticamente próximo a região de combustão (Figura 3-3).

Figura 3-3: Aspecto da deformação plástica no interior do reator.



Após tal observação, o cilindro interno do reator foi substituído.

3.2.2.1 Alteração no Diâmetro Interno do Reator

O procedimento foi executado na Oficina Mecânica da UFPB. Com auxílio de uma máquina de corte a plasma, retirou-se o tubo interno deformado (ver Figura 3-4a), descartando-o, juntamente com o material isolante.

Um novo reator foi, então, construído o qual foi isolado termicamente com vermiculita. Resultando assim, em um reator com 800 mm de comprimento, diâmetro interno de 150 mm e externo de 220 mm. Foram feitos mais dois orifícios laterais, para entrada radial de ar, totalizando três, os quais ficaram à mesma altura da base e distribuídos simetricamente ao redor do diâmetro. A grelha foi introduzida a 120 mm abaixo das entradas de ar. O reator, após as modificações executadas, pode ser visto na Figura 3-4b.

Figura 3-4: a-) Cilindro disforme retirado; b-) Reator modificado.



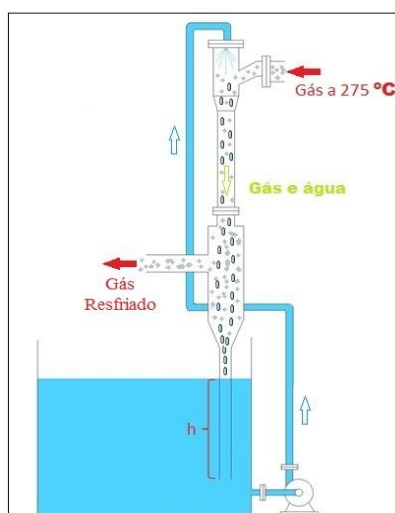
A modificação reduziu consideravelmente o encalhamento da biomassa no reator, fato que foi observado através do tempo de funcionamento do gaseificador em condições estáveis. Em outras palavras, o fluxo de biomassa e a vazão do gás produzido tornaram-se constantes.

3.2.2.2 Ampliação do Efeito da Lavagem e da Refrigeração do Gás Pobre

Como mencionado anteriormente, alguns dos componentes do gaseificador têm por função a lavagem do gás produzido, que possibilitam a remoção de resíduos provenientes da gaseificação. Além da remoção de resíduos do gás pobre, o sistema de lavagem, auxilia no resfriamento do mesmo, antes da sua utilização na alimentação do motor.

No sistema de lavagem do gás pobre, é essencial que apenas a parte líquida retorne para os reservatórios e que o gás possa seguir pela lateral do difusor (item 6 da Figura 3-2). Porém, verificou-se que o gás ultrapassava o selo de água (formado pela coluna de água de altura h , ver Figura 3-5) no reservatório, escapando, assim, para o ambiente. Verificou-se também, que a temperatura da água nesse reservatório (com capacidade de 75 l) aumentava até alcançar, aproximadamente, 46 °C no decorrer do processo de gaseificação.

Figura 3-5: Ilustração do sistema de lavagem e resfriamento do gás.

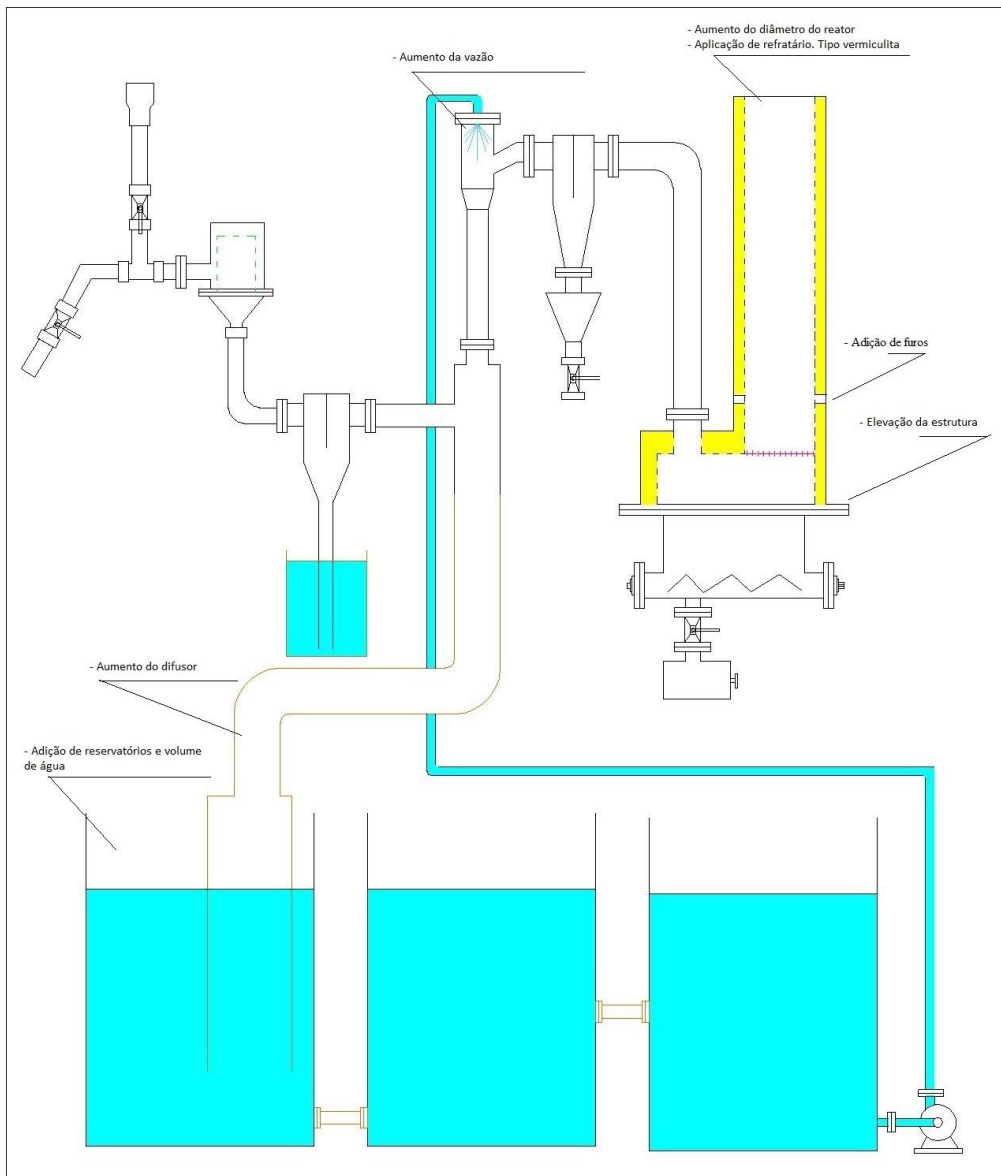


Com o intuito de conter aquele vazamento de gás para o ambiente, aumentou-se o diâmetro e o comprimento do difusor, dentre outras mudanças, de forma que o gaseificador foi elevado em 1 m, instalando-o sobre uma base de ferro.

Para aumentar o resfriamento e a eficiência do sistema de lavagem do gás pobre, adicionaram-se 3 reservatórios de água, totalizando 435 l, em substituição ao tanque inicial de 75 l, além de se fazer uso de um bico de esguicho que proporcionou maior vazão.

Todas as modificações já mencionadas anteriormente são esquematizadas na Figura 3-6.

Figura 3-6: Ilustração do sistema gaseificador definitivo diante às mudanças.



3.3 O MOTOR E O GERADOR UTILIZADOS NESTE TRABALHO

O gás pobre produzido no gaseificador alimenta um motor (acoplado a um gerador) do ciclo Otto. O motor utilizado neste trabalho possui as seguintes especificações: fabricante Briggs e Straton, modelo Vanguard V-Twin (Figura 3-7), de 2 cilindros em V, de quatro tempos ICE. Possui cilindrada total de 570 cm³, potência nominal de 18 hp (13,44 kW), originalmente a gasolina, com taxa de compressão de 8,5:1 (ver Tabela 3-1).

Figura 3-7: Motor VANGUARD V-Twin de 18 hp.



Tabela 3-1: Alguns dados técnicos do motor VANGUARD.

Motor VANGUARD 18 hp - OHV	
Número de cilindros	2 em V
Partida	Manual ou elétrica
Cilindrada total	$2 \times 285 \text{ cm}^3 = 570 \text{ cm}^3$
Ciclo	Otto – Gasolina
Diâmetro do Cilindro	72 mm
Curso do Pistão	70 mm
Ângulo de Ignição	22,2°
Taxa de Compressão	8,5 : 1
Volume da Câmara de Combustão	38 cm ³

O gerador utilizado neste trabalho é da marca TOYAMA, modelo TG2500MX (Figura 3-9), com geração nominal máxima de 2,2 kVA. Os geradores elétricos apresentam altos rendimentos, em até 93 %, na sua geração nominal máxima (SÁNCHEZ, 2010).

O motor e gerador são apoiados por coxins sobre uma estrutura metálica simples, de tal forma que seus eixos foram alinhados e um acoplamento estabeleceu a ligação entre ambos (Figura 3-8).

Figura 3-8: Motor e gerador montados.



Operando junto ao gaseificador, o grupo gerador supracitado tem como objetivo produzir potência de 1 kW_e, utilizando apenas como combustível, o gás pobre.

Neste trabalho, alguns dispositivos são responsáveis por auxiliar no controle da geração elétrica. Esses são descritos nos dois subtítulos a seguir.

3.3.1 O Misturador e Regulador de Fluxo Ar-Gás Pobre

Com o objetivo de fazer a adequada proporção da mistura ar/combustível, foi projetado um regulador de fluxo, (Figura 3-9), disposto em formato de "Y" e com uma regulagem manual, esse, foi inserido antes do carburador.

Figura 3-9: Misturador e regulador de fluxo ar-combustível.

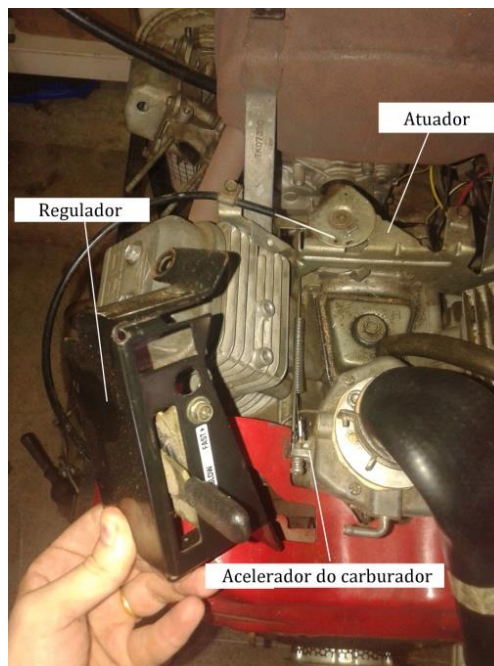


3.3.2 O Governador Mecânico de Velocidade

O motor utilizado conta com um governador mecânico de velocidade (Figura 3-10). A princípio, esse atuador modifica a posição do eixo do acelerador, fazendo com que a rotação do motor se mantenha constante para qualquer potência, na ocorrência de mudança de carga e/ou da composição da mistura admitida. Um mecanismo centrífugo contido no eixo do motor é ligado aos mecanismos (molas, braços, hastes, etc) do regulador, atuando na abertura ou fechamento da válvula borboleta (ou acelerador) contido no carburador.

Este sistema é de grande importância, visto que há variação, repentina e imperceptível ao operador, da composição do gás, no funcionamento do sistema gaseificador/motor Otto/gerador.

Figura 3-10: Governador mecânico de velocidade.



Durante o funcionamento do motor, a abertura da borboleta do carburador (pela atuação do governador mecânico supracitado) faz com que ocorra um aumento da interação motor/reator. Quando da aceleração, há uma excitação do gaseificador através de um aumento da sucção do ar pelas entradas laterais e topo do reator (adicionando sucção junto ao efeito Venturi), e assim produzindo mais gás pobre. Tal ação potencializa a gaseificação e a geração elétrica.

3.3.3 Aumento da Taxa de Compressão no Motor VANGUARD

Foi observado durante alguns testes iniciais, que o motor operava de forma ineficiente e falha, quando utilizava-se gás pobre na sua alimentação. Frente a isso, foi lançada a hipótese de que a taxa de compressão poderia, naquele momento, estar abaixo daquela realmente demandada pelo gás, nas características físico-químicas que esse se encontrava. Então, resolveu-se aumentar a taxa de compressão.

O procedimento para aumento da taxa de compressão envolveu o desbaste dos dois cabeçotes (ver Figura 2-3). O desbaste foi executado na fresadora da Oficina Mecânica da UFPB, resultando na diminuição total de 3,5 mm na altura de cada cabeçote (Figura 3-11).

Figura 3-11: a-) Cabeçotes desmontados; b-) Operação de fresagem no cabeçote; c-) Resultado da usinagem feita no cabeçote.



Finalizado o processo, a taxa de compressão foi calculada, atingindo-se um valor de 11,68:1.

Esse procedimento fez com que o motor pudesse operar de forma contínua e eficiente utilizando-se o gás pobre como combustível. Também, foi possível operar com o combustível original, a gasolina.

3.4 APARATO EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR

Além do gaseificador, motor e gerador apresentados acima, alguns equipamentos utilizados nos testes, são descritos abaixo.

3.4.1 Serra de Bancada Elétrica

Para padronizar o tamanho e forma da biomassa a ser utilizada, empregou-se uma serra de bancada (Figura 3-12).

Figura 3-12: Serra de Bancada.



3.4.2 Balança Digital

Para a medição do consumo da biomassa, fez-se uso de uma balança eletrônica digital, da marca *ACCULAB*, com capacidade de 6.000 kg e exatidão de 0,001 g. Para a medição da massa de uma amostra de um retalho da biomassa, recorreu-se a uma balança, também eletrônica, da marca *Shimadzu*, com exatidão de 0,0001 g (Figura 3-13).

Figura 3-13: Balanças utilizadas para obtenção da massa de biomassa.



3.4.3 Termobalança

A termobalança analítica da marca *RADWAG*, tipo *MAC 210*, disponível no Laboratório de Tecnologia Química (CT – UFPB), foi utilizada para a medição da umidade da biomassa (Figura 3-14). Com resolução de 0,001% de umidade e 1 mg de massa, e capacidade de medição em amostras de até 210 g. A temperatura utilizada foi de 105 °C e programação auto.

Figura 3-14: Termobalança para medição da umidade.



3.4.4 Anemômetro Digital

Um Anemômetro de marca *ICEL* modelo *AN – 4870*, tipo ventoinha, (Figura 3-15), foi utilizado para efetuar medições da velocidade do ar v_a (em m/s), nos condutos do sistema.

Figura 3-15: Anemômetro.



Devido ao fato de esse instrumento medir a velocidade do ar, para obter a velocidade do gás v_g , deve-se multiplicar a velocidade medida v_a por 1,03 (referente a razão de densidades que existe entre o gás pobre e o ar).

3.4.5 Analisador de Gases

A análise dos gases foi feita com o equipamento *Discovery G4* da *Alfateste*, constituído de: central de análise eletrônica e sonda. E que, com uso de um software adequado, exibe os resultados na tela de um computador (Figura 3-16).

Figura 3-16: Analisador de gases.



3.4.6 Manômetro em U

Para medir a pressão na linha do gás relativo ao ambiente, utilizou um manômetro em U (Figura 3-17).

Figura 3-17: Manômetro em U.



3.4.7 Termômetro

Na medição das temperaturas foi utilizado o termo-anemômetro digital YK2005AH (Figura 3-18), com sensor de temperatura do tipo *K*.

Figura 3-18: Medidor de temperatura.



3.4.8 Banco de lâmpadas

Durante os testes, utilizou-se um sistema resistivo formado por seis lâmpadas de 250 - 280 W e duas de 150 - 180 W (ver Figura 3-19). O banco de lâmpadas foi construído no próprio LI, para servir como simulador de carga do grupo gerador.

Figura 3-19: Banco de lâmpadas.



3.4.9 Analisador de Energia

O analisador *HIOKI 3197*, foi conectado ao banco de lâmpadas para análise instantânea da corrente, voltagem, frequência e potência elétrica real, no momento da geração (Figura 3-20).

Figura 3-20: Analisador de energia.



3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.5.1 Seleção da Biomassa

A biomassa utilizada na alimentação do gaseificador foi obtida através de rejeitos de madeiras, mais precisamente, restos de cadeiras, portas, madeira de construção, ripas, etc. disponibilizados pela própria UFPB.

Segundo DASAPPA et al (2003), o tamanho da biomassa influi no movimento do material, qualidade do gás e formação de alcatrão. Recomenda-se que a dimensão da unidade de biomassa seja de um duodécimo a um sexto do diâmetro do reator, preferencialmente, uma mistura de tamanhos dentro dessa faixa. Acima do limite superior, há formação de gás de baixa qualidade devido à queda de eficiência da volatilização. E tamanhos pequenos de biomassa viabilizam a formação de alcatrão.

Para este trabalho foi utilizado madeira de formato cúbico com 20 mm de aresta (Figura 3-21).

Figura 3-21: a-) Tamanho e formato cúbico da biomassa utilizada, b-) Topo do gaseificador e aspecto relativo da dimensão biomassa e diâmetro do reator projetados.



Além de tamanho e forma adequados, é significativo para a gaseificação, a utilização de biomassa com massa específica maior do que 300 kg/m^3 , e umidade abaixo de 15% (BEZERRA, 2016).

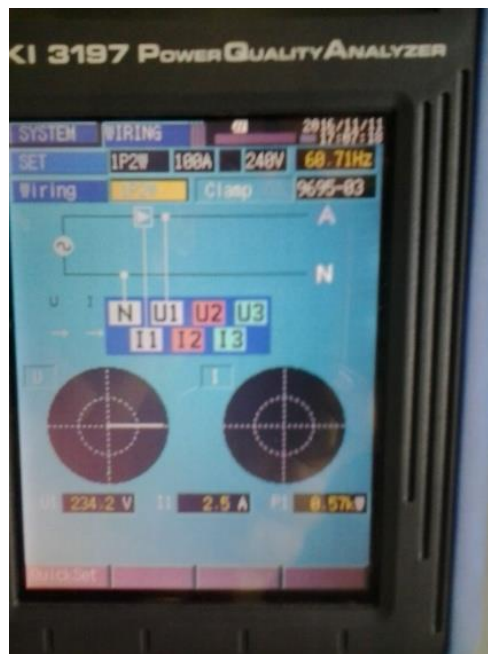
Antes dos testes, três amostras são previamente separadas para se fazer o cálculo da massa específica da biomassa ρ_b , e em seguida, verifica-se o teor de umidade $\%UM$ da mesma. O PCI_b é encontrado através da Eq. (2.3) utilizando o teor de umidade médio de uma amostra do experimento. Também foi considerada a massa específica da biomassa utilizada no experimento, levando em conta a massa específica média

daquelas amostras.

3.5.2 Carga aplicada ao Grupo Gerador

No funcionamento do sistema gaseificador/motor Otto/gerador, para simular carga elétrica, utiliza-se o banco de lâmpadas (ver Figura 3-19). Também ligado, por fios elétricos, aos fios do banco de lâmpadas tinha o analisador de energia (ver Figura 3-20), que fornece os valores de potência P_e , voltagem, corrente elétrica e frequência elétrica (Figura 3-22).

Figura 3-22: Visor do analisador de energia.

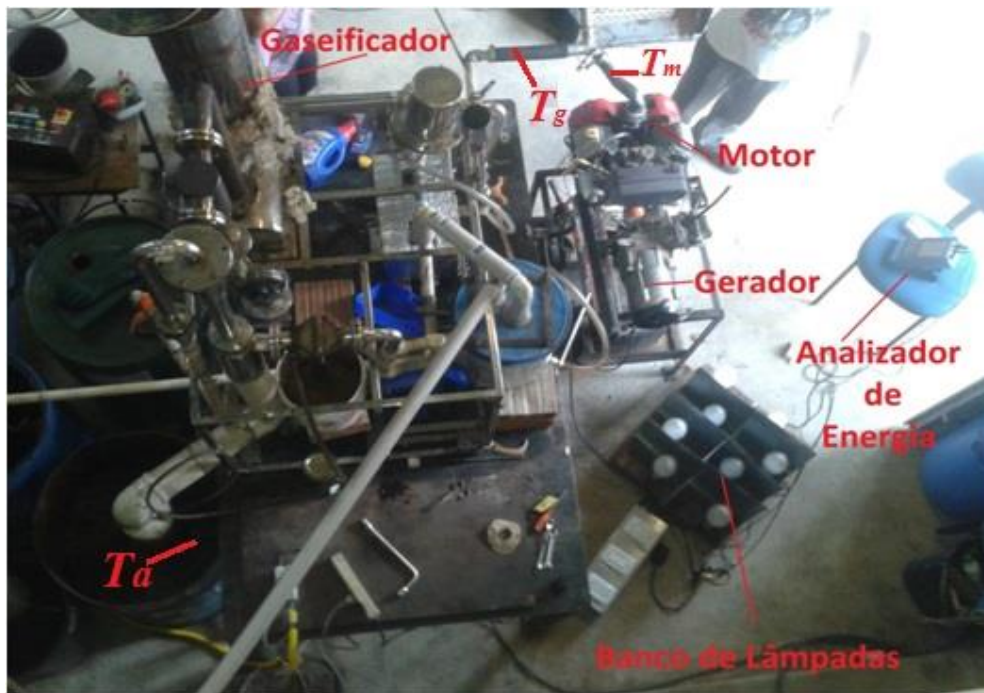


O regulador do governador de velocidade é mantido numa posição para estabelecer a rotação motora de 1800 rpm, mantendo-a qualquer que seja a potência, a voltagem em 220 V e a frequência de 60 Hz.

3.5.3 Medição das Temperaturas

Para cada potência elétrica, foram medidas com o termômetro (Figura 3-19) as temperaturas: da água no reservatório (T_a), do gás pobre (T_g) e da mistura ar-gás pobre a ser admitida no motor (T_m). A Figura 3-23 mostra os pontos onde as medidas de temperaturas foram efetuadas.

Figura 3-23: Estrutura montada e a localização das medições das temperaturas.



3.5.4 Medição da Composição dos Compostos Gasosos

A composição volumétrica dos compostos gasosos foi medida através do analisador de gases (ver Figura 3-16), na saída do gaseificador (gás pobre) e no escapamento do motor (gases de escape).

3.5.5 Vazão do Gás Pobre

A velocidade do gás pobre produzido v_g foi medida com o anemômetro (ver Figura 3-15), e o diâmetro d utilizado naquela medição foi de 71 mm. Determinando assim, o fluxo de gás proveniente da gaseificação V_g em $[m^3/s]$.

3.5.6 Procedimento de Realização dos Ensaio

Depois de verificar, no gás produzido, o teor de CO acima de 12 aciona-se o motor, inicialmente sem adição de carga. Verificando-se o funcionamento contínuo e estável do motor, a geração elétrica é iniciada ligando-se uma lâmpada. No intervalo de

5 minutos (para a estabilização dos parâmetros), fazem-se as medições: de temperaturas, das composições dos gases, do consumo de biomassa e da pressão na linha do gás. Após concluir as medições, acende-se mais uma lâmpada e os dados são novamente coletados para aquela nova potência alcançada. Procede-se assim, até que se obtenha a máxima potência que o sistema gaseificador/motor Otto/gerador possa oferecer.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos testes realizados, ao tempo em que serão tecidas considerações sobre eles.

4.2 TESTES PRELIMINARES

Antes de se iniciar os testes com o sistema formado pelo Gaseificador e Grupo Gerador (GGG), foram feitos ensaios preliminares com o gaseificador. Também, foi testado o motor com taxa de compressão de 11,68:1 buscando se determinar a eficiência do grupo gerador, ao se utilizar a gasolina como combustível.

4.2.1 Gaseificador

Alguns dados do gaseificador são descritos na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Dados do reator e da gaseificação.

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno do reator	150 mm
Diâmetro externo do reator	220 mm
Profundidade do topo até a grelha	780 mm
Altura entre a grelha às entradas de ar	120 mm
Tamanho e formato da biomassa	20 mm de aresta; formato cúbico.
Umidade da biomassa	8,2218%
Volume do leito do reator	9,5 dm ³
Suporte mássico de biomassa no reator	4,71 kg
Velocidade e vazão de gás (v_g e V_g)	1,60 m/s; 6,33 dm ³ /s
Consumo médio de biomassa, M_b	4,88 kg/h
Poder calorífico inferior da biomassa, PCI_b	18,073611 MJ/kg
Formação de cinzas	0,57 kg/h
Pressão manométrica do gás na linha	0,0022 bar
Temperatura de saída do gás	275 °C
Teor de CO volumétrico, % CO	12,39 a 14,38%
Poder calorífico inferior do gás pobre, PCI_g	3,0686 a 3,4428 MJ/Nm ³
Eficiência do gaseificador, Eq. (2.7)	79 a 89 %

De acordo com a Tabela 4-1 e das análises na operação do gaseificador utilizado neste trabalho, observa-se que:

1. A quantidade de cinzas, e também de um volume de carvão que atravessou a grelha correspondeu, em média, a 11,68% da quantidade de biomassa consumida.

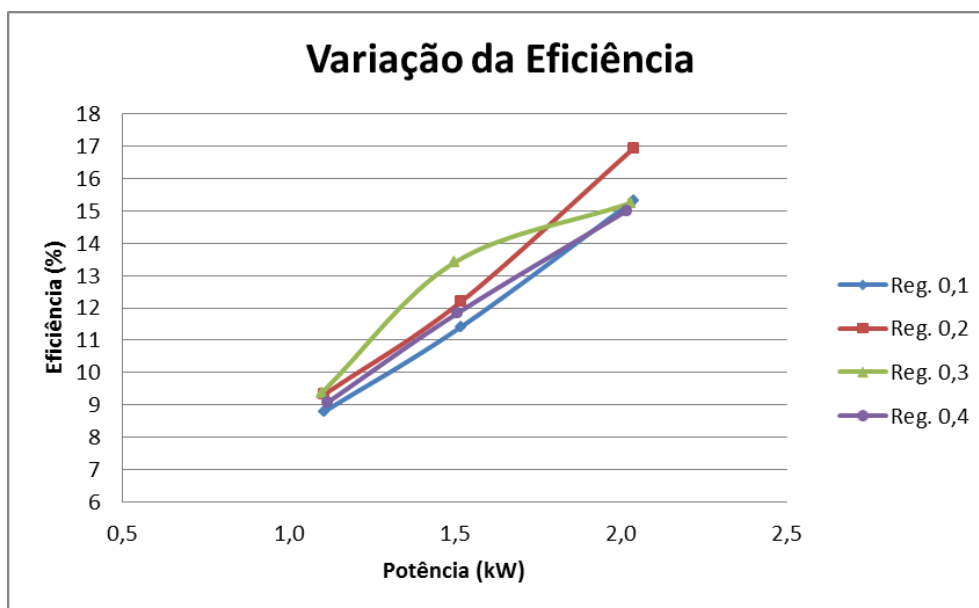
2. A eficiência do gaseificador ficou entre 79 e 89%, tendo sido calculada através da Eq. (2.7). Para efeito de comparação citamos que às determinadas por RUMÃO (2013), que ficaram entre 48 a 85%, e as de BEZERRA (2016), que se situaram entre 50 a 98%.

3. Foi observado que o teor de CO variou, entre 12,39 e 14,38% durante as operações do gaseificador.

4.2.2 Eficiência do Grupo Gerador usando Gasolina como Combustível

Foram feitos 4 testes no motor VANGUARD acoplado ao gerador elétrico TOYAMA. Foram obtidos diferentes valores para a eficiência do grupo gerador a gasolina, diante algumas potências elétricas com relação a algumas regulagens na folga que há entre o balancim e o topo da válvula (de admissão e descarga) (SILVA et al, 2016) (Figura 4-1).

Figura 4-1: Eficiências do grupo gerador usando como combustível a gasolina.



Fonte: SILVA et al (2016).

De acordo com a Figura 4-1, o grupo gerador (alimentado com gasolina) tem eficiência próxima de 9 % para a potência de 1,17 kW, e a tendência é ser menor a medida que a potência decresce.

4.3 MASSA ESPECÍFICA E UMIDADE DA BIOMASSA

A Tabela 4-2 apresenta os resultados obtidos nas medições de umidade e os valores da massa específica de 5 amostras da biomassa utilizada durante os testes.

Tabela 4-2: Valores da umidade e massa específica da biomassa.

	Umidade [%]	Massa Específica [kg/m³]
1	7,813	947,091739
2	9,139	1023,138129
3	6,891	729,2387474
4	7,755	996,162456
5	9,511	922,0240307
Média	8,2218	923,5310203

Os resultados das medições da umidade e da massa específica apresentaram magnitudes dentro da faixa recomendada para aplicação em GGG (ver item 3.5.1). Na realização dos cálculos do PCI_b através da Eq. (2.3), foi utilizado o valor médio da umidade disposto na Tabela 4-2, determinando-se, assim, o valor de 18073,61 kJ/kg.

4.4 TEMPERATURAS

Durante os testes foi verificado que a temperatura ambiente foi de 28,5 °C e a temperatura média de saída dos gases no reator de 275 °C. Foram medidas as temperaturas, no final dos 5 minutos para cada P_e alcançada, da água do reservatório (T_a), do gás pobre (T_g), e da mistura ar/gás pobre (T_m). Esses valores são apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Temperaturas observadas diante a obtenção de potência elétrica.

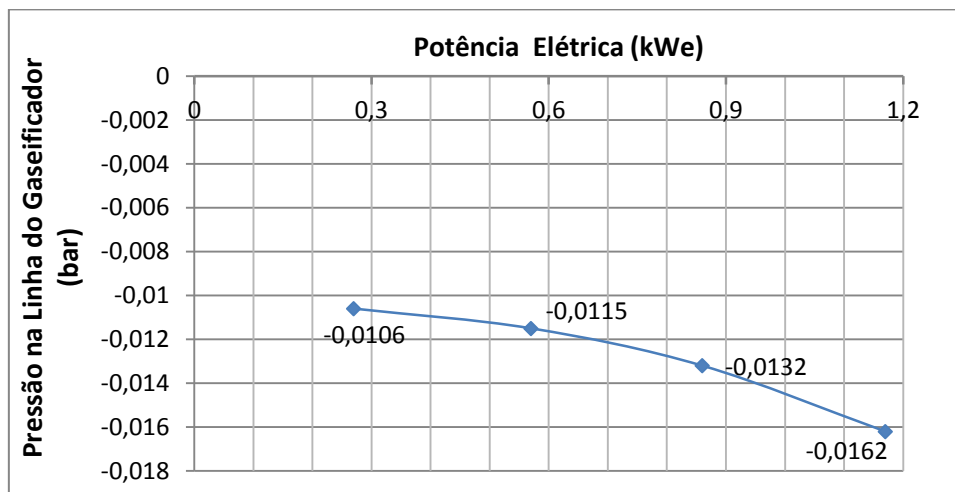
Potência (kW _e)	T _a (°C)	T _g (°C)	T _m (°C)
0,27	36,5	39,0	35,8
0,57	38,8	41,0	37,0
0,86	40,6	42,7	38,0
1,17	41,0	44,0	38,1

O aumento da potência elétrica, aumenta consequentemente as temperaturas T_a, T_g e T_m.

4.5 PRESSÃO NA LINHA DO GASEIFICADOR

A sucção provocada pelo processo de admissão do motor acarreta uma queda de pressão do gás pobre nas linhas das tubulações do gaseificador. A Figura 4-2 apresenta a distribuição da pressão na linha de gás pobre em função da potência elétrica gerada, variando de -0,0106 à -0,0162 bar.

Figura 4-2: Pressão do gás pobre na linha de distribuição do gaseificador relacionado à potência elétrica gerada.



No reator, essa queda de pressão viabiliza o aumento da entrada de ar atmosférico pelos bocais laterais e pelo topo do reator. Interferindo, assim, na dinâmica das reações e na composição dos gases gerados.

4.6 COMPOSIÇÃO DOS GASES DURANTE O FUNCIONAMENTO DO GASEIFICADOR GRUPO GERADOR

Com o analisador de gases foi obtida a composição de alguns gases, para cada potência alcançada (Tabela 4-4). Dentre elas, as porcentagens volumétricas de: CO na saída do gaseificador (%CO), CO na saída do escapamento do MCI (%CO_{esc.}), CO₂ na saída do gaseificador (%CO₂), CO₂ na saída do escapamento do MCI (%CO₂_{esc.}), gás oxigênio na saída do gaseificador (%O₂), O₂ na saída do escapamento do MCI (%O₂_{esc.}). Também foram determinados os valores de lambda no escapamento (λ).

Tabela 4-4: Composição dos gases produzidos pelo Gaseificador e emitidos pelo escapamento do motor, relacionados às potências obtidas.

Potência (kWe)	%CO	%CO _{esc.}	%O ₂	%O ₂ _{esc.}	%CO ₂	%CO ₂ _{esc.}	λ
0,27	13,68	2,85	3,87	3,46	12,00	17,30	1,05
0,57	14,38	0,73	3,83	3,31	11,06	16,80	1,18
0,86	13,92	1,09	4,51	0,98	12,10	20,90	1,01
1,17	12,39	1,29	2,14	1,87	15,80	17,70	1,03
Média	13,59	1,49	3,59	2,40	12,74	18,17	

Mesmo operando o motor com mistura pobre ($\lambda > 1$), para todas as potências do ensaio, ainda foi possível constatar uma pequena quantidade de CO na saída do escapamento.

4.7 CONSUMO DE BIOMASSA E CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOMASSA

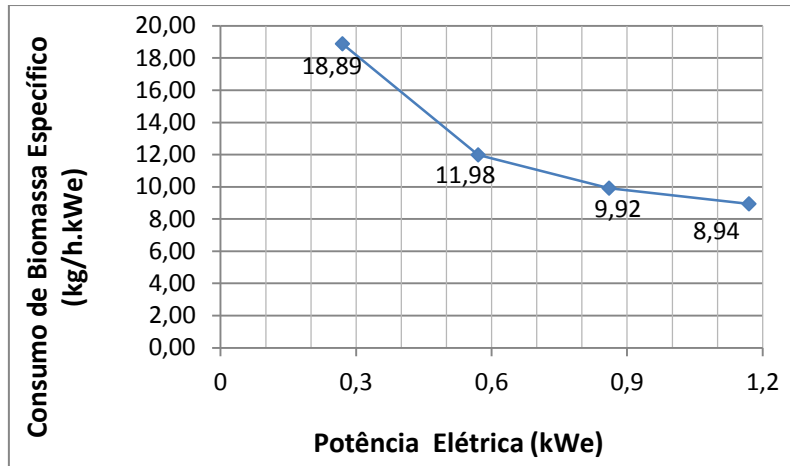
O consumo de biomassa M_b e a eficiência global η_{ggg} , relativo às potências alcançadas estão elencados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Consumo da biomassa utilizada e a eficiência global.

Potência (kWe)	M_b [kg/h]	η_{ggg} [%]
(sem carga)	4,88	-
0,27	5,10	1,05
0,57	6,83	1,66
0,86	8,53	2,01
1,17	10,46	2,23

O consumo específico de biomassa é a razão entre o consumo de biomassa M_b e a potência elétrica P_e observada no experimento. Os valores, com relação à P_e , podem ser verificados na Figura 4-3.

Figura 4-3: Consumo específico de biomassa.

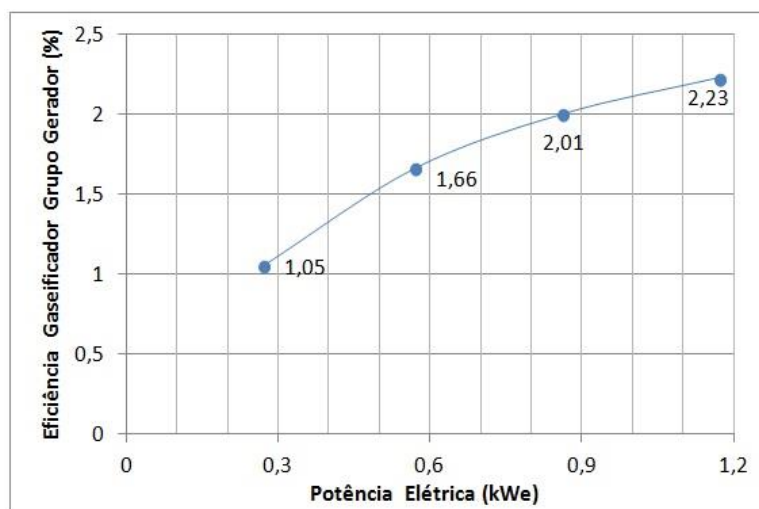


Pode-se observar que o consumo específico da biomassa diminui à medida que se aumenta a potência elétrica gerada.

4.8 EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR GRUPO GERADOR

A Figura 4-4 demonstra o comportamento da eficiência do GGG, calculada a partir da Eq. (2.8), com relação às várias potências obtidas.

Figura 4-4: Eficiência do Gaseificador Grupo Gerador.



De acordo com a Figura 4-4, a eficiência do GGG aumenta com o aumento da potência elétrica. Atingindo um valor máximo de 2,23% na máxima potência.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

1. O gaseificador com eficiência entre 79 e 89% e teor de monóxido de carbono %CO entre 12,39 e 14,38% (ver Tabela 4-1), conseguiu operar por mais de 6 horas, gerando até 1,17 kW_e com eficiência máxima de 2,23%.

2. Durante a geração elétrica, os teores de monóxido de carbono (%CO) e de dióxido de carbono (%CO₂) do gás pobre produzido na gaseificação (ver Tabela 4-4) se situaram dentro dos limites indicados na Tabela 2-3 (para o gaseificador co-corrente), relacionados ao gás de síntese.

3. O sistema de lavagem e resfriamento conseguiu diminuir de 275 para 41,6 °C (em média) a temperatura do gás pobre durante a geração elétrica, como mostrado na Tabela 4-3. De acordo com SÁNCHEZ (2010), recomenda-se que o gás pobre esteja com temperatura, em torno de 30 °C, para que possa ser utilizado em motores de combustão interna.

4. Os testes foram realizados utilizando-se, apenas, o ângulo de ignição de 22°, no motor VANGUARD. É possível aumentar a eficiência do motor e conseqüentemente do sistema gaseificador/grupo gerador, escolhendo-se um ângulo de ignição mais adequado ao gás pobre, como ocorreu em RUMAO (2013) e em BEZERRA (2016).

5. Mesmo com a utilização do sistema de lavagem, verificou-se a presença de alcatrão em condutos do gaseificador e na admissão do motor. Para reduzir a quantidade e os efeitos do alcatrão no motor, deve se fazer funcionar, por cerca, de 5 minutos, o MCI com gasolina, após seu uso com o gás pobre. Um sistema de lavagem mais eficiente se faz necessário.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar diferentes tamanhos de biomassa dentro da faixa recomendada e verificar a influência na qualidade do gás, na limpeza e na geração da potência elétrica.

- Aumentar a capacidade de filtração, ou modificar o sistema de limpeza e observar o desempenho da gaseificação, qualidade do gás e a influência na potência elétrica.

- Construir e testar um filtro tendo como elemento filtrante a própria biomassa a ser testada. De forma que o alcatrão aderido à biomassa que no momento da filtração proporcionou, possa elevar o poder calorífico do gás quando gaseificar tal biomassa.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. D. L. **Caracterização de um Gaseificador do tipo Downdraft.** Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPA. Orientador: Manoel Fernandes Martins Nogueira. Belém, 2010.

ALVES, A. F. M. **Influência do Resfriamento da Turbina no Desempenho de um Motor Diesel Tuurboalimentado Ottolizado para Gás Natural.** Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB. Orientador: Emerson Freitas Jaguaribe. João Pessoa, 2016.

BEZERRA, A. F. **Aprimoramento da Eficiência de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por Grupo Gerador Alimentado com Gás Pobre.** Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB. Orientador: Emerson Freitas Jaguaribe. João Pessoa, 2016.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna.** Volume 1. São Paulo, 2012.

DASAPPA, S., MUKUNDA, H. S., PAUL, P. J. et al. **Biomass to Energy: The Science and Technology of the IISc Bio-energy Systems.** 1ed. Índia. ABETS. 2003.

DIAS, M. S. C. **Uso de Pequenos Gaseificadores para Geração de Energia Elétrica e Bombeamento d'água em Localidades Remotas,** Solarterra Engenharia e Serviços Ltda, São Paulo, 2004. Disponível em:

<<http://luizmeira.com/dados/recicla/gaseificadores.pdf>> Acesso em: 23/08/2017.

FAO - Food Agriculture Organization of the United Nations. **Wood Gas as engine Fuel.** A Report of the Mechanical Wood Products Branch of FAO Forestry. Paper No 72. 1986.

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.** Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado em Engenharia de edificações e saneamento. Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2012.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial.** Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

- GODINHO, M. **Gaseificação e Combustão de Resíduos Sólidos da Indústria Calçadista**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. 2006.
- HOLMAN, J. P. **Thermodynamics**. Third Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 1980.
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. **Energie aus Biomass: Grundlagen, Techniken un Venfahren**, Springer Velag, 2001.
- KAUPP, A., GOSS, J. R. **State of the Art Report for Small Scale (to 50 kW). Gás Producer-Engine Systems**. Department of Agricultural Engineering University of California Davis, CA. 1981.
- LORA, E. E. S., VENTURINI, O. J. **BIOCOMBUSTÍVEIS**. Interciência. 2ª edição. Volume 1. Rio de Janeiro, 2012.
- MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2ª Ed. Publindústria, Edições Técnicas, Portugal, 2006.
- PORTAL BRASIL. **Capacidade Elétrica Atinge 149 mil MegaWatts em Novembro**. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/01/capacidade-eletrica-atinge-149-mil-megawatts-em-novembro>> Acesso em 23/08/2017.
- REED, T.B., & DAS, A. **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems**, Biomass Energy Foundation Press, USA, 1988.
- RUMÃO, A. S. **Geração de potência e energia elétrica a partir da gaseificação de rejeitos de biomassa**. 106 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2013.
- SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**, São Paulo: Átomo, 2010.
- SILVA, F. S., RUMÃO, A. S., GONÇALVES, M. S. J., FIGUEIREDO, D. L. S., LIMA, B. A. A. **Análise da Eficiência de um Motor de Combustão Interna a partir da Variação na Regulagem das Válvulas de Admissão e Exaustão**. XVI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Goiás. 2016.
- WYLEN, G. J. V., SONNTAG, R. E., BORGNAKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**, tradução da 6ª ed. americana: Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

YOSHIKAWA, K. R&D (Research and Development) on distributed power generation from solids fuels. Elsevier/Energy, Science@Direct. 2006.