



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

**USO DE UM SISTEMA QUE CONTRIBUI PARA A
ADMISSÃO CONTÍNUA DO COMBURENTE EM UM
GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

por

Jandemarques Alexandre
Soares da Silva

*Tese apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de
Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Abril, 2019

**JANDEMARQUES ALEXANDRE
SOARES DA SILVA**

**USO DE UM SISTEMA QUE CONTRIBUI PARA A
ADMISSÃO CONTÍNUA DO COMBURENTE EM UM
GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586u Silva, Jandemarques Alexandre Soares da.

USO DE UM SISTEMA QUE CONTRIBUI PARA A ADMISSÃO
CONTINUA DO COMBURENTE EM UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA /
Jandemarques Alexandre Soares da Silva. - João Pessoa,
2019.

82 f. : il.

Orientação: Emerson Freitas Jaguaribe.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Gaseificação de biomassa. 2. Geração de energia
elétrica. 3. Eficiência energética. 4. sistema de
desobstrução de grelha. I. Jaguaribe, Emerson Freitas.
II. Título.

UFPB/BC

USO DE UM SISTEMA QUE CONTRIBUI PARA A ADMISSÃO CONTÍNUA DO COMBURENTE EM UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA

por

JANDEMARQUES ALEXANDRE SOARES DA SILVA

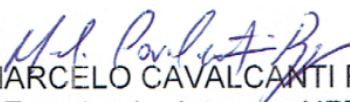
Tese aprovada em 26 de abril de 2019



Prof. Dr. EMERSON FREITAS JAGUARIBE
Orientador - UFPB



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ADRIANO SITÔNIO RUMÃO
Examinador Externo - UFPB



Prof. Dr. FÁBIO BARBOSA FERRAZ
Examinador Externo - IFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa, Fabiana Bizerril Soares, a minha filha, Mariana Bizerril Soares, aos meus pais, João Pedro e Mariza Soares, aos meus irmãos, Jean Max e Jeanderson Soares, a minha cunhada, Naja Queiroz, e minhas sobrinhas Larissa e Lívia Queiroz, que estiveram sempre ao meu lado e me incentivaram no decorrer do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela benção de concluir este trabalho, a minha esposa Fabiana, à minha filha Mariana pelo incentivo e paciência durante a elaboração desta tese, aos meus pais João Pedro e Mariza, pelo apoio incondicional e dedicação para comigo.

Ao meu orientador Emerson Freitas Jaguaribe, pela disposição e diligência na coordenação desta pesquisa, manifesto minha apreciação pelas discussões contrutivas que culminaram com a realização deste trabalho.

Minha gratidão aos amigos do Laboratório de Inovações (LI) que estiveram sempre presentes nas diversas etapas desta pesquisa e mais particularmente, a Everton, Vicente e Merques, que me auxiliaram nos experimentos.

Não poderia, ainda, me esquecer do professor Adriano e de todos os estagiários do LI, pelo apoio dispensado durante a realização desta tese.

Estou igualmente agradecido aos amigos do Laboratório de Carvão ativado (LCA), em especial a Wendell, pelos ensaios de termogravimetria e pela caracterização da biomassa.

Sou, também, grato ao técnico do LI, Carlos Guimarães, pelo apoio na execução das modificações feitas no gaseificador, e a todos aqueles, que de uma forma ou de outra concorreram para que construísse e finalizasse este trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	17
INTRODUÇÃO	17
1.1. Justificativa e motivação	17
1.2. Objetivo geral	20
1.3. Objetivos específicos	20
1.4. Organização do trabalho	21
CAPÍTULO II	22
A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA	22
2.1. Introdução	22
2.2 Princípios do processo de gaseificação	22
2.2.1. A zona de secagem	23
2.2.2 A zona de pirólise	24
2.2.3. A zona de combustão	24
2.2.4. A zona de redução	25
2.3. Gaseificação, processo autossuficiente	25
2.4. Tipos de gaseificadores	26
2.4.1. Gaseificadores contracorrentes	26
2.4.2. Gaseificadores co-correntes	27
2.4.3. Gaseificadores de fluxo cruzado	28
2.4.4. Gaseificadores de leito fluidizado	29
2.5. O gaseificador instalado no Laboratório de Inovações	29

2.5.1. Modificações realizadas no sistema de gaseificação original	31
2.5.2. A grelha retentora de carvões em formação do gaseificador	32
2.5.3. Mecanismo de perfuração de cinzas	33
2.6. Critérios de avaliação do desempenho da gaseificação	34
2.6.1. Teor de umidade da biomassa	34
2.6.2. Relação entre PCI, PCS e teores de umidade da biomassa	35
2.6.3. Determinação do PCI do gás produzido	36
2.6.4. Avaliação da eficiência da gaseificação	36
2.6.5. Fluxo de gás pobre na linha de admissão do motor	38
2.7. Balanço de massa e balanço de energia no sistema	38
2.8. Conclusão	43
CAPÍTULO III	44
PROCESSO DE OTTOLIZAÇÃO DE MOTORES DIESEL NO LABORATÓRIO DE INOVAÇÕES	44
3.1. Introdução	44
3.2. Conceitos básicos referentes à motores de combustão interna	44
3.3. Motores de ignição comandada (Ciclo Otto)	46
3.4. Motores de ignição por compressão (Ciclo Diesel)	46
3.5. Ottolização de motores diesel no LI	47
3.5.1. Adaptações no motor a diesel e a introdução de componentes próprios do Ciclo Otto	47
3.5.2. Progressos efetuados no Laboratório de Inovações sobre a ottolização de motores	48
3.6. Conclusão	49
CAPÍTULO IV	50
DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	50
4.1. Introdução	50

4.2. Os equipamentos	50
4.2.1. Grupo gerador	50
4.2.2. O gaseificador	51
4.3. Instrumentos e equipamentos utilizados.....	52
4.3.1. Serra de bancada elétrica	52
4.3.2. Balança digital	52
4.3.3. Termobalança	53
4.3.4. Análise termogravimétrica	53
4.3.5. Calorímetro.....	54
4.3.6. Analisador de gases veiculares	55
4.3.7. Simulador de carga	55
4.4. Os primeiros experimentos	56
4.4.1. Determinação do teor de umidade da biomassa.....	56
4.4.2. Procedimento para início do funcionamento do motor	57
4.4.3. Intervalo de acionamento do mecanismo de perfuração de cinzas.....	58
4.4.4. Avaliação do consumo de biomassa.....	58
4.6. Conclusão.....	58
CAPÍTULO V	59
RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1. Introdução	59
5.2. Caracterização da biomassa	59
5.2.1. Teor de umidade da biomassa.....	59
5.2.2. Determinação da massa específica da biomassa.....	60
5.2.3. Análise Termogravimétrica.....	60
5.2.4. Poder calorífico superior	63
5.2.5. Poder calorífico inferior	64
5.3. Caracterização do gás pobre.....	64

5.3.1. Composição do gás na tubulação de admissão do motor.....	64
5.3.2. Poder calorífico inferior do gás pobre.....	66
5.3.3. Composição dos gases da combustão do motor	67
5.4. Medidas de temperaturas do gás	68
5.6. Consumo de Biomassa	71
5.7. Eficiências	73
5.7.1. Eficiência do gaseificador	73
5.7.2. Eficiência do grupo gerador	73
5.7.3. Eficiência do sistema Gaseificador/Grupo gerador	74
5.8. Conclusão.....	75
CAPÍTULO VI.....	76
CONCLUSÕES.....	76
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do gaseificador de trabalho.....	23
Figura 2: Esquema de um gaseificador contracorrente	27
Figura 3: Esquema de um gaseificador co-corrente.	28
Figura 4: Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.....	28
Figura 5: Esquema de um gaseificador de leito fluidizado.	29
Figura 6: Componentes do gaseificador importado.....	30
Figura 7: Queimador e chama piloto	31
Figura 8: Reservatório de gás – Pulmão (Bezerra, 2016).....	32
Figura 9: Nível das cinzas acumuladas sobre a grelha (Luna, 2018)	33
Figura 10: Sistema de perfuração de cinzas	34
Figura 11: Ajuste de curva aos pontos experimentais de Yoshikawa (2006), e de Garcia (2002).	36
Figura 12: Diagrama esquemático do sistema e fluxos de massa e de energia de produtos a cada estágio	39
Figura 13: Pontos mortos do motor	45
Figura 14: Regulador de fluxo de gás pobre/ar (esquerda) e esquema (direita).....	48
Figura 15: Grupo gerador utilizado neste trabalho.....	51
Figura 16: Gaseificador utilizado neste trabalho.....	52
Figura 17: Termobalança.....	53
Figura 18: TGA	54
Figura 19: Calorímetro IKA C200	54
Figura 20: Analisador de gases discovery G4 da Alfatest	55
Figura 21: Simulador de carga elétrica.....	56
Figura 22: TGA para biomassa derivada do Cajueiro.	61
Figura 23: TGA para biomassa derivada da Oliveira.	61
Figura 24: TGA para biomassa derivado do Sombreiro.....	62

Figura 25: TGA para biomassa derivada da Mangueira.....	62
Figura 26: TGA para biomassa derivada da Cajazeira.	63
Figura 27: PCI do gás pobre na tubulação de admissão do motor em função da potência elétrica (Resultados do presente trabalho e de Luna (2018)).	67
Figura 28: Evolução da temperatura do gás, em função da potência, no caso do presente trabalho e de Luna (2018).....	69
Figura 29: Altura da coluna de fluido do tubo em “U”, localizado na tubulação de admissão de gás do motor, em função da potência elétrica, coletadas no presente trabalho e no de Luna (2018).	70
Figura 30: Fluxo de gás pobre na tubulação de admissão do motor, em função da potência elétrica, determinado no presente caso e no trabalho de referência.	70
Figura 31: Consumo de biomassa em função da potência elétrica, no presente caso e naquele do trabalho de referência.....	71
Figura 32: Diagrama Shankey do fluxo de energia do gaseificador.....	72
Figura 33: Consumo específico de biomassa em função da potência elétrica, no presente caso e no trabalho de referência.	72
Figura 34: Eficiência do gaseificador, para o presente trabalho e para o caso referenciado.	73
Figura 35: Eficiência do grupo gerador, baseada nos dados do presente trabalho e daquele de referência.	74
Figura 36: Eficiência dos sistemas gaseificador/grupo gerador, do presente trabalho e do de Luna (2018).	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reações de oxidação na zona de combustão.	24
Tabela 2: Reações dominantes na zona de redução.....	25
Tabela 3: Teor de umidade da biomassa.	59
Tabela 4: Massa específicas de dez amostras de biomassa usadas nos experimentos. ..	60
Tabela 5: Poder calorífico superior da biomassa.....	63
Tabela 6: Poder calorífico inferior da biomassa.....	64
Tabela 7: Análise dos gases na linha de alimentação do motor, realizadas através do analisador de gás, presente trabalho.	65
Tabela 8: Teores dos principais componentes do gás pobre na linha de alimentação do motor, obtidos através do analisador de gás, Luna (2018).	65
Tabela 9: Análise dos gases no escapamento do motor, realizadas através do analisador de gás, do presente trabalho.	67
Tabela 10: Teores dos gases no escapamento do motor, obtidos através do analisador de gás, Luna (2018).	68

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

C – Curso do pistão (m);
CT/UFPB – Centro de Tecnologia (Universidade Federal da Paraíba);
d – Diâmetro da tubulação de escoamento (m);
D – Diâmetro do cilindro (m);
DTG – Derivative Termogravimetry (Derivada Termogravimétrica);
g – Aceleração devido a gravidade (m/s^2);
GGG – Gaseificador/Grupo Gerador;
h – Altura da coluna de fluido no tubo em “ U ” (cm);
HC – Hidrocarbonetos (ppm);
 h_{LV} – Entalpia de vaporização da água a 25°C;
ICE – Ignição por Centelha;
ICO – Ignição por compressão;
IISc/CGPL – Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory;
LCA – Laboratório de Carvão Ativado;
LI – Laboratório de Inovação;
MAP – Manifold Absolute Pressure (Pressão Absoluta do Coletor);
MCI – Motores de Combustão Interna;
MNRE – Ministry of New and Renewable Energy;
 m_{cs} – Massa do combustível seco (kg);
 $m_{\text{água}}$ – Massa de água evaporada (kg);
 $\dot{m}_{\text{biomassa}}$ – Fluxo de biomassa de alimentação do gaseificador (kg/h);
 $\dot{m}_{\text{gásI}}$ – Fluxo de gás pobre que deixa o V.C.I (kg/h);
 $\dot{m}_{\text{gásII}}$ – Fluxo de gás pobre que deixa o V.C.II (kg/h);
 $\dot{m}_{\text{gásIII}}$ – Fluxo de gás pobre que deixa o V.C.III (kg/h);
 $\dot{m}_{\text{ar,a}}$ – Fluxo de ar aspirado pelo gaseificador (kg/h);

$\dot{m}_{ar,b}$ – Fluxo de ar aspirado pelo motor (kg/h);
 $\dot{m}_{H_2O,ep}$ – Fluxo de água que entra no sistema de lavagem primária (kg/h);
 $\dot{m}_{H_2O,es}$ – Fluxo de água que entra no sistema de lavagem secundária (kg/h);
 $\dot{m}_{H_2O,sp}$ – Fluxo de água que sai no sistema de lavagem primária (kg/h);
 $\dot{m}_{H_2O,ss}$ – Fluxo de água que sai no sistema de lavagem secundária (kg/h);
 $\dot{m}_{carvão}$ – Fluxo de carvão produzido no gaseificador (kg/h);
 $\dot{m}_{cinzas,a}$ – Fluxo de cinzas decantadas no cinzeiro do gaseificador (kg/h);
 $\dot{m}_{cinzas,b}$ – Fluxo de cinzas capturadas pelo ciclone (kg/h);
 $\dot{m}_{cinzas,c}$ – Fluxo de cinzas capturadas pelo sistema de lavagem primária (kg/h);
 $\dot{m}_{cinzas,d}$ – Fluxo de cinzas capturadas pelo sistema de lavagem secundária (kg/h);
 $\dot{m}_{cond,a}$ – Fluxo de condensados produzidos no sistema de lavagem primária (kg/h);
 $\dot{m}_{cond,b}$ – Fluxo de condensados produzidos no sistema de lavagem secundária (kg/h);
 $\dot{m}_{cond,c}$ – Fluxo de condensados produzidos na placa de condensação (kg/h);
 $\dot{m}_{exaustão}$ – Fluxo de gases de exaustão do MCI (kg/h).
 n – Número de cilindros do motor;
 $P1$ – Pressão do gás após a lavagem secundária;
 $P2$ – Pressão do gás após o filtro de manga;
 PCI_w – Poder calorífico inferior, na condição de umidade “w” (kcal/kg);
 $PCI_{biomassa}$ – Poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador (J/kg);
 $PCI_{gás}$ – Poder calorífico inferior do gás produzido pelo gaseificador (J/Nm³);
 $PCI_{carvão}$ é o PCI do carvão (kJ/kg);
 PCI_{cinzas} é o PCI das cinzas (kJ/kg);
 $PCI_{exaustão}$ é o PCI dos gases da exaustão do MCI (kJ/kg);
 PCS_{seco} – Poder calorífico superior da amostra totalmente seca (kcal/kg);
 P_{B1} – Potência da bomba centrífuga do sistema de lavagem primário (kW);
 P_{B2} – Potência da bomba centrífuga do sistema de lavagem secundário (kW);
 $P_{CHILLER}$ – Potência do Chiller (kW);
 $P_{LÍQ.}$ é a energia líquida gerada no MCI (kW).
 PMI – Ponto morto inferior;
 PMS – Ponto morto superior;
 $\dot{Q}_{VCI}$ – Quantidade de calor perdida em todo o V.C. I para a atmosfera (kW);
 $\dot{Q}_{VCI}$ – Quantidade de calor perdida em todo o V.C. II para a atmosfera (kW);

$\dot{Q}_{VCIH}$ – Quantidade de calor perdida em todo o V.C. *III* para a atmosfera (kW);
 $\dot{Q}_{VICIV}$ – Quantidade de calor perdida em todo o V.C. *IV* para a atmosfera (kW);
 $\dot{Q}_U$ – Quantidade de calor gerada durante a gaseificação (kW);
 T_{admis} – Temperatura do gás na entrada do coletor de admissão do motor;
 T_{CH1} – Temperatura do gás após o removedor de cinzas;
 T_{CH2} – Temperatura do gás após a troca de calor com a biomassa no topo do reator;
 T_{CH3} – Temperatura do gás após a lavagem primária;
 T_{CH4} – Temperatura do gás após a lavagem secundária;
 $T_{Chiller}$ – Temperatura da água do chiller;
TG – Termogravimetria;
TGA – Termogravimetric Analysis (Análise Termogravimétrica);
 T_{mist} – Temperatura da mistura ar-gás no momento da admissão pelo motor;
UCE – Unidade de Controle Eletrônico;
 V_{cc} – Volume da câmara de combustão;
 $V_{gás}$ – Velocidade do gás pobre (m³/s);
 V_{PMI} – Volume no ponto morto inferior;
 V_{PMS} – Volume no ponto morto superior;
 w – Teor de umidade da amostra de biomassa (% em massa, expressa entre 0 e 1);
 γ_{gas} – Peso específico do gás que está escoando no tubo (N/m³);
 γ_{liq} – Peso específico do líquido no tubo em “U” (N/m³);
 ε – taxa de compressão do motor;
 λ – Fator lambda;
 t – Tempo em que a massa foi consumida no gaseificador (h);
 η_{gg} – Eficiência do grupo gerador;
 $\eta_{gaseif.}$ – Eficiência de gaseificação;
 $\eta_{global.}$ – Eficiência do sistema gaseificador / grupo gerador;

USO DE UM SISTEMA QUE CONTRIBUI PARA A ADMISSÃO CONTÍNUA DO COMBURENTE EM UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é investigar os efeitos de um mecanismo de perfuração de cinzas no comportamento de um sistema formado por um gaseificador de biomassa e um grupo gerador, composto por um motor ottolizado. Esse gaseificador fora projetado para alimentar um motor dual (gás pobre/diesel), com capacidade máxima de geração de 20 kW elétrico. A conversão deste motor para operar apenas com gás pobre sem prejudicar sua capacidade de geração de potência elétrica, exigiu muitas modificações. Foi observado, que a estrutura original modificada permitia a ampliação de potência gerada. Todavia, à medida que se fazia adaptações para ampliar sua capacidade térmica, tinha-se como resultado, durante o funcionamento do sistema, aumento significativo de produção de cinzas. As cinzas passaram a bloquear a grelha e interromper o funcionamento do sistema como um todo, por falta de oxigenação. Assim, um aparato mecânico foi projetado, construído, instalado e avaliado, levando-se em conta o comportamento do gaseificador, nos aspectos, físico, químico e mecânico, e o funcionamento do sistema, examinando-se os resultados produzidos. Para se avaliar a extensão das possíveis interferências do novo aparato no próprio funcionamento do sistema, fez-se comparação dos resultados deste trabalho com os resultados obtidos por Luna (2018), que utilizou o mesmo gaseificador, porém sem fazer uso do Perfurador de Cinzas. O consumo específico do gás pobre em função da potência gerada do presente trabalho variou entre 1,2 e 3,6 %. No caso do gaseificador, foi visto que a eficiência, em função da potência, ficou entre 75 e 82 %. A eficiência do grupo gerador, em termos da potência gerada, oscilou entre 11 e 23 %. A variação da eficiência do sistema formado pelo gaseificador/grupo gerador, foi quase linear

em função da potência gerada e se situou entre 8 e 19 %. O mais significativo, todavia, foi perceber que ao se comparar as curvas construídas com os dados do presente trabalho e aquelas advindas de Luna (2018), em várias situações, houve grande similaridade em seus aspectos e na distribuição de seus valores. Por sua vez, o uso do Perfurador vem a operação continuada do gaseificador, evitando o tamponamento de sua grelha.

Palavras chaves: Gaseificação de biomassa, Geração de energia elétrica, Eficiência energética, sistema de desobstrução de grelha

USE OF A SYSTEM THAT CONTRIBUTES TO A CONTINUOUS ADIMISSON OF THE COMBURENTE IN A BIOMASS GASIFIER

ABSTRACT

The main goal of this research is to investigate the effects of an Ash Remover mechanism on a system formed by a biomass gasifier and a genset with a Diesel engine converted into an Otto cycle. The gasifier was designed to power a dual (poor gas / diesel) engine, with a maximum power electric generation of 20 kW. To operate the same engine only with poor gas, without harming its capacity to generate electric power, required many modifications. It was observed that the increase in the level of ashes produced by the gasifier, as a result of the increase in the electric power produced, was a natural event. When these ashes accumulates on the grate of the gasifier, there was a discontinuity in gasification. To solve this problem, a mechanic system that can allow the passage of gases and therefore the improvement of oxygenation has been installed. The system is manually operated whenever required, which in general occurs when the power of the genset is being increased. This work aims to evaluate the influence of such a system, on the performance of the gasifier/genset system. In order to evaluate the extent of possible interferences of the new apparatus in the system's own operation, a comparison was made between data from this work and data obtained from Luna (2018), using the same gasifier, but without Ash Remover Mechanism. In a second experiment, biomass was used with different specific mass, moisture content and calorific value. The specific consumption of the poor gas as a function of the generated power varied between 1.2 and 3.6%. In the case of the gasifier, it was seen that the efficiency, depending on the power, remained between 75 and 82%. The efficiency of the genset, in terms of the generated power, varied between 11 and 23%. The efficiency of the system formed by the gasifier / genset was almost linear as a function of the generated power and ranged between 8 and 19%. Most significantly, the curves plotted using the data of the present work, in several situations, bear great similarity both in their

aspects and in their value distribution, with other in a related work. The use of the Ash Remover did not impair the prediction of the conventional behavior, of the fixed bed co-current open top gasifier, nor of the gasifier system / genset, equipped with equal apparatus. There is also the certainty that the use of the Ash Remover will be useful to guarantee continuous operation of the gasifier, since it can avoid the buffering of its grill.

Keywords: Biomass gasification, Power generation, Energy efficiency, Grate clearing system.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa e motivação

Nas últimas décadas o interesse pelo processo de gaseificação de biomassa tem aumentado devido à crescente busca pelo uso de energias alternativas, visando, sobretudo, a substituição de fontes que têm origem no petróleo.

Biomassa é qualquer material orgânico e biodegradável originário de vegetais, animais, ou de micro-organismos, constituindo-se em uma opção nobre, seja do ponto de vista do meio ambiente, pois, é neutra, uma vez que praticamente não gera gases do efeito estufa, seja do grande potencial para gerar energia, sendo renovável, abundante e disponível em qualquer parte do mundo.

Sabe-se, por outro lado, que existem diferentes formas de se tornar disponível a energia química da biomassa para a realização de trabalho, cada uma delas com resultados e características diferentes (Sadhvani, Sushil, & Mario, 2016). São exemplos, a conversão bioquímica, através da qual se produz o etanol celulósico a partir, por exemplo, do bagaço de cana-de-açúcar (Kumar, Deepak, & Murthy, 2011) e a conversão termoquímica, quando se faz uso, seja da combustão, da gaseificação, ou da pirólise (Panwar, Kothari, & Tyagi, 2012). Entende-se, todavia, que a combustão produz apenas calor, geralmente empregando-se caldeiras para gerar vapor e consequentemente trabalho. Diferentemente, a gaseificação é outro processo térmico no qual tanto calor como gás combustível (gás pobre) são gerados. É, ainda, a maneira mais eficiente de se aproveitar a energia interna da biomassa (McKendry, 2002). É um processo autossuficiente em termos do balanço de energia, além de dispor da facilidade de produzir uma diversidade de combustíveis, sejam

oxigenados ou aqueles formados por hidrocarbonetos (Metcalf, K., & al, 2013). É a maneira mais eficiente de se converter a energia interna da biomassa tendo em vista que o gás produzido poderá ser queimado em temperaturas mais elevadas, ou até em células combustíveis (Paengjuntuek, Woranee, Boonmak, & Mungkalasiri, 2015).

As tecnologias de conversão de biomassa em energia, especialmente a pirólise e a gaseificação, têm sido extensivamente estudadas, com vista a se promover a utilização de energia renovável e resolver, questões energéticas e ambientais.

Dependendo de suas características, (método de aquecimento, agente gaseificante, nível de pressão utilizado, forma como a biomassa se desloca no reator, etc., os gaseificadores podem ser classificados de diferentes formas), ver (Kan, Strezov, & Evans, 2016) e (Brown, 2019). Quando a distinção se dá pelo sentido como a biomassa e o gás se movem no interior do reator, os gaseificadores podem ser considerados de leito fixo, (de corrente ascendente, ou descendente) de leito fluidizado, e de leito arrastado. Os de leito fixo (também, conhecidos como de leito móvel), são considerados os mais convencionais, dispondo do funil de alimentação na parte superior (James, Yuan, & Boyette, 2016). São preferidos aos de topo fechado, (gaseificadores denominados Imbert, ou, ainda, com gargalo) em razão de serem facilmente alimentados e terem seu interior acessado sem dificuldades quando se precisa instalar, ou modificar a instrumentação empregada. Além do mais, nesses gaseificadores, o agente de gaseificação atravessa em fluxo descendente as quatro zonas de processamento da gaseificação, evitando a má distribuição de temperatura. Por último, permite menor ocorrência na limitação da fluidez da biomassa, quando esta se aglomera em uma área transversal do reator, sem que se desloque por gravidade, em um processo conhecido por “bridging”, dificultando, ainda, a formação de canais preferenciais para a passagem de gases, fenômeno esse denominado de “channeling” (Reed, Walt, Ellis, Das, & Deutch, 1999) and (Stevens, 2001). Além do mais são mais adequados a fornecerem o gás combustível para motores de combustão interna, tendo em vista que produzem menos alcatrão, isto é, um líquido viscoso, e altamente corrosivo, capaz de se encrustar nas paredes das tubulações e cilindros, imobilizando, por vezes, válvulas e pistões.

A Índia é um dos países que mais fazem uso de gaseificadores de biomassa, seja para produzir eletricidade, ou potência de eixo, atendendo a uma grande população que não é servida pela rede elétrica estatal – segundo (Patel, Parmar, Rathod, Gaikwad, & Chhantbar, 2017), existem mais de 5500 cidades indianas sem estarem ligadas a rede

elétrica do estado. Os gaseificadores produzidos na Índia possuem capacidade de gerarem potências que se situam na faixa de 5 a 500 kW, e na sua grande maioria são do tipo leito fixo. E embora se estime que no ano de 2035 se possa produzir naquele País, 35.000 MW de energia elétrica através da gaseificação da biomassa, (Sharma & Rashi Verma, 2013), sabe-se que a capacidade atual instalada não passa de 703 MW, onde, aproximadamente, 150 MW atendem mais de 300 propriedades que fazem o beneficiamento de arroz (MNRE, 2019).

Embora a justificativa sirva para a maioria dos países, inclusive o Brasil, alguns aspectos que limitam a maior utilização de gaseificadores na Índia, segundo (Buragohain, Mahanta, & Moholkar, 2010), são:

- a. A compatibilidade entre o gás gerado e os motores de combustão interna (MCI);
- b. A dificuldade de se poder assegurar a disponibilidade de um determinado tipo de biomassa adequada ao uso de MCI, de forma permanente.

Obviamente que na lista desses fatores, denominados por Buragohain et al., 2010, de barreiras ao uso da biomassa como combustível para os MCI, existem outras, tais como: o preço da biomassa, de seu transporte, e do seu armazenamento, bem como a falta de incentivos governamentais. Caso nos restrinjamos aos problemas mais técnicos acima relatados e intrínsecos ao uso do gás pobre para alimentar os MCI, percebe-se que, de fato, muitas dificuldades inerentes ao uso de gaseificadores de biomassa têm que ser superadas para que essa tecnologia possa ser disponibilizada ao mundo moderno, exigente por processos confiáveis e de fácil controle.

Como se fez menção em parágrafo anterior, um dos inconvenientes causados ao gás gerado na gaseificação é a presença do alcatrão, que como menciona (Adhkari & Adoulmoumine, 2015), a sua remoção, constitui o sucesso da comercialização do gás, tendo em vista o grande impacto que traz para o próprio custo do gás. Como referido por (Milne, Evans, & Abatzaglou, 1998), existem poucas tecnologias economicamente aceitáveis para se remover o alcatrão do gás pobre. Por outro lado, (Phuphuakrat & al, 2010), menciona que a retirada do alcatrão depende das condições em que a gaseificação ocorre de sua composição, bem como da quantidade existente. O mesmo autor tratando o gás de síntese menciona que o percentual de remoção conseguido se situou entre 26 e 53 %.

Outro subproduto da gaseificação que pode acarretar muitas dificuldades ao funcionamento do gaseificador são as cinzas. Consideradas como impurezas do gás, são produtos da decomposição térmica da biomassa e formadas por compostos inorgânicos. Seus principais componentes são a sílica, o alumínio, o ferro e o cálcio, dentre outros minerais. Com o efeito da temperatura podem se fundir bloqueando, sobretudo a grelha do reator, ocasionando inicialmente redução da chama piloto, e, posteriormente, a descontinuidade do funcionamento do reator, por falta de oxigenação. Esse fenômeno não ocorre apenas em gaseificadores. A grelha, forma a interface entre combustíveis sólidos já pirolisados e as cinzas, estando, portanto, presente, também, em equipamentos de incineração, tais como fornalhas, que em muitos casos possuem grelhas móveis que permitem a movimentação das cinzas que se formam no assoalho da grelha, evitando, assim, seu tamponamento.

O LI, com vistas a solucionar esses problemas recorrentes de interrupção dos processos de gaseificação, desenvolveu um mecanismo, o Perfurador de Cinzas, com intuito de se evitar a descontinuidade da gaseificação.

1.2. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o estudo da influência do mecanismo de perfuração de cinzas no desempenho de um sistema de produção de energia elétrica, formado por um gaseificador de biomassa, com capacidade para 80 kW térmicos, acoplado a um grupo gerador, composto por um motor Diesel MWM D229-6, convertido para o ciclo Otto, e um gerador elétrico, marca Negrine, com potência nominal de 150 kVA, e ativa de 120 kW.

1.3. Objetivos específicos

- Instrumentar, com termopares e sensores de pressão, todo o sistema gaseificador/grupo gerador;
- Avaliar o desempenho do gaseificador, analisando o consumo de biomassa, a composição do gás pobre, as temperaturas nas diversas zonas do gaseificador, bem como determinar sua eficiência, com e sem o uso do mecanismo de perfuração de cinzas;

- Desenvolver procedimento idêntico para a determinação das eficiências energéticas do sistema como um todo, levantando inclusive as potências geradas e a composição dos gases de escape;
- Tendo em vista a importância da biomassa a ser empregada na alimentação do gaseificador, caracterizar, através de Análises Imediatas, as diferentes espécies de biomassa utilizadas como combustível sólido, com o auxílio, inclusive, das curvas Termogravimétricas, TG, e de suas derivadas, DTG;

1.4. Organização do trabalho

Com vistas a se dar caráter didático a esse texto, torna-se necessário, além dessa Introdução, se incluir os seguintes capítulos: O Capítulo II, que tratará do processo da gaseificação; dos tipos de gaseificadores; das condições da biomassa para alimentar o gaseificador e garantir o rendimento térmico adequado; das implicações do comportamento do gaseificador, resultantes do tamanho da biomassa a ser empregado; das principais reações ocorridas no reator e das implicações no funcionamento do reator, etc. No Capítulo III, serão apresentadas as evoluções tecnológicas na área da utilização de motores Diesel, que permitiram os avanços conquistados pelo LI no campo da geração de energia elétrica, através de sistemas formados por gaseificadores de biomassa e grupos geradores. Também, ali, se descreverá o aparato que possibilita oxigenação da zona de combustão, isto é, o Perfurador de Cinzas. No Capítulo IV abordar-se-á a parte experimental, onde se detalhará o aparato utilizado e os ensaios realizados. Na sequência, ou seja, no Capítulo V, virão os Resultados e suas Análises. Por fim, é apresentado o Capítulo VI, onde serão pontuadas as conclusões obtidas no presente trabalho e apontadas recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

2.1. Introdução

O LI tem buscado contribuir para que, em breve, se possa utilizar de forma massiva e em regiões e países dotados de biomassa em abundância, o uso de gasificadores de última geração. Isto é, de sistema de geração de potência, ou de energia elétrica, econômico e confiável, empregando gaseificadores acoplados a grupos geradores. Um dos aspectos desses gaseificadores é a auto-lavagem do gás pobre, e do craqueamento do alcatrão. Descreve-se portanto, neste capítulo, aspectos gerais da gaseificação, bem como, particularmente, o sistema adotado no LI, o qual segue em constante aprimoramento.

2.2 Princípios do processo de gaseificação

Na Introdução foi mencionada a existência de quatro zonas responsáveis pelo processo de gaseificação. São elas: a de Secagem; a de Pirólise; a de Combustão e finalmente a de Redução. Embora as mesmas sejam frequentemente modeladas em série, não há limite exato entre elas, que em muitas situações se sobrepõem. Dada a importância do conhecimento dessas zonas para o entendimento do processo de gaseificação passa-se a detalha-las.

2.2.1. A zona de secagem

Após a alimentação de biomassa com um determinado teor de umidade no secador do gaseificador, inicia-se o processo de secagem como resultado da transferência de calor proveniente do gás pobre sujo. Particularmente, no caso dos gaseificadores do LI, essa secagem se inicia após o gás pobre passar pelo ciclone, item 2 no esquema do gaseificador da Figura 1, dirigindo-se à região anelar (3) que circunda a biomassa in natura, em deslocamento gravitacional.

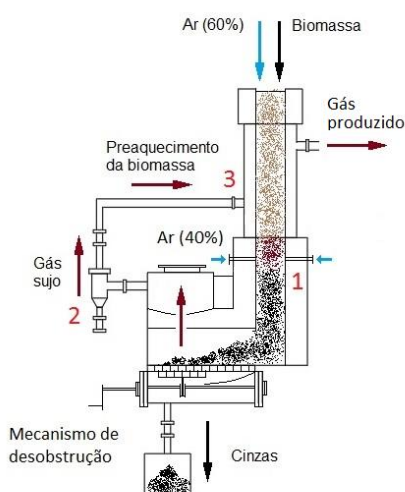
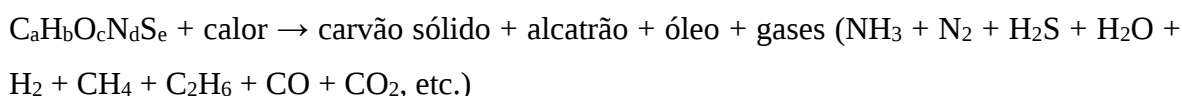


Figura 1: Esquema do gaseificador de trabalho.

Tipicamente, dependendo da natureza da biomassa seu teor de umidade pode chegar a ser superior a 80 %, como ocorre com o mesocarpo do coco verde. Todavia, para se evitar perda de energia de gaseificação, busca-se utilizar a biomassa in natura com teores inferiores a 15 %, (Basu P. , 2013). Nessa zona, a umidade se evapora a partir da temperatura de 100 °C, reduzindo-se a percentuais inferiores a 5% (Puig-Arvanat, Bruno, & Coronas, 2010). A umidade assim extraída, juntamente com os voláteis, liberados a partir de 140 °C se introduzem na região de pirólise, concluindo o processo de secagem.

2.2.2 A zona de pirólise

Na zona de pirólise, o processamento da biomassa ocorre em temperaturas que variam de 200 °C a 700 °C, na ausência de agente de oxidação. Com a elevação das temperaturas se dá o aparecimento de CO₂ e CO, em função de quebras de moléculas de celulose, hemicelulose e lignina, cujo processo tem início à temperatura de 175 °C, (Hill, 2007). A reação geral da pirólise pode ser descrita com a seguinte fórmula:



2.2.3. A zona de combustão

Reações heterogêneas e altamente exotérmicas de carvão, pequenas moléculas gasosas, alcatrão e vapores de óleo com o agente gaseificante (i.e. oxigênio, ar ou vapor d'água – no nosso caso, o ar) ocorrem nesta zona, e a temperatura pode chegar de 1200°C a 1500°C, e até mesmo, 1800°C. Algumas reações químicas importantes são listadas na Tabela 1 (tomando a gaseificação com ar ou oxigênio, por exemplo):

Tabela 1: Reações de oxidação na zona de combustão.

Reações de oxidação:	$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	-123 kJ/mol
	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-409 kJ/mol
	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	-283 kJ/mol
	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	-242 kJ/mol
	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	-803 kJ/mol
	$NH_3 + 3/4 O_2 \rightarrow 1/2 N_2 + 3/2 H_2O$	-383 kJ/mol
	$H_2S + 3/2 O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	-563 kJ/mol

Além da oxidação dos produtos pirolíticos da biomassa em monóxido de carbono e dióxido de carbono, outra função significativa da zona de combustão parcial é fornecer calor para as outras zonas.

2.2.4. A zona de redução

Na zona de redução (também denominada de zona de gaseificação), dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O) são reduzidos na presença do carvão para monóxido de carbono e hidrogênio, principais gases combustíveis que compõem o gás produzido. Durante esses processos, o calor sensível dos gases e o carvão são transformados em energia química do gás produzido.

As reações dominantes que ocorrem na zona de redução estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Reações dominantes na zona de redução.

(a) Boudouard	$\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$	+172 kJ/mol
(b) Gás de água	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	+131 kJ/kmol
(c) Mudança água-gás	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$	-42 kJ/kmol
(d) Reformação de vapor	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$	+206 kJ/kmol
	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$	+165 kJ/kmol
(e) Hidrogaseificação	$\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$	-75 kJ/kmol
(f) Formação de metano	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-206 kJ/kmol
Outras reações	$\text{NH}_3 \leftrightarrow 1/2 \text{N}_2 + 3/2 \text{H}_2$	+46 kJ/kmol
	$\text{SO}_2 + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$	-207 kJ/kmol

2.3. Gaseificação, processo autossuficiente

Na Introdução referimos à gaseificação como um processo autossuficiente quando se faz o balanço de energia. E uma vez que já se tem conhecimento do que ocorre nas zonas de gaseificação, torna-se fácil a demonstração desse postulado. Senão vejamos. Foi visto na Tabela 1, que:

$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (- 409 kJ/mol) onde o sinal negativo indica que a reação é exotérmica, isto é calor está sendo liberado. Caso se aplique o método da gaseificação parcial para se gaseificar o carbono (ver primeira reação descrita, também, na Tabela 1), isto é:

$\text{C} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ (-123 kJ/mol), base da gaseificação de qualquer material carbonáceo (carvão mineral, ou biomassa), percebe-se que o valor entre parêntesis corresponde a 30,1 % de -409 kJ/mol; O que significa dizer que o gás gerado (CO) pode

ser queimado com oxigênio para produzir energia, ver a terceira equação na Tabela 1, ou seja:

$\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (-283 kJ/mol) onde a quantidade entre parêntesis representa 69,2 % de -409 kJ/mol . O que mostra que 69,2 % da energia contida no carbono pode ser recuperada pela gaseificação. Ou seja, investindo-se 30,1 % de energia para a gaseificação se terá como retorno 69,2 %. Em resumo, esta análise justifica a razão da gaseificação ser mais vantajosa do que a pirólise. Deve-se acrescentar, ainda, que promover o controle da pirólise não é tarefa fácil.

2.4. Tipos de gaseificadores

Foi necessário na Introdução se fazer algumas considerações sobre os tipos de gaseificadores. A compreensão das razões que nos levaram a preferir realizar os ensaios com o gaseificador de biomassa leito fixo, topo aberto, co-corrente de fluxo descendente, ficarão melhor entendidas após tecermos considerações sobre os principais tipos de gaseificadores.

Já se considerou no capítulo I as várias possibilidades de se classificar os gaseificadores. Desta maneira, passaremos de imediato, a considerar alguns tipos de gaseificadores.

2.4.1. Gaseificadores contracorrentes

No gaseificador contracorrente (Figura 2) o fluxo de gás tem sentido contrário ao da alimentação de biomassa, de modo que a entrada de ar fica localizada na parte inferior do reator, e a saída do gás na parte superior. A combustão da biomassa ocorre no fundo do gaseificador liberando CO_2 e vapor de água. Os gases, assim gerados, passam pela zona de redução, onde os mesmos são reduzidos à H_2 e a CO , enquanto que a temperatura destes cai de aproximadamente 1000°C , ficando entorno dos 700°C .

Já na zona de pirólise ocorre a formação dos voláteis, assim como o alcatrão. Por fim, os gases saem do gaseificador com temperaturas próximas de 500°C (Basu P. , 2010).

As principais vantagens destes gaseificadores são: a alta eficiência térmica, devido ao pré-aquecimento da carga do combustível através dos gases gerados na zona de combustão; e que o tamanho, a forma e a umidade da biomassa não interferem

significativamente na eficiência do processo. Em contrapartida, o gás produzido é de baixa qualidade, possuindo alto teor de alcatrão, uma vez que neste tipo de gaseificador não ocorre o craqueamento do alcatrão, já que o mesmo é arrastado pelo gás produzido sem passar pela zona de combustão, o que dificulta o seu uso em motores de combustão interna (Ruiz & al, 2013).

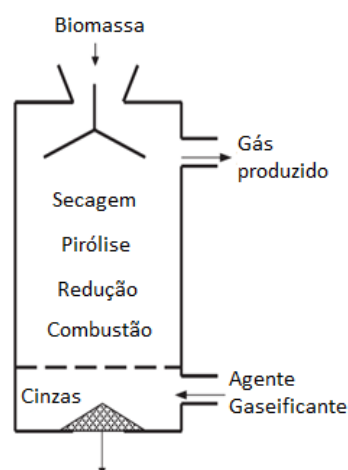


Figura 2: Esquema de um gaseificador contracorrente

2.4.2. Gaseificadores co-correntes

Os gaseificadores co-corrente são os mais difundidos, podendo ser utilizados até em veículos. Seu arranjo estrutural permite gerar um gás com baixo teor de alcatrão, o que possibilita sua aplicação em diversos equipamentos (Oakey, 2016)

Nesse tipo de gaseificador, ver Figura 3, a alimentação de biomassa é feita pelo topo do reator, enquanto que o ar é fornecido tanto pelo topo como pela lateral, e a extração do gás é feita pela parte inferior. Com isso, o gás é forçado a passar pela zona de combustão, que possui alta temperatura, possibilitando o craqueamento do alcatrão (Kan, Strezov, & Evans, 2016).

Identicamente como ocorre nos gaseificadores contracorrentes, os co-correntes dispõem de zonas de reação bem definidas. Sua disposição, todavia, é diferente. Primeiramente a biomassa passa pela zona de secagem, em seguida pela de pirólise, posteriormente pela de combustão e por fim, pela zona de redução, onde são formados o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H₂).

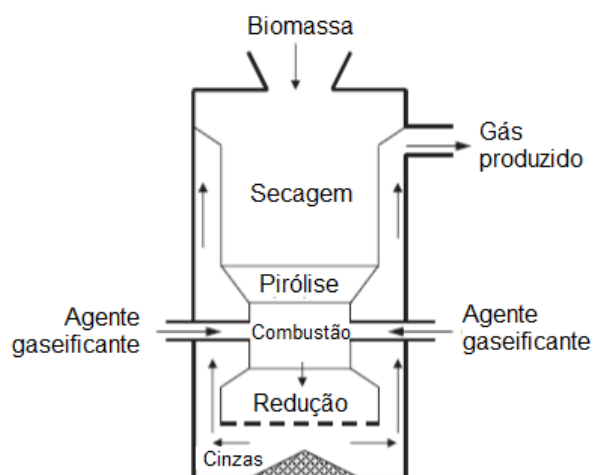


Figura 3: Esquema de um gaseificador co-corrente.

2.4.3. Gaseificadores de fluxo cruzado

Os gaseificadores do tipo fluxo cruzado (Figura 4) produzem um gás com características intermediárias, uma vez que os mesmos necessitam de mais ar do que os outros tipos e possuem uma rápida resposta à mudança de carga. No entanto, o uso da biomassa é restrito, sendo sensível à umidade e à sua granulometria (Kan, 2016).

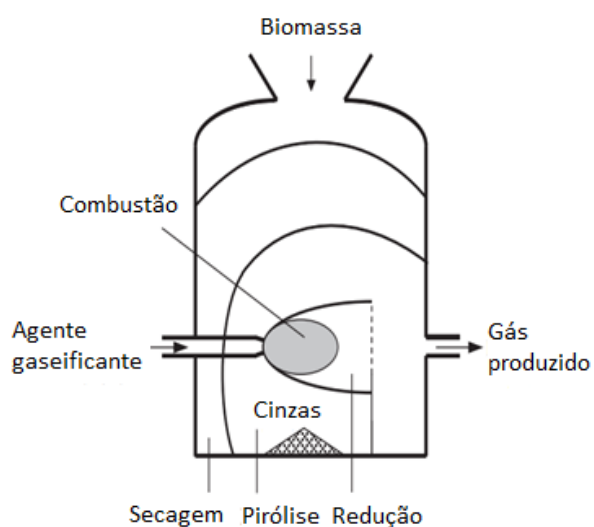


Figura 4: Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.

2.4.4. Gaseificadores de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado (Figura 5) se destaca por ter um projeto simples. Nele a biomassa é inserida pela lateral do reator, enquanto que o agente gaseificante é fornecido pela parte inferior do mesmo. A extração do gás se faz, também, pela lateral, porém, pelo lado oposto à entrada da biomassa.

O ar é injetado no interior do reator com alta velocidade, através de um único canal, eleva a temperatura da zona de combustão para pequenos volumes de combustíveis, reduzindo, assim, o teor de alcatrão gerado na pirólise (Arena, Zaccariello, & Mastellone, 2010).

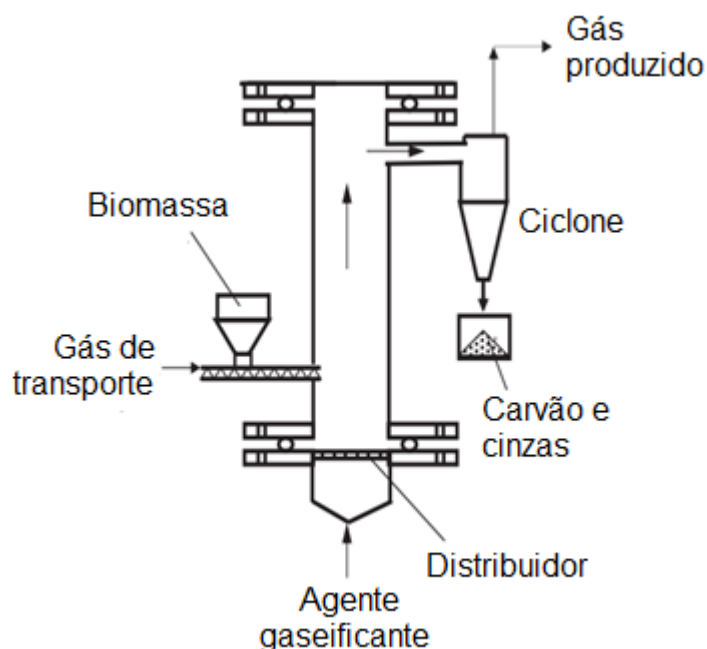


Figura 5: Esquema de um gaseificador de leito fluidizado.

2.5. O gaseificador instalado no Laboratório de Inovações

O gaseificador que originalmente foi instalado no LI é do tipo leito fixo co-corrente “topo aberto”, e foi adquirido do Indian Institute of Sciences/Combustion, Gasification and Propulsion Laboratory, IISc/CGPL. Foi projetado para alimentar motores do tipo dual, com capacidade máxima de geração de 20 kWe, tendo o diesel como combustível piloto.

Na Figura 6 se vê os seguintes itens: (1) parte superior, com abertura para a alimentação da biomassa. Também, por aquela passagem, é admitido o maior percentual de ar necessário ao processo; (2) reator, que é o seu principal componente; (3) mecanismo de perfuração de cinzas; (4) saída do gás produzido.

Após gerado, o gás segue para alimentar o motor, passando pelos seguintes componentes: (5) Ciclone, (6) Trocador de calor que realiza o pré-aquecimento da biomassa; (7) Placa de condensação de alcatrão; (8) Dois sistemas de lavagens de gás, responsáveis pela lavagem primária, com água a temperatura ambiente; (9) A placa de condensação; (10) Um trocador de calor (*cooler*) com água proveniente de uma central de refrigeração (*chiller*), que mantém a temperatura da água a aproximadamente 5 °C; (11) Retorno da água de lavagem secundária para o chiller; (12) Pulmão; (13) Um filtro de tecido (filtro de manga), para reter os particulados, localizado antes da tubulação de alimentação, que conduz o gás ao motor; (14) Tubulação em “T” de distribuição do gás para o motor ou para o queimador, com chama piloto, onde se avalia a qualidade do gás produzido, pela sua coloração, ver Figura 7.

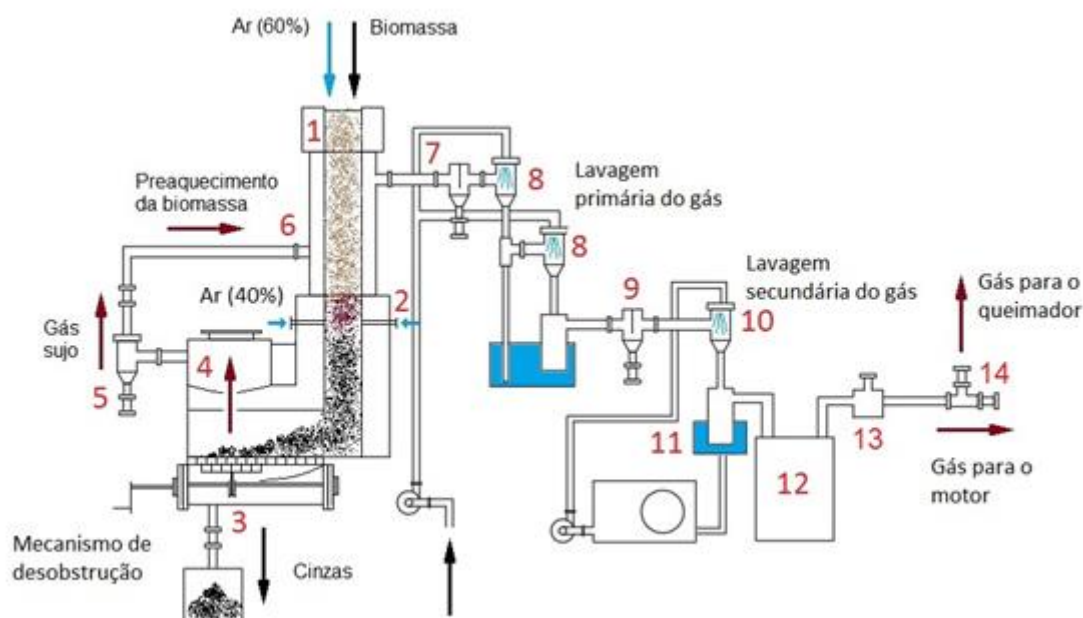


Figura 6: Componentes do gaseificador importado

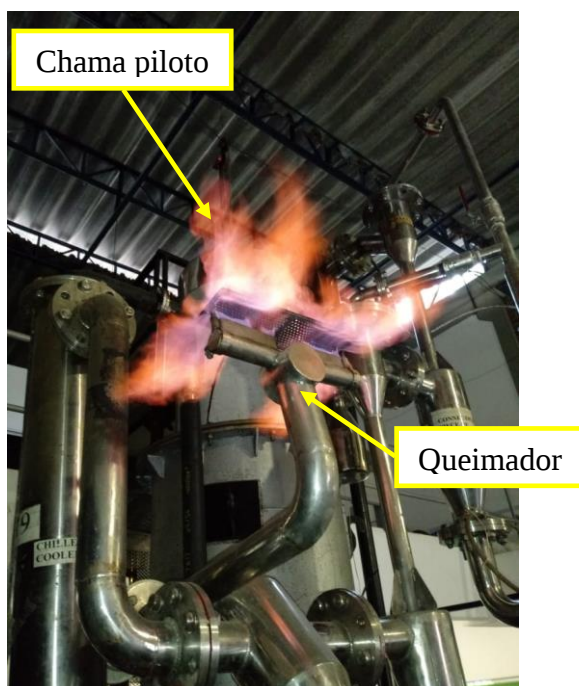


Figura 7: Queimador e chama piloto

2.5.1. Modificações realizadas no sistema de gaseificação original

O gaseificador adquirido deveria ser utilizado em um processo dual, isto é, fazendo uso do diesel na partida e utilizando de 18 a 20 % durante seu funcionamento. Ao se eliminar o diesel, a geração de potências, mesmo as menores, implicavam na produção de arrasto do gás pobre, que culminava com a aspiração de água de lavagem até o motor de combustão interna, cessando de imediato seu funcionamento. Em consequência, o filtro de manga ficava totalmente encharcado. Para contornar o problema aumentou-se o diâmetro das tubulações concernentes aos circuitos de gás e de água, além de se rebaixar, ao máximo, o nível da água de lavagem (Rumão, 2013).

Na continuação da pesquisa, Luna (2018) e Melo (2018), passaram a utilizar um grupo gerador, cujo motor tinha dois cilindros a mais do que aquele utilizado por Rumão (2013). Para tanto, uma nova alteração foi procedida, quando se intercalou na tubulação de alimentação do motor de combustão interna, entre a saída de gás do gaseificador e o filtro de mangas, ver Figura 6, item 12, um reservatório, ao qual foi denominado de “pulmão”, ver Figura 8. Duas funções foram previstas para o “pulmão”: impedir que um possível volume de água de lavagem misturada ao gás pobre encharcasse o filtro de mangas, e

permitir o armazenamento provisório do gás pobre. Esse novo condicionamento, como concluiu Melo (2018), deu ao motor em funcionamento maior estabilização, sempre que se passava de uma potência elétrica menor para outra maior.

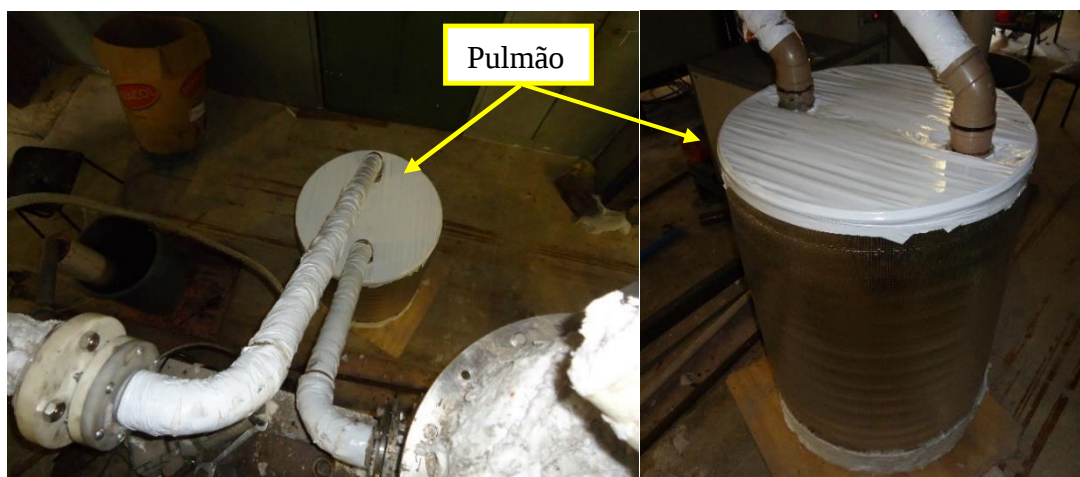


Figura 8: Reservatório de gás – Pulmão (Bezerra, 2016)

2.5.2. A grelha retentora de carvões em formação do gaseificador

Também, na Figura 6, é possível localizar a representação da grelha do gaseificador (parte superior do retângulo anotado por 3). Sua função principal é evitar que os carvões em formação, durante a combustão, se desloquem para o cinzeiro.

Com a eliminação do diesel, foi necessário o emprego de uma quantidade muito maior de biomassa para se gerar idênticas potências. Passou-se, conseqüentemente a se perceber a formação de uma quantidade maior de cinzas, ver Figura 9. Quando estas cinzas se acumulam sobre toda a extensão da grelha, ocorre a descontinuidade da gaseificação.



Figura 9: Nível das cinzas acumuladas sobre a grelha (Luna, 2018)

2.5.3. Mecanismo de perfuração de cinzas

Com intuito de solucionar esse problema, foi introduzido um sistema de desobstrução de grelha (Figura 10), o qual foi fixado na base do gaseificador, de modo que o seu acionamento, manual, pudesse ser feito através de uma manivela. O projeto do dispositivo de desobstrução foi planejado e desenvolvido buscando-se a simplicidade construtiva, a facilidade de manutenção, e o baixo custo. Sua utilização implicou em pequenas modificações no projeto original do gaseificador, tendo-se, inclusive, removido, o sem-fim, cuja finalidade era a remoção das cinzas de seu depósito. Ver item 3 da Figura 6. O acionamento do sistema de desobstrução é realizado no início do processo e a cada mudança de faixa de potência, para se promover a limpeza do sistema de gaseificação, desobstruindo a passagem dos gases produzidos pelo gaseificador e consequentemente, promovendo a entrada do agente gaseificante, que no caso é o ar.



Figura 10: Sistema de perfuração de cinzas

2.6. Critérios de avaliação do desempenho da gaseificação

Uma série de critérios são requeridos para se avaliar o desempenho dos sistemas de gaseificação de biomassa para que ele atenda aos requisitos da produção de gás em larga escala e otimizar a economia industrial. Esses critérios incluem a determinação das propriedades da biomassa; a caracterização do gás produzido; o levantamento do percentual do carbono fixo e o cálculo da eficiência do sistema de geração de energia.

2.6.1. Teor de umidade da biomassa

O teor de umidade é obtido através da secagem: determina-se a massa total da amostra, que em seguida é submetida a um processo de secagem a 105°C, com controle periódico da massa. O processo é mantido até que a massa da amostra se estabilize, sendo a seguir calculada a umidade w conforme abaixo (Poli, et al., 2013). O teor de umidade é calculado através da Equação (1):

$$w = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{cs}} + m_{\text{água}}} \quad (1)$$

Onde:

w : teor de umidade (% em massa, expressa entre 0 e 1)

m_{cs} : massa do combustível seco (kg)

$m_{\text{água}}$: massa de água evaporada (kg)

2.6.2. Relação entre PCI, PCS e teores de umidade da biomassa

2.6.2.1. Combustíveis com baixos teores de umidade

Inicialmente, sem considerar a água adicional formada pelo Hidrogênio do combustível, nem a oriunda da umidade relativa do ar de combustão e considerando que a temperatura de equilíbrio antes da condensação seja igual à do ambiente (25°C), a maioria das referências aceita, para combustíveis com baixos teores de umidade ($w < 0,03$), equação 2:

$$PCI_w = PCS_{seco} - w \cdot h_{LV} \quad (2)$$

Onde:

PCI_w : Poder calorífico inferior, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

w : Teor de umidade da amostra (% em massa, expressa entre 0 e 1)

PCS_{seco} : Poder calorífico superior da amostra totalmente seca (kcal/kg).

h_{LV} : Entalpia de vaporização da água a 25°C (584,2 kcal/kg)

2.6.2.2. Combustíveis com elevados teores de umidade

Para o caso de combustíveis com apreciáveis quantidades de água ($w > 0,03$), o valor do PCI_w passa a ser calculado através da equação 3 (Poli, et al., 2013):

$$PCI_w[kcal/kg] = (1 - w) \cdot PCS_{seco} - w \cdot 584,2 \quad (3)$$

Onde:

PCI_w : Poder calorífico inferior, na condição de umidade “w” (kcal/kg).

w : Teor de umidade da amostra (% em massa, expressa entre 0 e 1)

PCSseco: Poder calorífico superior da amostra totalmente seca (kcal/kg).

584,2: *hLV*, ou Entalpia de vaporização da água a 25°C (584,2 kcal/kg) – para unidades em (kJ/kg), a constante 584,2 deve ser substituída por 2441.

2.6.3. Determinação do PCI do gás produzido

Particularmente, no LI, o PCI do gás pobre, em MJ/Nm³, é determinado pela Equação (4) que foi obtida através de um ajuste de curva, a partir dos dados experimentais de Yoshikawa (2006), e de Garcia (2002), que correlacionam o poder calorífico inferior com o monóxido de carbono, ver Figura 11. A curva ajustada, quando comparados com os valores da literatura, não só abrange um domínio de percentual de CO que varia de 1% a, aproximadamente, 21%, como também apresenta coeficiente de Pearson de 0,9379 e desvio padrão de $\sigma_y = 0,975$ MJ/Nm³.

$$PCI_{\text{gas}} = -0,004738 \cdot (\%CO)^2 + 0,3149 \cdot (\%CO) - 0,1057 \quad (4)$$

Onde %CO é o teor, em percentual, de monóxido de carbono do gás produzido.

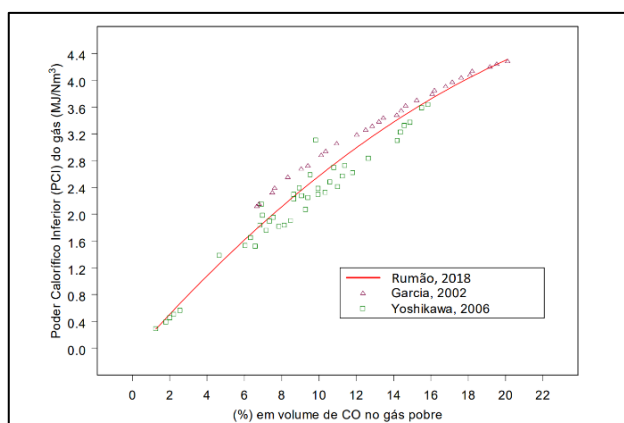


Figura 11: Ajuste de curva aos pontos experimentais de Yoshikawa (2006), e de Garcia (2002).

2.6.4. Avaliação da eficiência da gaseificação

2.6.4.1. Eficiência do gaseificador

A eficiência energética do sistema de gaseificação η , é definido como a razão entre o poder calorífico total do gás produzido e o calor específico da biomassa fornecida ao gaseificador, ver Equação 5:

$$\eta = \frac{PCI_{gas} \times \dot{m}_{gas}}{PCI_{biomassa} \times \dot{m}_{biomassa}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

PCI_{gas} é o PCI do gás produzido (kJ/m³);

$\dot{m}_{gas}$ é o fluxo de gás produzido (m³/h);

$PCI_{biomassa}$ é o PCI da biomassa (kJ/kg);

$\dot{m}_{biomassa}$ é o fluxo de biomassa de alimentação do gaseificador (kg/h).

2.6.4.2. Eficiência do grupo gerador

A eficiência do grupo gerador é o índice da geração de energia do sistema comparado com o poder calorífico total do gás produzido, a qual é definida pela Equação 6:

$$\eta_{gg} = \frac{P_{LÍQ.}}{\dot{m}_{gás} \times PCI_{gás}} \times 100\% \quad (6)$$

Onde $P_{LÍQ.}$ (MW) é a energia líquida gerada em motores a gás ou turbinas.

2.6.4.3. Eficiência térmica (Eficiência do sistema)

A eficiência térmica é o índice da geração de energia do sistema comparado com a energia original contida na biomassa, a qual é definida por Damartzis et al, (2012):

$$\eta_t = \frac{P_{LÍQ.}}{\dot{m}_{biomassa} \times PCI_{biomassa}} \times 100\% \quad (7)$$

Onde $P_{LÍQ.}$ (MW) é a energia líquida gerada em motores a gás ou turbinas.

2.6.5. Fluxo de gás pobre na linha de admissão do motor

Como se sabe, o tubo de Pitot é um medidor de pressão diferencial que avalia a diferença entre a pressão local total, ou de estagnação, e a pressão estática local.

Na determinação do fluxo de gás pobre oriundo do gaseificador, foi utilizado um conjunto formado por tubos de Pitot e manômetro em “U”. Avaliando-se o desnível de líquido deslocado no manômetro em “U”, determinou-se a velocidade do gás pobre, $V_{gás}$ (m/s), na tubulação usando-se a expressão 8:

$$V_{gás} = \sqrt{2gh \left(\frac{\gamma_{liq} - 1}{\gamma_{gás}} \right)} \quad (8)$$

Onde:

g é a aceleração devido à gravidade (m/s^2);

h é a altura da coluna de fluido no tubo em “U” (cm);

γ_{liq} é o peso específico do líquido no tubo em “U” (Querosene = 8200 N/m^3);

$\gamma_{gás}$ é o peso específico do gás que está escoando no tubo ($\cong 11 \text{ N/m}^3$).

Conhecendo-se a velocidade do gás e a área da seção transversal da tubulação de escoamento do gás, calcula-se o fluxo volumétrico, $Q_{gás}$ (m^3/s), utilizando-se a Eq. (9):

$$Q_{gás} = \frac{\pi d^2}{4} V_{gás} \quad (9)$$

Onde,

d é o diâmetro da tubulação de escoamento (m).

2.7. Balanço de massa e balanço de energia no sistema

A partir da equação da continuidade e da Primeira Lei da Termodinâmica, em regime permanente e desprezando as contribuições referentes à energia cinética e potencial, aplicadas ao gaseificador e ao grupo gerador, conforme indicados pelos volumes

$$\dot{m}_{gásI} = \dot{m}_{cinzas,b} + \dot{m}_{gásII} \quad (12)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásI}$ é o fluxo de gás pobre que deixa o V.C.I (kg/h);

$\dot{m}_{cinzas,b}$ é o fluxo de cinzas capturadas pelo ciclone (kg/h);

$\dot{m}_{gásII}$ é o fluxo de gás pobre que deixa o V.C.II (kg/h).

Para o V.C.III:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gásII} + \dot{m}_{H_2O,ep} + \dot{m}_{H_2O,es} \\ = \dot{m}_{H_2O,sp} + \dot{m}_{H_2O,ss} + \dot{m}_{cinzas,c} + \dot{m}_{cinzas,d} + \dot{m}_{cond,a} \\ + \dot{m}_{cond,b} + \dot{m}_{cond,c} + \dot{m}_{gásIII} \end{aligned} \quad (13)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásII}$ é o fluxo de gás pobre que deixa o V.C.II (kg/h);

$\dot{m}_{H_2O,ep}$ é o fluxo de água que entra no sistema de lavagem primária (kg/h);

$\dot{m}_{H_2O,es}$ é o fluxo de água que entra no sistema de lavagem secundária (kg/h);

$\dot{m}_{H_2O,sp}$ é o fluxo de água que sai no sistema de lavagem primária (kg/h);

$\dot{m}_{H_2O,ss}$ é o fluxo de água que sai no sistema de lavagem secundária (kg/h);

$\dot{m}_{cinzas,c}$ é o fluxo de cinzas capturadas pelo sistema de lavagem primária (kg/h);

$\dot{m}_{cinzas,d}$ é o fluxo de cinzas capturadas pelo sistema de lavagem secundária (kg/h);

$\dot{m}_{cond,a}$ é o fluxo de condensados produzidos no sistema de lavagem primária (kg/h);

$\dot{m}_{cond,b}$ é o fluxo de condensados produzidos no sistema de lavagem secundária (kg/h);

$\dot{m}_{cond,c}$ é o fluxo de condensados produzidos na placa de condensação (kg/h);

$\dot{m}_{gásIII}$ é o fluxo de gás pobre que deixa o V.C.III (kg/h).

O balanço de massa referente ao V.C.III da Figura 12, está representado na Equação (13). No mencionado Volume de Controle se destaca os circuitos de lavagem do gás primário e secundário, que ocorrem entre o gaseificador e seus reservatórios de armazenagem de água. Admitindo-se o regime permanente, o fluxo de água que deixa a fronteira do V.C. III é igual ao fluxo de água que é admitido. O contato entre a água de lavagem e o gás produzido, remove desse gás particulados em suspensão,

produzindo, ainda, parte da condensação de líquido pirolenhoso e a consequente redução na temperatura deste gás. Assim a equação (13), se reduz a:

$$\dot{m}_{gásII} = \dot{m}_{cinzas,c} + \dot{m}_{cinzas,d} + \dot{m}_{cond,a} + \dot{m}_{cond,b} + \dot{m}_{cond,c} + \dot{m}_{gásIII}$$

Para o V.C.IV:

$$\dot{m}_{gásIII} + \dot{m}_{ar,b} = \dot{m}_{exaustão} \quad (14)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásIII}$ é o fluxo de gás pobre que deixa o V.C.III (kg/h);

$\dot{m}_{ar,b}$ é o fluxo de ar aspirado pelo motor (kg/h);

$\dot{m}_{exaustão}$ é o fluxo de gases de exaustão do MCI (kg/h).

Primeira Lei da Termodinâmica aplicada ao sistema gaseificador/grupo gerador:

$$\dot{Q}_{V.C.} + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} \mathbf{V}_e^2 + g \mathbf{Z}_e \right) = \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} \mathbf{V}_s^2 + g \mathbf{Z}_s \right) + \dot{W}_{V.C.} \quad (15)$$

Fazendo as mesmas considerações realizadas para o balanço de massa e observando a Figura 12, se tem:

Para o V.C. I:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biomassa} \times PCI_{biomassa} \\ = \dot{Q}_{VCI} + \dot{m}_{carvão} \times PCI_{carvão} + \dot{m}_{cinzas,a} \times PCI_{cinzas} + \dot{m}_{gásI} \\ \times PCI_{gásI} \end{aligned} \quad (16)$$

Onde:

$PCI_{biomassa}$ é o PCI da biomassa (kJ/kg);

$\dot{Q}_{VCI}$ é a quantidade de calor perdida em todo o V.C. I para a atmosfera (kW);

$PCI_{carvão}$ é o PCI do carvão (kJ/kg);

PCI_{cinzas} é o PCI das cinzas (kJ/kg);

$PCI_{gásI}$ é o PCI Do gás que deixa o V.C. I (kJ/kg).

Para o V.C. II:

$$\dot{m}_{gásI} \times PCI_{gásI} = \dot{Q}_{VCII} + \dot{m}_{cinzas,b} \times PCI_{cinzas} + \dot{m}_{gásII} \times PCI_{gásII} \quad (17)$$

Onde:

$PCI_{gásI}$ é o PCI do gás que deixa o V.C. I (kJ/kg);

$\dot{Q}_{VCII}$ é a quantidade de calor perdida em todo o V.C. II para a atmosfera (kW);

$PCI_{gásII}$ é o PCI do gás que deixa o V.C. II (kJ/kg).

Para o V.C. III:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gásII} \times PCI_{gásII} + P_{CHILLER} + P_{B1} + P_{B2} \\ = \dot{Q}_{VCIII} + \dot{m}_{cinzas,c} \times PCI_{cinzas} + \dot{m}_{cinzas,d} \times PCI_{cinzas} \\ + \dot{m}_{cond,a} \times PCI_{cond} + \dot{m}_{cond,b} \times PCI_{cond} + \dot{m}_{cond,c} \times PCI_{cond} \\ + \dot{m}_{gásIII} \times PCI_{gásIII} \end{aligned} \quad (18)$$

Onde:

$PCI_{gásII}$ é o PCI do gás que deixa o V.C. II (kJ/kg);

$\dot{Q}_{VCIII}$ é a quantidade de calor perdida em todo o V.C. III para a atmosfera (kW);

PCI_{cond} é o PCI do condensado (kJ/kg);

$PCI_{gásIII}$ é o PCI do gás que deixa o V.C. III (kJ/kg);

P_{B1} é a potência da bomba centrífuga do sistema de lavagem primário (kW);

P_{B2} é a potência da bomba centrífuga do sistema de lavagem secundário (kW);

$P_{CHILLER}$ é a potência do Chiller (kW).

Para o V.C. IV:

$$\dot{m}_{gásIII} \times PCI_{gásIII} = \dot{Q}_{VCIV} + \dot{m}_{exaustão} \times PCI_{exaustão} + P_{LIQ} \quad (19)$$

E,

$$P_{LIQ} = P_{TOT} - (P_{CHILLER} + P_{B1} + P_{B2}) \quad (20)$$

Onde:

$PCI_{gásIII}$ é o PCI do gás que deixa o V.C. III (kJ/kg);

$\dot{Q}_{VCIV}$ é a quantidade de calor perdida em todo o V.C. IV para a atmosfera (kW);

$PCI_{exaustão}$ é o PCI dos gases da exaustão do MCI (kJ/kg);

$P_{LÍQ.}$ é a energia líquida gerada pelo grupo gerador (kW);

$P_{TOT.}$ é a energia total gerada pelo grupo gerador (kW).

2.8. Conclusão

A gaseificação de biomassa é uma maneira eficiente de se converter a energia interna da biomassa na energia química do gás pobre, quando comparada a outros métodos de conversão como a combustão direta ou a pirólise.

Durante a gaseificação, existem quatro zonas ou etapas distintas, a cada uma dessas zonas, ocorrem diversas reações simultâneas, exotérmicas e endotérmicas, onde ao fim do processo teremos como produtos, uma mistura de gases, dentre os principais podemos citar o N_2 , CO e H_2 ; produtos sólidos como carvão e cinzas; e líquidos como alcatrão e bio-óleo.

Dependendo do tipo de gaseificador e do sistema de limpeza utilizado após a saída do gaseificador, pode-se detectar composições e qualidades de gás produzido diferentes. Quando esse gás é usado na alimentação de Motores de Combustão Interna (MCI), a exigência com a qualidade do gás é maior do que quando esse gás é destinado à queima direta. No capítulo seguinte, serão abordadas questões relativas aos MCI.

CAPÍTULO III

PROCESSO DE OTTOLIZAÇÃO DE MOTORES DIESEL NO LABORATÓRIO DE INOVAÇÕES

3.1. Introdução

A busca pela ottolização de motores diesel, tanto para uso de combustíveis líquidos, ou gasosos, vem sendo muito cobiçada por empresas que os utilizam em grupos geradores, e processo de acionamentos. Isto se deve, ao motor Diesel ter uma característica que não é inerente ao motor do tipo ICE, a robustez. É essa qualidade que permite ao motor Diesel trabalhar, em condições normais, consideradas impossíveis de ser suportado por motores do ciclo Otto original (Rumão, 2013). Além disso, não se encontram no mercado nacional motores de grande porte da categoria Otto, mas existem motores ciclo Diesel de grande porte (Figueiredo, Fernandes, Petrucci, Filho, & Marsura, 2012).

Neste capítulo se fará uma breve introdução a respeito de motores do ciclo Diesel e do ciclo Otto, bem como considerações sobre o sistema autóctone de conversão de motores Diesel para o ciclo Otto, desenvolvido no LI. Serão apresentados, ainda, os avanços tecnológicos já realizados no LI na área de ottolização.

3.2. Conceitos básicos referentes à motores de combustão interna

Segundo Martins (2006), as máquinas térmicas são aquelas que transformam energia térmica em energia mecânica útil. A energia térmica provém da combustão de uma mistura combustível-comburente, liberando-se deste modo a energia química do combustível.

O fluido fornece trabalho aos órgãos mecânicos do motor através de variações de pressão e volume criadas pelo fornecimento de calor.

O motor de combustão interna (MCI) aproveita o aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para imprimir um movimento de rotação ao eixo do motor. O motor é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados a um eixo de transmissão pelas bielas. Se fizermos rodar o eixo de transmissão, os pistões sobem e descem nos diversos cilindros. Para que o motor não pare quando um pistão estiver a comprimir ar num cilindro, ou para que não tenha um andamento muito irregular, uma extremidade do eixo de transmissão é munida de um volante de inércia, que acumula energia cinética.

O ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro denomina-se ponto morto superior ou *PMS* (Figura 13). Ao ponto mais baixo chama-se ponto morto inferior ou *PMI*. A distância percorrida pelo pistão entre os dois pontos mortos designa-se por curso. (*C* - Figura 13). O raio da manivela é igual à metade do curso.

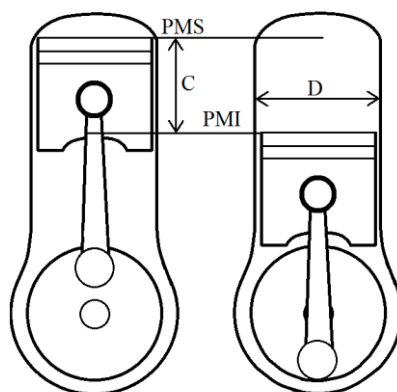


Figura 13: Pontos mortos do motor

Quando o pistão desce desde *PMS* até *PMI* ele "varre" um volume correspondente a um cilindro cuja base é a sua seção e a altura é o curso do pistão, chamado volume varrido ou cilindrada unitária. A soma dos volumes varridos de todos os cilindros dá-se o nome de cilindrada do motor. Se um motor tiver um número n de cilindros de diâmetro D e curso C a sua cilindrada será: $V = n \cdot C \cdot D^2 \cdot \pi / 4$.

Quando o pistão se encontra no *PMS*, existe um espaço morto acima da cabeça do pistão. É nesse volume que se ocorre a combustão e por isso se denomina câmara de combustão.

Se dividirmos o volume total por cima da cabeça do pistão quando este está em *PMI* pelo valor quando ele está em *PMS*, obtemos a taxa de compressão do motor. Sendo assim esta é dada por:

$$\varepsilon = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_{varido} + V_{cc}}{V_{cc}} \quad (15)$$

no qual V_{cc} é o volume da câmara de combustão.

3.3. Motores de ignição comandada (Ciclo Otto)

O motor de combustão interna mais comum é o motor a gasolina, que se denomina motor de ignição comandada ou de ignição por faísca, pois a sua combustão inicia-se por uma descarga eléctrica de elevada tensão (faísca) dentro da câmara de combustão.

3.4. Motores de ignição por compressão (Ciclo Diesel)

No motor de ignição comandada, o combustível é geralmente misturado com ar no exterior do cilindro e toda essa massa se inflama na câmara de combustão, por meio da faísca proporcionada pelo sistema de ignição. O motor de ignição por compressão não tem sistema de preparação da mistura exterior nem sistema de ignição. Aspira ar puro que, submetido à elevada pressão atingida antes do *PMS* do final da compressão, atinge uma temperatura suficiente para garantir a inflamação do combustível à medida que é injetado neste ar.

Como o ar se encontra a elevada pressão, é necessário que o combustível seja introduzido a uma pressão ainda superior, para o qual é indispensável o uso de um sistema de injeção a alta pressão. Este sistema comprime e fornece o combustível a cada cilindro, na pressão e na quantidade exata a fim de permitir uma combustão suave.

3.5. Ottolização de motores diesel no LI

3.5.1. Adaptações no motor a diesel e a introdução de componentes próprios do Ciclo Otto

Para se modificar a forma de ignição de ICO para ICE, retira-se, inicialmente, todo o sistema de alimentação de combustível do motor a diesel, composto por: bomba de injeção, filtro de combustível, tubos e bicos injetores. Em seguida, remove-se o cabeçote original a fim de proceder às aberturas das roscas para a instalação das velas de ignição, bem como para adaptá-lo à nova taxa de compressão. Particularmente, quando se utiliza gás pobre, que tem um poder calorífico aproximadamente dez vezes menor do que aquele do gás natural, mantém-se a taxa de compressão do motor original. Deve-se destacar que o inédito nesse processo de conversão é não se modificar os pistões, que, de uma forma geral causa o desbalanceamento durante seus funcionamentos, acarretando perda de potência.

Adiciona-se, na sequência, um sistema de ignição que pode ser do tipo estático, sem distribuidor, ou dinâmico, que faz uso de um distribuidor.

Há, ainda, que se determinar o correto ângulo de ignição, isto é, o momento em que ocorre a centelha na vela de ignição, quando se dá o início da combustão da mistura, que deverá se dar após o Ponto Morto Superior, PMS. Quando não se usa o distribuidor, um sistema instalado no virabrequim determina a posição exata da ignição proporcionando queima mais uniforme da mistura. Introduce-se, finalmente um sistema de regulador de fluxo gás pobre/ar, ver Figura 14, que vai permitir a regulação inicial de partida do motor, e logo em seguida sua modificação para a posição definitiva.

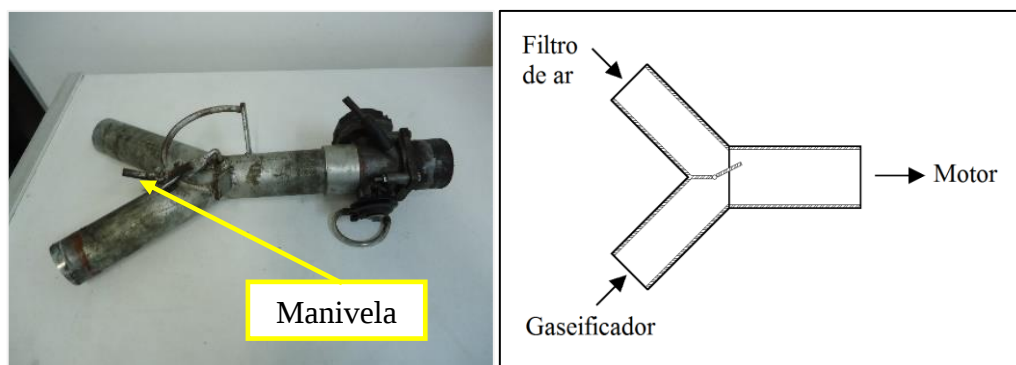


Figura 14: Regulador de fluxo de gás pobre/ar (esquerda) e esquema (direita).

3.5.2. Progressos efetuados no Laboratório de Inovações sobre a ottolização de motores

Queiroga (2012) fez ensaios com um motor Perkins 1104C-44TAG2 ottolizado, turboalimentado, usando etanol hidratado. Uma de suas preocupações era evitar a ocorrência da autoignição. A Razão de Compressão do motor foi alterada de 18:1 para 9,3:1. Nos testes foi mantida a rotação em 1800 rpm, para avanços de ignição de 12,5° a 20°. Para o gerenciamento da injeção e da ignição de combustível, Queiroga, 2012, utilizou uma Unidade de Controle Eletrônico, UCE, programável, da marca Fueltech, composta pelos módulos RacePro, FirePro e Spark Pro. Os dados experimentais mostraram que o consumo específico de combustível tendeu a aumentar com a elevação da Potência Elétrica, e que com o crescimento do avanço de ignição, foi possível reduzir aquele consumo. A potência máxima atingida, em todas as configurações, ficou, em torno, de 45 kWe. Na potência máxima, o motor convertido consumiu 27 kg/h de combustível, funcionando com 12,5° de Avanço de Ignição. Já com 20° ele apresentou um consumo de 25,9 kg/h.

Rumão (2013), mostrou que através do ajuste do ângulo de ignição é possível se fazer funcionar um motor ottolizado com elevado desempenho, produzindo potências com baixo consumo de combustível. Particularmente, operando-se com o sistema formado pelo Gaseificador/Grupo Gerador ele constatou que a escolha desses ângulos corrobora, também, com o funcionamento do gaseificador, aumentando a geração do gás pobre com elevação do PCI, devido ao aumento da pressão de vácuo na linha de gás. Do ponto de vista químico a literatura especializada mostra que a razão maior para o aumento do

desempenho do sistema decorre da elevação do CO, como demonstraram (Yoshikawa, 2006) e (Garcia, 2002).

Bezerra (2016) introduziu modificações no sistema gaseificador/grupo gerador, quando preparou todo o isolamento térmico da tubulação de alimentação de gás pobre do motor, com lã de rocha. Introduziu, ainda, um reservatório para “armazenamento” do gás pobre. Além do mais, elaborou um mapa de ignição, de forma a percorrer, automaticamente todas as potências possíveis, com o menor consumo de combustível. Para tanto, fez uso do dispositivo FT 400 da Fueltech acoplado ao Spark Pró, conseguindo ampliar o rendimento térmico do sistema, e elevando a potência máxima conseguida por Rumão (2013) de 26 kW para 28 kW.

Luna (2018) aprofundou a análise da influência do reservatório de gás, “pulmão”, no funcionamento do sistema Gaseificador/Grupo Gerador. Conseguiu, dessa forma, ampliar de 28 kW, a maior potência conseguida por Bezerra (2016), para 32 kW, fazendo uso de um motor com 6 cilindros.

3.6. Conclusão

Para se realizar a modificação da forma de ignição de ICO para ICE, se faz necessário a remoção do sistema de alimentação, adaptação do cabeçote original de modo a receber as velas de ignição. Além do mais, é requerida a instalação de um sistema de ignição, programável através de uma UCE. Além da otimização, uma série de outros avanços em MCI foram implementados, tendo assim o uso de um grupo gerador com um motor com tecnologia dominada pelo LI, inclusive com diversos trabalhos já publicados.

No capítulo a seguir, serão apresentadas descrições dos equipamentos e instrumentação que compõe o aparato experimental.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

No presente capítulo serão apresentados os equipamentos e a instrumentação utilizados na realização dos experimentos. Serão introduzidos, também os procedimentos operacionais necessários a se obter a maximização na produção de energia, com o aumento da eficiência do sistema, como um todo.

4.2. Os equipamentos

O sistema objeto deste estudo é composto, basicamente, pelo grupo gerador e pelo gaseificador indiano, que serão descritos nas seções 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente.

4.2.1. Grupo gerador

O grupo gerador utilizado neste trabalho foi formado pelo motor MWM 229/6, de seis cilindros, com 5,88 L de cilindrada, aspiração natural, injeção mecânica e razão de compressão de 17:1, e o gerador elétrico da marca Negrine, que possui potência nominal de 150 kVa, e potência ativa de 120 kW, ver Figura 15.

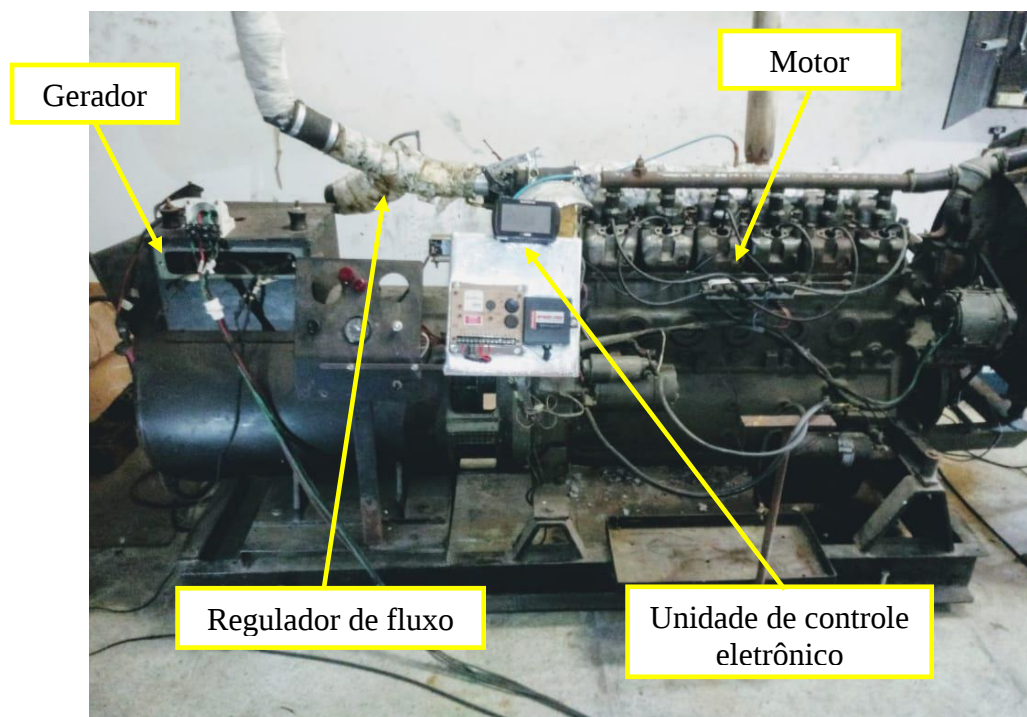


Figura 15: Grupo gerador utilizado neste trabalho

Este motor originalmente operava segundo o ciclo Diesel, de 4 tempos. Queiroga (2009) promoveu a otolização desse motor para poder utilizá-lo com etanol. Mais recentemente, foram realizadas novas adaptações no motor para utilizá-lo com gás pobre (Melo, 2018).

4.2.2. O gaseificador

Como já descrito na seção 2.5, o gaseificador utilizado nos ensaios foi do tipo leito fixo co-corrente “topo aberto”, importado da Índia, do Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, Figura 16. Como já comentado, o gaseificador original sofreu muitas modificações ao longo dos progressos feitos sobre gaseificação no LI, todavia, sua capacidade térmica não foi alterada, permanecendo em 80 kWt.

Uma vez que já foram apresentadas as características do gaseificador empregado nesse trabalho, bem como as modificações introduzidas, acrescentaríamos, apenas, alguns comentários referentes à algumas particularidades, que são: 1. O ciclone, que remove particulados com dimensões que compreendem entre 2 a 50 μm ; 2. A existência de dois

estágios de lavagem do gás pobre; 3. O uso de um chiller, que promove a refrigeração do gás pobre, aumentando sua massa específica e, portanto, o poder calorífico por volume de gás. Menciona-se, por último, o filtro de manga, que é formado por quatro filtros independentes, que utilizam o feltro como o material de retenção.

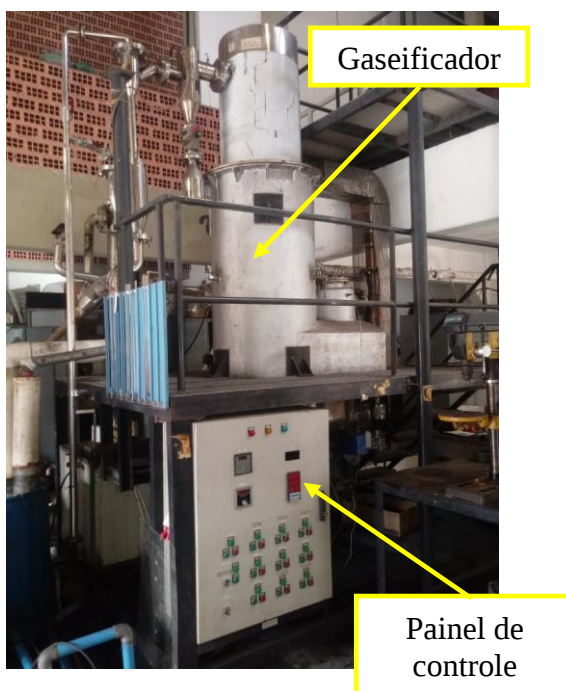


Figura 16: Gaseificador utilizado neste trabalho

4.3. Instrumentos e equipamentos utilizados

4.3.1. Serra de bancada elétrica

A serra de bancada elétrica, foi utilizada para padronização das dimensões dos blocos de madeira em aproximadamente 25 mm x 25 mm x 60 mm.

4.3.2. Balança digital

Para se determinar o consumo de biomassa exigido pelo gaseificador foi utilizada uma balança digital com capacidade total de 40 kg e resolução de 2 g.

4.3.3. Termobalança

Para se determinar o teor de umidade nas amostras da biomassa foi utilizada uma termobalança com resolução de 0,001 g, 0,01 % de umidade e capacidade de 160 g, Figura 17. Este equipamento utiliza a termogravimetria para medir as variações de massa de uma amostra durante o aquecimento (ou resfriamento) ou quando mantida a uma temperatura específica.



Figura 17: Termobalança

4.3.4. Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas foram realizadas em um analisador termogravimétrico (Figura 18), modelo TGA-Q50 da TA Instruments, com exatidão de perda de massa de 0,1 μg . As amostras em cada ensaio experimental foram submetidas a um aumento da temperatura da temperatura ambiente até 900 ° C, via razão de aquecimento de 10 ° C min^{-1} . O fluxo do gás de arrasto (N_2 , 99,997%) foi fixada em 100 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, à pressão atmosférica. Em cada análise, foi utilizada cerca de 10 mg de amostra com um tamanho de partícula inferior a 106 μm .

A termogravimetria ou análise termogravimétrica (TG) é uma técnica da análise térmica na qual a variação da massa da amostra é determinada em função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura.

Esta técnica possibilita conhecer as alterações que o aquecimento pode provocar nas massas das substâncias.



Figura 18: TGA

4.3.5. Calorímetro

O poder calorífico superior (PCS) das amostras de biomassa foram determinados com o calorímetro IKA C200 (Figura 19), sob uma atmosfera controlada com oxigênio (99,97%) e pressão de 30 bar no vaso de decomposição e seguindo a norma ASTM D5865.



Figura 19: Calorímetro IKA C200

4.3.6. Analisador de gases veiculares

A análise dos gases foi feita com o Discovery G4 da Alfatest, o qual é constituído por quatro componentes: central de análise eletrônica, sonda, compressor de ar e regulador de pressão, ver Figura 20. O analisador de gases Discovery G4 determina o volume percentual de CO - CO₂ - HC - O₂ contidos nos gases produzidos. Uma amostra do gases da linha de alimentação do motor é captada com o auxílio de uma bomba de vácuo. O Discovery G4 possui um sensor químico capaz de obter o percentual de Oxigênio (O₂), que auxilia o equipamento a prever se um motor está funcionando com queima estequiométrica ($\lambda = 1$), ou não ($\lambda \neq 1$).

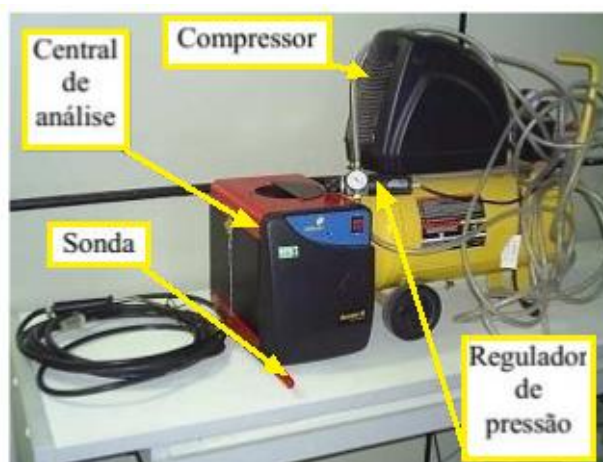


Figura 20: Analisador de gases discovery G4 da Alfatest

4.3.7. Simulador de carga

O simulador de cargas é um equipamento que tem por objetivo possibilitar a avaliação, de forma indireta e contínua, da potência do motor. O motor se encontra acoplado a um gerador elétrico, que tem seu campo magnético excitado quando da imposição de cargas aplicadas por um banco de resistências elétricas (o simulador), ver Figura 21. É constituído por um conjunto de três equipamentos: dois bancos de resistências, com capacidade de 45 kW cada, e um painel de controle. O painel dispõe de um visor onde se pode fazer a leitura de vários parâmetros, como frequência e potência

elétrica, além de permitir que se estabeleça, através de um botão rotativo, em qual potência o desempenho do motor será examinado.

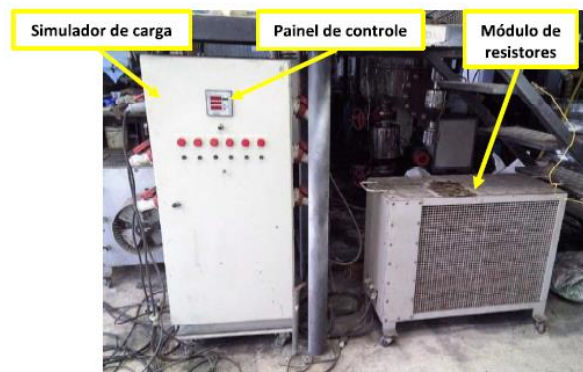


Figura 21: Simulador de carga elétrica

4.4. Os primeiros experimentos

A biomassa utilizada no experimento é formada a partir de uma mistura de podas de cinco espécies diferentes de árvores e em proporções iguais, que são Cajueiro (*Anacardium occidentale*), Oliveira (*Olea europaea*), Sombreiro (*Clitoria fairchildiana*), Mangueira (*Mangifera indica*) e Cajazeira (*Spondias mombin*). A madeira foi cortada em dimensões, aproximadamente, padronizadas (60 mm x 25 mm x 25 mm). Tal padronização é para garantir um melhor empacotamento dentro do reator e para que ocorra queima uniforme e uma produção constante de gás. Essas medidas foram recomendadas por Dasappa (2003).

4.4.1. Determinação do teor de umidade da biomassa

Antes da utilização da biomassa, a mesma foi exposta ao sol, com vistas a se reduzir seu teor de umidade. Em seguida, foram selecionadas seis amostras, aleatoriamente, e avaliados seus teores de umidade. A avaliação do teor de umidade das amostras foi realizada no Laboratório de Carvão Ativado (LCA) do Centro de Tecnologia da UFPB, fazendo uso da termobalança descrita na seção 4.3.3, onde a mesma foi programada para operar a temperatura de 105 °C, durante 60 minutos.

4.4.2. Procedimento para início do funcionamento do motor

Antes de se iniciar os ensaios, fazia-se necessário verificar o funcionamento de todos os instrumentos de medição, equipamentos auxiliares como o analisador de gás, que são utilizados durante os testes. Inclui-se, aí, o nível dos reservatórios de água e o nível de cinzas acumuladas em seu reservatório. Na sequência retirava-se a tampa no topo do gaseificador e removia-se os bloqueios dos orifícios periféricos, garantindo-se a plena entrada de ar. Imediatamente, após, acionavam-se as bombas de lavagem primária, a secundária e a da central de refrigeração (chiller), passando-se, então, à ignição da biomassa in natura, usando-se a chama de um maçarico nas aberturas laterais.

Antes de se iniciar as operações com o gaseificador, era necessário aguardar a temperatura da água do chiller atingisse 5 °C. Com a biomassa inflamada, os primeiros sinais dos gases (fumaça) começam a aparecer através dos orifícios por onde deve emergir a chama piloto.

Fazendo uso, novamente do maçarico, acende-se a chama piloto. Aguarda-se, então, aproximadamente 15 minutos, até que a coloração da chama seja próxima do azul intenso, garantia de que o poder calorífico do gás é suficiente para acionar o motor de combustão interna. Nesse momento, fecha-se a válvula de alimentação da chama piloto e abre-se a válvula de controle do fluxo da mistura ar/gás, permitindo que, aproximadamente, 15% de gás pobre e 85% de ar alimente o motor otolizado. Dá-se, assim, partida no motor. Volta-se, então, a regular o controle de mistura, ao tempo em que se aciona o controlador eletrônico de rotação, que manterá a rotação do motor constante, em 1800 rpm.

Com o motor em funcionamento o banco de resistências é ligado ao gerador. Por construção, a primeira potência que se consegue ler no visor do banco de resistências é 8,4 kW. Através de um botão rotativo, também, no painel do banco de resistências, pode-se aumentar a potência imposta ao motor. Para se garantir que há gás pobre suficiente para se passar de um nível de potência para outro, com aproximadamente 5 kW de diferença, deixa-se escoar um período de tempo de 10 min. Procedimento semelhante foi adotado por Rumão (2013), Bezerra (2016) e Luna (2018).

No tocante à alimentação do gaseificador com biomassa, isto é feito em determinados intervalos de tempo, cujo espaço vai depender do nível da potência do motor, que ditará o consumo de biomassa.

4.4.3. Intervalo de acionamento do mecanismo de perfuração de cinzas

Foi percebido, ao longo do funcionamento do sistema gaseificador/grupo gerador, que a partir da potência de 23 kW, havia uma tendência de queda nos índices de qualidade da gaseificação. Desta maneira, convenceu-se que, num momento imediatamente anterior a esta faixa de potência, deveriam ser removidas as cinzas da grelha, com o auxílio de um equipamento denominado perfurador de cinzas, que se encontra incorporado ao gaseificador. Procedimento idêntico foi adotado nas faixas de potências subsequentes. Evitava-se, assim, o bloqueio da passagem do gás pobre e o risco de descontinuidade no processo de combustão.

4.4.4. Avaliação do consumo de biomassa

Para se quantificar o consumo de biomassa com o gaseificador em operação, e para cada uma das potências geradas, pesava-se a quantidade de massa consumida em um determinado intervalo de tempo.

4.6. Conclusão

Foram descritas, ao longo deste capítulo, tanto o gaseificador como o grupo gerador empregado neste estudo. Foram detalhadas, também, as análises laboratoriais necessárias à determinação de índices levados em consideração no computo da eficiência dos vários processos que compuseram este trabalho.

No capítulo a seguir, serão abordados os resultados e as discursões decorrentes dos experimentos e análises de laboratório descritas no presente capítulo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados, ao tempo em que serão feitos os comentários e análises pertinentes.

5.2. Caracterização da biomassa

5.2.1. Teor de umidade da biomassa

A Tabela 3 apresenta os resultados do teor de umidade das amostras de biomassa.

Tabela 3: Teor de umidade da biomassa.

Amostras	Umidade (%)
1	8,0
2	9,0
3	8,0
4	8,0
5	10,0
6	10,0
Média	8,83

Verifica-se, portanto, que a umidade média das amostras ficou abaixo dos 9 %.

5.2.2. Determinação da massa específica da biomassa

A Tabela 4 expõe os resultados de 10 amostras da biomassa que serviram de padrão para a alimentação do gaseificador.

Tabela 4: Massa específicas de dez amostras de biomassa usadas nos experimentos.

Amostra	Peso (kg)	A (mm)	L (mm)	P (mm)	Vol. (m ³)	ρ (kg/m ³)
1	0,026	31,6	59,1	31,6	5,90E-05	440,57
2	0,022	31,85	46,8	25,7	3,83E-05	574,29
3	0,03	30	55,2	23	3,81E-05	787,65
4	0,02	23,2	59,8	23,9	3,32E-05	603,17
5	0,034	29,15	58,8	26,2	4,49E-05	757,11
6	0,028	30,3	60,25	30,7	5,60E-05	499,60
7	0,024	25,6	59,6	30,6	4,67E-05	514,05
8	0,026	25,6	60	29,5	4,53E-05	573,80
9	0,028	26	58,8	25,8	3,94E-05	709,88
10	0,018	30	55	24,2	3,99E-05	450,79

Percebe-se que todas as amostras de biomassa apresentaram massa específica que se situou entre 440,57 e 787,65 kg/m³. Logo, todas estão acima do limite mínimo recomendado de massa específica, para uso em gaseificadores de leito fixo e fluxo descendente, que é estimado em 300 kg/m³ (Basu, 2010).

5.2.3. Análise Termogravimétrica

A Figura 22 apresenta as curvas TG e DTG para a biomassa derivada de madeira de cajueiro, onde é possível observar que a região onde houve a maior degradação térmica em percentual de peso de biomassa, ocorreu entre 237,6°C e 400,7°C. A observação sugere que a degradação completa daquela biomassa, isto é, da celulose, hemicelulose e lignina, ocorrerá a temperaturas superiores a 400,7°C. Infere-se, pois, que poderá ser, totalmente, processada, já na zona de pirólise.

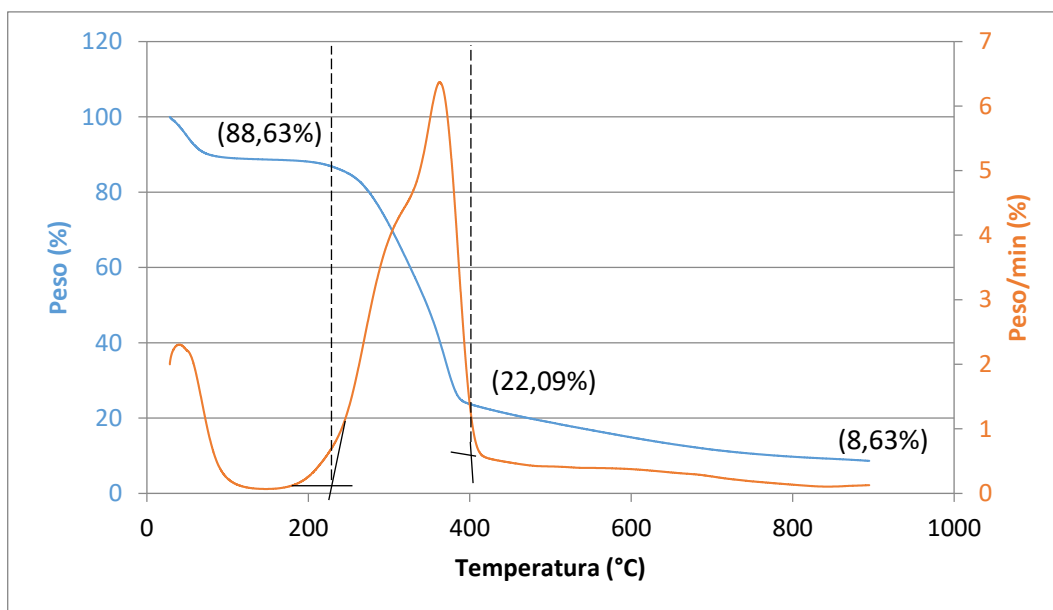


Figura 22: TGA para biomassa derivada do Cajueiro.

Fazendo-se uma apreciação semelhante para as curvas de TG e DTG apresentadas nas Figuras 23 a 26, e que dizem respeito, respectivamente, às espécies oliveira, sombreiro, mangueira e cajazeira, percebe-se que todas, à temperatura de 430 °C, praticamente, terão asseguradas suas completas degradações térmicas.

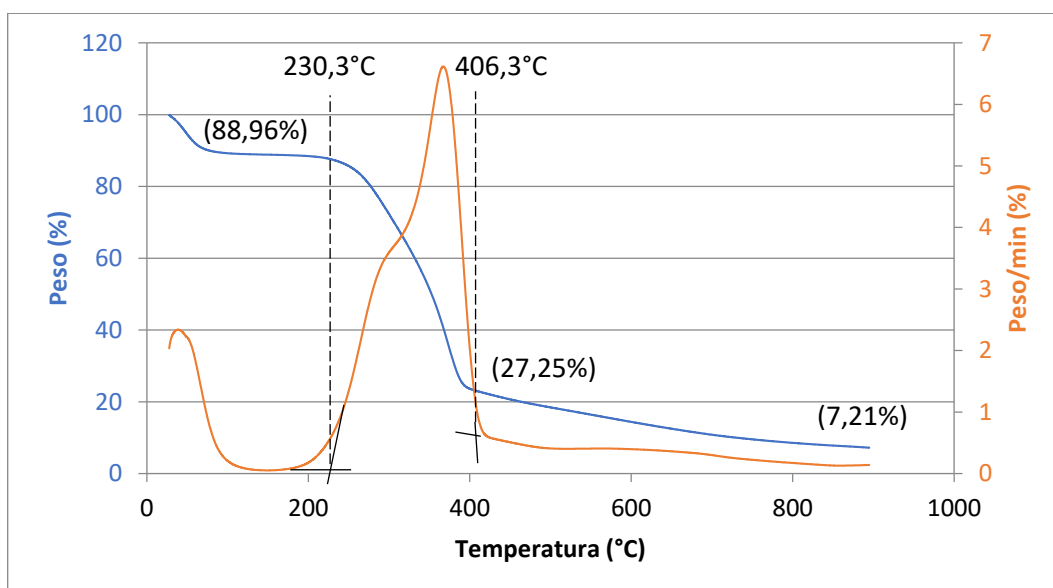


Figura 23: TGA para biomassa derivada da Oliveira.

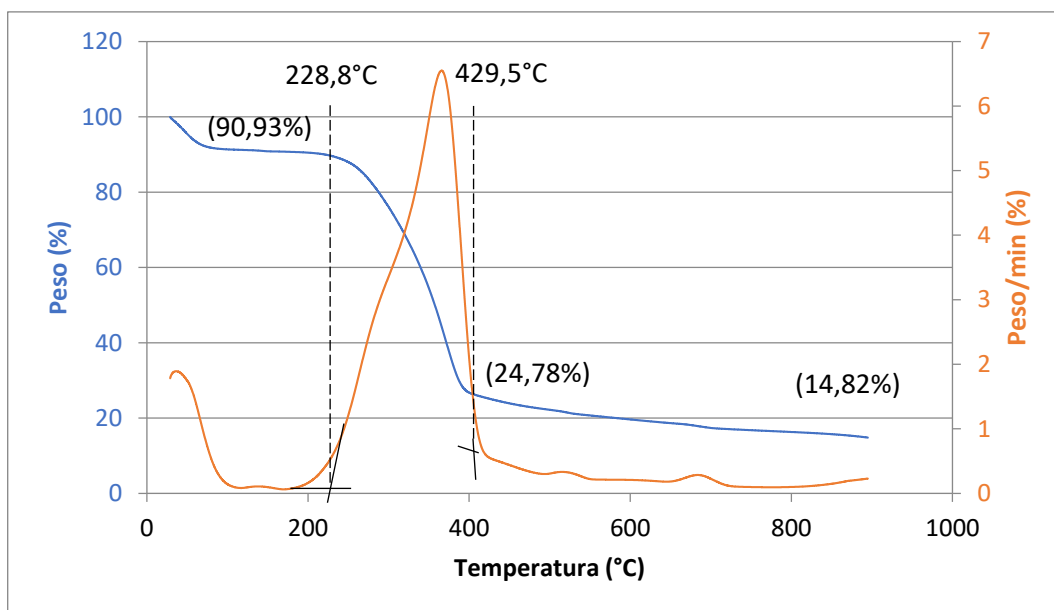


Figura 24: TGA para biomassa derivado do Sombreiro.

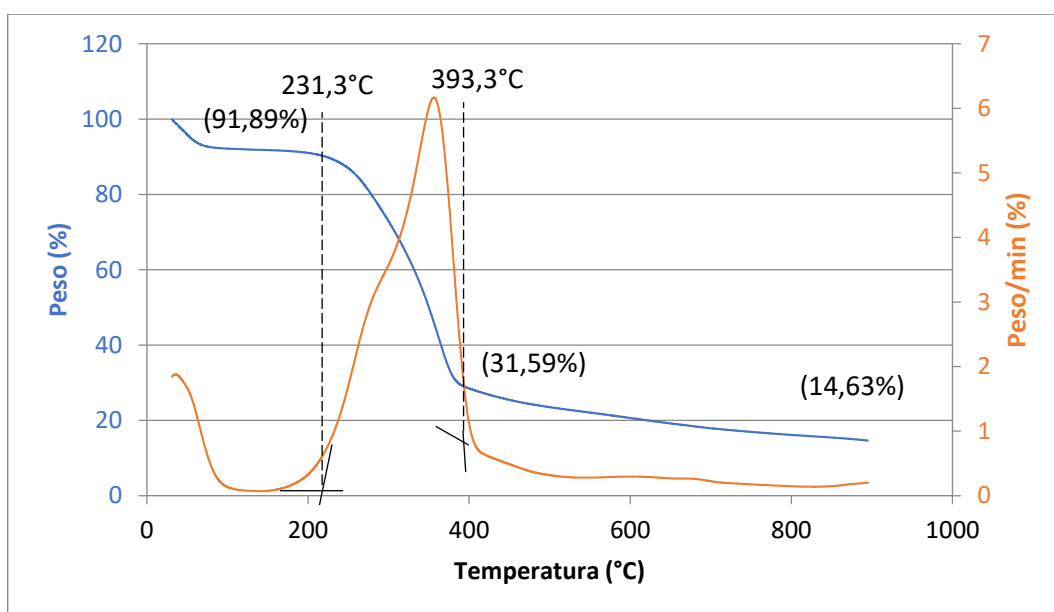


Figura 25: TGA para biomassa derivada da Mangueira.

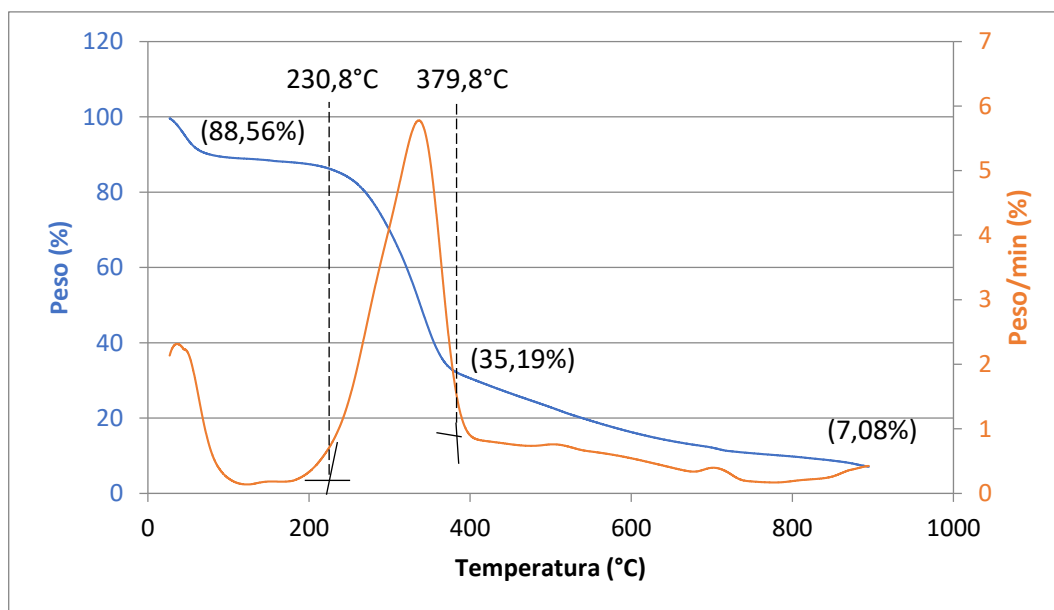


Figura 26: TGA para biomassa derivada da Cajazeira.

5.2.4. Poder calorífico superior

Para determinação do PCS da biomassa, foram feitas duas análises para cada amostra de cada tipo de biomassa, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5: Poder calorífico superior da biomassa.

		PCS (kJ/kg)
Amostra 1 – Cajueiro:	Análise 1:	18069
	Análise 2:	17919
Amostra 2 – Oliveira:	Análise 1:	18173
	Análise 2:	18133
Amostra 3 - Sombreiro:	Análise 1:	18054
	Análise 2:	17843
Amostra 4 - Mangueira:	Análise 1:	18705
	Análise 2:	18770
Amostra 5 - Cajazeira:	Análise 1:	16122
	Análise 2:	16357

Observando-se o PCS das amostras de 1 a 5, constata-se que, de uma forma geral, as quatro primeiras apresentaram valores muito próximos, sendo que a madeira da

cajazeira demonstrou ter o menor PCS. Mesmo assim, consultando-se Demirbas (2004), que indica que, de uma forma geral, o PCS da biomassa se situa entre 14 e 21 MJ/kg, constata-se que esse menor PCS, se situa próximo do valor médio da dada faixa.

5.2.5. Poder calorífico inferior

O PCI_w foi estimado através da Equação (3), a qual descreve o PCI_w em função do PCS, determinado na seção anterior e o teor de umidade (w), que utiliza o valor médio de umidade das amostras, ver Tabela 3, sendo os resultados mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Poder calorífico inferior da biomassa.

		PCS (kJ/kg)	w (%)	PCI _w (kJ/kg)
Amostra 1 - Cajueiro:	Análise 1:	18069	0,0883	16.257,97
	Análise 2:	17919	0,0883	16.121,21
Amostra 2 - Oliveira:	Análise 1:	18173	0,0883	16.352,78
	Análise 2:	18133	0,0883	16.316,32
Amostra 3 - Sombreiro:	Análise 1:	18054	0,0883	16.244,29
	Análise 2:	17843	0,0883	16.051,92
Amostra 4 - Mangueira:	Análise 1:	18705	0,0883	16.837,81
	Análise 2:	18770	0,0883	16.897,07
Amostra 5 - Cajazeira:	Análise 1:	16122	0,0883	14.482,89
	Análise 2:	16357	0,0883	14.697,14
Média				16.025,94

5.3. Caracterização do gás pobre

5.3.1. Composição do gás na tubulação de admissão do motor

As Tabela 7 e 8, apresentam, respectivamente, os níveis de CO, CO₂, HC e O₂, resultados de ensaios do presente trabalho e de Luna (2018).

Tabela 7: Análise dos gases na linha de alimentação do motor, realizadas através do analisador de gás, presente trabalho.

Potência nominal (kWe)	CO (% vol.)	CO₂ (% vol.)	HC (ppm)	O₂ (% vol.)
8,4	14,57	12,37	631	2,90
13	14,82	10,93	447	3,71
18	15,35	10,10	408	4,48
23	14,58	10,11	508	4,94
26	15,76	11,47	601	3,73
29	17,14	11,30	558	2,91
32	18,04	13,17	654	1,33

Tabela 8: Teores dos principais componentes do gás pobre na linha de alimentação do motor, obtidos através do analisador de gás, Luna (2018).

Potência nominal (kWe)	CO (% vol.)	CO₂ (% vol.)	HC (ppm)	O₂ (% vol.)
8,4	17,04	12,5	376	1,89
13	17,57	11,4	183	2,08
18	18,09	10,3	115	2,84
23	17,44	9,2	59	3,89
26	16,31	9,3	81	4,5
29	15,44	10,2	96	5,13
32	14,78	13,2	74	2,87

Ao se comparar os dados das Tabela 7 e 8, constata-se que os valores registrados de CO e de CO₂, até mesmo avaliados para potências superiores a 23 kW (potência de acionamento do mecanismo de remoção de cinzas), do presente trabalho, se encontram abaixo dos de Luna (2018), passando na sequência a sofrerem uma inversão nas suas magnitudes, ou seja, os valores do presente trabalho passam a ser mais elevados. Essa ocorrência, em função da potência produzida pelo sistema gaseificador/gerador, pode ser representada em termos do PCI do gás, ver Figura 27, pois, o PCI está diretamente relacionado com o %CO.

Em se considerando à Tabela 7 e atendo-se aos percentuais de CO₂, deduz-se que as temperaturas geradas por este trabalho são maiores no início do processo para depois se

reduzirem (a formação do CO_2 se dá através de reação exotérmica). Este efeito poderá ser visualizado no gráfico da Figura 28.

No que tange ao HC, os níveis dos hidrocarbonetos no presente trabalho foram mais elevados do que os obtidos por Luna (2018), provavelmente, pela maior quantidade de lignina existente na biomassa de Luna (2018), Overrend et al. (2012), possível de se constatar a partir do conhecimento de que ele se utilizou de biomassa mais densa (valor médio $858,4 \text{ kg/m}^3$).

O maior teor de O_2 no início do processo, no presente trabalho, deve ser entendido como a existência de combustão incompleta. No final do processo, contudo, provavelmente pela ação do mecanismo de remoção de cinzas, o oxigênio teve ocasião de se combinar com o Carbono, reduzindo o O_2 , dando origem ao aumento de CO e de CO_2 , e da temperatura, ver Figura 27. Houve ocorrência inversa no caso de Luna (2018), podendo-se considerar que a combustão tenha se dado de forma completa.

5.3.2. Poder calorífico inferior do gás pobre

O poder calorífico inferior do gás pobre ($\text{PCI}_{\text{gás}}$) foi calculado através da Equação (4), e os resultados estão expostos na Figura 27. Por outro lado, através das Tabelas 7 e 8, se vê que os valores do CO na Tabela 8, e conseqüentemente do PCI de Luna (2018), começam mais elevados, sofrendo mais tarde uma inversão. A Figura 27 espelha, justamente, esse comportamento. Identifica-se, ainda, na mesma figura que ao se acionar o dispositivo de desobstrução na potência nominal de 23 kW_e, ocorre uma queda brusca de CO , ver Tabela 7, e, ato contínuo, do $\text{PCI}_{\text{gás}}$, ver Figura 27. A partir daí há nova retomada do $\text{PCI}_{\text{gás}}$, com o aumento da potência nominal, que atinge valor máximo a 32 kW.

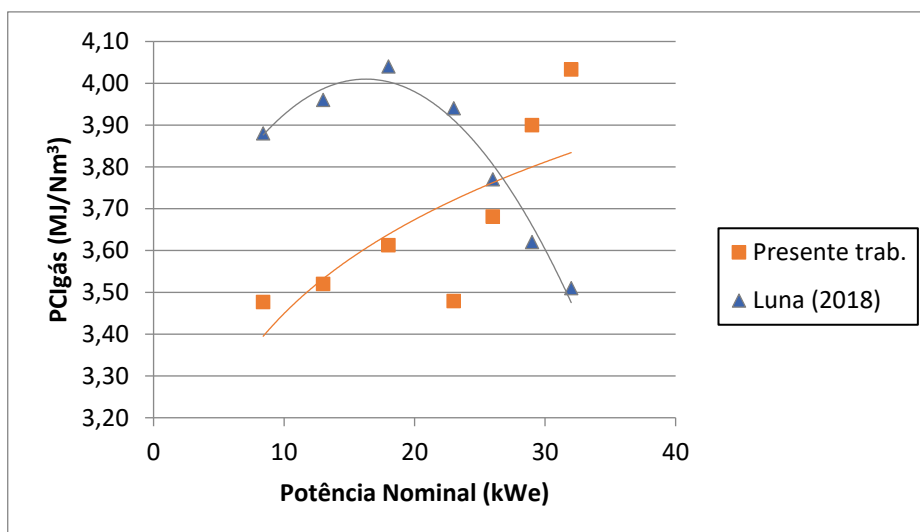


Figura 27: PCI do gás pobre na tubulação de admissão do motor em função da potência elétrica (Resultados do presente trabalho e de Luna (2018)).

5.3.3. Composição dos gases da combustão do motor

As Tabela 9 e 10 apresentam os níveis de CO, CO₂, HC, O₂ e λ , avaliados na saída de escapamento dos gases, para o caso do presente trabalho, bem como de Luna (2018).

Tabela 9: Análise dos gases no escapamento do motor, realizadas através do analisador de gás, do presente trabalho.

Potência nominal (kWe)	CO (% vol.)	CO ₂ (% vol.)	HC (ppm)	O ₂ (% vol.)	λ
8,4	1,10	19,89	13	0,85	1,01
13	0,75	19,86	8	2,25	1,02
18	1,04	20,04	11	0,98	1,01
23	0,65	20,50	15	0,79	1,01
26	0,67	20,55	21	0,52	1,01
29	0,52	20,48	17	0,81	1,02
32	0,23	20,13	17	1,06	1,03

Tabela 10: Teores dos gases no escapamento do motor, obtidos através do analisador de gás, Luna (2018).

Potência nominal (kWe)	CO (% vol.)	CO ₂ (% vol.)	HC (ppm)	O ₂ (% vol.)	λ
8,4	1,98	20,2	0	0,63	0,99
13	0,31	20,8	0	1,1	1,03
18	0,42	21,5	0	0,57	1,01
23	0,57	21,5	0	0,55	1,01
26	0,77	21,5	0	0,5	1
29	0,37	19,3	12	1,46	1,04
32	0,66	20,2	26	0,61	1,01

Ao se analisar as Tabelas 9 e 10 que dispõem os componentes do gás pobre à saída do escape, quando o motor está funcionando com mistura estequiométrica, os valores de todos os componentes se situam próximos, apresentando, particularmente, alternâncias em suas magnitudes. Pode-se inferir ainda, que o acionamento do mecanismo de remoção de cinzas não prejudicou a qualidade dos gases de escape, constatando-se, inclusive, que os valores de hidrocarbonetos não queimados e de monóxido de carbono, gases causadores de efeito estufa, estão aquém dos limites estipulados pelo CONAMA (Bezerra, 2016).

5.4. Medidas de temperaturas do gás

A Figura 28 apresenta a variação da temperatura do gás pobre com a potência. Também, neste caso as características da biomassa do presente trabalho, (massa específica, por exemplo) permitiram que as temperaturas na saída do gaseificador fossem, em princípio, mais elevadas. Todavia, após o acionamento do mecanismo, se identifica uma tendência de queda, enquanto nas registradas por Luna (2018), têm um comportamento crescente. Observa-se, ainda, na Figura 28, como já se havia chamado a atenção ao se analisar a variação nos teores dos componentes do gás pobre, que as temperaturas caem, após o acionamento da manivela do perfurador, como uma consequência da entrada do ar ambiente.

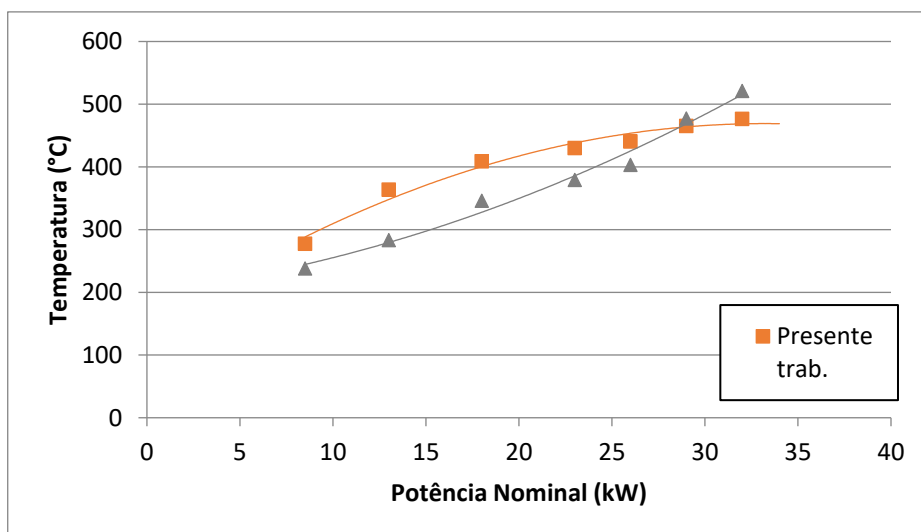


Figura 28: Evolução da temperatura do gás, em função da potência, no caso do presente trabalho e de Luna (2018).

De um modo geral, todas as temperaturas registradas durante os experimentos tendem a aumentar com a potência e com o tempo, tendendo a estabilização da temperatura, ao se alcançar a potência nominal máxima (32 kWe), em torno de 470 °C com acionamento do sistema e próximo à 520 °C, sem o acionamento do mesmo.

5.5. Velocidade do gás pobre na tubulação de admissão

Na Figura 29 estão dispostos os valores da altura da coluna de fluido registrados no tubo em “U” instalado na tubulação de passagem do gás pobre, para os casos do presente trabalho, e o de Luna (2018). Constata-se que os valores obtidos por Luna (2018) foram mais elevados, chegando, a diferença, a ser de 40%. Tal evidência pode ser justificada pelas condições do motor. Quando dos ensaios de Luna (2018) a pressão dos cilindros era de 17 bar, enquanto que na ocasião dos ensaios do presente trabalho essa pressão reduziu-se para 14 bar. Segundo, o Manual da MWM para motores da série 229, de 07/15, em um motor usado essa compressão deveria ser de 19 bar (285 psi).

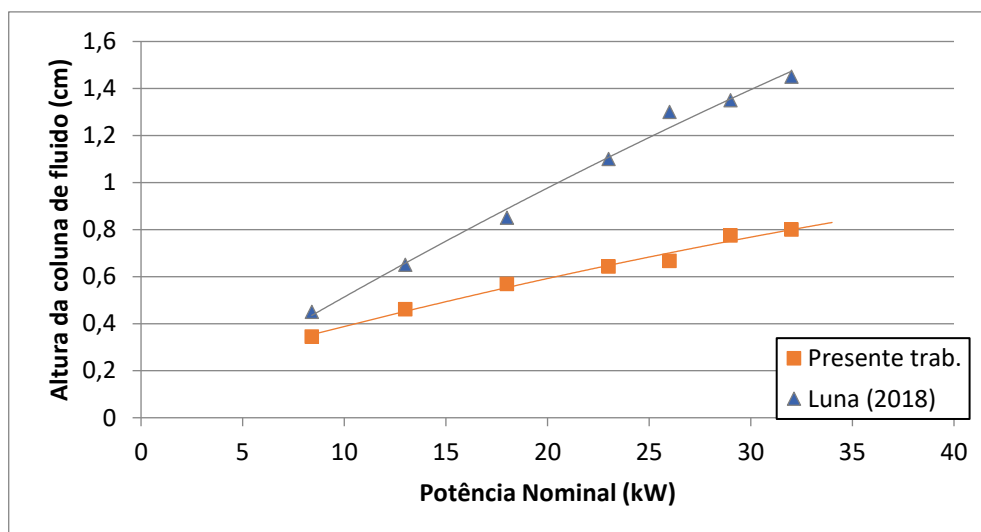


Figura 29: Altura da coluna de fluido do tubo em “U”, localizado na tubulação de admissão de gás do motor, em função da potência elétrica, coletadas no presente trabalho e no de Luna (2018).

Com os resultados da Figura 29, e das Equações (8) e (9), pode-se construir o gráfico da Figura 30. Como esperado, em virtude do que foi comentado na análise da Figura 29, o fluxo de gás registrado por Luna (2018) foi mais elevado ao longo da variação da potência, apresentando diferença superior a 25 %.

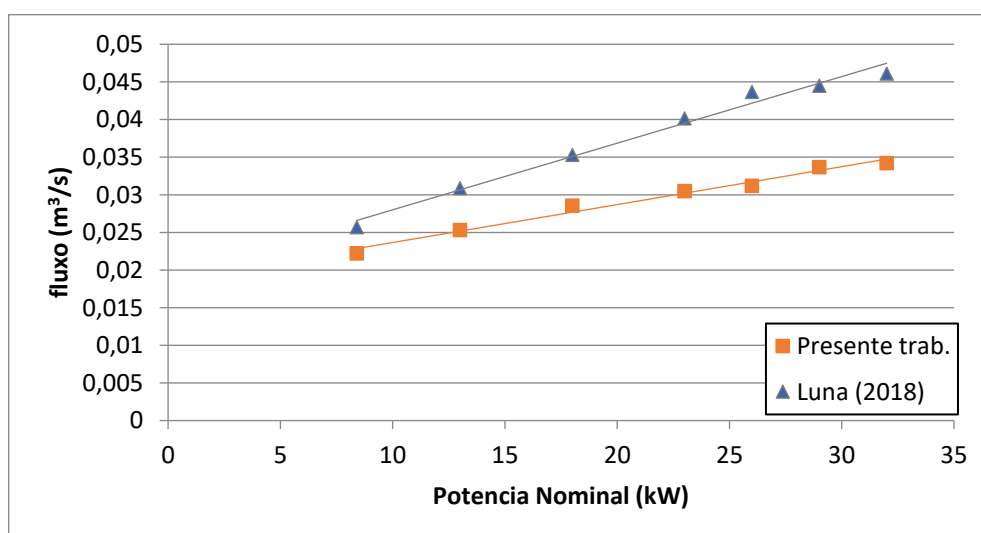


Figura 30: Fluxo de gás pobre na tubulação de admissão do motor, em função da potência elétrica, determinado no presente caso e no trabalho de referência.

5.6. Consumo de Biomassa

A Figura 31 apresenta o consumo de biomassa no caso do presente trabalho e no de Luna (2018), para os domínios de potências estudados. Analisando-se as curvas daquela figura constata-se que o consumo de Luna (2018) foi maior do que o do presente trabalho. A razão provável advém do fato da biomassa usada por Luna (2018) ser mais densa, e apresentar maior teor de umidade. Tais características levam a biomassa a apresentar menor reatividade, fazendo com que o gás produzido tenha qualidade inferior. Este menor consumo da biomassa do presente trabalho ocorre, a despeito de se ter usado o acionamento do aparato de remoção de cinzas, que provoca a eliminação de parte do carvão vegetal, advindo do interior do reator (cerca de 2 kg a cada 150 minutos de teste, para um consumo de biomassa in natura de 30 kg/h). Considerando o PCI do carvão vegetal como sendo 31 MJ/kg, constata-se que, em média, a remoção das cinzas elimina 13 % da energia da biomassa in natura, no mencionado intervalo de tempo.

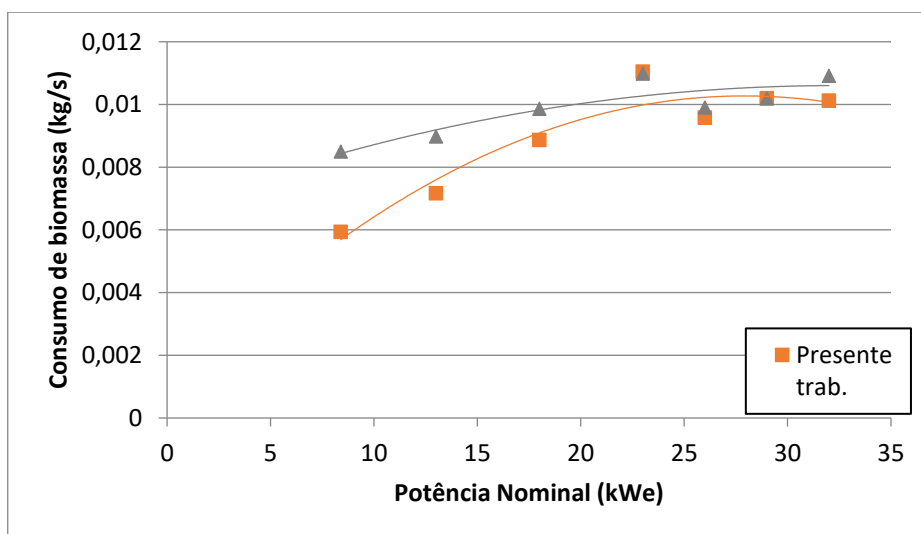


Figura 31: Consumo de biomassa em função da potência elétrica, no presente caso e naquele do trabalho de referência.

Esse carvão vegetal retirado, todavia, tem elevado índice de carbono fixo, cerca de 67 % e tanto pode ser reutilizado em gaseificadores, como na produção de carvão ativado.

A Figura 32, apresenta um diagrama Shankey, cujos valores numéricos foram calculados através das Equações (17), (18) e (19), e decorrentes dos Volumes de Controle I, II e III, da Figura 12. Nos cálculos levou-se em consideração a potência nominal de 32 kW.

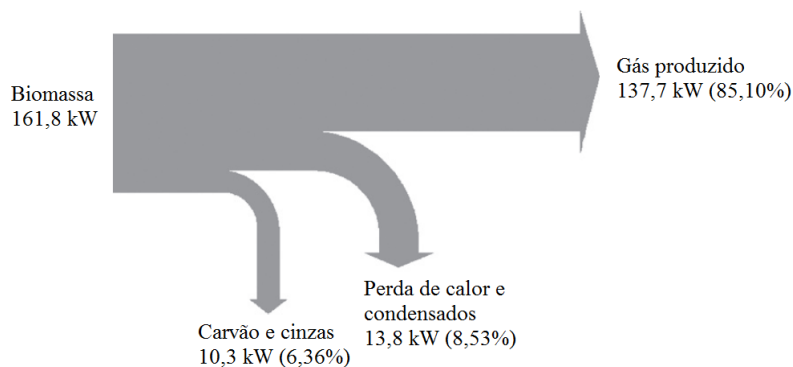


Figura 32: Diagrama Shankey do fluxo de energia do gaseificador.

A Figura 33, mostra o consumo específico de biomassa para as diversas potências obtidas no presente trabalho e naquele de Luna (2018), que apresentou maior consumo de biomassa. Quando se analisa toda a extensão da variação de potência vai se perceber que, de uma forma geral, quanto maior é a potência, menor o consumo específico.

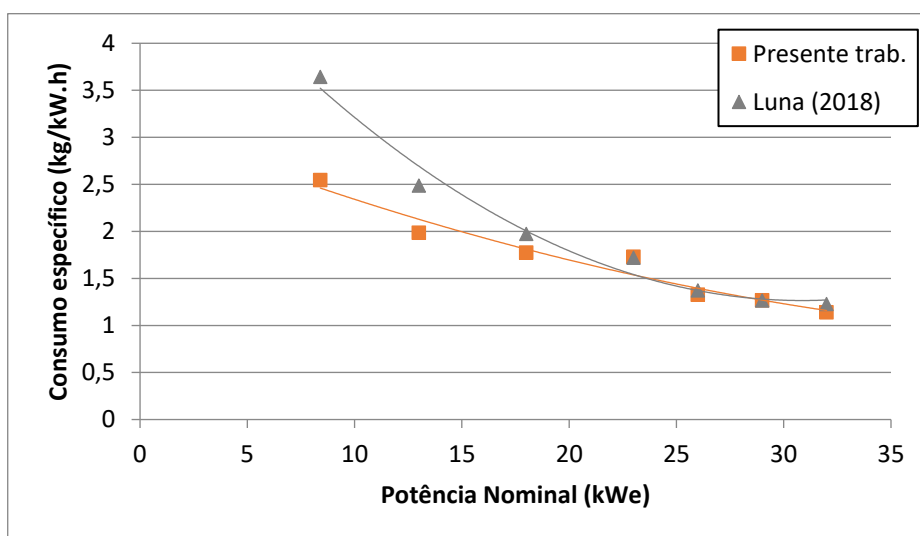


Figura 33: Consumo específico de biomassa em função da potência elétrica, no presente caso e no trabalho de referência.

5.7. Eficiências

5.7.1. Eficiência do gaseificador

Na Figura 34 estão dispostas as curvas com as eficiências do gaseificador para os dois casos aqui examinados. Levando-se em conta a Equação (5) e os gráficos que aparecem nas Figuras 27, 30 e 31, verifica-se a ocorrência do cruzamento das curvas, em prejuízo das eficiências alcançadas no presente trabalho, mas tendo em vista o comportamento dos termos que compõem a Equação (5) observamos uma tendência de convergência para um mesmo ponto.

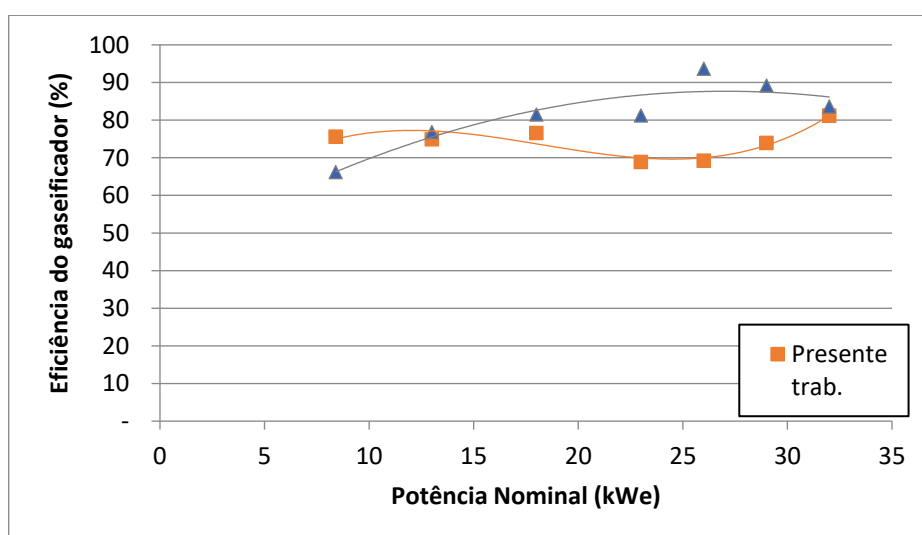


Figura 34: Eficiência do gaseificador, para o presente trabalho e para o caso referenciado.

5.7.2. Eficiência do grupo gerador

A partir da Equação (6), que tem como parâmetro determinante o valor inverso ao PCI do gás pobre, construíram-se as curvas da Figura 35. Uma vez que o PCI do gás pobre de Luna (2018) foi maior, em praticamente para todas as potências, a curva de eficiência do presente trabalho ficou acima daquela de Luna (2018).

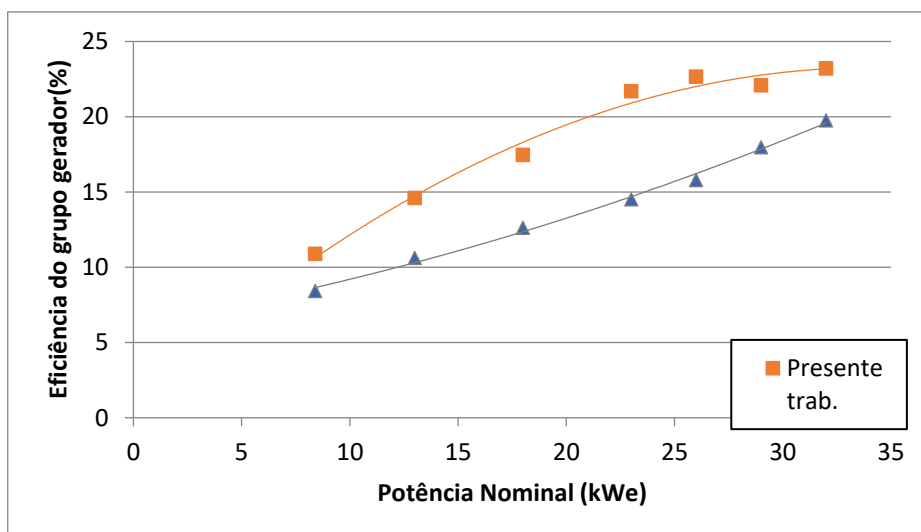


Figura 35: Eficiência do grupo gerador, baseada nos dados do presente trabalho e daquele de referência.

5.7.3. Eficiência do sistema Gaseificador/Grupo gerador

Na Figura 36, a curva do presente trabalho resultou em melhores eficiências do sistema, uma vez que o PCI da biomassa empregada, foi menor do que aquele determinado por Luna (2018), ver Equação (7). Observa-se, todavia, uma desaceleração na eficiência a partir da potência de 23 kWe, quando do acionamento do mecanismo de perfuração de cinzas, enquanto que no trabalho de referência a eficiência segue uma trajetória aproximadamente linear.

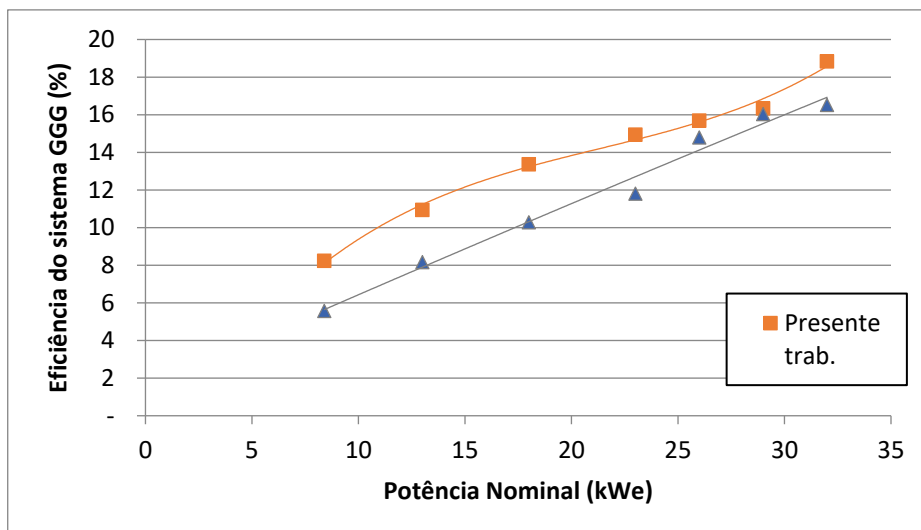


Figura 36: Eficiência dos sistemas gaseificador/grupo gerador, do presente trabalho e do de Luna (2018).

5.8. Conclusão

Buscou-se neste capítulo, examinar os resultados referentes à caracterização da biomassa utilizada neste trabalho, como também a caracterização do gás produzido e dos gases produtos da combustão. Foram realizadas comparações entre os resultados obtidos no presente trabalho e naquele de referência, ou seja, com o de Luna (2018). No capítulo a seguir, serão relacionadas às conclusões de todo o trabalho.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A partir das várias considerações feitas no capítulo anterior pode-se dizer que:

1. A gaseificação é um processo térmico que apresenta balanço energético positivo, ao fornecer energia térmica para processar sua degradação e recuperar mais do que o dobro dessa energia, quando libera a energia química da biomassa;
2. Os teores de umidade da biomassa, composta por diferentes tipos de madeira empregadas na alimentação do gaseificador ficaram abaixo de 9 %, o que pode ser considerado adequado ao tipo de gaseificador considerado;
3. Todas as massas específicas da composição da biomassa estiveram acima do valor recomendado para uso em gaseificadores, que é 300 kg/m^3 , Basu, (2010);
4. As curvas termogravimétricas, TG, levantadas para todos os tipos de biomassa usados neste trabalho, demonstraram que a $430 \text{ }^\circ\text{C}$, qualquer delas estaria carbonizada. É a madeira da cajazeira que precisa de menor energia térmica (temperatura mais baixa) para sua completa decomposição, que ocorrerá no limite, a $379,8 \text{ }^\circ\text{C}$;
5. A cajazeira apresentou PCS, em média, valor 10% inferior ao das outras madeiras, cuja média se situou próximo a 18000 kJ/kg .
6. A principal fonte de referência para comparação dos resultados desse trabalho foi a Dissertação de Mestrado de Luna (2018). Os principais parâmetros da biomassa, dessa dissertação que devem ser observados são: massa específica média igual a $858,4 \text{ kg/m}^3$, PCI médio do gás, $17.748,5 \text{ kJ/m}^3$ e teor de umidade 9,67 %, enquanto os valores, respectivos, desse trabalho, foram $591,1 \text{ kg/m}^3$, 16.026 kJ/m^3 e 8,83 %. Tendo em vista que a menos do uso do mecanismo de remoção de cinzas que não foi empregado por Luna (2018), uma vez que ele tinha o cuidado de a cada teste, retirar todo o resíduo de cinzas da grelha, em muitos casos as diferenças de

resultados nos testes devem ser contabilizados em termos das propriedades da biomassa. Dessa maneira, a partir das análises feitas foi observado que:

- a) Ao se comparar os resultados das magnitudes dos teores dos componentes que aparecem nas Tabelas 7 e 8, em função da potência gerada, fica patente, a partir das discussões que estão incorporadas no item 5.3.1, que as diferenças encontradas entre os resultados daquelas tabelas, devem, ora às propriedades das biomassas, ora às reações químicas de ocorrência natural. Tais reações, acontecem, sobretudo, na zona de combustão, inclusive aquelas estimuladas pelo acionamento do Perfurador de Cinzas;
- b) Sabendo-se que o PCI do gás pobre é função do CO gerado, os resultados apresentados na Figura 27 são os esperados, tendo-se inclusive condições de perceber a influência do Perfurador de Cinzas no processo;
- c) Os gases coletados no escapamento apresentaram valores semelhantes àqueles do trabalho que serve de comparação a este. Observou-se, ainda, que aqueles de efeito estufa estão, em ambos, os casos estudados, abaixo do limite permitido pelo CONAMA.
- d) As propriedades das biomassas, também, se mostraram determinantes no caso das distribuições de temperatura do gás pobre liberado no reator, em função da potência gerada, ver Figura 28. Tendo sido possível, verificar na mesma figura o efeito da intervenção do mecanismo de remoção de cinzas;
- e) Os dados anotados nos ensaios indicaram uma diferença entre os fluxos medidos nos dois trabalhos, chegando em um dos pontos registrados por Luna (2018) a aproximadamente 81 %, que repercutiu no gráfico da Figura 30, que apresenta as curvas de fluxos do gás pobre, onde os valores calculados por Luna (2018) foram mais elevados, culminando em um dos pontos a ser maior cerca de 35%. Ao se examinar todos os dados relacionados aos dois trabalhos, concluiu-se, que de uma forma geral, essas diferenças não prejudicaram no processo comparativo realizado entre os outros dados do presente estudo e aquele de Luna (2018).
- f) O consumo de biomassa do presente trabalho foi inferior ao do trabalho que serviu de referência, provavelmente, em virtude da biomassa usada no presente trabalho ter massa específica inferior e menor teor de umidade. Constata-se, por outro lado, que ficou evidente o maior consumo pontual da biomassa causado

pelo efeito do Perfurador de Cinzas. Deve-se observar, ainda, em ambas as curvas da Figura 31, o comportamento natural de processos de gaseificação para a geração de potências: maior a potência, maior o consumo;

- g) Ao analisar a Figura 33, pode-se perceber que quando se considera o consumo específico em gaseificadores, quanto maior a potência gerada menor o consumo, o que levou ambas as curvas, a tenderem para praticamente o mesmo ponto;
- h) Partindo-se da expressão de definição da eficiência do gaseificador e analisando-se o comportamento dos parâmetros que compõe tal expressão, é possível se compreender a ocorrência de cruzamento entre as curvas vistas na Figura 34. Este resultado de certa forma lógico permitiu se admitir que ambas as curvas convergem para um ponto comum, com a potência;
- i) Em razão, sobretudo, do valor do PCI do gás pobre de Luna (2018) ter sido mais elevado, a curva do presente trabalho que aparece na Figura 35, se configura com valores mais altos do que a de Luna (2018). Divisa-se, todavia, naquela curva uma forte convergência para um ponto comum;
- j) Verificou-se que as eficiências do sistema gaseificador/grupo gerador foram superiores para todas as potências examinadas. Todavia, ficou claro, também, a existência de uma forte tendência de aproximação das duas curvas, à medida que cresce o valor da potência. Aliás, este comportamento onde as duas curvas buscam a convergência pode ser percebido ao longo da análise dos resultados desse trabalho. No nosso entender, este fato indica que, embora tendo-se analisado trabalhos diferentes, com biomassa diversa, o mesmo gaseificador respondeu de forma semelhante, o que facilita a validação das conclusões que se pode tirar do presente estudo. Pode-se concluir, portanto, que o uso do Perfurador de Cinzas não afasta a previsibilidade do comportamento convencional, seja do gaseificador de leito fixo, co-corrente, topo aberto, seja do sistema gaseificador/grupo gerador equipado com tal aparato. Por outro lado, seu uso vai garantir a continuidade de operações do sistema, sem a preocupação com o bloqueio da grelha pelas cinzas, ou sem ter que se retirar todo esse material da grelha, sempre que se pretender dar partida ao sistema, fato este que ocorreu no trabalho de referência.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar completa manutenção no motor MWM 229-6, utilizado neste trabalho, uma vez que o mesmo apresentou pressão de compressão, cerca de 26 % abaixo da expectativa do fabricante, e refazer todos os experimentos.
2. Implementar dispositivo capaz de melhorar o fluxo da biomassa no reator do gaseificador, que, de uma forma geral se comporta de forma muito irregular.
3. Reprogramar o intervalo de acionamento do sistema de desobstrução de maneira a se obter melhores resultados, seja no desempenho do sistema gaseificador/grupo gerador, seja na produção do carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

- ADHKARI, S., & ADOULMOUMINE, N. (2015). *Biomass Gasification and Pyrolysis. Handbook of Clean Energy Systems*. John Wiley & Sons, Ltd.
- ARENA, U., ZACCARIELLO, L., & MASTELLONE, M. L. (2010). Fluidized bed gasification of waste-derived fuels. *Waste Management*, 1212-1219.
- BASU, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Academic Press.
- BASU, P. (2013). Hydrothermal gasification of biomass. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction*. 315-352.
- BEZERRA, A. F. (2016). *Aprimoramento da Eficiência de um Sistema de geração de Energia Elétrica por Grupo Gerador Alimentado com Gás Pobre*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa - PB.
- BROWN, R. C. (2019). Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power. *Wiley*.
- BURAGOHAIN, B., MAHANTA, P., & MOHOLKAR, V. S. (2010). Biomass gasification for decentralized power generation: The Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73-92.
- DAMARTZIS, T., MICHAİLOS, S., & ZABANIOTOU, A. (2012). Energetic assesment of a combined heat and power integrated biomass gasification-internal combustion engine systemby using Aspen Plus(R). *Fuel Processing Technology*, 95, pp. 37-44.
- DASAPPA, S., MUKUNDA, H. S., PAUL, P. J., & ALL, E. (2003). Biomass to Energy : The Science and Technology of the IISc Bio-energy systems. *ABETS*.
- FIGUEIREDO, F. L., FERNANDES, F., PETRUCCI, A. L., FILHO, R. F., & MARSURA, M. (dezembro de 2012). Produção de energia elétrica através da biomassa em sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, pp. 165-174.
- GARCIA, R. (2002). *Combustíveis e Combustão Industrial*. Rio de Janeiro: Interciência.
- HILL, C. A. (2007). *Wood modification: chemical, thermal and other processes* (Vol. 5). John Wiley & Sons.
- JAMES, R., YUAN, W., & BOYETTE, M. (2016). The effect of biomass physical properties on top-lit updraft gasification of woodchips. *Energies*.

- KAN, T., STREZOV, V., & EVANS, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126-1140.
- KUMAR, DEEPAK, & MURTHY, G. S. (2011). Impact of pretreatment and downstream processing technologies on economics and energy in cellulosic ethanol production. *Biotechnology for biofuels*.
- LUNA, F. E. (2018). *Efeito de um Reservatório de Gás (Pulmão) na Melhoria da Eficiência Energética de um Gaseificador de Biomassa*. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB.
- MARTINS, J. (2006). *Motores de Combustão Interna* (3º ed.). Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- MCKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): Gasification Technologies. *Bioresource Technology*, 83, pp. 55-63.
- MELO, V. M. (2018). *Influência da Potência do Motor do Grupo Gerador na Limitação de Produção de energia Elétrica de um Sistema Formado por um Gaseificador/Grupo Gerador*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa.
- METCALFE, K., W., & AL, E. (2013). A hierarchical and comparative kinetic modeling study of C1– C2 hydrocarbon and oxygenated fuels. *International Journal of Chemical Kinetics*, 638-675.
- MILNE, T. A., EVANS, R. J., & ABATZAGLOU, N. (1998). *Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- MNRE. (13 de 04 de 2019). <https://mnre.gov.in/biomass-gasification>. Fonte: Ministry of New and Renewable Energy: <https://mnre.gov.in/biomass-gasification>
- PAENGJUNTUEK, WORANEE, BOONMAK, J., & MUNGLALASIRI, J. (2015). Energy efficiency analysis in an integrated biomass gasification fuel cell system. *Energy Procedia*, 79, 430-435.
- PANWAR, N. L., KOTHARI, R., & TYAGI, V. V. (2012). Thermo chemical conversion of biomass–Eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1801-1816.
- PATEL, T. R., PARMAR, T. A., RATHOD, M. R., GAIKWAD, K. N., & CHHANTBAR, S. (Abril de 2017). Experiment evolution for Downdraft Gasifier With using

- various biomass wood, bagasse and coconut shell. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*.
- PHUPHUAKRAT, T., & AL, E. (2010). Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixed bed gasification system from dried sewage sludge. *Fuel*, 2278-2284.
- POLI, D. D., ZANCHETA, M. N., BOARI, Z. D., MELDONIAN, N. L., MOURA, C. L., & JIURGIU, P. A. (2013). Uma Avaliação das Metodologias para Determinação do Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos. *Revista de Ciências Exatas e de Tecnologia*, 9-31.
- PUIG-ARVANAT, M., BRUNO, J. C., & CORONAS, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 2841-2851.
- QUEIROGA, B. C. (2012). *Conversão de um Motor a Diesel Turboalimentado para Etanol Hidratado: Considerações Técnicas e Comparações de Custo*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa - PB.
- REED, T. B., WALT, R., ELLIS, S., DAS, A., & DEUTCH, S. (1999). Proceedings of the 4th Biomass Conference of the Americas, Oakland, California. *Elsevier Science, Ltd*, 2, 1001-1007.
- RUIZ, J. A., & AL, E. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18 , 174-183.
- RUMÃO, A. S. (2013). *Geração de Potência e Energia Elétrica a partir da Gaseificação de Rejeitos de Biomassa*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa - PB.
- SADHWANI, N., SUSHIL, A., & MARIO, R. E. (2016). Biomass gasification using carbon dioxide: effect of temperature, CO₂/C ratio, and the study of reactions influencing the process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- SHARMA, A., & RASHI VERMA, T. (2013). Biomass estimation and methodology. Village electrification through sustainable use of renewable energy.
- STEVENS, D. J. (2001). *Hot gas conditioning: Recent progress with larger-scale biomass gasification systems; update and summary of recent progress*. National Renewable Energy Lab., Golden, CO.
- YOSHIKAWA, K. (2006). *R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels*. Elsevier/Energy, Science@Direct.