



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

USO DE BIOMASSA E DE CARVÃO VEGETAL EM GASEIFICADORES PARA PRODUZIR GÁS ADEQUADO A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

por

Vicente de Vasconcelos
Claudino Filho

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

**VICENTE DE VASCONCELOS
CLAUDINO FILHO**

***USO DE BIOMASSA E DE CARVÃO VEGETAL EM
GASEIFICADORES PARA PRODUZIR GÁS ADEQUADO A MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA***

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

F481u Filho, Vicente de Vasconcelos Claudino.

USO DE BIOMASSA E DE CARVÃO VEGETAL EM GASEIFICADORES
PARA PRODUZIR GÁS ADEQUADO A MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA / Vicente de Vasconcelos Claudino Filho. - João
Pessoa, 2019.

90 f. : il.

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

1. Gaseificação. 2. Biomassa. 3. Carvão Vegetal. 4.
Fontes Renováveis. I. Jaguaribe, Emerson Freitas. II.
Título.

UFPB/BC

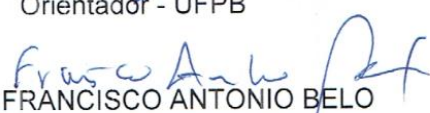
**USO DE BIOMASSA E DE CARVÃO VEGETAL EM
GASEIFICADORES PARA PRODUIR GÁS ADEQUADO A
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

por

VICENTE DE VASCONCELOS CLAUDINO FILHO

Tese aprovada em 24 de abril de 2019


Prof. Dr. EMERSON FREITAS JAGUARIBE
Orientador - UFPB


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO BELO
Examinador Interno - UFPB


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


Prof. Dr. ADRIANO SITÔNIO RUMÃO
Examinador Externo - UFPB


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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pela iluminação concedida a mim, a minha mãe Luzimar Pereira dos Santos, a minha esposa Fernanda Dantas de Almeida Claudino, pela compreensão, apoio e carinho para comigo durante a jornada desta tese.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e o que ela pode nos proporcionar. A minha mãe Luzimar Pereira dos Santos, a minha esposa Fernanda Dantas de Almeida Claudino e aos meus sogros Wilson Almeida de Melo e Maria Aparecida Dantas de Melo. Ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe, ao Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão, e aos membros da banca Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos, Prof. Dr. Francisco Antônio Belo, e Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho. Aos técnicos de laboratório Carlos Guimarães, Airton Leite de Amorim, José Batista dos Santos Filho e Alison Cardoso de Oliveira. Aos meus amigos de laboratório Merques Freitas do Nascimento, Jandemarques Alexandre Soares da Silva, Bráulio Alexandre e Jorge Rebouças. Aos estagiários Samuel dos Santos André, Otávio Batista Neto, Micael Raulino, Saulo Mariano, Luís Paulo Nogueira, Wendell Venicio de Araújo Galdino, Henrique Plácido, Ana Caroline Romão Ferreira Feitosa, Débora Évelyn de Oliveira Silva e Lucas Daniel Firmino Paulino. E um agradecimento especial ao Mestre Francisco Everton Tavares de Luna, pela imensurável ajuda em todas as etapas desta tese.

USO DE BIOMASSA E DE CARVÃO VEGETAL EM GASEIFICADORES PARA PRODUZIR GÁS ADEQUADO A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

RESUMO

Nos dias atuais suprir a demanda por energia é um dos grandes desafios da sociedade. A cada dia a curva que demonstra o quanto de energia é consumido em todo o mundo tem ascendido em uma velocidade maior do que as fontes podem gerar. O desenvolvimento da indústria e o consumo residencial são os principais fatores para que isso ocorra. Um meio encontrado para tentar suprir essa demanda é a utilização de fontes renováveis de energia. O problema de muitas dessas fontes renováveis é que elas dependem exclusivamente de fatores climáticos como o vento e o sol. Uma opção para evitar essa dependência é a utilização da gaseificação de biomassa. A biomassa é um recurso disponível durante todo o ano, sem que seja prejudicada por fatores climáticos. Por sua vez, a utilização da biomassa residual evita a poluição do meio ambiente, ao mesmo tempo em que a transforma em fonte alternativa de energia. Este trabalho tem por objetivo demonstrar que é possível tornar a operacionalização de um sistema formado por um gaseificador de biomassa de um grupo gerador, ao tempo em que se aumenta a sua eficiência energética a partir da substituição da biomassa in natura pelo carvão vegetal. O gaseificador utilizado tem a capacidade de produzir 8 kW térmicos e o grupo gerador pode gerar 2,2 kW de potência elétrica. Durante os experimentos foi utilizado um simulador de carga do tipo resistivo, constituído por oito lâmpadas de bulbo com potências que variaram de 150 a 280 W, perfazendo um total de 2,04 kW. Ao se substituir a biomassa in natura pelo carvão vegetal foi possível se elevar a eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador de 5,21 % para 9,71 %. Constatou-se, ainda, a redução no consumo específico de biomassa (carvão vegetal) do gaseificador, que operando na potência máxima, provoca um consumo específico de 3,89 kg/kWh com a

biomassa in natura, e esse valor foi reduzido para 1,18 kg/kWh com o uso do carvão vegetal. O simulador de carga resistivo funcionou conforme o esperado, tendo sido possível se acionar as oito lâmpadas de bulbo, obtendo-se, desta maneira, a potência máxima de trabalho motor. Comprovou-se, por outro lado, que a substituição da biomassa in natura pelo carvão vegetal foi conveniente ao estado de conservação do sistema, quando eliminou os efeitos nocivos que o alcatrão causa às tubulações do aparato. E essa importância torna-se mais notória, quando deixa de provocar aderência e imobilização de peças do motor de combustão interna, tais como válvulas e pistões. Dá-se, assim, mais um passo para a demonstração da viabilização da gaseificação da biomassa como fonte de energia alternativa, dentre as existentes no cenário nacional.

Palavras chave: *Gaseificação, Biomassa, Carvão Vegetal, Fontes Renováveis.*

USE OF BIOMASS AND CHARCOAL IN GASIFIERS TO PRODUCE PROPER GAS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

Meeting today's demand for energy is one of society's great challenges. Each day the curve that demonstrate how much energy is consumed around the world has risen in a faster rate than the sources can generate. Industry development and residential consumption are the key drivers for this. A way to try to meet this demand is the using of renewable energy sources. However, many of the renewable sources depends exclusively on climatic factors, such as wind and sun. Biomass gasification may be a way out to avoid this dependence. Biomass it is a resource available throughout the year, without being hampered by climatic factors. In turn, the use of residual biomass prevents pollution of the environment, while transforming it into an alternative source of energy. The goal of the present work is to show that is possible in an efficient way to generate electricity from waste wood, and posteriorly charcoal, using a gasifier that has 8 kWt of generation capacity and a genset linked to a Otto Cycle engine. A resistive charge simulator made up of bulb lamps with power ratings ranging from 150 to 280 W, making 2.04 kW. The goals of the present work, it was successfully achieved. By replacing the in natura biomass with charcoal it was possible to increase the efficiency of the gasifier/genset. Moreover, it can be seen reduction on biomass specific consumption (charcoal) of the gasifier. The resistive charge simulator worked as expected, had been possible to activate all eight bulb lamps, getting, thus, the maximum work power from engine. It was found, in the other hand, by replacing the in natura biomass with charcoal it convenient to the system conservation status, eliminating the harmful effects the tar causes to piping apparatus. This importance make more notorious, when there is not adherence and immobilization of parts of internal combustion engine, like valves and pistons. Thus, another step is taken to demonstrate the viability of biomass gasification as an alternative energy source, among those existing in the national scenario.

Keyword: *Gasification, Biomass, Charcoal, Renewable Sources.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. Objetivos Gerais.....	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II.....	7
FUNDAMENTOS DA GASEIFICAÇÃO	7
2.1. INTRODUÇÃO.....	7
2.2. O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	7
2.3. ZONAS DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	8
2.4. REAÇÕES DE GASEIFICAÇÃO	9
2.4.1. Reações Heterogêneas Gás – Sólido:.....	9
2.4.2. Reações Homogêneas (Fase Gasosa):.....	10
2.4.3. O Craqueamento do Alcatrão:	11
2.4.4. Oxidação por Parte dos Produtos da Pirólise:	11
2.5. O GASEIFICADOR	11
2.5.1. Classificação dos Gaseificadores:.....	11
2.5.2. Tipos de Gaseificadores:	12
2.6. CORRELAÇÕES E CONCEITOS FÍSICO – MATEMÁTICOS.....	21
2.6.1. Poder Calorífico Inferior do Gás Pobre Produzido.....	21
2.6.2. Poder Calorífico Inferior da Biomassa (Madeira).....	22
2.6.3. Poder Calorífico Inferior do Gás, Determinado a Partir de sua Decomposição.....	22
2.6.4. Consumo de Biomassa.....	23
2.6.5. Eficiência do Gaseificador/Grupo Gerador	23
2.7. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DO SISTEMA	23
CAPÍTULO III	30

CONTAMINANTES DO GÁS POBRE	30
3.1. INTRODUÇÃO.....	30
3.2. O ALCATRÃO E A SUA REMOÇÃO	30
3.2.1. Técnicas de Remoção do Alcatrão.....	31
3.2.2. Tecnologias Primárias.....	32
3.2.3. Tecnologias Secundárias	32
3.3. AS CINZAS	33
CAPÍTULO IV.....	35
MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1. INTRODUÇÃO.....	35
4.2. O GASEIFICADOR UTILIZADO NESTE TRABALHO	35
4.2.1. Modificação do Sistema de Desobstrução da Grelha	39
4.2.2. Melhorias na Medição de Temperatura do Gaseificador	41
4.2.3. O Motor Utilizado neste Trabalho	44
4.2.4. Gerador de Energia Elétrica.....	44
4.3. Aparato Experimental Complementar	45
4.3.1. Serra de Bancada.....	45
4.3.2. Simulador de Carga.....	45
4.3.3. Analisador de Gases Veiculares	46
Fonte: FIGUEIREDO (2017).....	46
4.3.4. Balança Digital.....	46
4.3.5. Analisador de Energia.....	46
4.3.6. Termobalança	47
4.3.7. Termo higrômetros e Leitores de Temperatura.	48
4.4. SELEÇÃO DO TAMANHO DOS TABLETES DE BIOMASSA IN NATURA PARA SE ALIMENTAR O GASEIFICADOR.....	49
4.5. OS TESTES.....	50
4.5.1. Testes com Biomassa In Natura	50
4.5.2. Carvão Vegetal.....	52
4.5.3. Os Testes com o Carvão Vegetal	53
4.5.4. Vantagem da Utilização do Carvão Vegetal Sobre a Biomassa In Natura .	54
CAPÍTULO V	57
RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	57
5.2. TEOR DE UMIDADE.....	57

5.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS – ENSAIO COM BIOMASSA IN NATURA	58
5.4. CONSUMO DE BIOMASSA IN NATURA	58
5.5. PCI DO GÁS POBRE PRODUZIDO POR POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA COM BIOMASSA IN NATURA	59
5.6. COMPOSIÇÃO DOS GASES COM BIOMASSA IN NATURA	60
5.7. EFICIÊNCIA DO SISTEMA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR UTILIZANDO BIOMASSA IN NATURA	61
5.8. MEDIÇÃO DAS TEMPERATURAS OPERANDO-SE COM O CARVÃO VEGETAL.....	62
5.9. CONSUMO DE CARVÃO VEGETAL.....	62
5.10. PCI DO GÁS POBRE PRODUZIDO POR POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL	63
5.11. COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ADMISSÃO NO MOTOR UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL	64
5.12. EFICIÊNCIA DO SISTEMA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL	65
CAPÍTULO VI.....	67
CONCLUSÕES.....	67
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de um gaseificador contracorrente	13
Figura 2.2: Esquema de um gaseificador co-corrente	14
Figura 2.3: Esquema de um gaseificador de leito cruzado	16
Figura 2.4: Esquema de um gaseificador de leito fluidizado	17
Figura 2.5: Esquema de um gaseificador de fluxo arrastado.....	19
Figura 2.6: Esquema de um gaseificador forno rotativo	20
Figura 2.7: Esquema de um gaseificador de plasma.	21
Figura 2.8: Volumes de controle para balanço de massa e energia.....	24
Figura 4.1: O gaseificador com modificações já introduzidas.	36
Figura 4.2: Diagrama esquemático do gaseificador original	37
Figura 4.3: Esquema compacto da presente estrutura do gaseificador utilizado nesse trabalho.	38
Figura 4.4: Alavanca de acionamento do sistema de desobstrução.....	40
Figura 4.5: Sistema de desobstrução	41
Figura 4.6: Termopares utilizados para medir as temperaturas da zona de combustão (T_2) e de secagem (T_4 e T_5)	42
Figura 4.7: Termopares utilizados para medir as temperaturas das zonas de pirólise (T_3) (a), redução (T_1) (b).	43
Figura 4.8: Termopares localizados próximo ao Tubo de Pitot (T_6) e na entrada do motor (T_7)	43
Figura 4.9: Termopar na saída do gás do reator (T_s).....	44
Figura 4.10: Banco de resistência em funcionamento	45
Figura 4.11: : Analisador de gases	46
Figura 4.12: : Analisador portátil da qualidade de energia.....	47
Figura 4.13: Termobalança.....	48
Figura 4.14: Termo higrômetro	49
Figura 4.15: Tamanhos dos tabletes de biomassa utilizada.....	50
Figura 4.16: Controlador de fluxo em Y	52
Figura 4.17: Formação de hidrocarbonetos na biomassa in natura e no carvão vegetal.	54
Figura 4.18: Filtros utilizados nos testes	55
Figura 4.19: Material retirado do purgador do gaseificador.....	56
Figura 4.20: Análise dos níveis de opacidade no escape do motor.....	56

Figura 5. 1: Consumo específico de biomassa in natura em função potência elétrica gerada	59
Figura 5. 2: PCI do gás pobre produzido em função da potência elétrica gerada	60
Figura 5. 3: Composição dos gases em função potência elétrica gerada.....	60
Figura 5. 4: Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador	61
Figura 5. 5: Consumo específico de carvão vegetal em função da potência elétrica gerada	63
Figura 5. 6: PCI do gás pobre produzido em função potência elétrica gerada	64
Figura 5. 7: Composição dos gases em função da potência elétrica gerada.....	65
Figura 5. 8: Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 1: Composição Volumétrica do Gás	8
Tabela 3. 1: Teor de Alcatrão no Gás Produzido em Diferentes Tipos de Gaseificadores	31
Tabela 5. 1: Teor de Umidade Contida na Biomassa In Natura.	57
Tabela 5. 2: Temperaturas mensuradas no gaseificador.....	58
Tabela 5. 3: Temperaturas Mensuradas No Gaseificador Utilizando Carvão Vegetal...	62

LISTA DE SÍMBOLOS

%CO – Porcentagem de Monóxido de Carbono
%UM – Porcentagem de Umidade Existente na Biomassa
 C_{Bio} – Consumo da Biomassa
CO – Óxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
CH₄ - Metano
H₂ – Hidrogênio
HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
 $\dot{m}_{ar,g}$ - Fluxo de ar aspirado pelo gaseificador
 $\dot{m}_{ar,m}$ - Fluxo de ar aspirado pelo motor
 $\dot{m}_{bio}$ - Fluxo de biomassa de alimentação do gaseificador
 $\dot{m}_{carvão}$ - Fluxo de carvão produzido no gaseificador
 $\dot{m}_{cinzas}$ - Fluxo de cinzas decantadas no cinzeiro do gaseificador
 $\dot{m}_{cinzas,purg}$ - Fluxo de cinzas capturadas pelo purgador
 $\dot{m}_{cinzas,lav}$ - Fluxo de cinzas capturadas pelo sistema de lavagem
 $\dot{m}_{cond}$ - Fluxo de condensados produzidos na placa condensadora
 $\dot{m}_{ex}$ - Fluxo de gases de exaustão do MCI
 $\dot{m}_{gásI}$ - Fluxo de gás produzido pelo gaseificador
 $\dot{m}_{gásII}$ - Fluxo de gás que sai do V.C. II
 $\dot{m}_{gásIII}$ - Fluxo de gás que sai do V.C. III
 $\dot{m}_{gásIV}$ - Fluxo de gás que sai do V.C. IV
 $\dot{m}_{gásV}$ - Fluxo de gás que sai do V.C. V
 $\dot{m}_{H_2O}$ - Fluxo de água que entra no sistema de lavagem
 $\dot{m}_{part}$ - Fluxo de particulados capturados pelo filtro de manga

O₂ – Oxigênio

p_{atrito} – perdas por atrito no interior do gerador elétrico (kW);

P_B – Potência da bomba centrífuga

P_e – Potência Elétrica Útil

P_{eixo} - potência do eixo que acopla o motor ao gerado elétrico (kW);

PCI – Poder Calorífico Inferior

$PCI_{biomassa}$ - PCI da biomassa

$PCI_{carvão}$ - PCI do carvão

PCI_{cinzas} - PCI das cinzas

$PCI_{exaustão}$ - PCI dos gases da exaustão do MCI

$PCI_{gásI}$ - PCI do gás que sai do V.C. I

$PCI_{gásII}$ - PCI do gás que sai do V.C. II

$PCI_{gásIII}$ - PCI do gás que sai do V.C. III

$PCI_{gásIV}$ - PCI do gás que sai do V.C. IV

$PCI_{gásV}$ - PCI do gás que entra no V.C. VI

PCI_{part} - PCI dos particulados captutrados no filtro de manga

PCS – Poder Calorífico Superior

$P_{LÍQ.}$ - Energia líquida gerada pelo grupo gerador

P_{TOT} - Energia total gerada pelo grrupo gerador

$\dot{Q}_{ei}$ – quatidade de calor devido a energia interna da biomassa

$\dot{Q}_{eiMCI}$ – quanridade de calor devido a energia interna da mistura ar-combustível

$\dot{Q}_{GAS}$ - Quantidade de calor perdida em todo o V.C. I para a atmosfera

$\dot{Q}_{MCI}$ - Quantidade de calor perdida no motor de combustão interna para a atmosfera

Q_{v_gás} – Vazão Volumétrica do Gás

V_{gás} – Velocidade do Gás

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);

η_G – Eficiência de gaseificação;

η_{GG} – Eficiência do sistema gaseificador / grupo gerador;

η_s – Eficiência do grupo gerador;

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Pelo menos cinco fatos fundamentam a certeza de que a biomassa é uma das mais importantes fontes de energia (HEIDENREICH, FOSCOLO, 2014, LAURI *et al.*, 2014, ZHANG *et al.*, 2012, BRAVANAM, SASTRY, 2011, LIU, 2010, BLASI, 2009): 1. É um combustível renovável (SCHMIDT, 2009, ISIKGOR, BECER, 2015); 2. É neutro com relação às emissões de CO₂ (HEIDENREICH, FOSCOLO, 2014; CHAWDHURYA, MAHKAMOV, 2011, JAMES *et al.*, 2016) 3. É capaz de substituir combustíveis derivados de petróleo (HEIDENREICH, FOSCOLO, 2014, LAURI *et al.*, 2014, ZHANG *et al.*, 2012, BRAVANAM, SASTRY, 2011, LIU, 2010, BLASI, 2009); 4. É abundante (LAURI *et al.*, 2014, ZHANG *et al.*, BLASI, 2009) e 5. É um recurso encontrado em todas as partes do mundo (YANG *et al.*, 2004, IFC, 2017).

Existem várias opções de se tornar disponível a energia química da biomassa, cada uma delas com características e resultados próprios (BHAVANAM *et al.*, 2011). Uma das formas mais eficientes de se ter acesso a essa energia é através da produção de gás por processos bioquímicos (fermentação) ou através da termoquímica (pirólise). É óbvio que a partir de qualquer dessas vias pode-se obter a energia na forma de calor, de eletricidade ou mecânica. Todavia, entende-se que a gaseificação, é a maneira mais eficiente de se aproveitar a energia interna da biomassa (McKENDRY, 2002), tendo em vista que o gás produzido poderá ser queimado em temperaturas mais elevadas, ou até em células combustíveis.

Entende-se por gaseificação todo processo que transforma combustível sólido em gás combustível (McKENDRY, 2002, HBDGES, 1988). Essa conversão se dá através da queima do material com baixa percentagem de ar com relação à queima estequiométrica.

Durante a Segunda Guerra Mundial, mais de um milhão de gaseificadores foram construídos e utilizados pela população civil na Europa (KAUPP, 1984), e mais de dez mil carros movidos a gás pobre circulavam por aquele continente (WTB, 1999). A grande oferta de combustíveis derivados do petróleo, pós-guerra, retraiu o uso desses aparatos. Hoje, porém, com a diminuição das reservas de petróleo, e a consciência de que o aquecimento global é oriundo da combustão dos derivados do petróleo, o emprego de gaseificadores volta a ser cogitado.

O uso da gaseificação para a geração de eletricidade tem a vantagem de evitar os custos da distribuição. Eles são reduzidos, tendo em vista, que os gaseificadores servem, geralmente, às comunidades locais, ou a indústrias que dispõem de biomassa residual. Desta forma, em países como o Brasil, a biomassa pode competir, inclusive, com a hidroeletricidade, embora se saiba que, dado o baixo poder calorífico do gás pobre, torna-se onerosa a sua estocagem (RUMÃO, 2013).

O gás pobre, ou gás de baixo poder calorífico é produzido quando, biomassa, carvão vegetal, ou mineral é gaseificado com ar, ou com outro agente como o vapor d'água. Nos gases gerados pela maioria dos gaseificadores, encontram-se, também, ácidos e alcatrão condensados, além de particulados. Tais impurezas podem conduzir à problemas operacionais na utilização do gás pobre.

Na Índia, após vinte anos de pesquisa, o Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, desenvolveu um gaseificador de biomassa que possui um sistema de lavagem para o gás produzido que, com o auxílio de um ciclone e de filtros de manga, permite a retirada de uma parcela considerável de particulados e do próprio alcatrão, os quais são formados durante a gaseificação.

O gás produzido ou gás pobre de gaseificadores pode ser empregado diretamente na produção de potência, através da geração de vapor, ou mesmo usado na cocção de alimentos em pequenas comunidades. A outra maneira de se fazer uso do gás pobre é via geração de energia elétrica. Nesse caso, necessário se faz que o gaseificador seja acoplado à um grupo gerador, onde o motor desse grupo seja dual, ou a gás.

Em 2004 o Laboratório de Inovação do Centro de Tecnologia da UFPB (LI), adquiriu do IISc/CGPL, através de um projeto com o Ministério das Minas e Energia, dois gaseificadores de biomassa, sendo ambos de topo aberto e de leito fixo. Um deles com capacidade para produzir 80 kW térmicos que deveria gerar 20 kW elétricos, quando associado à um grupo gerador cujo motor seria dual. Tal motor partiria com diesel e consumiria de 18 a 20 % daquele combustível, quando em operação, com relação a sua composição original. O segundo gaseificador, de capacidade térmica menor (4 kW térmicos) fora projetado para com um grupo gerador com motor do ciclo Otto produzir 1 kW elétrico.

FIGUEIREDO (2017), considerando que o reator do gaseificador de 4 kW térmicos sofrera considerável desgaste nas suas paredes internas de cerâmica, o substituiu por dois tubos concêntricos de aço inox, preenchendo o espaço anular com vermiculita. Em seguida acoplou-o a um grupo gerador com motor Vanguard V-Twin de 2 cilindros em V, de quatro tempos, a gasolina, com cilindrada total de 570 cm³ e potência nominal de 18 hp (13,44 kW). Uma vez que o motor passaria a ser alimentado com gás pobre, foi necessário aumentar sua taxa de compressão, que passou de 8,5: 1 para 11,68:1. Dentre as conclusões tiradas por Figueiredo (2017) destaca-se: 1. A eficiência do gaseificador foi de 87 %; 2. O sistema de arrefecimento e lavagem do gás reduziu no máximo a temperatura do gás de alimentação do motor para 41,6 °C; 3. Mesmo com a utilização do sistema de lavagem, verificou-se a presença de alcatrão condensado em condutos do gaseificador e na admissão do motor.

MACAU (2017), observando as dificuldades apresentadas pelo sistema de lavagem do gás pobre utilizado por FIGUEIREDO (2017), refez, basicamente os testes de FIGUEIREDO (2017) utilizando um sistema de condicionamento do gás pobre, baseado na atomização desse gás em um meio aquoso. As principais conclusões de MACAU (2017) foram: 1. Houve redução do consumo específico com o aumento da potência; 2. A utilização de um depurador úmido foi capaz de remover parte das impurezas do gás. 3. Identificou-se a presença de particulado aglutinado com alcatrão sobre toda a superfície do bocal de nebulização e no seu tubo de suporte. Assim, esse sistema precisa ser melhorado para que o conjunto gaseificador/grupo gerador possa funcionar continuamente.

RUMÃO (2013), fez uso do sistema formado pelo gaseificador de biomassa indiano de 80 kW térmicos, acoplado a um grupo gerador de 36 kVA, com motor Diesel

MWM D229-4, otolizado. Estudou a eficiência do sistema como um todo, do gaseificador em particular e do motor, isoladamente, em vários cenários, quando o motor foi testado com diferentes ângulos de ignição, e o gaseificador foi alimentado com dois diferentes tipos de rejeitos de madeira. Desse estudo, inferiu, dentre outros fatos, que: 1. O ângulo de ignição de 9°, foi o que permitiu maiores vantagens econômicas, e melhores condições de funcionamento, quando se leva em conta o intervalo formado pela menor potência de trabalho, até a maior permitida durante os ensaios; 2. O motor alimentado apenas com gás pobre, chegou a produzir potência elétrica de trabalho igual a 26 kW, quando originalmente, operando na forma dual deveria chegar no máximo a 20 kW; 3. O sistema de lavagem mostrou-se eficiente, quando chegou a reduzir a temperatura do gás pobre, de 502 ° C, para 9 ° C; 4. De uma forma geral, menores ângulos de ignição, acarretarão maiores pressões de vácuo e maior produção de gás pobre. A diminuição desta pressão no decorrer do uso do gaseificador, indica que o filtro de manga, responsável pela retenção de particulados e do alcatrão oriundo do gás pobre, está obstruído ocasionando perda de potência do motor.

O propósito do trabalho de BEZERRA (2016), foi rever os ensaios de RUMÃO (2013) a partir da confecção de um mapa, onde se associou potências motrizes ao ângulo de avanço, fazendo-se uso do controlador comercial de ignição FT 400. Os resultados da aplicação desse mapa com relação aos de RUMÃO (2013), foram: 1. Garantiu-se menor consumo de gás pobre, e, logo de biomassa, para todas as potências geradas; 2. O sistema formado pelo gaseificador e grupo gerador operou com eficiências mais elevadas. Por sua vez, constatou, também, que há: “a necessidade de se melhorar o sistema de lavagem dos gases, pois, a sistemática atual não impede que frações do alcatrão venham a se depositar nas paredes do cilindro. Em consequência, deixando-se de operar o motor por cerca de três semanas, ocorre uma aderência extremamente vigorosa entre algumas peças do motor, como cilindro e pistão, quando ocorre a fixação do corpo da borboleta ao seu eixo, a retenção das válvulas, etc., tornando-se necessário que se faça todo o completo desmonte das peças para que o motor volte a operar. ”

A partir desses relatos fica perceptível os avanços que têm sido feitos no LI com relação à gerar eletricidade a partir da gaseificação da biomassa. Ao mesmo tempo, constata-se que todos os esforços envidados para se reduzir à níveis razoáveis o alcatrão que interfere nos motores alimentados pelo gás pobre foram, praticamente, inócuos.

Deve ser observado que os efeitos prejudiciais do alcatrão não é uma particularidade dos gaseificadores do LI. O Laboratório Nacional de Energias

Renováveis, dos Estados Unidos, há, praticamente, duas décadas já considerava o alcatrão como sendo um dos mais nefastos e problemáticos contaminantes que impediam a disseminação da comercialização dos gaseificadores, (MILNE *et al.* 1998). Em uma demonstração de que as dificuldades causadas pelo alcatrão persistem, é observado ao se ler PRANDO *et al.* (2016) que discutem, detalhadamente, a formação de alcatrão em um gaseificador topo aberto, co-corrente, semelhante ao usado neste trabalho. Sugerem ali, métodos de coletas de amostra, bem como formas de análises. Por sua vez, GÓMEZ-BAREA e LECKER (2010), são taxativos ao dizerem que aplicações do gás pobre, bem como do gás de síntese não são recomendáveis, quando o gás tem que ser resfriado, como, de fato, acontece quando o gás serve à alimentação de motores.

Considerando o exposto, busca-se neste trabalho, utilizando o gaseificador, originalmente de 4 kW térmicos, leito fixo, topo aberto, acoplado à um grupo gerador com motor Vanguard V-Twin de 2 cilindros em V, de quatro tempos, com potência nominal de 18 hp (13,44 kW), comparar as eficiências do sistema, quando o gaseificador é alimentado com carvão vegetal, com aquelas obtidas com biomassa residual, in natura (A substituição da biomassa in natura pelo carvão vegetal deverá servir, entre outros objetivos, a evitar os transtornos causados pelo alcatrão). Prever-se, também, a influência na diferença dos poderes caloríficos do gás pobre produzido nos dois casos, nos níveis de potências alcançados, na facilidade operacional, no consumo dos combustíveis, etc. Usar-se-á, ainda, o entendimento de que, ao se fazer uso de biomassa in natura, pode-se admitir que sua umidade seja até de 15 %. Tratando-se, todavia, do carvão vegetal, esse limite não deverá atingir 7 %. A razão é que, no caso do carvão, percentuais maiores do que aqueles assinalados, dificultam a continuidade do processo de queima na zona de oxidação, reduzindo o volume do gás em formação. Uma outra particularidade é que, no caso da biomassa residual DASAPPA *et al.* (2003), sugere que a massa específica da biomassa seja pelo menos igual a 300 kg/m³. Em se tratando do carvão vegetal, outro parâmetro tem mais significado, que é o teor de carbono fixo, ou seja, a quantidade de carbono, existente no carvão.

Buscando-se produzir um texto de fácil compreensão, além deste capítulo, a matéria será distribuída em mais cinco outros, a saber: Capítulo 2, Fundamentos da Gaseificação, onde serão dispostos todos os conceitos necessários ao entendimento do processo de conversão térmica, para a geração do gás pobre. O Capítulo 3 será dedicado às considerações dos elementos mais nocivos contidos no gás produzido, isto é, o alcatrão e as cinzas, e terá como título Contaminantes do Gás Pobre. Na sequência virão: o

Capítulo 4, Materiais e Métodos, Capítulo 5, Resultados e Discussões, para finalmente termos o Capítulo 6, Conclusões.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Gerais

O objetivo do presente trabalho é estudar os vários aspectos da produção de energia elétrica a partir da queima da biomassa in natura e da de carvão vegetal em um gaseificador de leito fixo, topo aberto, do tipo co-corrente, acoplado a um grupo gerador.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Utilizar a biomassa, in natura, residual, para que se possa ter valores comparativos, seja no que tange à eficiência de geração, produtividade, operacionalidade, etc.;
2. Reduzir ou a eliminar a produção do alcatrão pela queima da biomassa in natura;
3. Empregar madeira de rejeito e carvão produzido no próprio gaseificador durante os ensaios;
4. Comparar os resultados deste trabalho com trabalhos anteriores, realizados no mesmo gaseificador;
5. Utilizar, em um segundo momento, carvão vegetal com índice de carbono fixo superior a 56 %, e baixa quantidade de cinzas, para comparação com os resultados obtidos com a utilização de biomassa in natura no mesmo gaseificador.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DA GASEIFICAÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é abordado o processo de gaseificação, os produtos advindos, os tipos de gaseificadores, sendo ainda apresentadas algumas correlações intrinsicamente ligadas à natureza da biomassa, do gás pobre, ou ao sistema de gaseificação.

2.2. O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A gaseificação pode ser definida como a conversão termoquímica de um combustível sólido ou líquido em gases combustível, por uma adição sub-estequiométrica de um agente gaseificante, à alta temperatura (HEINDENREICH, 2016). A gaseificação é, também, atraente, pois seu produto é fácil de transportar, de armazenar, proporcionam melhoria na eficiência de combustão, maior controle na intensidade, na continuidade, na intermitência da chama, e na vazão. À mistura gasosa advinda desse processo, dar-se o nome de gás de baixo poder calorífico, gás pobre ou gás manufacturado. Considera-se, ainda, a gaseificação, como o resultado de uma queima parcial da biomassa, devido ao volume de oxigênio utilizado ser inferior ao necessário para sua queima completa. A matéria orgânica participante do processo de gaseificação pode ser transformada totalmente ou parcialmente, em gases, tendo estes a seguinte composição: nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), metano (CH_4) (dependendo das condições de operação), hidrocarbonetos leves (acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4) e etano (C_2H_6)), vapor de água, vapor de alcatrão, poeira (carbono e cinzas) (REED e DAS, 1998). Dentre os componentes citados, apenas o CO_2 , o H_2 , o CH_4 , os hidrocarbonetos em pequenas quantidades e o vapor de alcatrão são combustíveis, sendo

os outros componentes, inclusive o alcatrão solidificado, corrosivos (KAUPP e GOSS, 1984). O processo de gaseificação converte de 60% a 90 % da energia da biomassa em energia interna do gás (REED e DAS, 1998). Pode-se observar na Tabela 2.1 a composição volumétrica do gás proveniente da gaseificação da madeira e do carvão vegetal.

Tabela 2 1: Composição Volumétrica do Gás

Elemento	Madeira (Vol. %)	Carvão (Vol. %)
Nitrogênio (N ₂)	50 – 54	55 – 65
Monóxido de Carbono (CO)	17 - 22	28 – 32
Dióxido de Carbono (CO ₂)	9 – 15	1 – 3
Hidrogênio (H ₂)	12 – 20	4 – 10
Metano (CH ₄)	2 – 3	0 – 2

Fonte: FAO (1986)

2.3. ZONAS DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

De acordo com DEJTRAKULWONG (2014), o processo de gaseificação pode ser dividido em quatro processos que podem ocorrer numa mesma região, ou em regiões diferentes do reator do gaseificador. Essas regiões são denominadas de zonas e são descritas a seguir:

1. Zona de secagem: localiza-se na parte superior do reator, e é a primeira etapa do processo, acontecendo durante o aquecimento do combustível. É a etapa mais lenta e significativa para materiais mais úmidos.
2. A zona de desvolatilização ou decomposição química é a etapa da pirólise, iniciando-se entre 280 °C e 450 °C e ocorre sem a presença do agente oxidante. Há nessa etapa a decomposição dos carboidratos (hemicelulose, celulose e lignina), a produção de gases não condensáveis (CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂), alcatrão e ácidos leves. As características em termos de quantidade e qualidade dos produtos provenientes da pirólise dependem das condições de operação do processo. Sendo assim, a temperatura, a granulometria do material, a velocidade ou razão de aquecimento, o

tempo de residência e as características inerentes à biomassa, são fatores variáveis importantes no desempenho do processo (CORTEZ *et al.*, 2008).

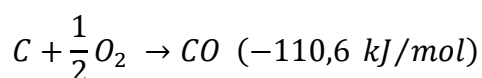
3. As demais etapas têm seu fornecimento de calor através do processo de combustão, ou seja, da reação do material com o oxigênio. A combustão pode ocorrer no próprio reator, em uma câmara de combustão ou em um gerador de vapor. O que se queima pode ser: parte do próprio gás de síntese, outros produtos da gaseificação (líquidos e sólidos) e até o combustível primário (BHAVANAM, 2011).
4. É na zona de redução que ocorre a gaseificação em si, devido a reação parcial do carbono e dos hidrocarbonetos com o oxigênio. Os combustíveis principais gerados nessa zona são o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H₂). Esse processo ocorre entre as temperaturas de 400 °C e 900 °C (BASU, 2010).

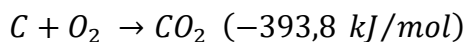
2.4.REAÇÕES DE GASEIFICAÇÃO

De acordo com SÁNCHEZ (2010), podem ocorrer durante os processos de gaseificação, principalmente, reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas (redução), envolvendo fases sólidas e gasosas, conforme descritas a seguir:

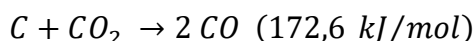
2.4.1. Reações Heterogêneas Gás – Sólido:

A oxidação do carbono: é necessária para a obtenção da energia térmica requerida pelo processo endotérmico, para manter a temperatura de operação nos valores requeridos. A oxidação é realizada em condições de falta de oxigênio, em respeito a relação estequiométrica, para oxidar apenas parte do combustível. O principal produto dessa reação é a energia térmica necessária para todo o processo de gaseificação (MOLINO, 2015).

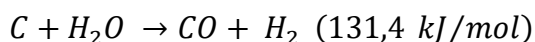




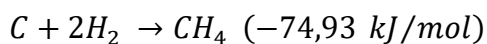
A reação de Boudouard: é uma das mais importantes reações, pois converte o dióxido carbono produzido no processo de combustão em monóxido de carbono (MORF, 2001).



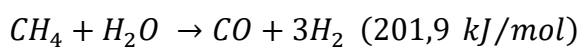
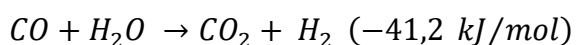
A reação de gás d'água: necessita de uma um suprimento de calor, sendo uma reação entre hidrocarbonetos e vapor, levando assim à formação de hidrogênio. Em reformadores de vapor alotérmicos, o qual recebe calor de fontes externas, essas reações serão predominantes (NEUBAUER, 2013).



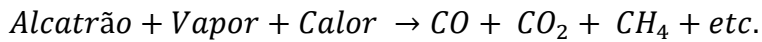
Formação de metano: é uma reação exotérmica que não consome oxigênio, aumentando assim a eficiência do processo de gaseificação e o calor final contido no gás produzido (CHADEESINGH, 2011)



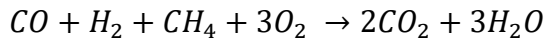
2.4.2. Reações Homogêneas (Fase Gasosa):



2.4.3. O Craqueamento do Alcatrão:



2.4.4. Oxidação por Parte dos Produtos da Pirólise:



2.5. O GASEIFICADOR

Como se sabe, o gaseificador é essencialmente um reator onde várias reações químicas e físicas ocorrem. Conforme visto no item 2.3 deste trabalho, a biomassa dentro do reator perde umidade, aquece, sofre pirólise, oxida e se reduz, transformando-se em uma mistura de combustível gasosa.

2.5.1. Classificação dos Gaseificadores:

SÁNCHEZ *et al.* (2002) classifica os gases dos gaseificadores da seguinte forma:

Pelo poder calorífico produzido:

- Gás de baixo poder calorífico: até 5 MJ/Nm³
- Gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm³
- Gás de alto poder calorífico: 10 a 40 MJ/Nm³

E os gaseificadores pelo tipo de agente de gaseificação:

- Ar
- Vapor d'água
- Oxigênio

- Hidrogênio (hidrogaseificação)

Ou pela pressão de trabalho:

- Baixa pressão (atmosférica)
- Pressurizados (até 6 MPa)

Também faz considerações quanto ao tipo e forma da biomassa:

- Resíduos agrícolas
- Resíduos industriais
- Resíduos sólidos urbanos (lixo)
- Biomassa In Natura
- Biomassa peletizada
- Biomassa pulverizada

Porém, segundo GODINHO (2006), a classificação mais utilizada é feita pela direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gasificação, sendo esta classificação descrita no item 2.5.2 a seguir.

2.5.2. Tipos de Gaseificadores:

- Gaseificadores contracorrentes: é o tipo mais simples de gaseificador. A entrada de ar se encontra na base do gaseificador, e os gases têm um fluxo ascendente na direção contrária do movimento da biomassa. A alimentação da biomassa se dá pela parte superior do gaseificador, que ao ser consumida na zona de combustão, desloca-se para baixo devido a ação da gravidade. Este tipo de gaseificador é exemplificado na Figura 2.1.

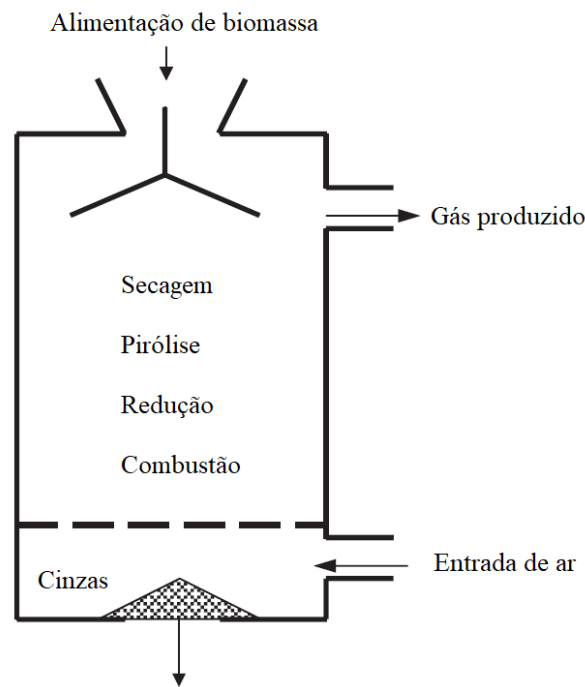


Figura 2.1: Esquema de um gaseificador contracorrente

Fonte: Adaptado de BASU (2010)

A eficiência térmica desses gaseificadores é alta, devido ao fato de que os gases quentes provenientes da zona de combustão pré-aquecerem a carga de biomassa. Em contrapartida, o gás produzido é extremamente impuro. Como o fluxo dos gases é direcionado para a parte superior do gaseificador, o alcatrão e outros produtos da pirólise não são craqueados na zona de combustão, e isso pode acarretar em incrustações nas tubulações do gaseificador. Apesar do fato de que este tipo de gaseificador poder ser utilizado com uma larga variedade de combustíveis, resíduos agrícolas e municipais por exemplo, o gás produzido pode conter grandes quantidades de particulados, alcatrão e voláteis. Assim, o seu uso em motores de combustão interna é desaconselhado, sendo, portanto, mais utilizado em queimadores para aquecimento direto. A temperatura de saída dos gases produzidos é em torno de 400 °C.

- Gaseificadores co-correntes: o gás produzido neste tipo de gaseificador apresenta baixos níveis de alcatrão. Por esse motivo, é o gaseificador mais utilizado para geração de potência mecânica via motores de combustão interna. A Figura 2.2 mostra as zonas

deste tipo de gaseificador. Nota-se que as zonas de redução e de combustão estão posicionadas de forma contrária à do gaseificador contracorrente. A alimentação da biomassa é feita pelo topo do gaseificador, e o ar introduzido tem o mesmo sentido (descendente) do escoamento do gás produzido.

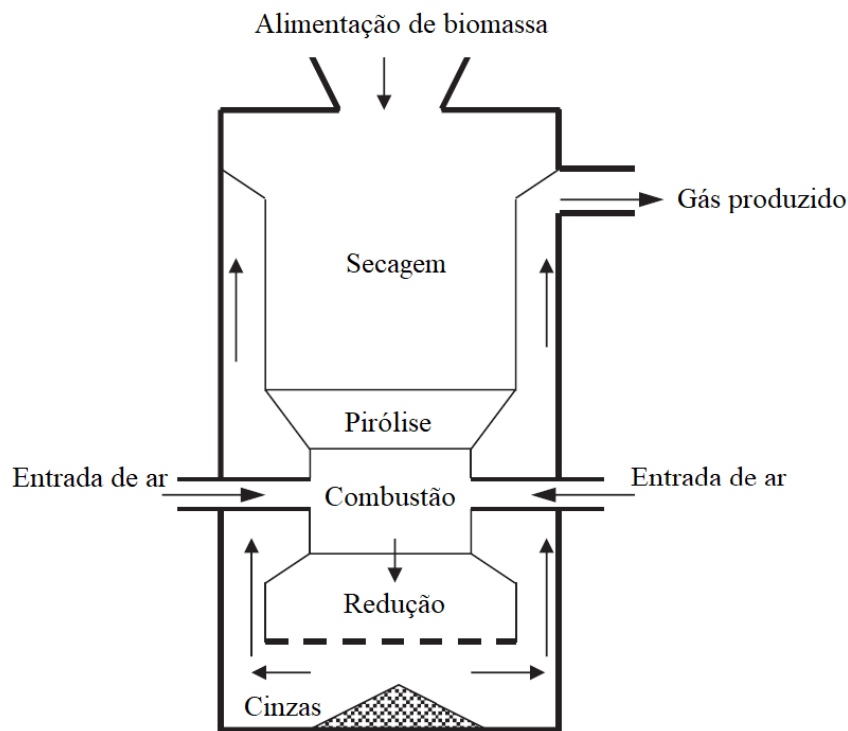


Figura 2.2: Esquema de um gaseificador co-corrente

Fonte: Adaptado de McKENDRY (2002)

A principal característica de projeto deste tipo de gaseificador é fazer com que o alcatrão e os voláteis produzidos na zona de pirólise, sejam conduzidos à zona de combustão e de redução. Assim, em condições de operação controladas, ocorre o craqueamento do alcatrão pela alta temperatura, cerca de 1000 °C. Há então a degradação térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão, as quais são transformadas em compostos de menor peso molecular como o CO, CO₂, CH₄, e outros gases. Este processo elimina até 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível (HENRIQUES, 2009). A zona de combustão deve ser bem projetada, a fim de não haver regiões com baixa temperatura, para que não ocorra a passagem de voláteis sem serem craqueados. O diâmetro interno

dessa zona é reduzido, criando uma espécie de garganta, geralmente feita de material cerâmico. As entradas de ar estão localizadas nessa garganta, e são distribuídas adequadamente para que haja uma uniformidade do ar e uma temperatura adequada em toda a região, permitindo assim a quebra do alcatrão. Devido ao fato do fluxo de gás ter o mesmo sentido de direção das cinzas, este possui a tendência de ter uma grande quantidade de cinzas e fuligem, o que não acontece nos gaseificadores contracorrentes, pois as partículas são filtradas pela própria biomassa. Os gases não trocam calor diretamente com as zonas de pirólise e de secagem, fazendo assim com que a temperatura fique em torno de 700 °C (RUMÃO, 2013).

- O gaseificador de topo aberto é uma variante desse tipo de gaseificador. A entrada de ar se dá pela parte superior a fim de evitar altas temperaturas e consequentemente a fusão das cinzas (MUKUNDA *et al.*, 1993).
- Gaseificadores de fluxo cruzado: neste tipo de gaseificador o gás é retirado lateralmente, na mesma altura do leito onde é injetado o ar. O injetor é normalmente arranjado de forma a distribuir o ar no centro da zona de combustão, como pode ser visto na Figura 2.3. O gás produzido por este gaseificador tem características intermediárias entre o produzido por gaseificadores contracorrentes e gaseificadores co-correntes (SÁNCHEZ, 2010).

Devido ao fato de o fornecimento de ar ser consideravelmente maior do que em outros tipos de gaseificadores, cria-se então uma zona de combustão de temperatura extremamente alta, com liberação muito rápida dos gases. Ambas as zonas de combustão e redução, estão concentradas em um pequeno volume no centro do gaseificador, fazendo com que o uso de materiais refratários seja dispensado para delimitar a zona de combustão (CORTEZ *et al.*, 2008).

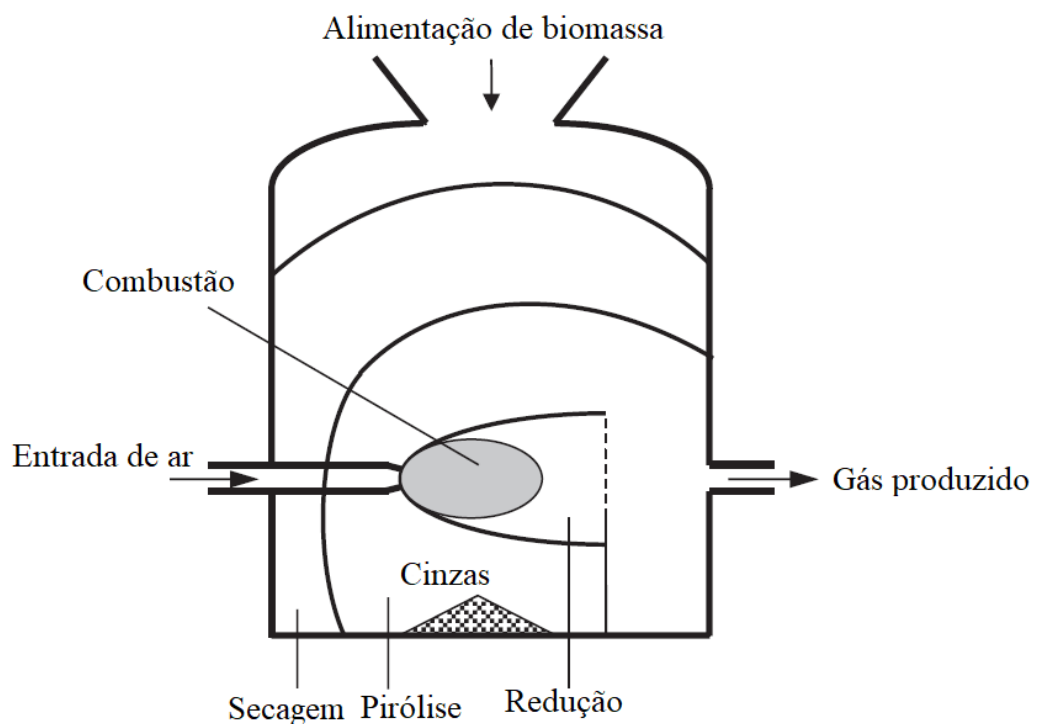


Figura 2.3: Esquema de um gaseificador de leito cruzado

Fonte: Adaptado de BASU (2010)

As principais vantagens deste tipo de gaseificador são: sua rápida resposta às variações de carga, simplicidade de construção e peso reduzido. Sua principal desvantagem é a alta sensibilidade na composição e umidade do combustível, e que para fins práticos, exigem a utilização de carvão vegetal limpo e seco (RUMÃO, 2013).

- Gaseificadores de leito fluidizado: neste tipo de gaseificador, as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia comum, sílica, alumina, etc.) suportado por uma placa distribuidora e fluidizado por um fluxo constante de ar. Cria-se assim melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura no leito de reações (leito isotérmico). Assim, a maioria dos voláteis está em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação completa e limpa (BEZERRA, 2016). O esquema do gaseificador de leito fluidizado pode ser visto na Figura 2.4.

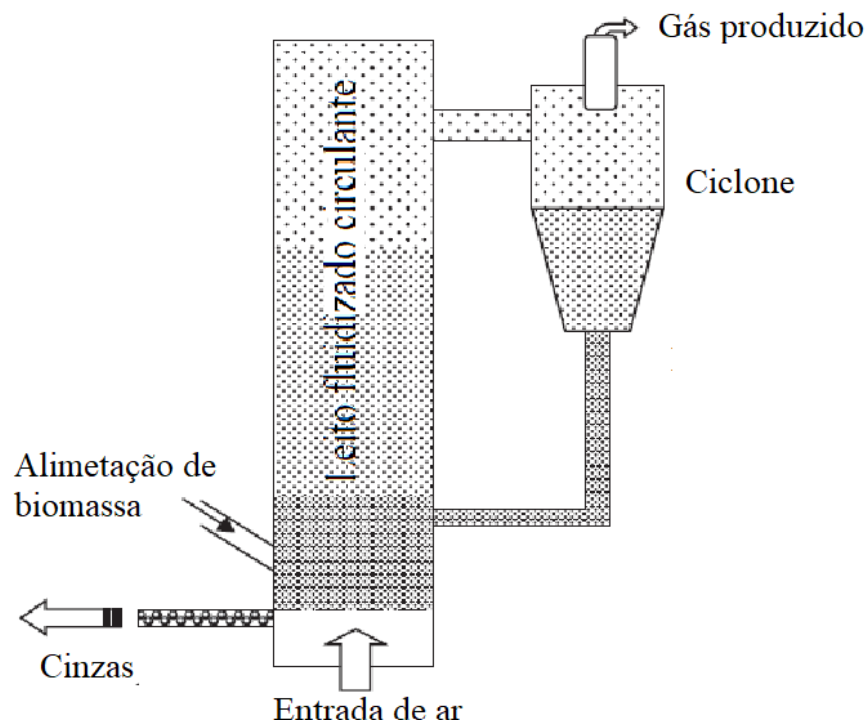


Figura 2.4: Esquema de um gaseificador de leito fluidizado

Fonte: Adaptado de NEUBAUER (2013)

Neste tipo de gaseificador, o agente gaseificante deve ser previamente pressurizado. É necessário então, fazer com que esse agente atravessasse a placa distribuidora no sentido ascendente, e em quantidade suficiente, para que a força de arrasto do escoamento do fluido seja maior do que o peso dos sólidos do leito. Desta forma, há a queima parcial do combustível. Não podem ser observadas as divisões das zonas de pirólise, oxidação e redução nesse tipo de gaseificador, já que todos os processos acontecem simultaneamente, em todo o volume do leito. A operação do leito fluidizado se dá em temperaturas na faixa de 700 °C a 900 °C. Pode-se identificar duas fases na seção transversal do leito: a emulsão, a qual contém as partículas sólidas com gás. Nessa fase, o fluxo é limitado pela quantidade de partículas sólidas que irão permitir a fluidização incipiente (velocidade mínima de fluidização). A outra fase observada é a fase de bolhas. Segundo RUMÃO (2013), o leito precisa ser aquecido inicialmente por um combustível auxiliar (GLP, carvão vegetal, etc.). E a biomassa só será introduzida quando a temperatura do reator estiver suficientemente alta, para assim ter início o processo de gaseificação. Pela razão da biomassa possuir uma alta reatividade, o gaseificador de leito

fluidizado pode operar a temperaturas relativamente mais baixas devido ao fato do alcatrão produzido na pirólise não ser prontamente gaseificado, estando presente em maior quantidade no gás produzido. A presença do alcatrão eleva o poder calorífico do gás e proporciona uma chama mais luminosa e com maior transferência de calor por radiação, mas também pode incrustar-se nas tubulações e impedir o uso do gaseificador em motores de combustão interna. O fácil controle da temperatura por meio da variação do fluxo de ar e da alimentação da biomassa é a principal vantagem desse tipo de gaseificador, pois este não apresenta resposta automática ao consumo de gás produzido, sendo então necessário essa variação do fluxo de ar e da alimentação da biomassa. Se o sistema alimentado pelo gás necessitar de uma variação do consumo, a existência de um controlador para o fluxo de ar e alimentação da biomassa é obrigatório (USHIMA, 1999).

- Gaseificadores de fluxo arrastado: operam em pressões elevadas de aproximadamente 24 atmosferas, tendo o seu uso mais comum o de tratamento de carvão. Porém, podem também ser alimentados com resíduos de refinarias, resíduos plástico misto e resíduos sólidos urbanos previamente triturados (MARANO, 2003). Partículas finas de combustível são adicionadas à água, ver Figura 2.5, para assim produzir uma pasta com concentração de sólidos de no mínimo 60 %. A água servirá como meio de transporte da biomassa, regulador de temperatura e de reagente, promovendo a liberação de hidrogênio (MARANO, 2003). A temperatura neste tipo de gaseificador variam entre 1200 °C e 1500 °C, garantindo assim uma rápida conversão de resíduos em gás de síntese de alta qualidade. As cinzas são fundidas nas paredes do gaseificador, sendo descarregadas como escória fundida na câmara de arrefecimento, e os metais presentes nas cinzas são encapsulados na escória já arrefecida (ARENA, 2011).

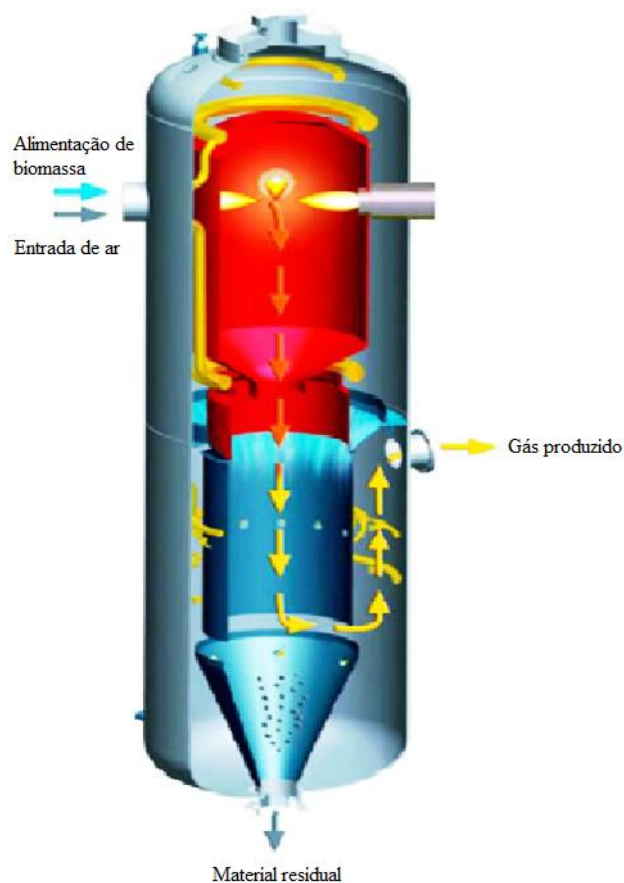


Figura 2. 5: Esquema de um gaseificador de fluxo arrastado.

Fonte: Adaptado de MOLINO et al. (2015)

- Gaseificador de forno rotativo: neste tipo de gaseificador, os sólidos são movidos para dentro e para fora de uma zona de reação à alta temperatura, e durante esse movimento há a mistura dos sólidos envolvidos. Sua composição consiste em um invólucro cilíndrico de aço revestido com material refratário resistente à corrosão, ver Figura 2.6, evitando-se assim, o superaquecimento do metal. Tem a extremidade da carga ligeiramente inclinada, em torno de 0,03 m/m, e a velocidade em que os sólidos giram em seu interior é controlada em cerca de 1,5 rpm (BIO ENERGY, 2009).

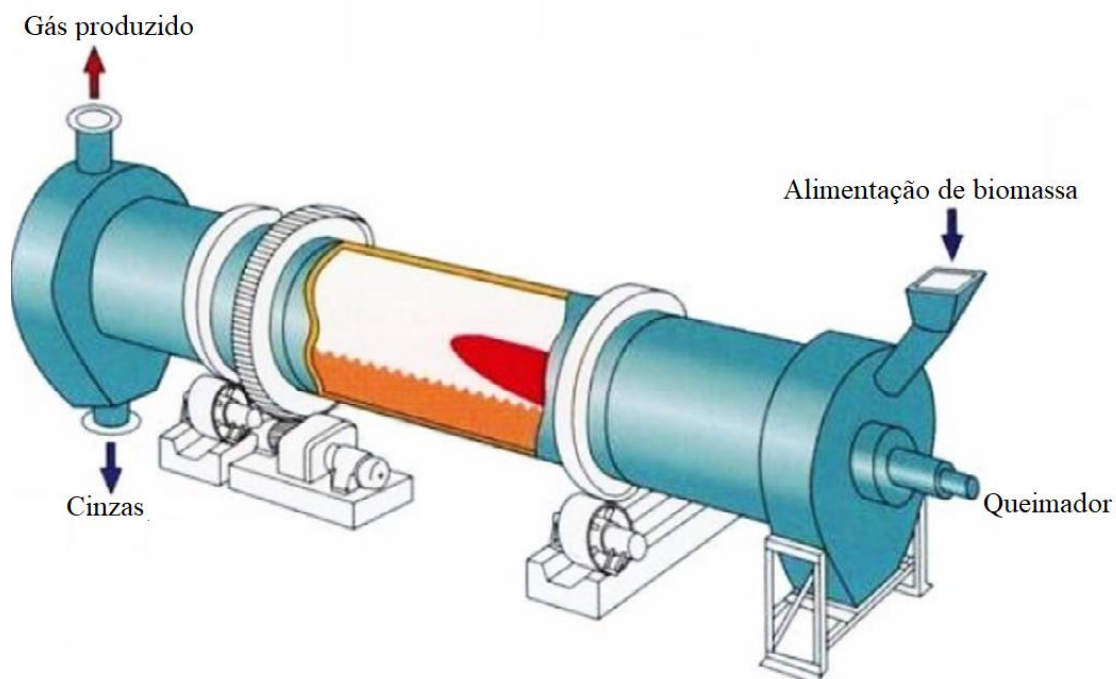


Figura 2. 6: Esquema de um gaseificador forno rotativo

Fonte: Adaptado de MOLINO et al. (2015)

- Gaseificação por plasma: tem como principal função a decomposição e a destruição de resíduos perigosos, sendo uma tecnologia considerada recente. É utilizada, por enquanto, na Índia, Japão e Canadá. A gaseificação de plasma é uma maneira segura de conversão destes resíduos perigosos, em uma outra forma de energia (GTC, 2014). Um esquema deste tipo de gaseificador pode ser visto na Figura 2.7.

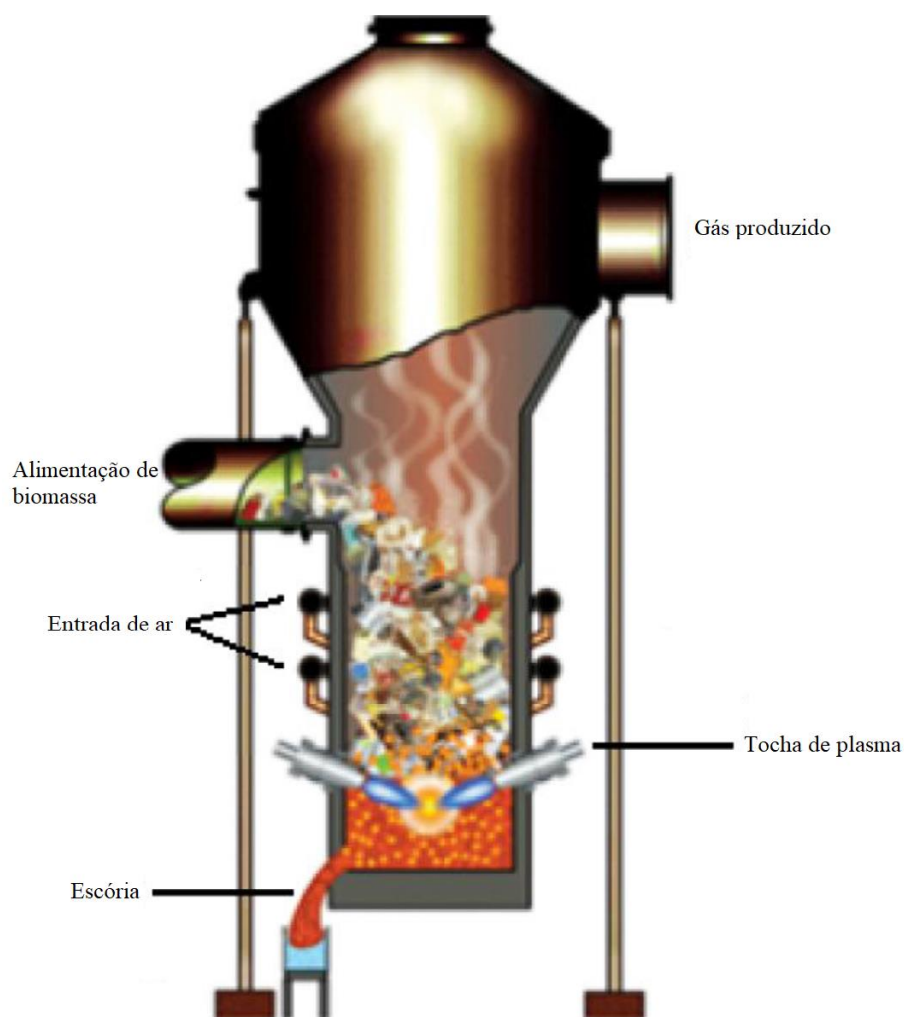


Figura 2. 7: Esquema de um gaseificador de plasma.

Fonte: Adaptado de MOLINO et al. (2015)

2.6. CORRELAÇÕES E CONCEITOS FÍSICO – MATEMÁTICOS

2.6.1. Poder Calorífico Inferior do Gás Pobre Produzido

Para determinar o PCI, RUMÃO (2013) deduziu uma equação, apresentada neste trabalho como a Equação (2.1), partindo dos dados experimentais de YOSHIKAWA (2006) e da curva de GARCIA (2002), ambos funcionais do monóxido de carbono proveniente da gaseificação da madeira.

$$PCI_{Gás} = -0,004738 \cdot (\%CO)^2 + 0,3149 \cdot (\%CO) - 0,1057 \quad (2.1)$$

Onde %CO é a quantidade, em níveis percentuais, de monóxido de carbono no gás.

2.6.2. Poder Calorífico Inferior da Biomassa (Madeira)

A partir da Eq. (2.2), GARCIA (2002), é possível calcular o poder calorífico inferior da biomassa, (madeira), em kcal / kg.

$$PCI_{Mad} = 4756 - 53,418 \cdot (\%UM) \quad (2.2)$$

Onde %UM é o valor, em níveis percentuais, da umidade existente na biomassa.

2.6.3. Poder Calorífico Inferior do Gás, Determinado a Partir de sua Decomposição

ITEGAN (2011), menciona que o poder calorífico inferior do gás produzido no gaseificador, pode ser calculado também a partir da fórmula empírica de Dulong, Equação (2.3), levando em consideração o percentual de cada composto presente no gás.

$$PCI_{Gás/comp.} = 3050 \cdot (\%CO) + 2580 \cdot (\%H_2) + 8500 \cdot (\%CH_4) + 13500 \cdot (\%C_2H_2) + 14050 \cdot (\%C_2H_4) \quad (2.3)$$

Onde: %CO é o teor, em percentual, de monóxido de carbono, %H₂ é o teor, em percentual, de hidrogênio no gás, %CH₄ é o teor, em percentual, de metano no gás, %C₂H₂ é o teor, em percentual, de etino no gás, e %C₂H₄ é o teor, em percentual, de eteno no gás.

2.6.4. Consumo de Biomassa

O consumo da biomassa, C_{Bio} (kg/h), no gaseificador pode ser calculado pela Equação (2.4).

$$C_{Bio} = \frac{M_{Bio}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Onde:

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

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

2.6.5. Eficiência do Gaseificador/Grupo Gerador

A eficiência geral do sistema gaseificador/gerador, η_s (%), é definida pela Eq. (2.5).

$$\eta_s = \frac{P_e}{\dot{m}_{biomassa} \cdot PCI_{biomassa}} \cdot 100(\%) \quad (2.5)$$

Onde: P_e é a potência elétrica útil (W).

2.7. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DO SISTEMA

Aplicando-se um volume de controle sobre o sistema gaseificador-grupo motor/gerador, visto na Figura 2.8, e aplicando a Equação da Continuidade e a Primeira Lei da Termodinâmica, considerando o sistema em regime permanente e desprezando as variações de energia cinética e potencial, obtêm-se:

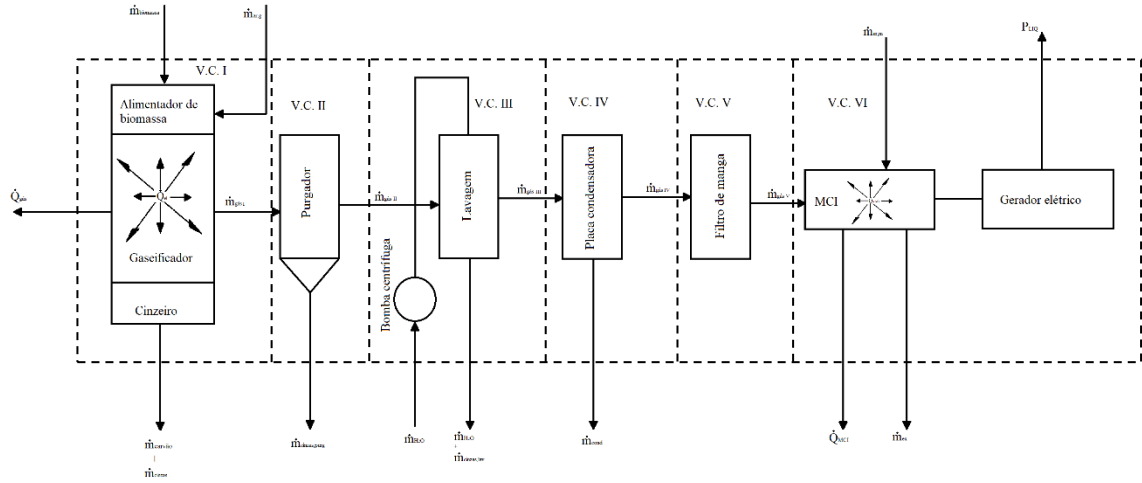


Figura 2 8. Volumes de controle para os balanços de massa e energia

Equação da continuidade:

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = 0 \rightarrow \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0$$

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2.6)$$

Sendo assim, para o V.C. I tem-se:

$$\dot{m}_{bio} + \dot{m}_{ar,g} = \dot{m}_{gásI} + \dot{m}_{cinzas} + \dot{m}_{carvão} \quad (2.7)$$

Quando se alimenta o gaseificador com carvão vegetal, a Equação (2.7) passa a ter a seguinte forma:

$$\dot{m}_{bio} + \dot{m}_{ar,g} = \dot{m}_{gásI} + \dot{m}_{cinzas} \quad (2.8)$$

Onde:

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

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

$\dot{m}_{gásI}$ é o fluxo de gás produzido pelo gaseificador (kg/h)

$\dot{m}_{carvão}$ é o fluxo de carvão produzido no gaseificador (kg/h);

$\dot{m}_{cinzas}$ é o fluxo de cinzas decantadas no cinzeiro do gaseificador (kg/h);

Para o V.C. II, tem-se:

$$\dot{m}_{gásI} = \dot{m}_{cinzas,purg} + \dot{m}_{gásII} \quad (2.9)$$

Onde:

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

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

Para o V.C. III:

$$\dot{m}_{gásII} + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{cinzas,lav} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{gásIII} \quad (2.10)$$

A partir da Equação (2.8), os fluxos de água que entram e saem do sistema de lavagem podem ser cancelados. Essa mesma água recircula no sistema de lavagem, retirando impurezas como particulados e o líquido pirolenhoso (alcatrão). Essas impurezas são acumuladas nos reservatórios de água. Sendo assim, a Equação (2.8) fica:

$$\dot{m}_{gásII} = \dot{m}_{cinzas,lav} + \dot{m}_{gásIII} \quad (2.11)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásII}$ é o fluxo de gás que entra no V.C. II (kg/h);

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

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

Para o V.C. IV

$$\dot{m}_{gásIV} = \dot{m}_{gásIII} + \dot{m}_{cond} \quad (2.12)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásIII}$ é o fluxo de gás que entra no V.C. IV (kg/h);

$\dot{m}_{cond}$ é o fluxo de condensados produzido na placa condensadora (kg/h);

$\dot{m}_{gásIV}$ é o fluxo de gás que saí do V.C. IV (kg/h);

Para o V.C. V:

$$\dot{m}_{gásV} = \dot{m}_{gásIV} + \dot{m}_{part} \quad (2.13)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásIV}$ é o fluxo de gás que entra no V.C. V (kg/h);

$\dot{m}_{part}$ é o fluxo de particulados capturados pelo filtro de manga (kg/h);

$\dot{m}_{gásV}$ é o fluxo de gás que saí do V.C. V (kg/h);

O fluxo de particulados capturados pelo filtro de manga não atravessa a fronteira do volume de controle. Esses particulados são retidos por um filtro feito de tecido.

Para o V.C. VI:

$$\dot{m}_{gásV} = \dot{m}_{ar,m} + \dot{m}_{ex} \quad (2.14)$$

Onde:

$\dot{m}_{gásV}$ é o fluxo de gás que entra no V.C. IV (kg/h);

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

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

Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\dot{Q}_{GÁS} + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} \mathbf{V}_e^2 + g \mathbf{Z}_e \right) = \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} \mathbf{V}_s^2 + g \mathbf{Z}_s \right) + \dot{W}_{V.C.} \quad (2.15)$$

Para o V.C. I:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biomassa} \times PCI_{biomassa} = \dot{Q}_{GÁS} + \dot{Q}_{ei} + \dot{m}_{carvão} \times PCI_{carvão} + \dot{m}_{cinzas} \times \\ PCI_{cinzas} + \dot{m}_{gásI} \times PCI_{gásI} + P_B \end{aligned} \quad (2.16)$$

Onde:

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

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

$\dot{Q}_{ei}$ é a quantidade de calor devido a energia interna da biomassa (kW);

$PCI_{carvão}$ 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);

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

Quando o gaseificador é alimentado com carvão vegetal, a Equação (2.16) tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biomassa} \times PCI_{biomassa} = \dot{Q}_{GÁS} + \dot{Q}_{ei} + \dot{m}_{cinzas} \times PCI_{cinzas} + \dot{m}_{gásI} \times \\ PCI_{gásI} + P_B \end{aligned} \quad (2.17)$$

Para o V.C. II:

$$\dot{m}_{gásI} \times PCI_{gásI} = \dot{m}_{cinzas,purg} \times PCI_{cinzas} + \dot{m}_{part} \times PCI_{part,purg} + \dot{m}_{gásII} \times PCI_{gásII} + P_B \quad (2.18)$$

Onde:

$PCI_{gásI}$ é o PCI do gás que entra no V.C. II (kJ/kg);

$PCI_{part,purg}$ é o PCI dos particulados capturados no purgador (kJ/kg);

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

Para o V.C. III:

$$\dot{m}_{gásII} \times PCI_{gásII} + P_B = \dot{m}_{cinzas,lav} \times PCI_{cinzas} + \dot{m}_{gásIII} \times PCI_{gásIII} \quad (2.19)$$

Onde:

$PCI_{gásII}$ é o PCI do gás que entra no V.C. III (kJ/kg);

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

P_B é a potência da bomba centrífuga do sistema de lavagem (kW);

Para o V.C. IV:

$$\dot{m}_{gásIII} \times PCI_{gásIII} = \dot{m}_{cond} \times PCI_{cond} + \dot{m}_{gásIV} \times PCI_{gásIV} \quad (2.20)$$

Onde:

$PCI_{gásIII}$ é o PCI do gás que entra no V.C. IV (kJ/kg);

PCI_{cond} é o PCI dos produtos de condensação (kJ/kg);

$PCI_{gásIV}$ é o PCI do gás que sai do V.C. IV (kJ/kg).

Para o V.C. V:

$$\dot{m}_{gásIV} \times PCI_{gásIV} = \dot{m}_{part} \times PCI_{part,fdm} + \dot{m}_{gásV} \times PCI_{gásV} \quad (2.21)$$

Onde:

$PCI_{gásIV}$ é o PCI do gás que entra no V.C. V (kJ/kg);

$PCI_{part,fdm}$ é o PCI dos particulados capturados no filtro de manga (kJ/kg);

$PCI_{gásV}$ é o PCI do gás que sai do V.C. V (kJ/kg).

Para o V.C. IV:

$$\dot{m}_{gásV} \times PCI_{gásV} = \dot{Q}_{MCI} + \dot{Q}_{eiMCI} + \dot{m}_{exaustão} \times PCI_{exaustão} + P_{LIQ} \quad (2.22)$$

$$P_{TOT} = P_{eixo} - p_{atrito} \quad (2.23)$$

$$P_{LIQ} = P_{TOT} - |P_B| \quad (2.24)$$

Onde:

$PCI_{gásV}$ é o PCI do gás que entra no V.C. VI (kJ/kg);

$\dot{Q}_{MCI}$ é a quantidade de calor perdida no motor de combustão interna para a atmosfera (kW);

$\dot{Q}_{eiMCI}$ é a quantidade de calor devido a energia interna da mistura ar-combustível (kW);

P_{eixo} é a potência do eixo que acopla o motor ao gerador elétrico (kW);

p_{atrito} são as perdas por atrito no interior do gerador elétrico (kW);

$PCI_{exaustão}$ é o PCI dos gases da exaustão do motor de combustão interna (kJ/kg);

P_{LIQ} é a energia líquida gerada pelo grupo gerador (kW);

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

CAPÍTULO III

CONTAMINANTES DO GÁS POBRE

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo se discorrerá sobre os contaminantes do gás produzido nos gaseificadores, tais como o alcatrão e as cinzas. Esses contaminantes contribuem para a perda de eficiência devido ao seu caráter corrosivo e ao bloqueio do fluxo de gás nas tubulações.

3.2. O ALCATRÃO E A SUA REMOÇÃO

A formação do alcatrão acontece principalmente na zona de pirólise do gaseificador. O alcatrão pode ser definido como uma mistura de hidrocarbonetos condensáveis incluindo compostos de anel aromático simples e até compostos com cinco anéis aromáticos, hidrocarbonetos contendo oxigênio (componentes fenólicos por exemplo), e HAPs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos). Segundo LI *et al.* (2009), os componentes do alcatrão podem ser classificados em cinco grupos, dependendo do peso molecular de cada, ou seja:

- Aromáticos leves contendo um único anel;
- Compostos HAP leves contendo de dois a três anéis;
- Compostos HAP pesados contendo de quatro a sete anéis;
- Hidrocarbonetos aromáticos heterocíclicos;
- Alcatrão pesado indetectável em uma cromatografia de gás.

A quantidade e a natureza do alcatrão dependem fortemente das propriedades da matéria-prima, tipo de gaseificador, agente gaseificador e condições de operação (McKENDRY, 2002b).

PRANDO *et al.* (2016) analisa a formação do alcatrão através da temperatura. Para altas temperaturas de operação, a formação de alcatrão diminui, embora cause uma aromatização dos componentes envolvidos. Na faixa de 400 °C há a formação de oxigenados, éteres fenólicos a 500 °C, fenólicos a 600 °C, éteres heterocíclicos a 700 °C, HAP leves a 800 °C e HAP pesados a 900 °C.

PATHAK *et al.* (2007) elaborou uma tabela, ver Tabela 3.1, onde mostra que o teor de alcatrão no gás produzido em função do tipo do gaseificador.

Tabela 3. 1: Teor de Alcatrão no Gás Produzido em Diferentes Tipos de Gaseificadores

	Gaseificador co-corrente de leito fixo	Gaseificador contracorrente de leito fixo	Gaseificador LFC
Faixa de conteúdo do alcatrão (g/Nm ³)	0,01 – 6	10 – 150	2 – 30
Teor médio do alcatrão (g/Nm ³)	0,5	50	8

Fonte: PATHANK *et al.* (2007)

3.2.1. Técnicas de Remoção do Alcatrão

Devido aos efeitos indesejáveis já mencionados anteriormente, a busca pela diminuição e até pela total eliminação do alcatrão nos processos de gaseificação tem sido objeto de inúmeros estudos. Basicamente existem nos dias atuais dois tipos de tecnologias de remoção do alcatrão; a primária e a secundária. As tecnologias secundárias se mostram mais efetivas, porém as tecnologias primárias permitem um controle local da formação do alcatrão, tendo assim uma maior atenção sobre a secundária.

3.2.2. Tecnologias Primárias

O principal objetivo das tecnologias primárias é a redução ou eliminação do alcatrão produzido no processo de gaseificação. As tecnologias primárias podem ser divididas em métodos diretos e métodos indiretos. Os métodos diretos influem diretamente no projeto do gaseificador propondo modificações e otimizações dos parâmetros operacionais, como o fluxo de alimentação de biomassa, temperatura de gaseificação, pressão, razão entre vapor e biomassa, etc., para que seja evitada a formação do alcatrão. Os métodos indiretos tratam da adição de catalisadores no leito dos gaseificadores, fazendo assim com que haja a quebra do alcatrão em hidrocarbonetos leves e outros gases combustíveis como o H_2 e o CO (MILNE *et al.*, 1998)

3.2.3. Tecnologias Secundárias

As tecnologias secundárias visam a retirada do alcatrão em um tratamento pós-gaseificação. Assim como as tecnologias primárias, as tecnologias secundárias podem ser divididas em dois métodos: o físico e o químico.

O método físico trata o alcatrão como partículas de poeira ou névoa do gás produzido. O alcatrão precisa então ser condensado antes da sua separação do gás. A remoção física pode ser realizada através da utilização de ciclones, filtros de barreira, banho de precipitados eletrostáticos (ESPs) e de um banho no purificador de gás. O tipo de remoção física a ser utilizado dependerá da quantidade de particulados e de alcatrão e do tamanho das partículas. Os ciclones não possuem uma boa eficiência para a retirada de gotículas de alcatrão. Os filtros de barreira são, basicamente, um material poroso que pode capturar uma certa quantidade de alcatrão, quando o gás atravessa o filtro. Em alguns casos, catalisadores podem ser integrados ao filtro como leito fixo, para realizar a retirada, simultaneamente, dos particulados e do alcatrão. Os filtros apresentam o problema de interrupção da passagem do gás, quando há uma grande concentração de alcatrão e de particulados. Os banhos eletrolíticos apresentam uma alta eficiência, maior do que 90%, para partículas de até $0,5\ \mu m$, mas possuem um alto custo de instalação e de operação. Os banhos no purificador de gás, possuem uma eficiência maior do que 90%, mas sua eficiência diminui drasticamente para partículas menores do que $1\ \mu m$. Seu custo de instalação é baixo quando comparado ao banho eletrolítico, mas devido ao grande uso

de ventiladores e spray líquido, seu custo de operação é relativamente alto (ZHANG *et al.*, 2012).

O método químico utilizado é o de craqueamento, que é mais vantajoso em termos de recuperar a energia contida no alcatrão, convertendo-o em gases como o H₂ ou o CO pela utilização de altas temperaturas, em torno de 1200 °C, ou por reações catalíticas, com temperaturas em torno de 800 °C. Esse método é utilizado comercialmente em várias plantas e tem demonstrado ser um dos mais eficientes. Catalisadores não metálicos como a dolomita, zeólita e calcita, e catalisadores metálicos como o Ni, Ni/Mo, Ni/Co, Mo, NiO, Pt e Ru vêm sendo aplicados aos processos de gaseificação (ZHANG *et al.*, 2012).

Como já citado anteriormente, a presença do alcatrão é prejudicial aos gaseificadores e em especial aos motores de combustão interna. O alcatrão incrusta nas paredes das tubulações dos gaseificadores e nos filtros, causando assim obstruções no fluxo normal do gás produzido. Nos motores de combustão interna, o alcatrão pode se depositar nos bicos injetores, causando também a obstrução dos mesmos. Além do mais, sua deposição nas válvulas, tanto de admissão como de exaustão pode vir a causar o travamento das mesmas, e sérios danos aos motores.

Neste trabalho foi utilizado um filtro de barreira (filtro de manga), confeccionado em feltro, convencionalmente utilizado em gaseificadores. Embora tal filtro seja utilizado para impedir que os particulados e o alcatrão cheguem ao motor, a experiência tem demonstrado que no caso do líquido pirolenhoso, a atuação do filtro fica a desejar.

3.3. AS CINZAS

NOGUEIRA (2012) diz que as cinzas são um dos subprodutos da gaseificação. São formadas por compostos inorgânicos e seus principais componentes são a sílica, o alumínio, o ferro e o cálcio. Podem também apresentar magnésio, sódio, potássio e titânio.

A formação das cinzas se dá pela quebra química da biomassa, por meio de processos termoquímicos ou bioquímicos. Caso as cinzas sejam produzidas pela combustão com o ar, elas se tornam uma medida padrão para combustíveis sólidos e líquidos. Durante um processo bioquímico, a porcentagem de resíduos sólidos será maior que o conteúdo de cinzas formadas durante a queima do mesmo material. Isso acontece por que os resíduos sólidos representam a quantidade de carbono não degradável presente

na biomassa, ou seja, o carbono recalcitrante que não pode ser degradado em um processo biológico, mas sim em um processo termoquímico. Em um processo termoquímico, a composição química das cinzas pode representar problemas operacionais no gaseificador. Para um processo de combustão, as cinzas podem reagir e formar uma espécie de escória, uma fase líquida formada a elevadas temperaturas, podendo diminuir a taxa de transferência das plantas e aumentar os custos operacionais. Dependendo da magnitude do conteúdo das cinzas, a energia disponível do combustível pode ser reduzida proporcionalmente (McKENDRY, 2002).

A presença das cinzas em um gaseificador pode gerar aglomeração, incrustações e corrosão. Mas uma quantidade mínima sobre a grelha do gaseificador impede que a mesma atinja um aquecimento excessivo (RIBEIRO, 2007).

ÁNGEL (2009) diz que em gaseificadores do tipo co-corrente, que é o tipo utilizado neste trabalho, a variação de temperatura no reator pode dar origem a pontos quentes que favorecem a fusão das cinzas.

Para evitar a ocorrência da fusão das cinzas, pode ser utilizado algum mecanismo de remoção das cinzas, ou projetar a grelha de modo que haja uma garantia de uma oxigenação suficiente para o combustível e o escoamento das cinzas (MARTIN *et al.*, 2010). No presente trabalho foi utilizado um sistema de perfuração das cinzas, para que as mesmas não se acumulassem no interior do reator. Este perfurador faz com que as cinzas, depois de desagregadas, por meio da gravidade, sejam depositadas em um cinzeiro, localizado logo abaixo do reator, melhorando a oxigenação da zona de combustão, e evitando a fusão das cinzas.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os equipamentos utilizados e os testes realizados. São apresentadas, também, as melhorias realizadas com vistas a se promover ganhos na eficiência, ou no controle do sistema.

4.2. O GASEIFICADOR UTILIZADO NESTE TRABALHO

O gaseificador utilizado neste trabalho, ver Figura 4.1, foi importado do Indian Institute Of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, localizado em Bangalore, Índia. É do tipo leito fixo, co-corrente, de topo aberto. Originalmente o gaseificador possuía uma capacidade de 4 kWt, mas com as modificações feitas, o gaseificador duplicou sua capacidade original.

A alimentação com biomassa é realizada pelo topo do reator. Orifícios situados na superfície perimetral e na altura da zona de combustão do reator, servem a admissão do ar ambiente permitindo a combustão da biomassa. São usados, ainda, para se introduzir a chama do maçarico que dá início ao processo de ignição da biomassa. O processo de inicialização da queima da biomassa é facilitado pela existência de pressão negativa no reator, causado pelo fluxo de água de lavagem do gás pobre submetido ao efeito Venturi. O oxigênio que não reagiu na zona de combustão passa então para a zona de redução e para a zona de pirólise. Dessa forma, há a reação do oxigênio com o carbono, formando CO_2 e H_2O . Tanto o CO_2 quanto o H_2O seguem para a zona de redução e reagem um com o outro, formando assim os gases combustíveis CO , CH_4 e H_2 . Além do reator, o

gaseificador é composto por outros componentes referidos na Figura 2.2. Ao compararmos as Figuras 4.2 com a 4.3, percebe-se que a estrutura original do gaseificador foi significativamente modificada. Foram reduzidos os comprimentos das tubulações para evitar a perda de carga, a posição do filtro de manga foi invertida com relação a sua posição original, fazendo com que o gás percorresse um menor caminho e passasse diretamente pelo filtro de manga. A localização da chama piloto também foi modificada visando uma menor perda de carga do gás. Foi instalado, também, um sistema de desobstrução de cinzas, como se detalhará no item 4.2.1. Todas essas modificações tiveram como objetivo aumentar a funcionalidade e a eficiência do gaseificador.



Figura 4.1: O gaseificador com modificações já introduzidas.

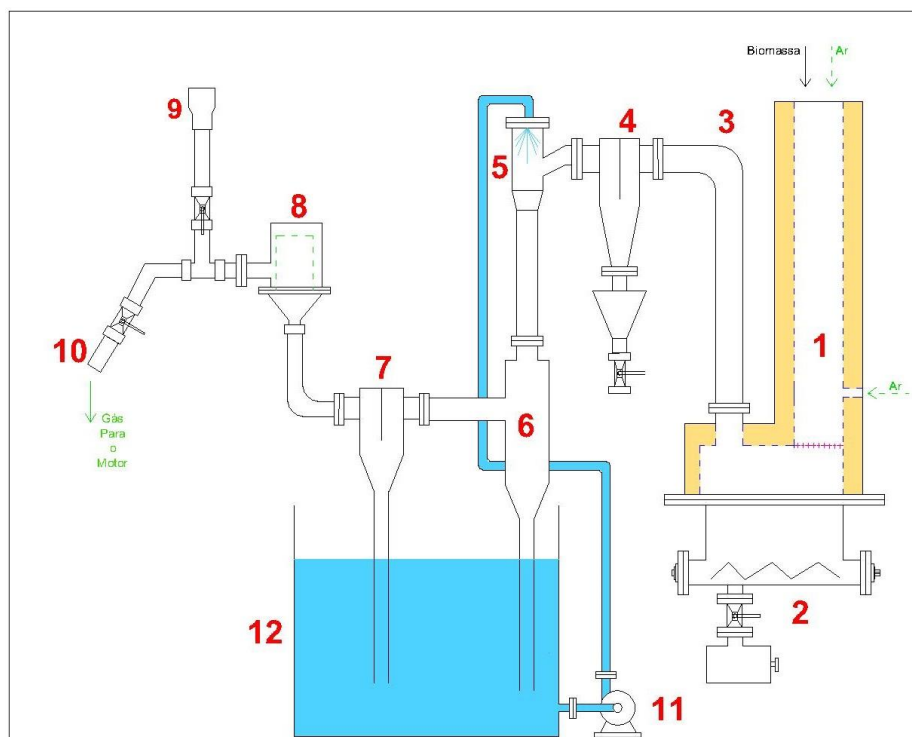


Figura 4.2: Diagrama esquemático do gaseificador original

Fonte: FIGUEIREDO (2017)

1 – Reator: local do gaseificador onde ocorre a alimentação e a queima da biomassa. É onde se encontram os furos laterais para a entrada de ar no gaseificador. Em seu interior há uma grelha para sustentação da biomassa e separação do carvão e das cinzas. Abaixo do reator encontra-se o cinzeiro, que será descrito posteriormente.

2 – Cinzeiro: local onde são armazenados o carvão e as cinzas produzidas durante o processo de gaseificação. Em sua parte superior, encontra-se o sistema de desobstrução, que será detalhado posteriormente neste trabalho. O cinzeiro, também, foi alterado, como será visto mais adiante.

3 – Tubo de saída de gás: promove a saída do gás do reator a 315 °C.

4 – Purgador de alcatrão: materiais particulados e o alcatrão colidem com uma placa no interior do purgador e caem por gravidade em seu interior, para posterior retirada.

5 – Lavador e resfriador do gás: ponto de entrada da água de lavagem do gás pobre, fluído este que, também, concorre para o resfriamento do mesmo.

- 6 – Difusor: elemento da tubulação que contribui para a separação do gás que vem misturado com a água. Parte do difusor fica imerso em um reservatório com água, que funciona como selo para impedir que o gás escape.
- 7 – Placa de condensação de umidade do gás: mesmo após passar pelo difusor, o gás ainda possui certa quantidade de água. No interior desse dispositivo, o gás encontra uma placa onde ocorre condensação e a eliminação de outra fração de água contida no gás pobre.
- 8 – Filtro de manga: o gás passa por um filtro feito de tecido, geralmente feltro, para a retirada de material particulado.
- 9 – Queimador: dispositivo onde se verifica se o gás começou a ser produzido, bem como o nível da qualidade do gás a partir de ser ter uma chama acesa.
- 10 – Tubulação para saída do gás pobre para o motor: leva o gás pobre até a alimentação do motor, após se interromper o fluxo que alimenta a chama piloto.
- 11 – Bomba centrífuga: promove a circulação de água para a lavagem do gás, a uma vazão de 2400 l/s, e possui uma potência de 117 W.
- 12 – Reservatórios de água: tanques que servem aos processos de limpeza ou resfriamento do gás pobre.

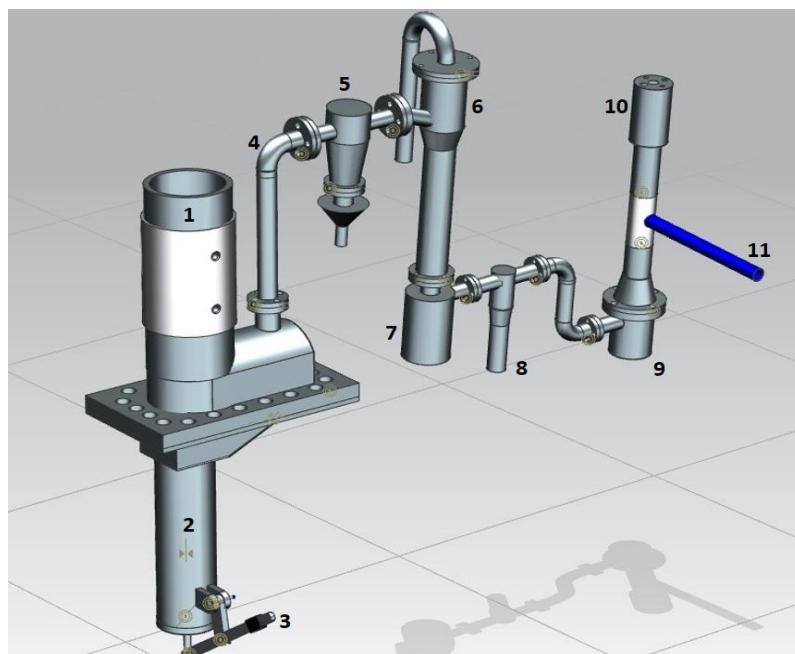


Figura 4.3: Esquema compacto da presente estrutura do gaseificador utilizado nesse trabalho.

Desenho por Samuel dos Santos Andre

- 1 - Reator: componente do gaseificador em que ocorrem todas as reações químicas do processo de gaseificação.
- 2 - Cinzeiro: é o dispositivo responsável por armazenar carvão e cinzas oriundos do processo de gaseificação.
- 3 - Alavanca do perfurador de cinzas: permite o acionamento manual do perfurador de cinzas.
- 4 - Tubulação de saída do gás produzido: duto por onde o gás pobre deixa o reator.
- 5 - Purgador: elemento responsável por reter particulados e o alcatrão presentes no gás pobre.
- 6 - Tubulação de lavagem do gás produzido: componente que promove a lavagem e o resfriamento do gás pobre, a fim de retirar impurezas (principalmente alcatrão). Devido ao efeito Venturi, provocado por sua geometria, tal componente também ajuda a oxigenação do reator quando a biomassa é inflamada.
- 7 - Difusor: item que permite a separação do gás da água.
- 8 - Placa de condensação de umidade: localizada após o difusor, tem a função de reter a umidade que ainda se encontra presente no gás.
- 9 - Filtro de Manga: filtro de tecido responsável por reter particulados contidos no gás.
- 10 - Queimador: componente auxiliar que permite a análise visual da qualidade da chama e da vazão de gás.
- 11 - Tubulação de alimentação: duto que direciona o gás, que já passou por todo o processo de limpeza, para o motor de combustão interna.

4.2.1. Modificação do Sistema de Desobstrução da Grelha

SILVA (2017), foi o primeiro pesquisador a se utilizar do sistema de desobstrução implantado pelo Laboratório de Inovação nos gaseificadores. A alavanca se localizava no topo do gaseificador, de forma que o eixo atuador atravessava todo o gaseificador, submetendo-o a elevadas temperaturas, provocando desgastes. Assim, um novo sistema de desobstrução foi implementado no gaseificador, tendo-se aproveitado a garra já existente no sistema anterior. Assim, a principal modificação introduzida foi no acionamento, montado na parte inferior do gaseificador, ver Figura 4.4. Dessa forma, a grelha que antes era soldada ao reator, passou a ser soldada ao cinzeiro, ver Figura 4.5. Tais modificações contribuíram, ainda, para melhorar a oxigenação do reator e impedir

que as cinzas obstruíssem a grelha. Além do mais, a mudança do local da alavanca para baixo do cinzeiro proporcionou um aumento no volume interno do reator, fazendo com que mais biomassa pudesse ser inserida.



Figura 4.4: Alavanca de acionamento do sistema de desobstrução



Figura 4.5: Sistema de desobstrução

4.2.2. Melhorias na Medição de Temperatura do Gaseificador

Foram instalados um total de sete termopares do tipo K, com faixa nominal de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ e um termoressistor do tipo PT-100, de platina, com faixa nominal de $-248\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $962\text{ }^{\circ}\text{C}$ no gaseificador. Cinco foram utilizados para a determinação das

temperaturas das zonas do reator. A temperatura da zona de combustão está identificada como T_2 , ver Figura 4.6. Outros três termopares estão localizados no reator tinham corpo de aço inox e foram posicionados para medir as temperaturas das zonas de secagem (T_4 e T_5), pirólise (T_3) e redução (T_1), ver Figura 4.7. Mais dois termopares foram colocados no sistema para medir a temperatura do gás logo após o Tubo de Pitot (T_6) e logo antes de entrar no motor (T_7) fixado no mangote, ver Figura 4.8. O termoresistor, ver Figura 4.9, foi utilizado para mensurar a temperatura de saída do gás do reator (T_8).

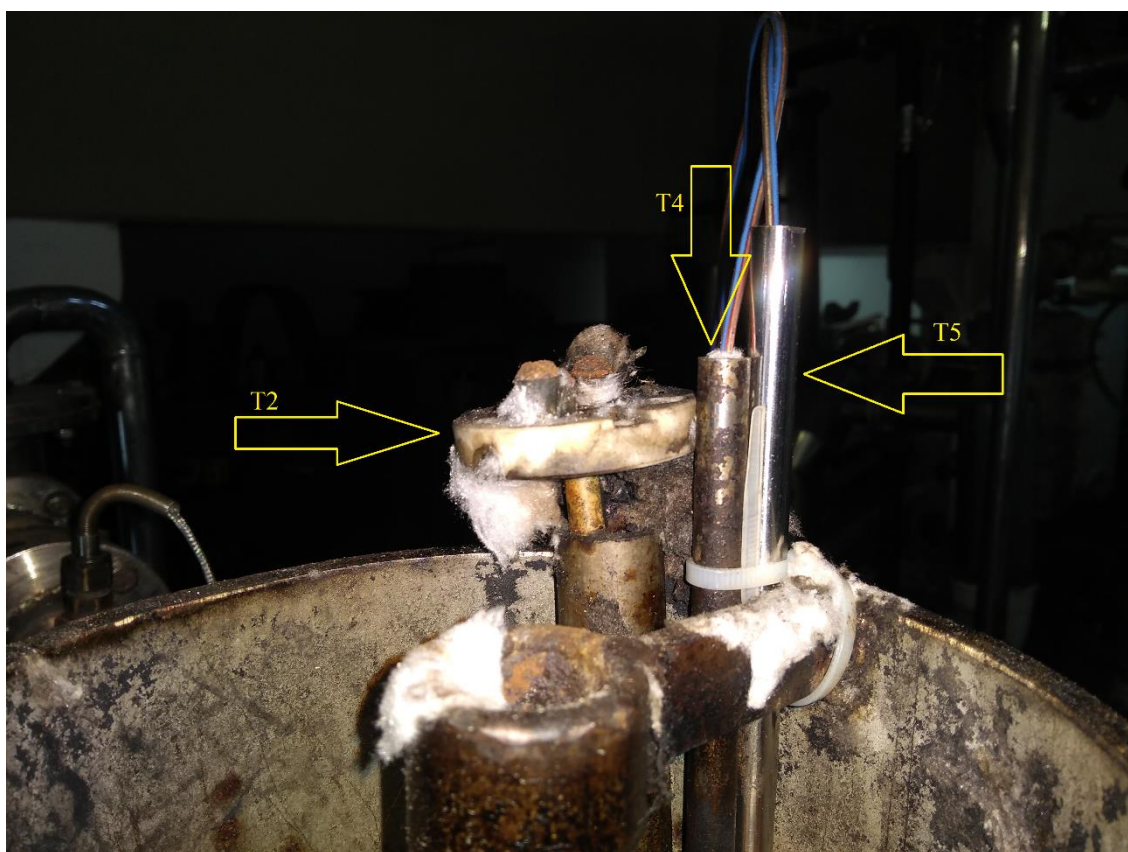


Figura 4.6: Termopares utilizado para medir a temperatura da zona de combustão (T_2) e de secagem (T_4 e T_5)



Figura 4.7: Termopares utilizados para medir as temperaturas das zonas de pirólise (T_3) (a), redução (T_1) (b)



Figura 4.8: Termopares localizados próximo ao Tubo de Pitot (T_6) e na entrada do motor (T_7)

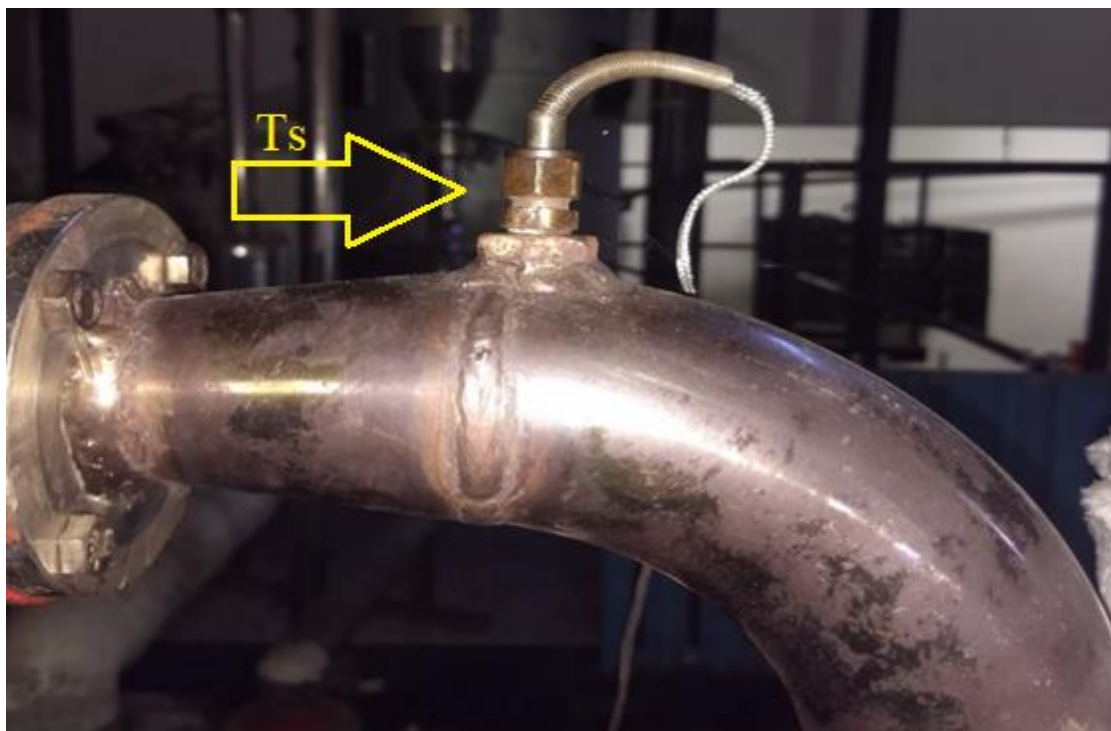


Figura 4.9: Termopar na saída do gás do reator (T_s)

4.2.3. O Motor Utilizado neste Trabalho

Utilizou-se neste trabalho um motor operando no ciclo Otto, adaptado para funcionar também com gás pobre, o qual foi conectado a um gerador de energia elétrica. O motor foi fabricado pela Briggs e Stratton, modelo Vanguard V-Twin, possuindo dois cilindros com configuração em V, com cilindrada total de 570 cm³. A potência nominal do motor é de 18 hp (13,42 kW), com seu combustível originalmente sendo a gasolina. Sua taxa de compressão original era de 8,5:1, tendo passado, depois da adaptação a 11,3:1.

4.2.4. Gerador de Energia Elétrica

Foi utilizado neste trabalho um gerador de energia elétrica da marca Toyama, modelo TG2500MX, que possui uma potência nominal de 2,0 kW e potência máxima de 2,2 kW, com fator de potência de 1,0. O gerador é monofásico, com tensão de saída de 220 V e frequência de 60 Hz.

O gerador foi acoplado ao motor Vanguard por meio de seus eixos, e ambos estão apoiados sobre coxins, em uma única plataforma metálica construída especialmente para esse fim.

4.3. Aparato Experimental Complementar

Além do gaseificador e do grupo motor-gerador, outros equipamentos são de fundamental importância para o desenvolvimento dos testes e a obtenção dos resultados. Estes equipamentos são apresentados da seção 4.3.1 até a seção 4.3.7.

4.3.1. Serra de Bancada

A serra de bancada, foi utilizada para o corte da biomassa in natura no tamanho especificado, para servir de combustível ao gaseificador.

4.3.2. Simulador de Carga

O simulador de carga utilizado neste trabalho consiste em seis resistências de 250 – 280 W e duas de 150 – 180 W. Foi construído no próprio Laboratório de Inovação e tem como função simular a carga aplicada ao grupo motor-gerador. A Figura 4.10 apresenta o simulador de carga em funcionamento.



Figura 4.10: Banco de resistência em funcionamento

4.3.3. Analisador de Gases Veiculares

A análise dos gases (CO , CO_2 , NO_x) foi realizada utilizando-se o equipamento da marca *Alfateste*, modelo *Discovery G4*, juntamente com um software adequado. O analisador de gases consiste de central de análise eletrônica e sonda, como visto na Figura 4.11.



Figura 4.11: Analisador de gases

Fonte: FIGUEIREDO (2017)

4.3.4. Balança Digital

Para a medição do consumo de biomassa pelo gaseificador, foi utilizada uma balança digital de alta precisão, da marca FRMIX, com mostrador de cinco dígitos, com três casas decimais após a virgula. Possui capacidade máxima de 40 kg e mínima de 2 g.

4.3.5. Analisador de Energia

Para analisar a potência e a frequência instantânea, utilizou-se um analisador da qualidade de energia, portátil, da marca HIOKI 3197, ver Figura 4.12. Potência, tensão,

corrente, fator de potência e frequência da rede são alguns dos parâmetros mensurados por esse tipo de analisador.



Figura 4. 12: Analisador portátil da qualidade de energia.

4.3.6. Termobalança

A termobalança analítica vista na Figura 4.13, RADWAG, tipo MAC 210, resolução de 0,001% de umidade e 1 mg de massa, disponibilizada pelo Laboratório de Tecnologia Química (LTQ), da UFPB, foi utilizada para verificar o teor de umidade contido na biomassa.

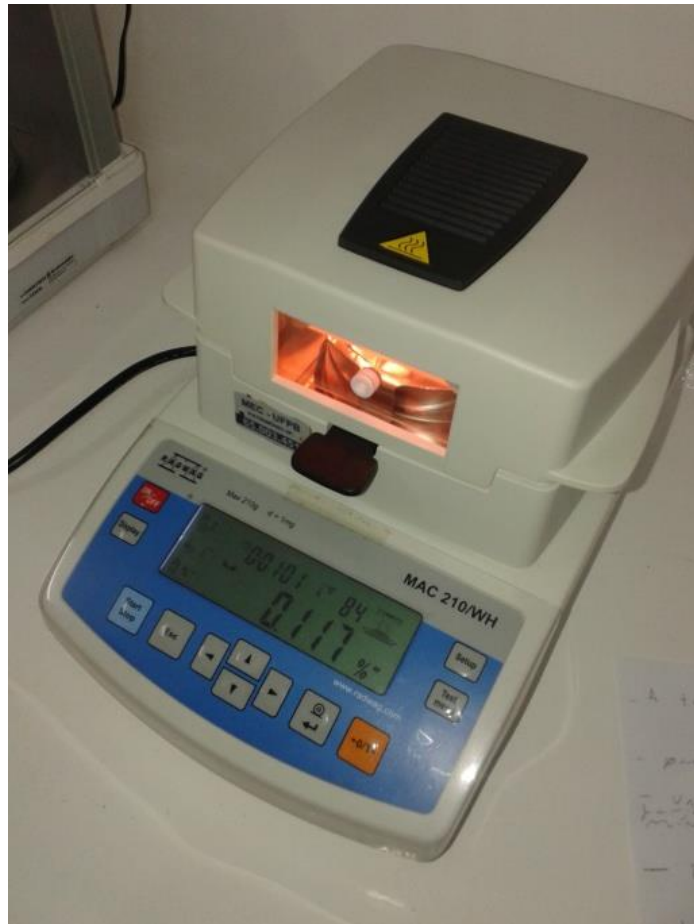


Figura 4.13: Termobalança

Fonte: FIGUEIREDO (2017)

4.3.7. Termo higrômetros e Leitores de Temperatura.

Foram utilizados nos testes termo higrômetros e leitores de temperatura para ter-se a leitura das temperaturas mensuradas. Os termos higrômetros são da Marca MINIPA, modelo MTH-1380, visto na Figura 4.14.



Figura 4. 14: Termo higrômetro

4.4. SELEÇÃO DO TAMANHO DOS TABLETES DE BIOMASSA IN NATURA PARA SE ALIMENTAR O GASEIFICADOR

Tomando-se por base os trabalhos de FIGUEIREDO (2017) e SILVA (2017), que por sua vez tiveram como referência o trabalho de DASSAPA (2002), foi utilizado no presente estudo três tamanhos de biomassa in natura, ver Figura 4.15. Uma amostra com aproximadamente 28 cm³ (41 mm x 39 mm x 17 mm), outra com aproximadamente 14 cm³ (40 mm x 20 mm x 18 mm) e a última com aproximadamente 4 cm³ (16 mm x 16 mm x 16 mm), respectivamente.



Figura 4.15: Tamanhos dos tabletes de biomassa in natura utilizada

4.5. OS TESTES

4.5.1. Testes com Biomassa In Natura

Após a inserção da biomassa no reator, promoveu-se sua ignição fazendo uso de um maçarico. Concomitantemente à promoção da combustão da biomassa, uma bomba de água para realizar a lavagem dos gases e seu resfriamento, foi acionada, para que também ocorresse a queda de pressão no interior do gaseificador. Transcorridos cerca de dez minutos, o queimador é aceso. Através de sua coloração e da altura da chama, pode-se verificar a qualidade do gás, bem como as condições de seu fluxo. Ao se perceber que todos os parâmetros estão próximos das condições de funcionamento do motor, o analisador de gás é utilizado para medir o nível de CO contido no gás. Quando este atinge o teor de 10%, abre-se a válvula que leva o gás até o motor e fecha-se a válvula da chama

piloto. É nesta etapa também que se dá a partida do motor. A proporção ar/gás é controlada manualmente por meio de um controlador de fluxo em Y, visto na Figura 4.16, desenvolvido no próprio Laboratório de Inovação.

A partir daí, aguarda-se, em torno de cinco minutos, para que todo o sistema se estabilize, quando então, se acende a primeira lâmpada (primeira carga resistiva). Com o sistema estabilizado, e estando o mostrador de frequência indicando 60 Hz, registra-se os dados da composição dos gases, as temperaturas das zonas do gaseificador, a de saída do gás do reator, aquela após o Tubo de Pitot, a do gás na entrada no motor, bem como a potência e a frequência na qual a energia está sendo gerada.

A avaliação do consumo se dá tendo-se a garantia de que o reator iniciou, com seu compartimento de biomassa completamente cheio. Ao se verificar a necessidade de se alimentar o reator, quantifica-se por pesagem a biomassa a ser introduzida e anota-se o tempo decorrido para o consumo registrado. Determina-se, desta forma, o consumo de biomassa, em kg/h.

Esse procedimento é repetido até que a última carga seja aplicada ao motor.

A cada carga acionada, os parâmetros citados acima (temperatura, potência, frequência, etc.) são mensurados e anotados junto com o consumo.

Para o acionamento de cada lâmpada, espera-se, como já mencionado, a estabilização do sistema, que ocorre quando a frequência da rede elétrica gerada pelo grupo gerador atinge o valor de 60 Hz.

Durante todo o procedimento, o fluxo da mistura ar/gás é controlado manualmente, assim como a aceleração do motor, para que este não venha a falhar e comprometer os resultados dos testes, ou ampliar o período de ensaios.

O procedimento acima descrito foi realizado para os três tamanhos dos tabletes de biomassa in natura acima referidos e mostrados na Figura 5.15.

Considerando-se, todavia, as dificuldades de fluidez dos tabletes de biomassa in natura no interior do reator (“bridging”) causadas pela magnitude das massas específicas dos dois tamanhos de maiores volumes, apenas se discutirá nos resultados os ensaios realizados com os tabletes de menor volume.



Figura 4.16: Controlador de fluxo em Y

4.5.2. Carvão Vegetal

Para se obter o carvão vegetal, a biomassa in natura deve passar pelo processo de pirólise lenta. A pirólise é o processo de degradação térmica, na ausência total do agente oxidante, ou com fornecimento parcial e limitado de oxigênio, fazendo com que dessa forma a gaseificação não ocorra em grande quantidade. As temperaturas nesse processo estão em torno de 400 °C à 800 °C (BRIDGWATER, 1991). A pirólise lenta também é conhecida como carbonização.

De acordo com Kanury e Blackshear Jr. (1970), a carbonização pode ser dividida em cinco períodos que dependem do tempo de exposição ao calor, desde a biomassa in natura até o carvão:

- Período I: propagação do calor na madeira pelo mecanismo da condução de calor, não havendo nenhuma alteração na biomassa, apenas a liberação de água;

- Período II: ocorrem as primeiras alterações na biomassa, formando-se assim a frente de pirólise. Nesta fase há dois estágios: um que corresponde à zona de pirólise, e outro onde a biomassa continua aquecendo;
- Período III: tem-se início a formação do carvão, mas com a existência de uma camada ainda não carbonizada. O calor nessa fase é transferido por condução e por convecção. Os gases pesados sofrem uma decomposição catalisada pelo carvão quente, enquanto que os gases leves, ao passarem para o exterior da zona, podem encontrar oxigênio, fazendo assim com que possivelmente ocorra uma combustão, a qual irá fornecer energia à superfície do carvão;
- Período IV: neste período já não há mais biomassa in natura, sendo a zona do carvão predominante;
- Período V: é a última fase da carbonização, formada apenas pelo carvão vegetal.

Para se determinar a qualidade do carvão vegetal produzido, é normalmente utilizada a análise imediata. Este método consiste em se avaliar os teores de cinzas, umidade, voláteis e de carbono fixo. Controlar a umidade é de fundamental importância para que o carvão vegetal não seja quebradiço e de baixa qualidade. A umidade em excesso aumenta a pressão nos poros do carvão vegetal, contribuindo com o rompimento desses poros (LISBOA, 2016). Ainda de acordo com LISBOA, 2016, o carbono fixo é o combustível residual da liberação do material volátil, sendo constituído de carbono e alguns elementos voláteis que não foram liberados. Carvões vegetais com bons índices de carbono fixo proporcionam uma maior produtividade por unidade de massa. Porém, índices muito elevados de carbono fixo podem vir a causar maior degradação térmica, resultando assim em uma queda da resistência mecânica do material combustível.

4.5.3. Os Testes com o Carvão Vegetal

Como já afirmado, diferentemente do caso da biomassa in natura, não se parametriza a escolha do tamanho da biomassa no caso do carvão vegetal pela massa específica. Assim, o que determinou o tamanho das peças de carvão vegetal foi a malha da grelha, tendo-se escolhido volumes com dimensões tais, que fossem suficientes para não passarem pela malha da grelha.

Por outro lado, procurou-se adotar, durante os testes, os mesmos procedimentos empregados quando dos ensaios feitos com a biomassa in natura. Todavia, dada a diferença, sobretudo, da composição química dos materiais, foi possível observar,

principalmente nos tempos de reações, valores bem diferentes, e conseqüentemente, no tocante às eficiências e desempenhos dos sistemas, como se verá no próximo capítulo.

4.5.4. Vantagem da Utilização do Carvão Vegetal Sobre a Biomassa In Natura

Como citado no item 3.2, um dos maiores contaminantes do gás pobre é o alcatrão, formado durante o processo de pirólise da biomassa in natura, sendo constituído por uma mistura de hidrocarbonetos. Na gaseificação do carvão vegetal, não há o processo de pirólise, e desta forma a formação de hidrocarbonetos é muito baixa, quando comparado com a formação de hidrocarbonetos quando se utiliza biomassa in natura, ver Figura 4.17.

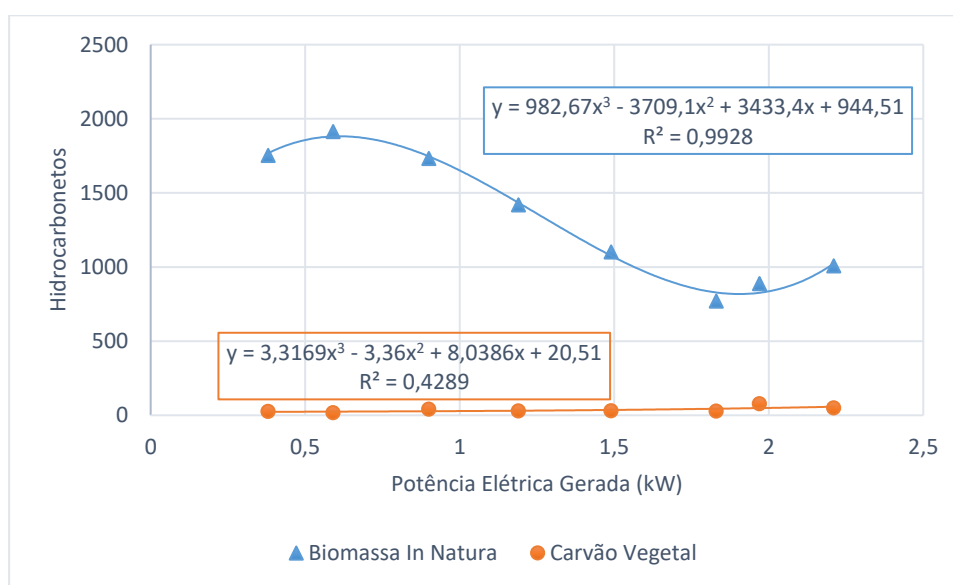


Figura 4.17: Formação de hidrocarbonetos na biomassa in natura e no carvão vegetal.

Como consequência deste efeito, não há a formação do alcatrão, como pode ser visto na Figura 4.18, onde são apresentados os filtros de manga utilizados nos experimentos com biomassa in natura e com carvão vegetal.

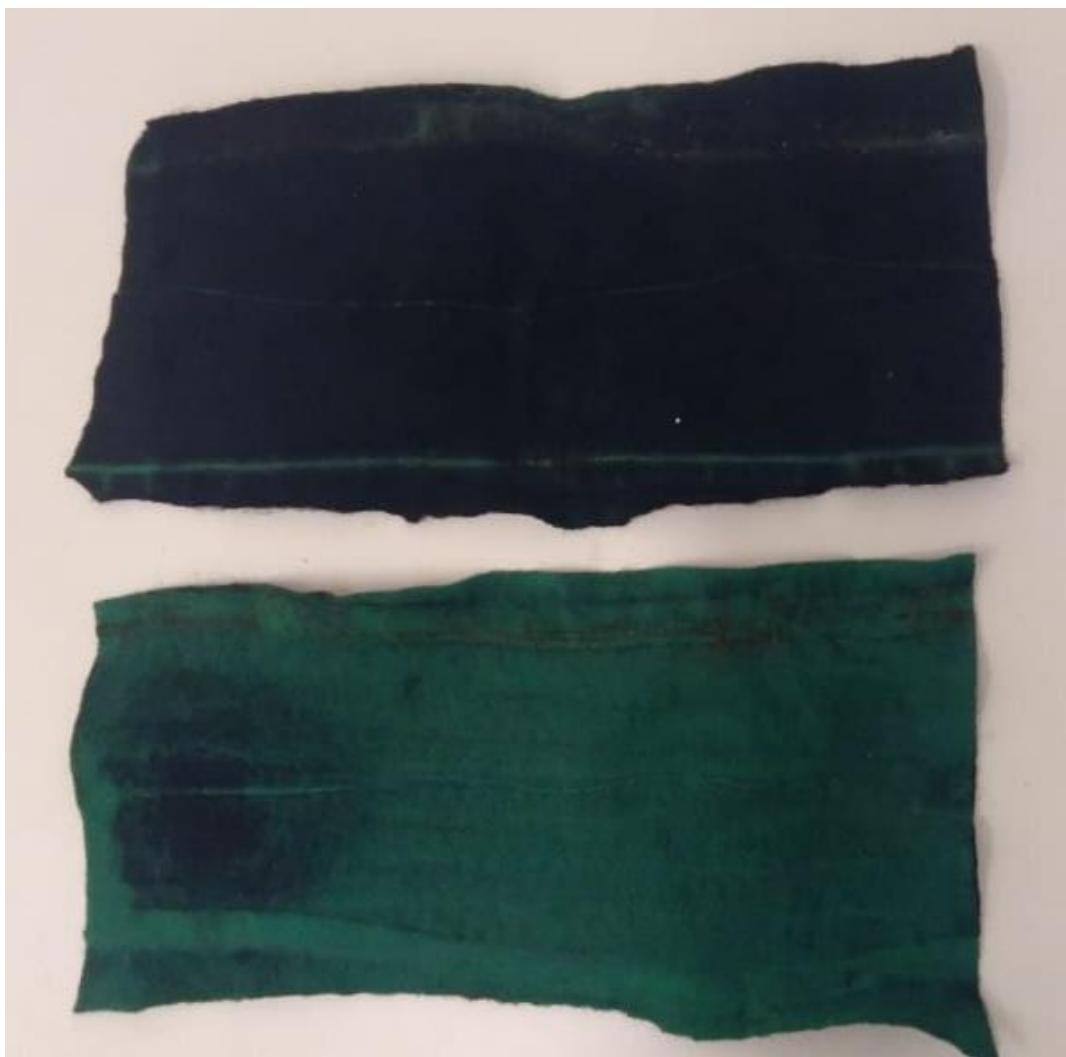


Figura 4.18: Filtros utilizados nos testes

O filtro mais escuro visto na Figura 5.18 foi utilizado nos testes com biomassa in natura, e com apenas um único teste, o alcatrão e os particulados ficaram totalmente impregnados. Já o filtro mais claro foi utilizado nos testes com carvão vegetal, e não foi necessária sua substituição, já que o mesmo não foi afetado pelo alcatrão.

A Figura 4.19 mostra o material retirado do purgador do gaseificador. O material mais escuro (b) foi retirado dos testes com biomassa in natura, possuindo em sua composição alcatrão e outros particulados devido ao processo de pirólise. Já o material mais claro (a) foi retirado do purgador após os testes com carvão vegetal. Sua composição é basicamente constituída por cinzas.



(a)

(b)

Figura 4.19: Material retirado do purgador do gaseificador

Utilizando-se um opacímetro modelo TM 138, da Tecnomotor, foram coletados dados sobre os particulados na saída dos gases do motor. Os resultados, como podem ser vistos na Figura 4.20, mostram que a presença de particulados utilizando-se carvão vegetal como biomassa, é significativamente menor do que quando se utiliza a biomassa in natura.

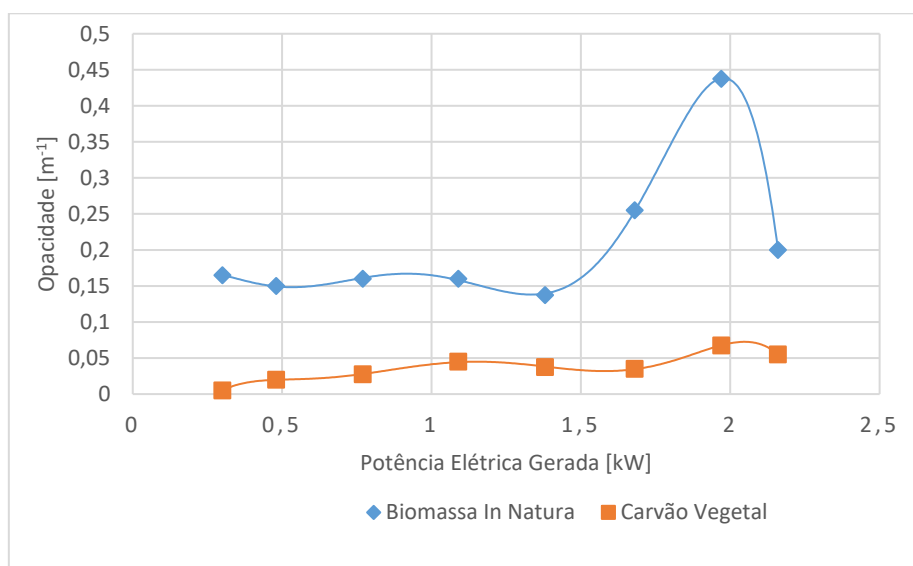


Figura 4.20: Análise dos níveis de opacidade no escape do motor

Pode-se considerar então, pela baixíssima presença de particulados (próximos de zero), que não há contaminação por alcatrão no gás pobre produzido, a partir da queima do carvão vegetal.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo os resultados e as análises dos experimentos são apresentados, comentando-se, sobretudo, os aspectos que caracterizaram e distinguiram dos daqueles obtidos com a biomassa in natura daqueles conseguidos com o carvão vegetal.

5.2. TEOR DE UMIDADE

Os teores de umidade dos tabletes da biomassa in natura, nos três diferentes tamanhos, foram calculados experimentalmente, após as amostras terem sido expostas ao sol por um período de oito horas. Os resultados destes teores são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1: Teor de Umidade Contida na Biomassa In Natura.

Amostra	Teor de Umidade
28 cm ³	11%
14 cm ³	13%
4 cm ³	9%
Média	11%

5.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS – ENSAIO COM BIOMASSA IN NATURA

A Tabela 5.2 apresenta os valores das temperaturas mensuradas nos oito pontos descritos no item 4.2.2 para as diferentes cargas caracterizadas pelo número de bulbos acesos. As potências foram obtidas com a utilização do analisador de energia da Figura 4.12.

Tabela 5. 2: Temperaturas mensuradas no gaseificador

MEDIDAS DE TEMPERATURA (°C)								
POTÊNCIA [W]	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
300	763	862	965	35,2	31,3	31	32	315
480	765	983	876	43,1	32,4	32	33	345
770	731	994	959	67,2	34,8	34	33	334
1090	756	1021	911	79,7	35,7	34	34	348
1380	758	995	942	113,8	38,7	36	35	372
1680	781	1086	902	154,2	41,4	38	35	383
1970	771	1094	958	173	43,1	38	36	373
2160	741	1043	1062	196,8	45,1	39	36	380

5.4. CONSUMO DE BIOMASSA IN NATURA

O gráfico apresentado na Figura 5.1 mostra a evolução do consumo específico de biomassa in natura para as diversas potências geradas.

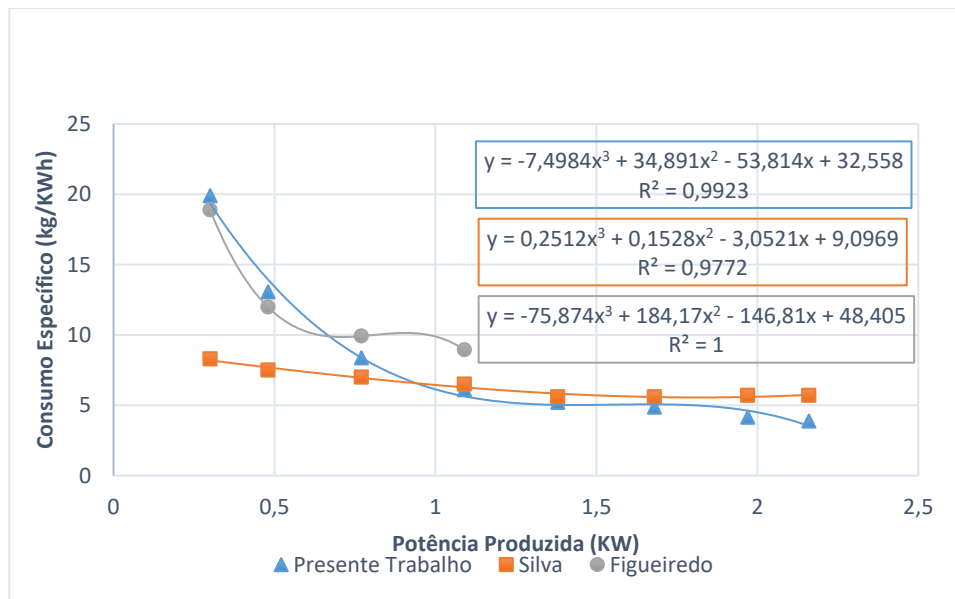


Figura 5. 1: Consumo específico de biomassa in natura em função da potência elétrica gerada

Foram feitas comparações com os trabalhos de Silva (2017) e Figueiredo (2017), observando-se que o comportamento decrescente da curva de consumo específico de biomassa com o aumento da potência gerada foi o mesmo para ambos os trabalhos.

5.5. PCI DO GÁS POBRE PRODUZIDO POR POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA COM BIOMASSA IN NATURA

O gráfico da Figura 5.2 apresenta o PCI do gás pobre produzido, calculado a partir da Equação (2.1), para cada potência elétrica gerada.

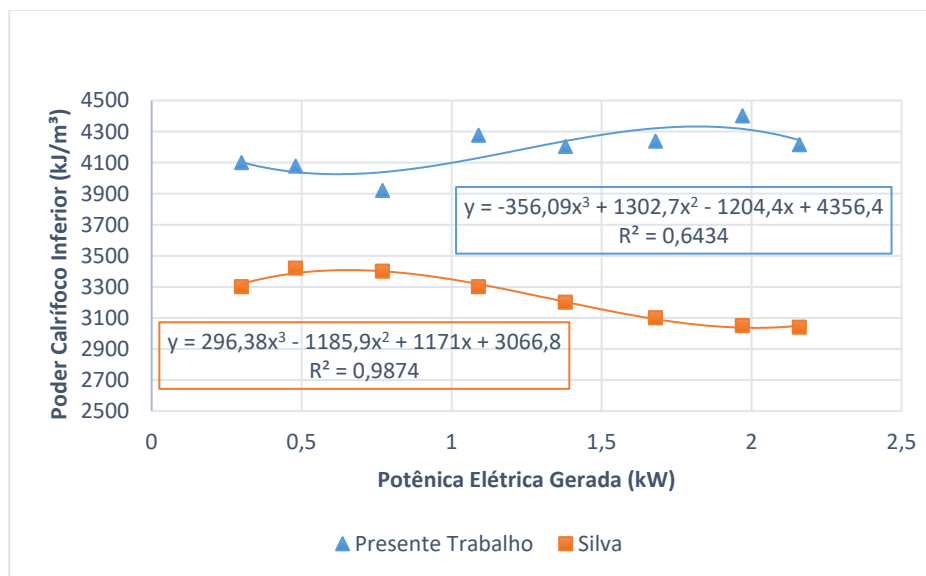


Figura 5. 2: PCI do gás pobre produzido em função da potência elétrica gerada

Em comparação com o trabalho de Silva (2017), as curvas possuem comportamento inverso, e o presente trabalho apresenta maiores valores do PCI, mesmo tendo sido utilizado a mesma biomassa in natura em ambos os trabalhos.

5.6. COMPOSIÇÃO DOS GASES COM BIOMASSA IN NATURA

O gráfico da Figura 5.3 apresenta a composição de CO, CO₂ e O₂ na admissão do motor, em função da potência elétrica gerada.

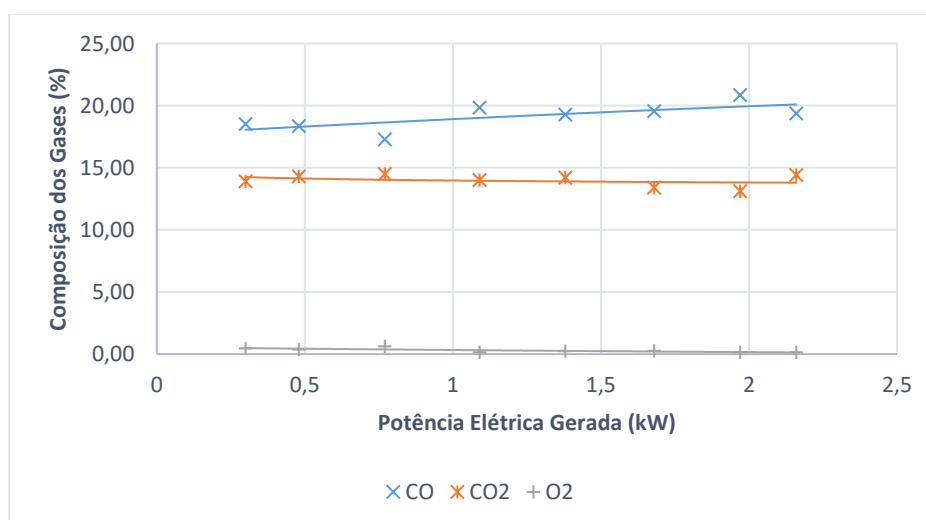


Figura 5. 3: Composição de CO, CO₂ e O₂ em função potência elétrica gerada

Observa-se, na Figura 5.3, que as composições percentuais de CO, CO₂ e O₂ permaneceram em níveis estáveis durante todo o ensaio. Isso indica, possivelmente, uma combustão estequiométrica, devido ao fato de que o fator λ , o qual indica se a mistura ar-combustível está rica ou pobre, demonstrou o valor 1.

5.7. EFICIÊNCIA DO SISTEMA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR UTILIZANDO BIOMASSA IN NATURA

A Figura 5.4 mostra a eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador, calculada a partir da Equação (2.5), em função da potência elétrica gerada.

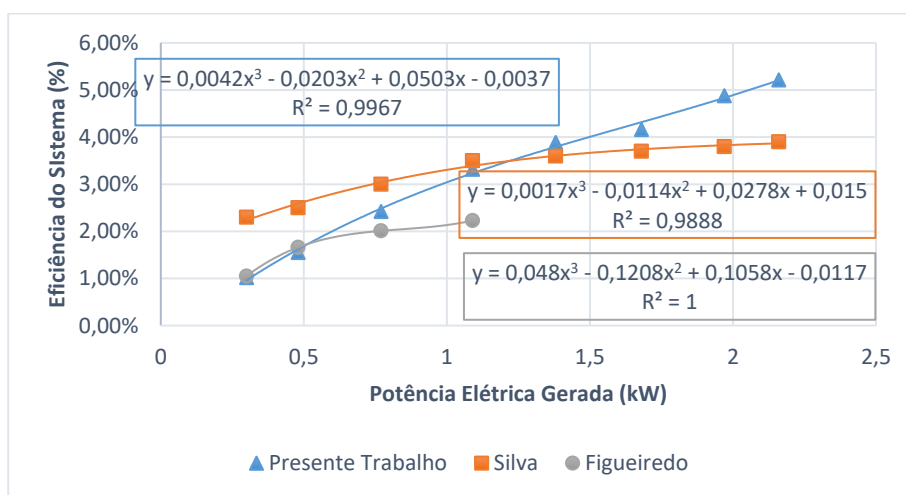


Figura 5. 4: Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador

Comparando-se os trabalhos de Silva (2017) e Figueiredo (2017), com os do presente trabalho, tendo-se usado o mesmo sistema gaseificador/grupo gerador e a mesma biomassa in natura, observa-se que a eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador do trabalho em tela foi superior. O fato de uma maior eficiência alcançada neste trabalho se deu devido as modificações realizadas no gaseificador, apresentadas no Capítulo IV.

5.8. MEDIÇÃO DAS TEMPERATURAS OPERANDO-SE COM O CARVÃO VEGETAL

Os índices das temperaturas e das cargas são os mesmos utilizados na análise da biomassa in natura. A temperatura T_3 não foi considerada, pois não há mais região de pirólise quando se utiliza o carvão vegetal. As potências foram obtidas com a utilização do analisador de energia, que aparece na Figura 4.12. Comparando-se as temperaturas obtidas com as duas diferentes biomassas, percebe-se que quando se utiliza carvão vegetal, gera-se temperaturas mais elevadas. Isso é devido ao PCI do gás produzido com carvão vegetal ser maior do que o PCI do gás produzido com biomassa in natura.

Tabela 5. 3: Temperaturas Mensuradas No Gaseificador Utilizando Carvão Vegetal

MEDIDAS DE TEMPERATURA (°C)								
POTÊNCIA [W]	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T _s
380	1025	45,4	34,4	984	629	37	34	510
590	1062	1088	1176	1213	65,7	33	37	477
900	1072	1182	884	1285	68,6	36	40	374
1190	1076	1200	893	1342	85,1	37	40	397
1490	816	1132	829	113,8	1096	37	41	325
1830	1050	1047	815	1212	148,9	37	42	300
1970	880	974	824	1227	154,7	53	43	377
2210	707	972	756	1161	171,9	39	44	250

5.9. CONSUMO DE CARVÃO VEGETAL

O gráfico apresentado na Figura 5.5 mostra a evolução do consumo de carvão vegetal para as diversas potências geradas.

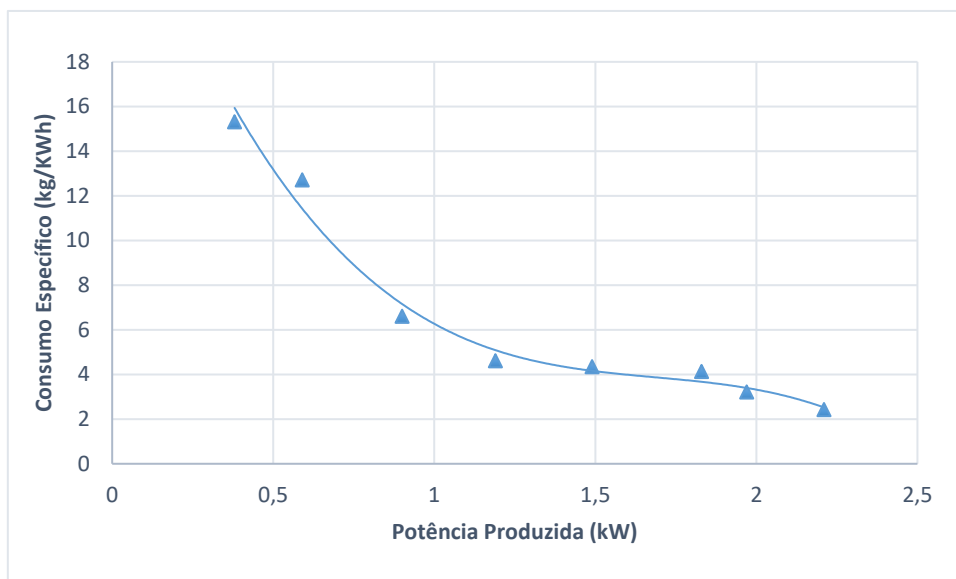


Figura 5. 5: Consumo específico de carvão vegetal em função da potência elétrica gerada

Assim como foi observado com a biomassa in natura, o consumo específico é inversamente proporcional ao aumento da potência. Porém, o consumo específico de carvão vegetal é menor quando comparado com o consumo específico da biomassa in natura.

5.10. PCI DO GÁS POBRE PRODUZIDO POR POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL

O gráfico da Figura 5.6 apresenta o PCI do gás pobre produzido, calculado a partir da Equação (2.1), para as diversas potências elétricas geradas.

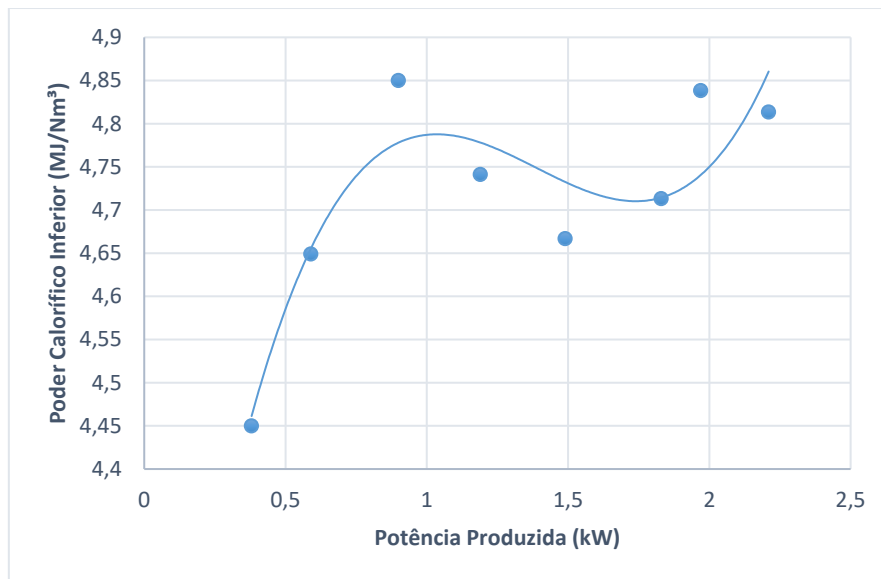


Figura 5. 6: PCI do gás pobre produzido em função da potência elétrica gerada

Quando comparado com o PCI da biomassa in natura, o PCI do carvão vegetal mostrou-se mais elevado, o que garante maior nível de energia de combustão. A existência de picos se deve, principalmente, ao efeito de “brindging”. Quando do aparecimento de tais efeitos, foi necessária a intervenção externa, com vistas a se corrigir a má distribuição do carvão vegetal, no reator.

5.11. COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ADMISSÃO NO MOTOR UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL

O gráfico da Figura 5.7 apresenta a composição dos gases na admissão do motor, em função da potência elétrica gerada.

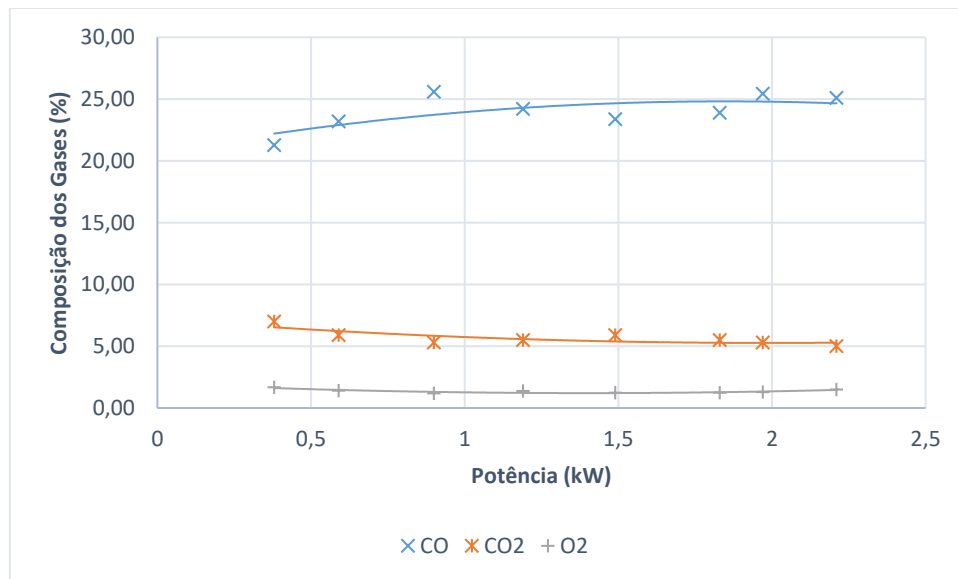


Figura 5. 7: Composição dos gases em função da potência elétrica gerada

A Figura 5.7 é semelhante à Figura 5.3, onde se pode notar uma estabilidade quanto a emissão dos gases, revelando que, possivelmente, houve uma combustão estequiométrica, devido ao fato já explanado no item 5.6. Porém, nota-se um leve aumento nos índices dos mesmos gases quando se compara com os resultados da utilização da biomassa in natura com aqueles oriundos do carvão vegetal. Este fato ocorre devido ao PCI do gás produzido com carvão vegetal ser maior que o PCI do gás produzido com biomassa in natura.

5.12. EFICIÊNCIA DO SISTEMA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL

A Figura 5.8 mostra a eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador, calculada a partir da Equação (2.5), em função da potência elétrica gerada.

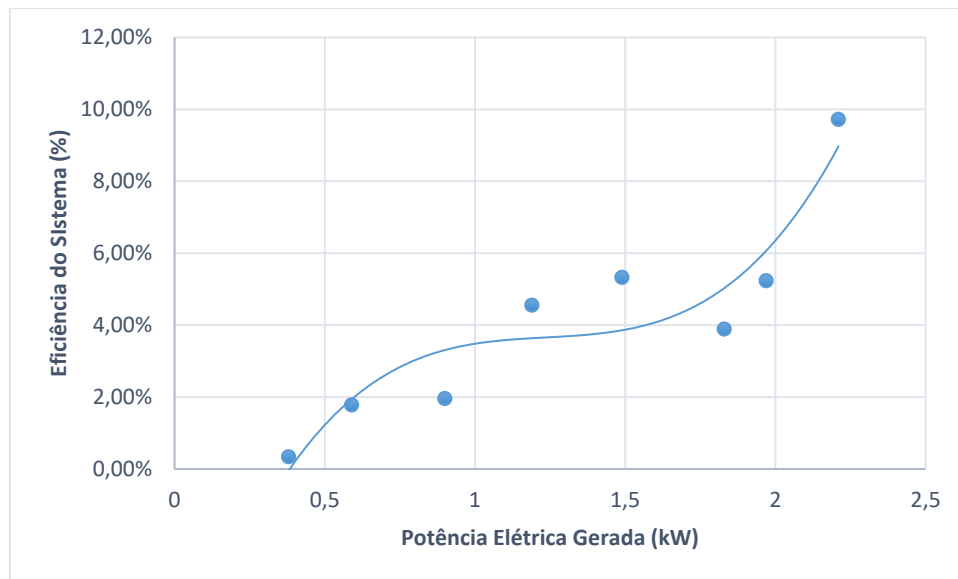


Figura 5. 8: Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador

A eficiência do sistema mostra alguns picos, consequência do efeito de “bridging”, que é o efeito provocado pela interligação entre as partículas, impedindo sua movimentação natural pelo efeito da gravidade no interior do reator. Comparando as Figuras 5.8 e 5.4, nota-se que houve um aumento na eficiência do sistema, quando se utiliza o carvão vegetal.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

As diversas modificações, impetradas, sobretudo, no gaseificador, com vistas a aumentar sua potencialidade de geração de energia, fizeram com que houvesse o distanciamento das características de padrão de funcionamento de todo o sistema. Por exemplo, foram necessários o uso de três tamanhos diferentes de biomassa in natura para que se pudesse evitar problemas comuns em gaseificadores, como os efeitos de interligação entre as partículas (“bridging”), impedindo seus deslocamentos por gravidade. Com este efeito, decorre outro, a formação de canais de fluxo de gases, preferenciais (“channelling”). Como explicam BHAVANAM *et al.* (2011) e THARAM (2003), tais ocorrências são produzidas pela inadequação da massa específica da biomassa. Outros problemas decorrentes desses fatos são: obstrução da passagem de gás no filtro de manga devido ao acúmulo excessivo de alcatrão e dificuldades em se fazer o motor dar partida. Desta forma, apenas foi possível a análise de dados referente à apenas um tamanho de biomassa in natura.

Já para o carvão vegetal, a partir do tamanho da biomassa in natura utilizada anteriormente, tentou-se fragmentar o carvão em pedaços, o mais uniformemente possível, para que não houvesse problemas no fator de empacotamento, mas permitindo, todavia, sua retenção pela grelha do gaseificador. Não houve problemas com relação ao alcatrão devido à não formação do mesmo. A partir da constatação dos resultados dos testes e dos fatos comentados acima, se pôde chegar às seguintes conclusões:

- O teor de umidade da biomassa permaneceu abaixo da umidade máxima recomendada pela literatura, que é de 15%, o que significa uma melhor facilidade para a queima;
- Os índices dos gases CO, CO₂ e O₂ tanto para a biomassa in natura, quanto para o carvão vegetal, mantiveram-se praticamente estáveis, mas com valores diferentes, tendo o carvão vegetal atingido maiores valores do que a biomassa in natura, com a variação da potência elétrica gerada;

- O sistema de desobstrução de cinzas funcionou muito bem, oxigenando melhor tanto a biomassa in natura, quanto o carvão vegetal, quando ativado, se comparado com trabalhos anteriores que utilizaram o mesmo sistema, mas com a alavanca acionada pelo topo do reator. Este fato se deve ao maior espaço proporcionado no interior do reator com a nova montagem;
- A baixa umidade e o tamanho mais ajustado dos tabletes da biomassa in natura, proporcionaram temperaturas de saída do gás pobre mais elevadas do que aquelas observadas em trabalhos anteriores, como os de SILVA, (2017) e de FIGUEIREDO, (2017);
- O carvão vegetal possibilitou testes com menor tempo de duração para as mesmas cargas impostas ao gerador elétrico, apesar de ter apresentado tempo mais dilatado, para se dar partida ao motor;
- O carvão vegetal também contribuiu para elevar a eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador, quando comparada a biomassa in natura. Uma das razões está no poder calorífico do carvão vegetal, que é maior do que aquele da biomassa in natura;
- Os picos de PCI do carvão foram menores do que os da biomassa in natura, devido ao melhor fator de empacotamento;
- Os índices de CO₂ ficaram abaixo dos índices do mesmo gás utilizando biomassa in natura, significando menos lançamentos na atmosfera de gás poluente;
- A mistura ar/combustível (λ) permaneceu praticamente estável, com valores próximos de 1,00, tanto para a biomassa in natura, quanto para o carvão vegetal, revelando que houve uma combustão estequiométrica no interior do motor;
- O carvão vegetal não gera alcatrão, podendo ser utilizado sem ter-se a preocupação de que as partes móveis do motor, como válvulas e eixos por exemplo, venham a serem impedidas de ter seu funcionamento normal, devido estarem impregnadas com o alcatrão.

Pode-se concluir, a partir desse estudo, que ambos os combustíveis têm efeitos positivos para a sua utilização no processo de gaseificação, tendo o carvão vegetal uma pequena vantagem sobre a biomassa, devido a maior eficiência do sistema gaseificador/grupo gerado, e a menor produção de CO₂ nos gases de admissão. Além do mais, o carvão vegetal mostrou ter um melhor fator de empacotamento sobre a biomassa in natura, assim como um menor consumo específico.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como visto neste trabalho, a gaseificação, seja de biomassa, seja de carvão vegetal, tem um enorme potencial ainda a ser alcançado. Por esse motivo, os estudos sobre este assunto são incessantes, e devem sempre visar a obter melhorias e inovações com relação a eficiência do sistema. Sendo assim, segue-se algumas sugestões que podem contribuir para os próximos estudos.

- Melhorar o sistema de oxigenação, quando do uso de carvão vegetal;
- Melhorar e expandir o simulador de carga resistiva;
- Tentar diminuir o tempo de espera para acionamento do motor, quando se utiliza carvão vegetal;
- Elaboração e utilização de um sistema mecânico ou eletrônico de controle do fluxo de ar/combustível para o motor.

REFERÊNCIAS

ANGEL, J. D. M., “*Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna*”, Itajubá, Minas Gerais, 2009.

ARENA, U., “*Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification*”. Department of Environmental Sciences, Second University of Naples, Caserta, Italy. International Journal of Integrated Waste Management: Science and Technology, vol. 32, pp: 625-639, 2011.

BASU, P., “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*”. Academic Press, 2010.

BIO ENERGY. *Evaluation of Emissions from Thermal Conversion Technologies Processing Municipal Solid Waste and Biomass*. Final Report. University of California Riverside, Los Angeles, junho 2009. Disponível em: <http://dpw.lacounty.gov/epd/socalconversion/pdfs/UCR_Emissions_Report_62109.pdf>. Acesso em 2 janeiro 2016.

BHAVANAM, A., SASTRY, R. C., “*Biomass Gasification Process in Downdraft Fixed Bed Reactors: A Review*”, International Journal of Chemical Engineering and Applications, vol. 2, n. 6, dezembro, 2011.

BEZERRA, A. F., *Aprimoramento da Eficiência de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por um Grupo Gerador Alimentado com Gás Pobre*, Tese de D.Sc., Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2016.

BLASI, C. Di., “*Combustion and Gasification Rates of Lignocellulosic Chars*”. Progress in energy and combustion science, 2009.

BHAVANAM A., SASTRY, R. C., “*Biomass Gasification Processes in Downdraft Fixed Bed Reactors: A Review*”. International Journal of Chemical Engineering and Applications, vol. 2, n. 6, December 2011.

BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. *A Review of Biomass Pyrolysis and Pyrolysis Technologies*. Biomass Pyrolysis Liquids. Upgrading and Utilisation, p. 11-92, 1991.

CHADEESINGH, R., *The Biofuels Handbook*, The Fischer-Torpsch Process, The Royal Society of Chemistry, Parte 3, Capítulo 5, pp. 476 – 517, J. G. Speight, Londres, Reino Unido, 2011.

CHAWDHURYA M. A., MAHKAMOV K., “*Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries*”. J. Sci. Res. 3 (1), pp. 51-64, 2011.

CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O., *Biomassa para Energia*, Editora da UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2008.

DEJTRAKULWONG, C., PATUMSAWAD, S., “*Four Zones Modeling of the Downdraft Biomass Gasification Process: Effects of Moisture Content and Air to Fuel Ratio*”. Energy Procedia 52, pp. 142 – 149, 2014.

Energy from Biomass *A Review of Combustion and Gasification Technologies*. World Bank Technical Paper. March 1999.

FAO – Food and Agriculture Organization for United Nations, “*Wood Gas as Engine Fuel*”. A Report of the Mechanical Wood Products Branch of FAO Forestry Paper nº 72, 1986.

FIGUEIREDO, D. L. S., *Produção de Energia Elétrica Via Gaseificador/Grupo Gerador: Estudo de um Caso*, M.Sc. dissertação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2017.

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

GODINHO, M., *Gaseificação e Combustão de Resíduos Sólidos da Indústria Calçadista*, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2006

GÓMEZ-BAREA, A., LECKER, B., *Gasification of Biomass and Waste. Ch. 10. Handbook of Combustion*. Ed. Maximilian Lackner, Franz Winter and Avinash k. Agarwal. 2010 Wiley-VCH.

GTC – Gasification Technologies Council. *Gasification the Waste to Energy Solution*. Texas, Estados Unidos, agosto, 2014. Disponível em: <http://www.gasification-syngas.org/uploads/downloads/GTC_Waste_to_Energy.pdf>. Acesso em: 11 abril, 2019.

Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. SERI U.S. Department of Energy. Março 1988.

HEIDENREICH S., FOSCOLO P. U., “*New concepts in biomass gasification*”. Progress in Energy and Combustion Science xxx, pp.1 – 24, 2014.

HENRIQUES, R. M., “*Potencial para Geração de Energia Elétrica no Brasil com Resíduos de Biomassa Através de Gaseificação*”. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

International Finance Corporation. World Bank Group. Converting Biomass to Energy. 2017 June.

ISIKGOR, F. H., BECER C. R., “*Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers*”. Polym. Chem., n. 6, pp. 4497–4559, 2015

ISMAIL, K. A. R., *Técnicas de Medidas e Instrumentação*, Campinas, São Paulo, ISBN 85-900609-5-0, 2000.

ITEGAN – Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia, “*Desenvolvimento de um Software para a Avaliação da Eficiência da Combustão em Usinas Termoeletricas Operando com Gás e Alternando com Diesel. Estudo de Caso realizado na UTE-Manaúra*”. Relatório Final, Manaus, Amazonas, 2011.

KANURY, A. M.; BLACKSHEAR JR, P. L. *Some considerations pertaining to the problem of wood-burning*. Combustion Science and Technology, v. 1, n. 5, p. 339-356, 1970.

KAUPP, A., GOSS, J. R., *Small Scale Gas Producer-Engine System*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1984.

LAURI P., HAVLÍK P., KINDERMANN G., FORSELL N., BÖTTCHER H., OBERSTEINER M., “*Woody biomass energy potential in 2050*”. Energy Policy 66, pp.19–31, 2014.

LARSON, E. D., “*Small Scale Gasification Based Biomass Power Generation*”. Center for Energy and Environment Studies, Princeton, EUA, 1998.

LISBOA, F. C. DE, *Carbonização e Gaseificação de Resíduos de Macaúba, Tucumã e Cupuaçu para Geração de Eletricidade*, Tese de D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

LIU S., “*Woody biomass: Niche position as a source of sustainable renewable chemicals and energy and kinetics of hot-water extraction/hydrolysis*”. Biotechnology Advances, n. 28, pp. 563–582, 2010.

LUNA, F. E. T., *Efeito de um Reservatório de Gás (Pulmão) na Melhoria da Eficiência Energética de um Gaseificador de Biomassa*, M.Sc. dissertação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2018.

MACAU, H. TELINO, *Melhoria Do Sistema De Lavagem Do Gás Pobre De Um Gaseificador De 4 Kwt*. M. Sc.dissertação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2017.

MARANO, J. J.; CONSULTANT, P. D. *Refinery Technology Profiles Gasification and Supporting Technologies*. Departamento de Energia dos EUA, 2003.

MARTIN, S., et al, “*Tensão Térmica e Taxa de Reação em um Reator para Gaseificação de Biomassa do Tipo Co-corrente*”, Revista Ceres, vol. 57, n. 2, 2010.

MARTINS, M. S. O. S., USHIMA, M. S. A. H., Técnica, C., & de Projeto, C.O.O.R.D.E.N.A.D.O.R. Apresentação de Resultados dos Testes do Sistema de Gaseificação Importado do Indian Institute Of Science – IISc* Profª Drª Suani Teixeira Coelho M.Sc. Silvia Maria Stortine Gonzales Velazquez.

McKENRY, P., “*Energy Production From Biomass (Part 1): Overview Of Biomass*”, Bioresource Technology n. 83, pp. 37 - 46, Elsevier, 2002.

McKENRY, P., “*Energy Production From Biomass (Part 3): Overview Of Biomass*”, Bioresource Technology n. 83, pp. 55 - 63, Elsevier, 2002.

MILNE, T. A., EVANS, R. J., ABATZOGLOU, N., “*Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion*”. National Renewable Energy Laboratory, November 1998.

MOLINO, A., CHIANESE, S., MUSMARRA, D., *Biomass Gasification Technology: The State Of Art Overview*, Jornal Of Energy Chemistry, Elsevier, 2015

MORF, P. O., “*Secondary Reaction of Tar during Thermochemical Biomass Conversion*”, Tese de D.Sc, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Suíça, 2001.

MUKUNDA, H. S., DASSAPA, S., SHRINIVASA, U., *Open Top Wood Gasifiers. Renewable Energy, Sources for Fuels and Electricity*, pp 699 – 728, Island Press, 1993.

NEUBAUER, Y., LIU, H., *Biomass Gasification*, Woodhead Publishing Limited, 2013.

NOGUEIRA, A. L., *Análise dos Efeitos das Condições Operacionais de um Gaseificador Co-corrente de Duplo Estágio na Qualidade do Gás*, Tese de D.Sc, Engenharia de Energia

PATHAK, P. S., KHANT, A., SHARMA, P., “*Biomass production, its utilization and surplus for energy production in India*”, Proc. of the national seminar on biomass management for energy purpose -issue and strategies. - VV Nagar : SPRERI, 2004. - pp. 10-35

PRANDO, D., AIL, S. S., CHIARAMONTI, D., BARATIERI, M., DASAPPA, S., “*Characterization of the Producer Gas from an Open Top Gasifier: Assessment of Different Tar Analysis Approaches*”. Fuel n. 181, pp. 566–572, 2016.

REED, T. B., DAS, A., “*Handbook of Biomassa Downdraft Gasifier Systems*”, Biomass Energy Foundation Press, USA, 1998.

RIBEIRO, R. Da S., *Investigação Experimental e Integração de um Sistema de Geração de Energia Elétrica por Gaseificação de Biomassa para Comunidades Isoladas*, 2007.

RUMÃO, A. S., *Geração de Potência e Energia Elétrica a Partir da Gaseificação de Rejeitos de Biomassa*, Tese de D.Sc., Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2013.

SÁNCHEZ, C. G., *Tecnologia da Gaseificação de Biomassa*, São Paulo, Átomo.

SÁNCHEZ, C. G., LORA, E. S., HAPP, J. F., *Capítulo 7 Gaseificação, disciplina: Tecnologia da Combustão, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP*, 2002.

SCHMIDT J. DI, *Cost-effective CO2 emission reduction and fossil fuel substitution through bioenergy production in Austria: a spatially explicit modeling approach*. PhD thesis. BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria. Vienna, December 2009.

SILVA, F. S., *Efeitos dos Tamanhos Padronizados de Retalhos de Madeira na Melhoria do Funcionamento de um Gaseificador de Biomassa*, M.Sc. dissertação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2017.

TARHAM, S., “*Airflow Channelling Through Fixed Wheat Straw Bed in an Updraft Gasifier Before the Instalation of Gasification*”, *Energy Sources*, 25:12, pp. 1183 – 1191, 2003.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., *Fundamentos da Termodinâmica*, São Paulo, 6ª edição, Edgard Blücher LTDA, 2006.

YANG, Y.B., SHARIFI, V.N., SWITHENBANK, J., “*Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds*”. *Fuel* n. 83, pp. 1553–1562, 2004.

YOSHIKAWA, K., “*R&D (Research and Development) on Distributed Power Generation from Solids Fuels*”, Elsevier/Energy, Science@Direct, 2006.

ZHANG, W., LIU, H., HAI, I. U., NEUBAUER, Y., SCHRÖDER, P., OLDENBURG, H., SEILKOPF, A., KÖLLING, A., “*Gas Cleaning Strategies For Biomass Gasification Product Gas*” , *International Journal of Low-Carbon Technologies*, n. 7, pp. 69 – 74, 2012.