



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

-Mestrado-Doutorado-

**MELHORIA DO SISTEMA DE LAVAGEM DO GÁS POBRE DE UM
GASEIFICADOR DE 4 kW TÉRMICOS**

por

Herculano Telino Macau

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

João Pessoa – Paraíba

Outubro, 2017

HERCULANO TELINO MACAU

**MELHORIA DO SISTEMA DE LAVAGEM DO GÁS POBRE DE UM
GASEIFICADOR DE 4 kW TÉRMICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba, Campus I.

**Orientador: Prof. Dr. Emerson Freitas
Jaguaribe**

João Pessoa – Paraíba

Outubro, 2017

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M117m Macau, Herculano Telino.
Melhoria do sistema de lavagem do gás pobre de um gaseificador de 4
kW térmicos / Herculano Telino Macau. - João Pessoa, 2017.
58 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Gaseificação. 2. Sistema de lavagem. 3. Alcatrão. I. Título.

UFPB/BC

CDU - 533(043)

**MELHORIA DO SISTEMA DE LAVAGEM DO GÁS POBRE
DE UM GASEIFICADOR DE 4Kw TÉRMICOS**

por

Herculano Telino Macau

Dissertação aprovada em 27 de outubro de 2017


Prof. Dr. EMERSON FREITAS JAGUARIBE
Orientador – UFPB


Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES
Examinador Interno - UFPB


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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente à Deus. Aos meus pais Leonardo Telino de Meneses e Vera Lúcia Macau de Meneses, à minha Irmã Andréa Telino Macau Andrade, à minha esposa Kedna Karla Ferreira da Silva Macau e à minha sobrinha Bianca Telino.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus e a todos aqueles que me ajudaram a desenvolver esse trabalho.

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

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe por ter me incentivado a dar continuidade a esse trabalho apesar de todos os empecilhos e por toda a sua contribuição para realização desse trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão pelas diversas contribuições que fez a esse trabalho.

Agradeço à minha família e esposa pela compreensão de minha ausência para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos do Laboratório de Inovação e Laboratório de Carvão Ativado por terem me ajudado de diversas formas para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos pela compreensão de minha ausência para a realização desse trabalho.

MELHORIA DO SISTEMA DE LAVAGEM DO GÁS POBRE DE UM GASEIFICADOR DE 4 kW TÉRMICOS

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é a melhoria do sistema de limpeza do gás pobre, o qual é produzido por um gaseificador co-corrente, topo aberto, com capacidade térmica de 4 kW. Esse gaseificador é acoplado a um grupo gerador com potência nominal de 2 kW. Toda a bancada experimental, a sua montagem e os testes pertinentes, foram realizados nas dependências do Laboratório de Inovação do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. As paredes internas do gaseificador foram reformadas para obtenção de uma superfície menos rugosa para facilitar o fluxo de biomassa através do reator. Um sistema de desobstrução da camada de cinzas foi desenvolvido e instalado no reator para a remoção das cinzas da grelha, facilitando o fluxo do gás. Um sistema de condicionamento de gás pobre baseado na pulverização do gás em um meio aquoso foi montado no sistema gaseificador-grupo gerador. Um sistema rústico de coleta de alcatrão foi desenvolvido e montado na tubulação de admissão do motor de combustão interna (MCI). Os experimentos foram realizados inicialmente para verificar a influência do desobstruidor de camada de cinzas na relação consumo e potência. Em seguida, um sistema de lavagem foi desenvolvido e montado, verificando-se que a quantidade de alcatrão no gás foi reduzida em 40,39 % tendo a potência útil diminuído em 16,17 %, reduzindo-se a 1,71 kW. Contudo, o Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás apresentou um aumento de 7,45 %.

Palavras-chave: gaseificação; sistema de lavagem; alcatrão.

IMPROVEMENT OF THE POOR GAS WASH SYSTEM OF A 4 (THERMAL) kW GASIFIER

ABSTRACT

The main objective of this work is the improvement of the poor gas cleaning system, which is produced by a co-current gasifier, open top, with thermal capacity of 4 kW. The gasifier was connected to a genset having prime power rating of 2 kW. The entire experimental apparatus, its assembly and the relevant tests were carried out in the Laboratory of Innovation, at the Center of Technology at the Federal University of Paraíba. The original inner walls of the reactor made of fire clay, were worn out. Therefore, they were replaced by a tube of stainless steel, making easier the downdraft flux of biomass. An ash clearing system was developed and installed in the reactor to remove ash layer deposited on the grill, helping gas flow. A conditioning system for the poor gas, based on gas pulverization in an aqueous medium was installed in the gasifier exit. A rudimentary tar collection system was developed and mounted in the inlet pipe of the internal combustion engine (ICE). The experiments were performed initially to verify the influence of the ash-clearing device on the consumption/power ratio. The gas washing system was designed, built and assembled. As a result, it produced a 40.39 % reduction in the tar present at the poor gas, as well as 16.17 % in the electrical power generated, which fell to 1.71 kW, due to the effect of pressure drop. On the other hand, the poor gas low heating value showed an increase of 7.45 %.

Keywords: gasification; water cleaning system; tar.

"Our business in life is not to get ahead of others, but
to get ahead of ourselves."
(E. Joseph Cossman)

SUMÁRIO

CAPITULO I.....	14
INTRODUÇÃO.....	14
CAPITULO II.....	16
GASEIFICAÇÃO E CONDICIONAMENTO DO GÁS POBRE.....	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Biomassa.....	16
2.3 Gaseificação.....	17
2.4 Gaseificador.....	18
2.4.1 Gaseificador co-corrente.....	19
2.4.2 Gaseificador contra-corrente.....	19
2.4.3 Gaseificador fluxo-cruzado.....	20
2.4.4 Gaseificadores de leito fluidizado.....	20
2.5 Condicionamento do gás pobre.....	21
2.4.1 Contaminantes.....	21
2.4.2 Material particulado sólido.....	22
2.4.3 Alcatrão.....	23
2.4.4 Métodos de condicionamento do gás produzido pela gaseificação.....	24
2.4 Dissertações e Teses referentes ao condicionamento do gás de síntese produzido pela gaseificação no cenário brasileiro.....	27
CAPITULO III.....	28
CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS.....	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 Correlações matemáticas.....	28
3.2.1 Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador.....	28
3.2.2 Densidade de fluxo de retenção de alcatrão.....	28
3.2.3 Consumo de biomassa.....	29
3.2.4 Consumo específico da biomassa.....	29
3.2.5 Poder calorífico inferior do gás sintetizado via gaseificação.....	29
3.2.6 PCI da madeira.....	30
CAPITULO IV.....	31
DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
4.1 O aparato experimental.....	31
4.1.1 Modificações no gaseificador usado nesse trabalho.....	33
4.1.2 Projeto e implantação de um sistema de desobstrução da camada de cinzas suportada pela grelha.....	34
4.1.3 Componentes do gaseificador original	37
4.1.4 Montagem de um depurador úmido.....	37
4.1.5 Implantação do sistema de coleta de alcatrão.....	39
4.2 Biomassa: condicionamento, análise e consumo.....	40
4.3 Analizador de gases de escape.....	42
4.4 Analizador de energia.....	42
4.5 Procedimento experimental.....	43
CAPITULO V.....	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 Implantação do sistema de desobstrução da camada de cinzas e do sistema de lavagem.....	45
5.2 Aumento da potência utilizando o sistema de lavagem melhorado....	45

5.3	Efeito do sistema de lavagem na densidade de fluxo de retenção de alcatrão.....	46
5.4	Estado de alguns componentes após a utilização do sistema de lavagem.....	47
5.5	Estado do bocal de nebulização e da tubulação antes do venturi.....	47
5.6	Caracterização do sistema com o depurador úmido com remoção de spray.....	48
	CAPITULO VI.....	53
	CONCLUSÃO.....	53
	REFERÊNCIAS.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Gaseificador co-corrente e suas zonas de reação.....	19
Figura 2.2: Gaseificador contra-corrente e suas zonas de reação.....	20
Figura 2.3: Gaseificador fluxo-cruzado e suas zonas de reação.....	20
Figura 2.4: Gaseificador de leito fluidizado e suas zonas de reação.....	21
Figura 2.5: Torre de lavagem de gases.....	25
Figura 2.6: Lavador Venturi.....	26
Figura 2.7: Depurador úmido.....	27
Figura 3.1: Módulo de coleta de alcatrão constituído de uma extensão de tecido de feltro em um suporte metálico.....	29
Figura 4.1: Bancada experimental: (a) configuração inicial, (b) configuração final, (c) foto do gaseificador sem a tubulação que impede a sucção da água pelo motor, (d) foto do gaseificador com a tubulação que impede a sucção de água pelo motor, (e) grupo gerador de 2 kWe, (f) simulador de carga resistiva...	31
Figura 4.2: Modificações da parede interna do reator. (a) Vista inferior do reator original, (b) Vista superior do reator original modificado pela primeira vez, (c) Vista inferior do reator original modificado pela primeira vez, porém já desgastado, (d) Vista superior do reator modificado pela segunda vez e última vez.....	33
Figura 4.3: (a) Protótipo do sistema de desobstrução da camada de cinzas suportada pela grelha, (b) Vista inferior da grelha apresentando uma camada de cinzas sobre ela, (c) movimento de descida do protótipo, (d) movimento de subida do protótipo e (e) Vista inferior da grelha após o processo de rompimento da camada de cinzas.....	35
Figura 4.4: (a) Montagem do dispositivo de rompimento de cinzas utilizando a grelha como gabarito, (b) Vista de topo do reator mostrando o guia superior montado. (c) Vista lateral do sistema de acionamento do movimento de vai-e-vem do prato perfurador.....	36
Figura 4.5: (a) Vista de topo de fracionador de gás sem a tampa do reservatório, (b) vista lateral do sistema de lavagem implantado, (c) vista superior do fracionador de gás com nível de água 5 cm acima da chapa difusora, antes do sistema ser colocado em operação, (d) vista superior do fracionador após o funcionamento do gaseificador com a utilização do sistema novo de lavagem, (e) vista lateral do sistema novo de lavagem com a implementação do tubo removedor de umidade do gás.....	38

Figura 4.6: Chuveiro de plástico com difusor aparafusado na câmara e câmara roscada no tubo.....	39
Figura 4.7: Sistema de coleta de impurezas do gás.....	40
Figura 4.8: (a) Biomassa estocada, (b) serra de bancada em operação e (c) biomassa cortada em cubos.....	41
Figura 4.9: (a) Balança de resolução 0,0001 grama, (b) balança de resolução 1 grama e cronometro, (c) termobalança.....	41
Figura 4.10: Analisador de gases de escape Discovery G4.....	42
Figura 4.11: Analisador de energia HIOKI 3197.....	42
Figura 5.1: Gráfico de consumo de biomassas em cubos de 20 mm de aresta...	45
Figura 5.2: Consumo de biomassa de cubos com aresta de 16 mm.....	46
Figura 5.3: Densidade de fluxo de retenção de alcatrão e particulado no analisador de impurezas do gás pobre.....	46
Figura 5.4: (a) válvula de admissão, (b) mangote de admissão do motor e (c) carburador adaptado.....	47
Figura 5.5: (a) Dispensor de água do venturi e (b) tubulação antes do venturi.	47
Figura 5.6: Consumo específico dos cubos de biomassa de 16 mm de aresta...	48
Figura 5.7: Eficiência total do sistema gaseificador/grupo gerador para biomassa de 16 mm de aresta.....	49
Figura 5.8: Comparação entre a porcentagem de monóxido de oxigênio para o gás pobre quando se utiliza e não utiliza o sistema de condicionamento de gás.....	49
Figura 5.9: Comparação entre o lambda do gás de escape quando se utiliza ou não o sistema de condicionamento de gás pobre.....	50
Figura 5.10: Valores de pressão na utilização do sistema de lavagem para biomassa de 16 mm de aresta. (a) Pressão de sucção na saída da segunda placa condensador, (b) queda de pressão no depurador úmido, (c) queda de pressão no filtro de manga, (d) Sucção na admissão do motor.....	51
Figura 5.11: Presença de óleo nos: (a) depurador úmido, (b) tubos e paredes, (c) paredes.....	52

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1: Reações químicas envolvidas na gaseificação.....	18
Tabela 2.2: Valores típicos de contaminantes no gás produto de gaseificadores de biomassa.....	21
Tabela 2.3: Qualidade do gás requerida para geração de potência.....	22
Tabela 2.4: Classificação dos sistemas de condicionamento físico do gás.....	25
Tabela 4.1: Características da biomassa.....	40

NOMENCLATURA

LI	-	Laboratório de Inovação
OIE	-	Oferta interna de energia
CAPES	-	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
UFPB	-	Universidade Federal da Paraíba
MCI	-	Motor de combustão interna
CO ₂	-	Dióxido de carbono
CO	-	Monóxido de carbono
H ₂ O	-	Água
H ₂	-	Hidrogênio
CH ₄	-	Metano
NH ₃	-	Amônia
H ₂ S	-	Gás sulfídrico
HCl	-	Ácido cianídrico
mg	-	Miligrama
m ³	-	Metro cúbico
mg/Nm ³	-	Miligrama por metro cúbico em condições normais de pressão e temperatura
$\eta_{sist.}$	-	eficiência total do sistema gaseificador-grupo-gerador dada em porcentagem
$Pe_{\text{útil}}$	-	potência elétrica útil dada em kWe
$PCI_{biomassa}$	-	poder calorífico inferior do gás dado em kW/kg de biomassa
M_s	-	consumo de biomassa em kg/h.
$Tx_{alcatrão}$	-	taxa de deposição de alcatrão mais particulado
M_{filtro_antes}	-	massa do filtro utilizado para reter o alcatrão antes da amostragem
M_{filtro_depois}	-	massa do filtro utilizado para reter o alcatrão depois da amostragem
$\Delta t_{amostragem}$	-	tempo de amostragem
M_s	-	consumo da biomassa
M_{s_depois}	-	massa mensurada antes do início do tempo de amostragem
M_{s_depois}	-	massa mensurada após do fim do tempo de amostragem
$Consumo_{esp}$	-	Consumo específico da biomassa
$PCI_{gás}$	-	poder calorífico inferior do gás
%CO	-	porcentagem volumétrica de monóxido de carbono no gás de síntese
$PCI_{madeira}$	-	Poder calorífico inferior da madeira

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

De acordo com Sánchez (2010) , a gaseificação é um processo de conversão térmica de biomassa¹ em gás combustível, que apresenta impurezas, tais como: particulados, voláteis e alcatrão, que podem trazer prejuízos como corrosão e entupimentos de equipamentos e tubos. Desse modo, um dos desafios da gaseificação de biomassa é a necessidade do condicionamento do gás produzido, ou gás pobre para sua utilização em máquinas térmicas, objetivando a geração de energia elétrica.

No Brasil, segundo a Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (2017), ocorreu um aumento de 1,4 %, de 2015 para 2016, na oferta interna de energia (OIE) no setor de renováveis, estando a energia hidráulica liderando o ranking. Contudo, o setor energético teve uma retração de 3,8 %. A parcela da oferta de energia renovável é de 43,5 % e a não renovável, de 56,5 %. A potência instalada para geração de energia a partir da biomassa é de 14.187 MW, apresentando uma estimativa de crescimento de 785 MW.

Apesar do crescimento na oferta de energia a partir da biomassa, a tecnologia utilizada ainda é, principalmente, através da queima direta em caldeiras. Segundo a Wisconsin Grasslands- Bioenergy Network (2017), a eficiência energética dessa tecnologia varia de 60 à 85%. Por outro lado, a eficiência do gaseificador de 20 kWt co-corrente utilizado por BEZERRA (2016), está entre 96 % à 98,36 %.

Segundo Bezerra (2016), existe à necessidade de se aperfeiçoar o sistema de lavagem dos gases, uma vez que parte do alcatrão se deposita nas paredes dos cilindros e nas válvulas do motor, impossibilitando o funcionamento do motor e, conseqüentemente, a geração de energia elétrica.

Considerando a grande limitação de bibliografia existente sobre técnicas de condicionamento do gás pobre, este trabalho busca apresentar e discutir um sistema de remoção de alcatrão e de particulados contidos naquele gás, baseado no seu fracionamento via meio aquoso. Tal sistema foi testado em um gaseificador com capacidade para 4 kW térmicos, cujo gás alimentava um motor do ciclo Otto de 18 hp.

¹ Segundo Sanchez (2010), a biomassa é composta por lignina, hemicelulose e celulose.

Também foram metas deste trabalho:

- Desenvolver um sistema de remoção de cinzas da grelha do reator para manter a continuidade do consumo da biomassa;
- Suplementar o sistema de lavagem do gás, a partir de seu fracionamento em um meio aquoso;
- Testar o sistema implementado e quantificar o percentual de remoção promovido.

Para melhor compreensão desse trabalho, o mesmo encontra-se dividido em cinco capítulos, onde, além da Introdução existem os seguintes Capítulos:

- ✓ II “Gaseificação e Condicionamento do Gás Pobre” – reservado a abordagem sobre gaseificação e condicionamento de gás pobre, fazendo-se, ainda, um levantamento bibliográfico dos trabalhos sobre gaseificação que permitirão uma compreensão maior sobre o tema abordado.
- ✓ III “Correlações Matemáticas” – que serve à descrição das correlações matemáticas utilizadas para se obter: a eficiência total do sistema gaseificador-grupo gerador, a densidade de fluxo de retenção do alcatrão, o consumo de biomassa, o consumo específico de biomassa, o poder calorífico inferior do gás e da madeira.
- ✓ IV “Desenvolvimento Experimental” – que reúne a descrição dos equipamentos e a instrumentação usados neste trabalho, além de historiar todos os ensaios realizados.
- ✓ V “Resultados e Discussão” – onde são expostos todos os dados obtidos na experimentação e os comentários pertinentes.
- ✓ VI “Conclusão” – que como o próprio nome indica, serve ao arremate sobre os pontos mais importantes discutidos neste trabalho.

CAPITULO II

Gaseificação E Condicionamento Do Gás Pobre

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados conceitos fundamentais relacionados com o tema desse trabalho, por exemplo, biomassa, gaseificação, gás pobre, particulado, alcatrão e voláteis. Ademais, serão apresentados os métodos de condicionamento de gás pobre.

2.2 Biomassa

A biomassa é compreendida por Rumão (2013) como qualquer material de origem animal ou vegetal que pode ser utilizado para produção de energia. O Grupo de Pesquisa em Bioenergia (2017) informa que o termo biomassa apresenta definições variadas para diferentes autores, contudo todas elas se restringem a definição de biomassa como qualquer combustível de origem animal ou vegetal de organismos que estiveram vivos recentemente e que seja renovável em um período de tempo inferior a cem anos. Baseado nessa definição os combustíveis fósseis não são considerados renováveis, apesar de serem de origem animal ou vegetal, pois demoram mais de cem anos para serem formados.

A produção de energia pode ser alcançada utilizando um dos seguintes processos de conversão de biomassa: termoquímica, térmica e bioquímica. A térmica é realizada através da queima direta para geração de calor. A conversão termoquímica é realizada através dos processos de pirólise e gaseificação. A bioquímica é realizada através da biodigestão. Enquanto a pirólise produz óleo combustível, a gaseificação e a biodigestão produzem gás combustível.

A gaseificação do carvão, apesar de ser uma tecnologia que teve sua primeira comercialização na Companhia londrina de gás, luz e carvão no ano de 1812, segundo Woolcock e Brown (2013), a gaseificação de biomassa requer a remoção de impurezas do gás combustível para sua utilização em motores de combustão interna a fim de evitar bloqueios e incrustações de tubos e equipamentos.

2.3 Gaseificação

Segundo Godinho (2006), a gaseificação é um processo de conversão térmica para produzir um gás combustível, porém Andrade (2007) considera essa conversão sendo termoquímica. Contudo, Bezerra (2016) entende ser um processo de oxidação parcial, onde a fonte de carbono pode ser de origem mineral ou vegetal, para produção de gás combustível. Para Rumão (2013), a gaseificação é um processo de transformação de combustíveis sólidos em uma mistura gasosa combustível que é denominada de gás de baixo poder calorífico, gás pobre ou manufaturado.

Conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2012), a gaseificação pode ser utilizada tanto para carvão quanto para biomassa, contudo a gaseificação do carvão é um processo comercial, porém a da biomassa ainda está em desenvolvimento e é ainda um desafio. Uma vez que, a gaseificação de biomassa produz um gás combustível com uma quantidade de impurezas considerável, principalmente alcatrão e particulados, que corroem, incrustam e bloqueiam tubos e peças móveis que entram em contato.

Dessa forma, a gaseificação da biomassa é entendida como um processo de conversão termo-química de um combustível de origem animal ou vegetal com um período de renovação da matéria orgânica inferior a 100 anos para formação de um gás combustível que pode ser queimado diretamente para produção de calor, em motores de combustão interna para realização de trabalho ou para síntese de combustíveis.

O processo de gaseificação envolve quatro processos, que de acordo com Rumão (2013), Sanchez (2010), Andrade (2007) e Bezerra (2016), são: secagem, pirólise, combustão e a redução. Na Figura 2.1 observa-se as 4 zonas de um gaseificador co-corrente, onde ocorrem os 4 processos já mencionados.

Na zona denominada secagem, o calor gerado pela combustão da biomassa aquece o combustível, evaporando a água presente nesse.

Na zona de pirólise, o combustível é aquecido na ausência de oxigênio, mantendo-se em uma faixa de temperatura de 280° C à 450°C, que vai promover a degradação termoquímica da lignina, hemicelulose e celulose que compõem a biomassa e produz CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂, alcatrão e ácidos leves.

Na zona de combustão, a biomassa, parte do gás pobre e os produtos da gaseificação reagem com o oxigênio, fornecendo calor para as demais zonas.

Na zona de redução, o carbono e os hidrocarbonetos reagem parcialmente com o oxigênio produzindo, principalmente, monóxido de carbono e hidrogênio. É nessa zona que ocorre de fato a gaseificação.

O processo de gaseificação é composto por reações heterogêneas, envolvendo as fases sólida e gasosa, e homogêneas envolvendo apenas a fase gasosa. As reações podem ser exotérmicas e endotérmicas. Essas reações estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Reações químicas envolvidas na gaseificação

Reações heterogêneas gás-sólido		Entalpia (kJ/mol)
Oxidação do carbono	$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	-110,6
	$C + O_2 = CO_2$	-393,8
Reação de Boudouard	$C + CO_2 = 2 CO$	172,6
Reação de gás-d'água	$C + H_2O = CO + H_2$	131,4
Formação de metano	$C + 2H_2 = CH_4$	-74,93
Reações homogêneas (fase gasosa)		
	$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	-41,2
	$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$	201,9
Craqueamento do alcatrão		
Alcatrão+Vapor+Calor→ $CO + CO_2 + CH_4 + etc.$		
Oxidação de parte dos produtos da pirólise		
$CO + H_2 + CH_4 + 2,5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O$		

Fonte: Sánchez (2010)

As reações apresentadas na Tabela 2.1, ocorrem basicamente entre gases e gases e carbono. Os gases podem ser: oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor d'água, hidrogênio e metano. O craqueamento do alcatrão e a oxidação de parte dos produtos da pirólise também estão representados no Tabela 2.1. Todavia, o craqueamento do alcatrão necessita de calor para decompor seus compostos em componentes mais leves, e menos nocivos para tubulações e equipamentos com peças móveis.

2.4 Gaseificador

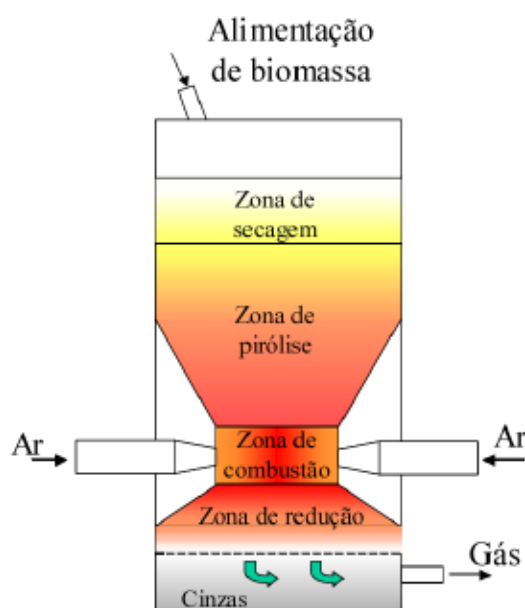
O gaseificador é essencialmente um reator onde a biomassa perde umidade, passa pelo processo de pirólise, combustão e gaseificação. Os gaseificadores são classificados quanto ao

movimento relativo entre o agente gaseificante e a biomassa em: co-corrente, contra-corrente, fluxo cruzado e leito fluidizado.

2.4.1 Gaseificador co-corrente

O gaseificador co-corrente é um dos gaseificadores mais difundidos para geração de potência mecânica, devido à baixa quantidade de alcatrão presente no gás. O gaseificador co-corrente tem esse nome, pois o fluxo de combustível sólido e o agente oxidante estão no mesmo sentido. A alimentação do gaseificador é realizada pelo topo e o sentido do agente oxidante é descendente.

Figura 2.1 – Gaseificador co-corrente e suas zonas de reação

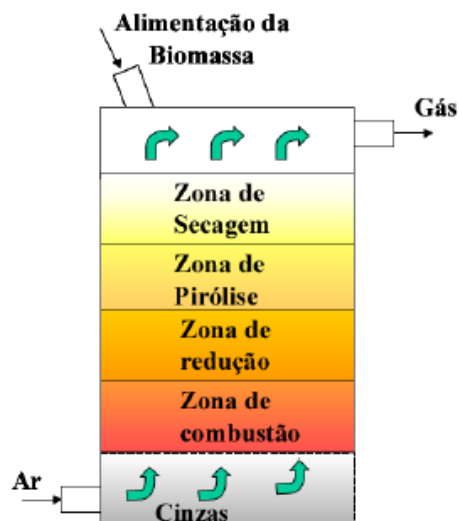


Fonte: Retirado de Andrade (2007)

2.4.2 Gaseificador contra-corrente

O gaseificador contra-corrente é um dos mais simples. Sendo a alimentação do reator realizada pelo topo, apresentando fluxo descendente, e o fluxo de ar se dá em sentido ascendente. Neste gaseificador, a zona de combustão fica acima da grelha e logo acima desta está a redução. No caso do gaseificador co-corrente, essas duas zonas estão em posições invertidas.

Figura 2.2– Gaseificador contra-corrente e suas zonas de reação

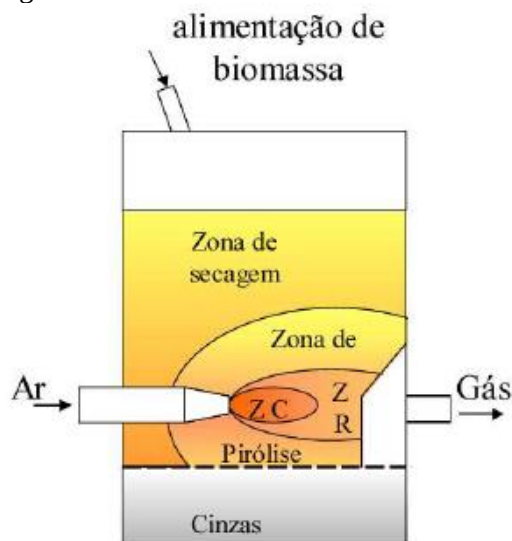


Fonte: Retirado de Andrade (2007)

2.4.3 Gaseificador fluxo-cruzado

O gaseificador de fluxo cruzado recebe esse nome devido ao fluxo de gás se dar de forma perpendicular ao fluxo da biomassa que ocorre de modo descendente.

Figura 2.3 – Gaseificador fluxo-cruzado e suas zonas de reação



ZC – Zona de combustão

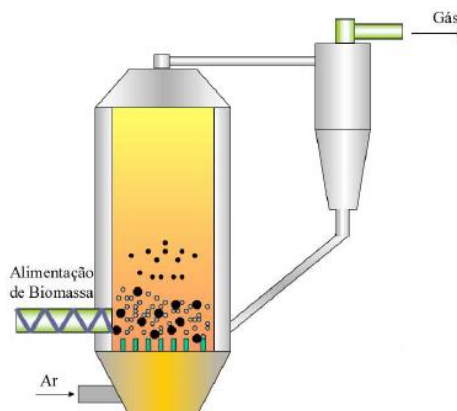
ZR – Zona de redução

Fonte: Retirado de Andrade (2007)

2.4.4 Gaseificadores de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado é essencialmente um reator cilíndrico e vertical com um leito de material inerte, como alumina, areia e cinzas, suportado por uma placa distribuidora e fluidizado por uma corrente de ar, melhorando as condições de troca de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação.

Figura 2.4 – Gaseificador de leito fluidizado e suas zonas de reação



Fonte: Retirado de Andrade (2007)

2.5 Condicionamento do gás pobre

2.5.1 Contaminantes

Segundo Anis e Zainal (2011) e Woolcock & Brown (2013), entende-se como impurezas do gás pobre: cinzas, carvão, compostos condensáveis, metais alcalinos (como sódio e potássio, existentes na fase de vapor), óxidos de nitrogênio, óleo betuminoso (constituído de uma mistura complexa de hidrocarbonetos oxigenados existentes na fase de vapor no gás manufaturado), ácido sulfídrico, sulfeto de carbonila, ácido clorídrico, amônia, ácido cianídrico. Todos esses componentes podem ser divididos em 3 grandes grupos: particulados, alcatrão e contaminantes gasosos.

Tabela 2.2 – Valores típicos de contaminantes no gás produto de gaseificadores de biomassa.

Tipo	Material particulado (mg/Nm ³)	Alcatrão (mg/Nm ³)
Leito fixo co-corrente	100-8.000	10-6.000
Leito fixo contra-corrente	100-3.000	10.000-150.000

Fonte: Adaptado de Sánchez (2010)

Na Tabela 2.2 são apresentados valores típicos de alcatrão e particulados para os gaseificadores classificados como: leito fixo co-corrente e contra-corrente. O gaseificador co-corrente apresenta uma menor quantidade de alcatrão e maior quantidade de particulado. Isso

se deve à passagem do alcatrão pela zona de combustão, craqueando-o, e pela passagem do gás através da zona de gaseificação e cinzeiro, onde existe a presença de cinzas e particulados pequenos e leves o suficiente para serem carregados pelo gás. Referente ao gaseificador contracorrente, o alcatrão não passa pela zona de combustão, contudo atravessa a zona de secagem que funciona como um filtro de particulado que promove a remoção dos particulados contidos no gás.

Tabela 2.3 – Qualidade do gás requerida para geração de potência

	Unidades	Motor de combustão interna
Material particulado	mg/Nm ³	<50
Tamanho de partícula	Micrometro	<10
Alcatrão	mg/Nm ³	<100

Fonte: Retirado de Sánchez (2010)

Na Tabela 2.3, aparecem três parâmetros importantes – material particulado, tamanho de partícula e alcatrão – a serem explorados para se determinar a qualidade mínima do gás com condição de ser utilizado em motores de combustão interna (MCI). De acordo com esta Tabela, o motor de combustão interna pode admitir uma quantidade de particulado inferior a 50 mg/Nm³ com o tamanho de partícula inferior a 10 micrometros. Referente ao alcatrão, o valor admitido está na ordem de 100 mg/Nm³. Dessa forma, para geração de potência de pequena escala, a quantidade de alcatrão deve ser reduzida em até 60 vezes quando se utiliza um gaseificador co-corrente com o valor típico máximo de alcatrão mostrado na Tabela 2.2. Para uma quantidade de particulado presente no gás de até 8.000 mg/Nm³, este deve ser reduzido para 50 mg/Nm³ com o tamanho de particulado inferior a 10 micrometros. Dessa forma, deve-se controlar o alcatrão e o particulado para o bom funcionamento do MCI quando utilizado em conjunto com um gaseificador.

2.5.2 Material particulado sólido

Sánchez (2010) entende por particulado sólido as cinzas e o carvão pequeno suficiente para ser carregado pelo gás pobre. Godinho (2006) apresenta o material particulado como sendo pó, cinza volante, fumos, fuligem e aerossol. À essa lista, Reed e Das (1988) acrescenta os itens spray e névoa. Os pós são partículas sólidas maiores que 1 micrometro e menores que 1.000 micrometros. O fumo – que é formado pela condensação de vapores –, a cinza volante e a névoa são partículas menores que 1 micrometro. O spray é referente a gotas com diâmetros superiores

a 10 micrometros. A fuligem representada por partículas formadas pela combustão incompleta, constituída de uma mistura de carbono e compostos voláteis condensados – com diâmetro entre 0,01 e 100 micrometros. E o aerossol é definido como sólidos ou líquidos suspensos no gás.

Dessa forma, entende-se por particulado sólido o pó e as cinzas volantes que são carregadas pelo gás. E esse material é formado dentro do reator à medida que a biomassa é processada, diminuindo-se o tamanho do carvão e produzindo-se cinzas que são pequenas o suficiente para que sejam carregadas com o gás pobre. A partir da Tabela 2.3, deve-se ter uma preocupação maior com a remoção do pó, spray e fuligem, tendo em vista que o diâmetro deles é superior a 10 micrometros.

2.5.3 Alcatrão

Segundo Woolcock e Brown (2013), alcatrão é constituído por compostos orgânicos condensáveis, que variam de produtos oxigenados primários à pesados hidrocarbonetos desoxigenados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Anis & Zainal (2011), reporta em seu trabalho que existem diversas definições de alcatrão que são baseadas na aplicação particular do gás. Em uma delas, Milne e Evans (1998) define o alcatrão como o composto orgânico em grande parte aromático produzido pela conversão térmica ou oxidação parcial de qualquer material orgânico. Baumhagl e Karellas (2011) apresenta uma definição em que o alcatrão é entendido como todos os contaminantes orgânicos, presente no gás, com peso molecular superior ao benzeno. Sánchez (2010) define alcatrão como uma mistura de hidrocarbonetos oxigenados ou não, provenientes da gaseificação, que se formam na fase de pirólise entre 200 e 500 °C- o alcatrão sai do gaseificador na forma de vapor e aerossóis – e condensam na faixa de temperatura de 50 °C à 400 °C. Segundo Min (2010), o alcatrão contém uma fração condensável orgânica dos produtos da gaseificação, constituindo em sua maior parte de compostos aromáticos.

Woolcock e Brown (2013), Anis e Zainal (2011), Milne e Evans (1998), Baumhagl e Karellas (2011), Sánchez (2010) e Min (2010) afirmam a necessidade de se remover o alcatrão do gás devido ao seu efeito corrosivo e de encrustação de tubulações. Ademais, o alcatrão pode infiltrar em folgas que podem impedir o funcionamento de equipamentos rotativos, alternativos e porosos, tais como válvulas de manobra e de admissão do motor, pistões e filtros.

O alcatrão é entendido nesse trabalho como uma mistura de compostos orgânicos originado da gaseificação de biomassa capaz de condensar impedindo o movimento de válvulas

e equipamentos para manobras de fluxo de gás e funcionamento de um MCI para produção de energia elétrica.

2.5.4 Métodos de condicionamento do gás produzido pela gaseificação

A remoção de impurezas como alcatrão e particulado é necessária para o bom funcionamento de motores de combustão interna, a fim de evitar travamentos e bloqueio dos equipamentos envolvidos no processo.

As técnicas para o condicionamento do gás podem ser classificadas em relação ao local onde os contaminantes são removidos, e também em relação a temperatura em que a remoção dos contaminantes ocorre. A técnica de condicionamento é dita primária quando a remoção de impurezas ocorre dentro do reator e secundária, se ocorre fora dele. As técnicas são também classificadas quanto à temperatura do processo de condicionamento: Limpeza do gás à quente, Limpeza do gás à frio e limpeza do gás morno. A limpeza à quente é referente a processos que ocorrem na faixa de temperatura de 400 °C à 1300°C. A limpeza à frio ocorre a temperaturas abaixo do ponto de ebulição da água. A limpeza do gás morno ocorre a temperaturas acima do ponto de ebulição da água e abaixo de aproximadamente 300 °C (WOOLCOCK E BROWN, 2013).

De acordo com Anis e Zainal (2011), sistemas de condicionamento do gás via meios mecânicos são classificados em dois tipos: seco e molhado. Sendo que o método seco ocorre a temperaturas na faixa de aproximadamente 200 °C a 500°C. Nesse método o alcatrão encontra-se na forma de vapor. Por outro lado, o método molhado é referente à faixa de temperaturas de 20 a 60 °C e o alcatrão encontra-se na forma de gotas. A Tabela 2.4 apresenta alguns métodos de condicionamento classificados em seco e molhado.

Tabela 2.4 – Classificação dos sistemas de condicionamento físico do gás

Tipo	Equipamento
Seco	Ciclone, separador rotativo de partículas, precipitadores eletrostáticos, filtros cerâmicos, de particulado, de tecido, etc.
Molhado	Torres de spray, lavadores de coluna empacotada, precipitadores eletrostáticos molhados, ciclones molhados, lavadores venturi, etc.

Fonte: Adaptado de Anis E Zainal (2011).

Sendo que os métodos físicos de remoção de alcatrão, segundo Paethanom et al. (2012), são caracterizados pelo processo de adsorção e absorção do alcatrão pelo meio filtrante. É comum a utilização de torres de lavagem, lavadores venturi, depuradores úmidos e depuradores úmidos de leito recheado em muitas plantas de gaseificação.

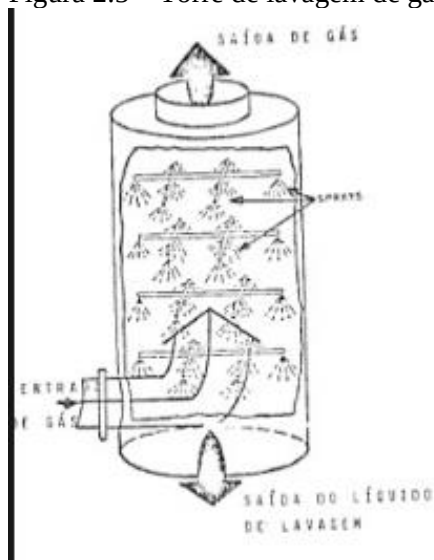
Como o propósito desse trabalho é o desenvolvimento de um sistema de remoção física do alcatrão, utilizando o método molhado, serão mostrados a seguir os seguintes métodos: torres de lavagem, lavadores venturi e depuradores úmidos.

i. Torres de lavagem

De acordo com Paethanom et al. (2012), as torres de lavagem é o mais simples e econômico dos métodos referente à sua estrutura. Contudo, segundo Anis e Zainal (2011), a sua eficiência quanto à remoção de alcatrão está na faixa de 10 a 25% e de particulado, de 60-98%.

As torres de lavagem são equipamentos cilíndricos em que o gás entra por sua extremidade inferior contendo contaminantes e atravessa uma chuva de gotículas produzida por bicos pulverizadores. Essas gotículas colidem com esses contaminantes arrastando-os para fora do sistema, ver Figura 2.5.

Figura 2.5 – Torre de lavagem de gases

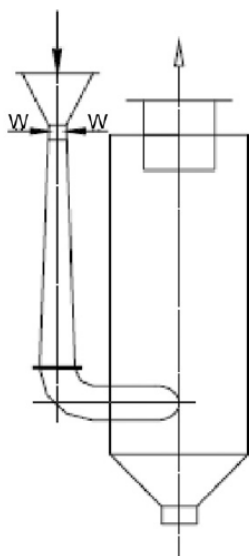


Fonte: Retirado de Sánchez (2010).

ii. Lavadores venturi

De acordo com Sánchez (2010), o lavador venturi é um sistema de lavagem que introduz água de lavagem na garganta do venturi ou a montante dela afim de colidir com o gás e suas impurezas, particulados e gotas de alcatrão, que passam a alta velocidade na garganta. Segundo Anis e Zainal (2011), o lavador venturi promove uma redução de alcatrão em 50-90 %, ver Figura 2.6.

Figura 2.6 – Lavador Venturi

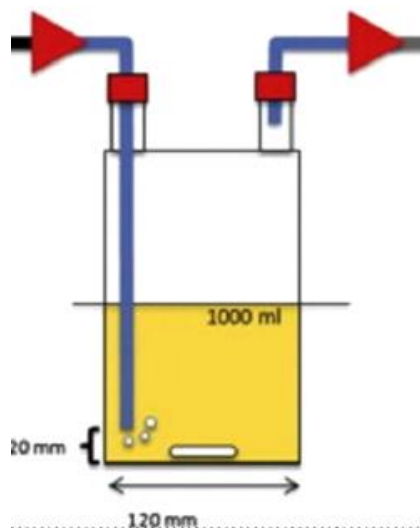


Fonte: Retirado de Anis e Zainal (2011)

iii. Depuradores úmidos

Os depuradores úmidos são o foco principal desse trabalho, eles são compostos por um tubo imerso em um meio líquido que tem o objetivo de remover as impurezas através da absorção, adsorção e choque do gás e suas impurezas com a água. De acordo com Ahmad e Zainal (2016), a eficiência de remoção de alcatrão do sistema, utilizando como meio de lavagem a água, é de 22% considerando o benzeno e 54% sem considera-lo, ver Figura 2.7.

Figura 2.7 – Depurador úmido



Fonte: Retirado de Shen et al. (2016).

Um estudo de caso desenvolvido por Monteiro (2017) mostrou que o depurador úmido utilizado como sistema de condicionamento do gás pobre para uma coluna de 8 cm de água acima do prato perfurado, reduziu o alcatrão e particulado somados em mais de 50 %, porém o poder calorífico do gás também foi reduzido em pouco menos de 50% de seu poder calorífico inferior. Dessa forma, dando indícios de que é possível remover o alcatrão através do fracionamento do gás em uma coluna de água.

2.6 Dissertações e Teses referentes ao condicionamento do gás de síntese produzido pela gaseificação no cenário brasileiro

Uma pesquisa bibliográfica realizada no Banco de Teses e Dissertações da CAPES (2016) utilizando como palavra-chave “gaseificação” apresentou como resultado - 338 trabalhos entre teses e dissertações, sendo 3 deles referentes a utilização de um sistema de condicionamento do gás pobre. Contudo, nenhum dos três trata da remoção de alcatrão utilizando depuradores úmidos.

CAPITULO III

CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS

3.1 Introdução

O objetivo desse capítulo é apresentar as correlações matemáticas necessárias para a obtenção dos valores de eficiência do sistema gaseificador-grupo gerador, consumo de biomassa, consumo específico de biomassa, poder calorífico inferior (PCI) da biomassa e a quantidade de alcatrão e particulado existentes no gás produzido.

3.2 Correlações matemáticas

3.2.1 Eficiência do sistema gaseificador/grupo-gerador

Segundo Rumão (2013), a eficiência do sistema gaseificador/grupo-gerador é definida como a potência útil sobre o PCI da biomassa multiplicada por seu consumo. Com isso, temos:

$$\eta_{sist.} = \frac{Pe_{\text{útil}}}{PCI_{biomassa} M_s} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Na qual:

$\eta_{sist.}$ – eficiência total do sistema gaseificador-grupo-gerador dada em porcentagem;

$Pe_{\text{útil}}$ – potência elétrica útil dada em kWe;

$PCI_{biomassa}$ – poder calorífico inferior do gás dado em kW/kg de biomassa;

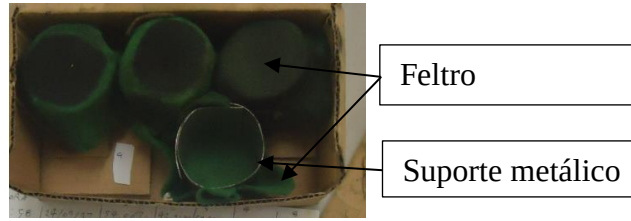
M_s – consumo de biomassa em kg/s.

3.2.2 Densidade de fluxo de retenção de alcatrão

A densidade de fluxo de retenção de alcatrão do gás pobre, $Tx_{alcatrão}$, é definida como a quantidade de alcatrão, em massa, refreada em um filtro de tecido, composto por uma extensão de feltro, em um suporte metálico, ver Figura 3.1, por unidade de área e de tempo:

$$Tx_{alcatrão} = \frac{M_{\text{feltro_depois}} - M_{\text{feltro_antes}}}{\Delta t_{amostragem}} \quad (3.2)$$

Figura 3.1 – Módulo de coleta de alcatrão constituído de uma extensão de tecido de feltro em um suporte metálico



Onde:

M_{feltro_antes} – massa do feltro utilizado para reter o alcatrão antes da amostragem em miligramas (mg);

M_{feltro_depois} – massa do feltro utilizado para reter o alcatrão depois da amostragem em mg;

$\Delta t_{amostragem}$ – tempo de amostragem em minutos (min).

3.2.3 Consumo de biomassa

O consumo da biomassa, M_s , do gaseificador, é dado por:

$$M_s = \frac{M_{s_depois} - M_{s_antes}}{\Delta t_{amostragem}} \quad (3.3)$$

Na qual:

M_{s_depois} – massa mensurada antes do início do tempo de amostragem em mg;

M_{s_depois} – massa mensurada após do fim do tempo de amostragem em mg.

3.2.4 Consumo específico da biomassa

De acordo com Rumão (2013), o consumo específico da biomassa, $Consumo_{esp}$, é dado pelo consumo da biomassa sobre a potência elétrica útil gerada.

$$Consumo_{esp} = \frac{M_s}{Pe_{\acute{u}til}} \quad (3.4)$$

3.2.5 Poder calorífico inferior do gás sintetizado via gaseificação

O PCI representa a quantidade de energia efetivamente disponível liberada durante a combustão. De acordo com Rumão (2013), o PCI do gás é obtido pela equação abaixo:

$$PCI_{g\acute{a}s} = -0,004738. (\%CO)^2 + 0,4149. (\%CO) - 0,1057 \quad (3.5)$$

Onde:

$PCI_{gás}$ –poder calorífico inferior do gás em MJ/Nm³;

$\%CO$ –porcentagem volumétrica de monóxido de carbono no gás pobre.

3.2.6 PCI da madeira

De acordo com Rumão (2013), o PCI da biomassa é determinado a partir da seguinte equação:

$$PCI_{madeira} = 4756 - 53,418.(\%UM) \quad (3.6)$$

Na qual:

$\%UM$ –umidade da biomassa em porcentagem %.

CAPITULO IV

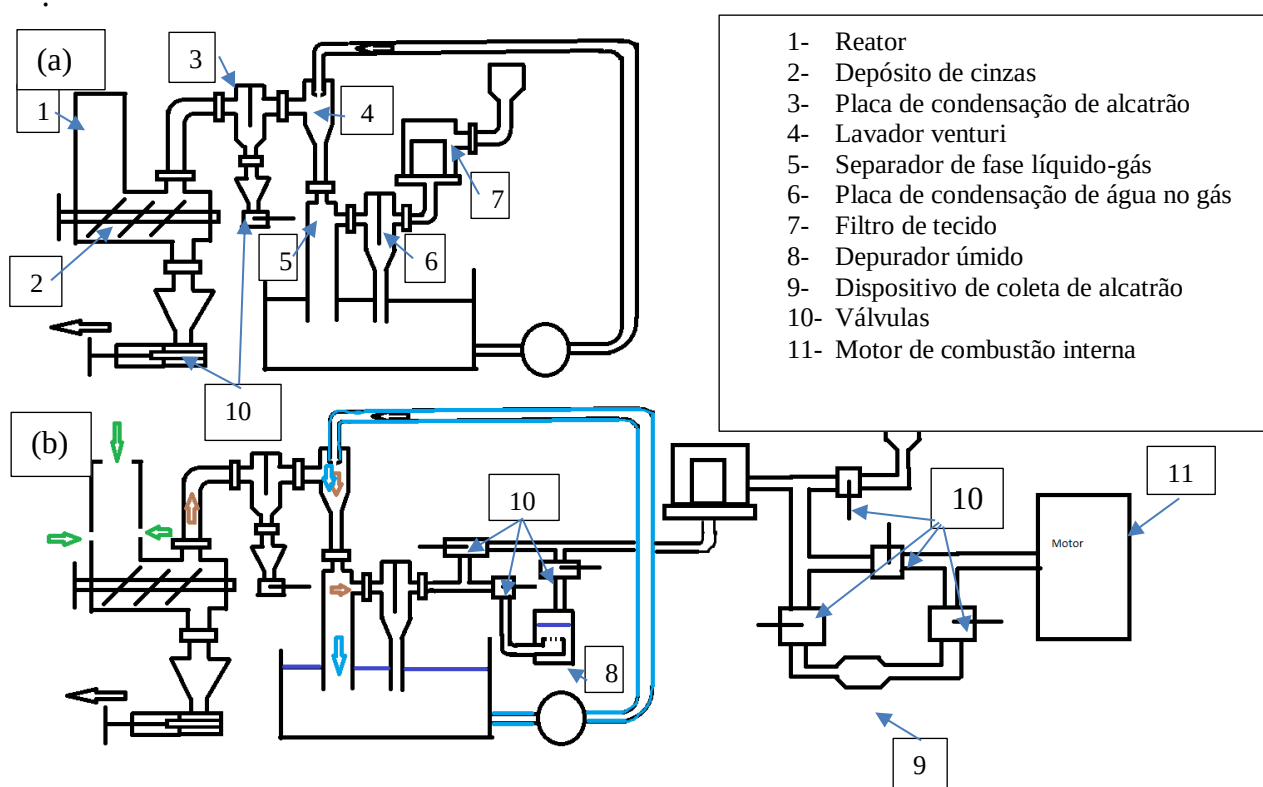
DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

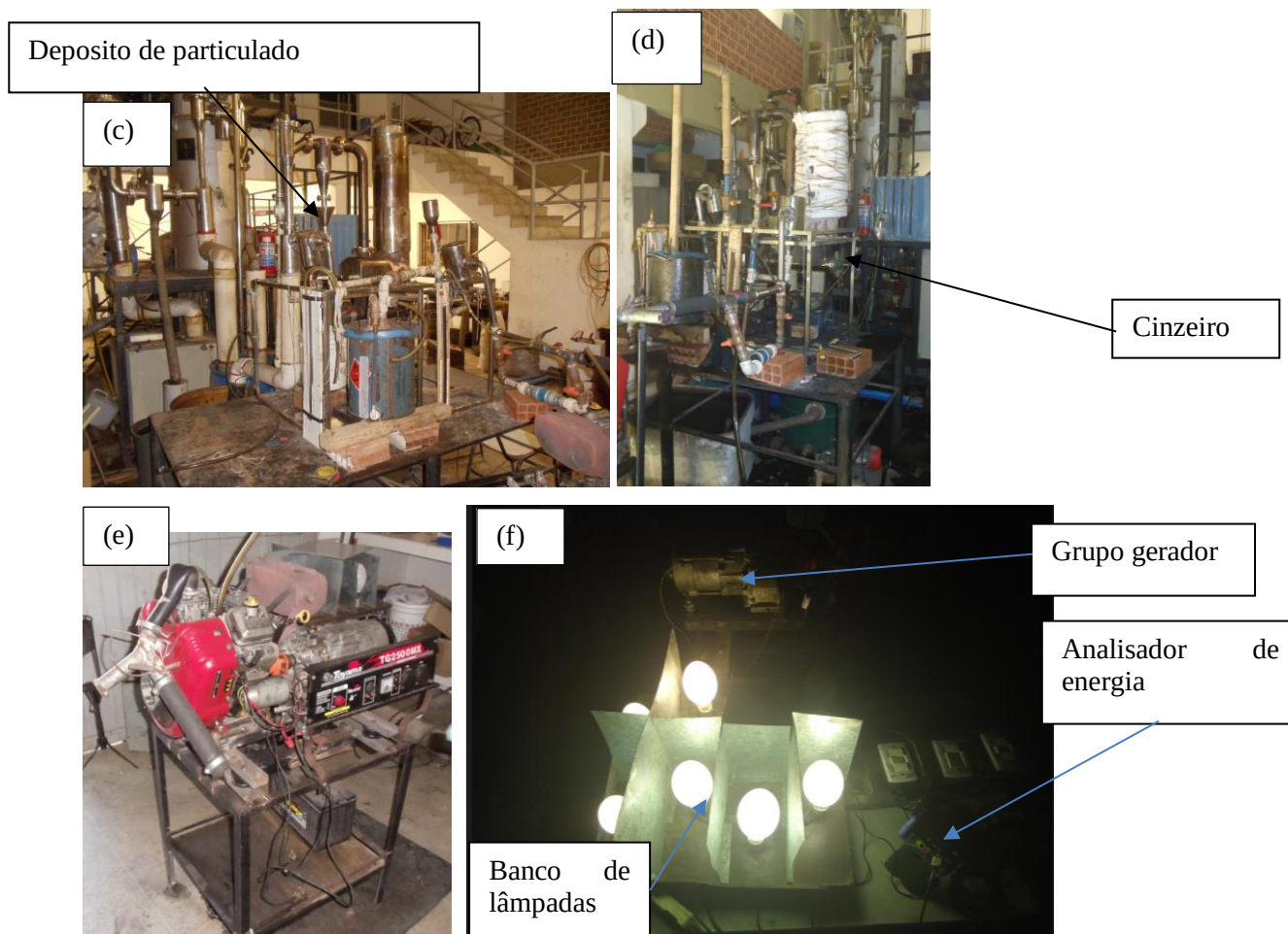
Neste capítulo será apresentado o aparato experimental, e o experimento. Faz referência, ainda, as modificações realizadas na parede interna do reator, ao projeto e instalação de um sistema de rompimento da camada de cinzas que se é formada sobre a grelha, à montagem de um depurador úmido e de um sistema de coleta de alcatrão. Ao final, é apresentado o procedimento experimental utilizado.

4.1 O aparato experimental

Para a realização dos experimentos, foram utilizados um gaseificador indiano de 4 kWt, um grupo gerador de 2 kWe e um simulador de carga resistiva, formado por seis lâmpadas de 250 – 280 W e duas de 150 – 180 W. A bomba que promove a circulação da água para manter o gaseificador funcionando consome 130 W.

Figura 4.1 – Bancada experimental: (a) configuração inicial, (b) configuração final, (c) foto do gaseificador sem a tubulação que impede a sucção da água pelo motor, (d) foto do gaseificador com a tubulação que impede a sucção de água pelo motor, (e) grupo gerador de 2 kWe, (f) simulador de carga resistiva.





Na Figura 4.1 (a), é mostrada a configuração original do gaseificador. Na Figura 4.1 (b), aparece a configuração final do gaseificador/grupo gerador com a implantação de um novo sistema de lavagem e do sistema de medição de alcatrão. Na Figura 4.1 (c), aparece a foto do gaseificador sem o sistema que impede a sucção da água pelo motor. Na Figura 4.1 (d), aparece a foto do gaseificador com um tubo de 1 metro acima do depurador úmido, que é utilizado para evitar o arraste de água para dentro do motor. Na Figura 4.1 (e), aparece o grupo gerador utilizado de 2 kWe e o simulador de cargas com capacidade de 1,8 kWe à 2,04 kWe, ver Figura 4.1 (f).

Os equipamentos utilizados para condicionar o tamanho da biomassa e realizar as medições necessárias estão elencadas abaixo:

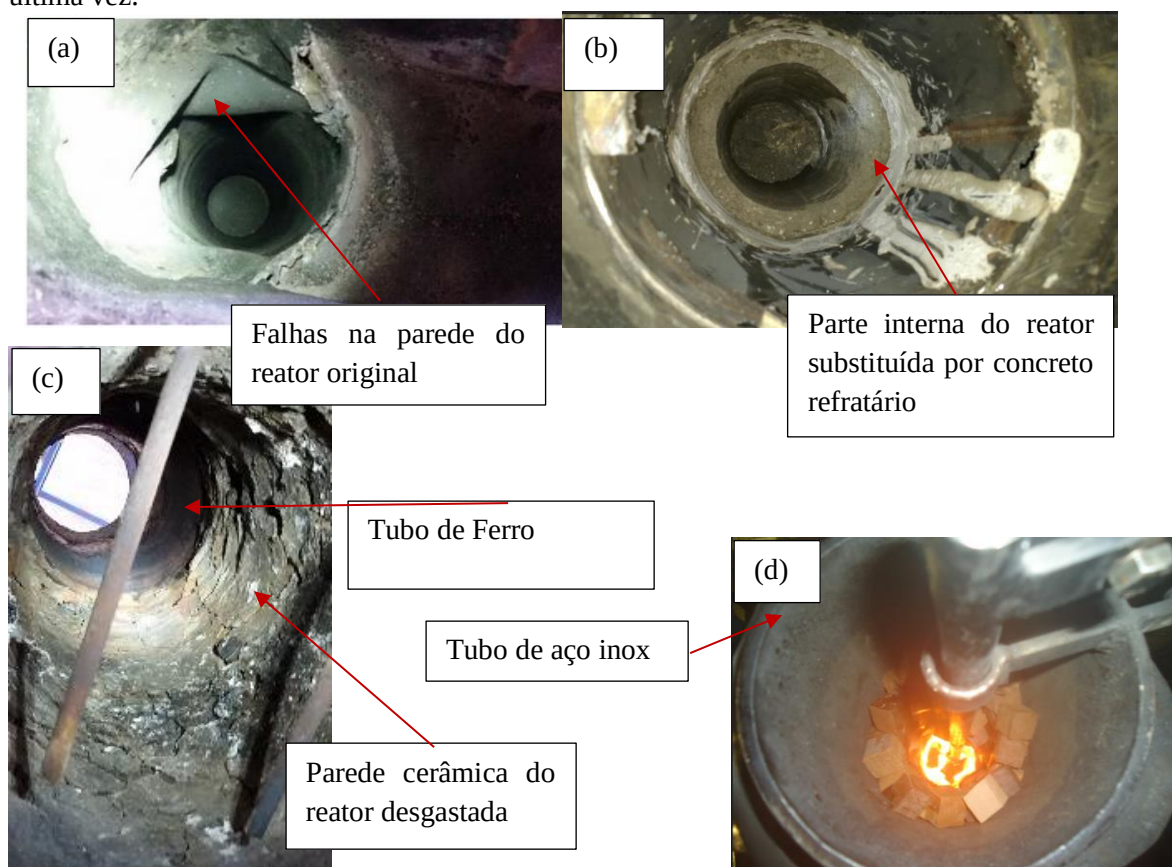
- 2 balanças de precisão, com resolução de 1 g e 0,0001 g, cada;
- 1 termobalança;
- 1 cronometro;
- 1 serra de bancada;
- 1 analisador de gases de escape da alfatest;
- 1 analisador de energia;

- 1 sistema de coleta de alcatrão

4.1.1 Modificações no gaseificador usado nesse trabalho

O Gaseificador utilizado nesse trabalho, apresentava a configuração inicial mostrada na figura 4.1 (a). Contudo, as paredes internas do reator no início desse trabalho já haviam sido modificadas duas vezes. Na primeira vez, a parede interna do reator feita de inox se apresentava deformada impedindo o fluxo de biomassa através do reator, provocando entupimentos constantes, ver Figura 4.2 (a). Com isso, a parede de inox do reator foi retirada e substituída por concreto refratário nas zonas de reação e no restante do reator foi colocado um tubo de ferro, ver Figura 4.2 (b) e (c). Contudo, o início desse trabalho começou com a parede de concreto refratário bem desgastada, ver Figura 4.2 (c). As falhas no concreto impediam a gaseificação da biomassa e promoviam interrupções frequentes do fluxo de biomassa. A partir desse momento, decidiu-se por substituir a parede do reator completamente por inox, ver Figura 4.2 (d).

Figura 4.2 – Modificações da parede interna do reator. (a) Vista inferior do reator original, (b) Vista superior do reator original modificado pela primeira vez, (c) Vista inferior do reator original modificado pela primeira vez, porém já desgastado, (d) Vista superior do reator modificado pela segunda vez e última vez.



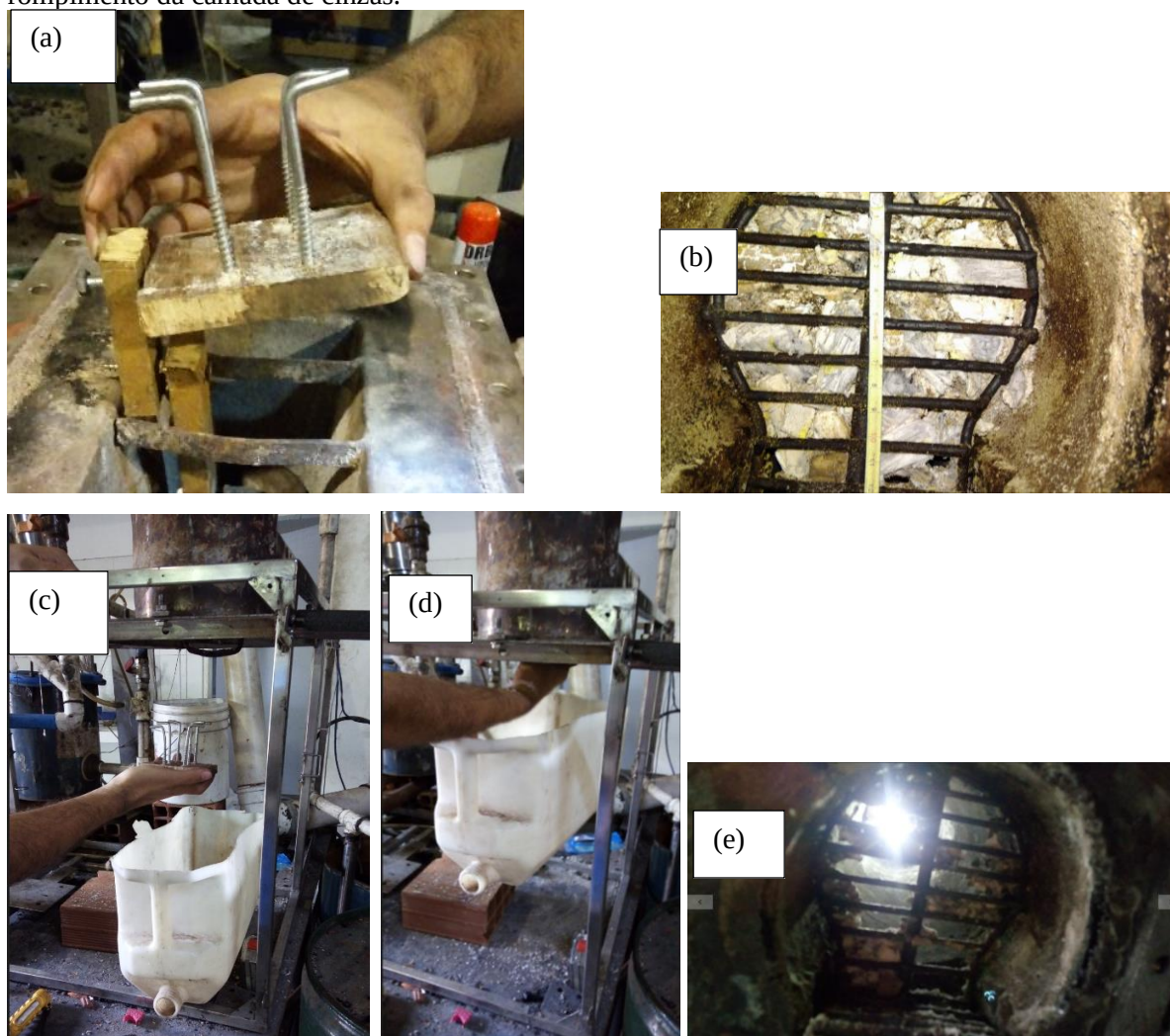
Com a substituição da parede refratária por um tubo de inox, como mostrado na Figura 4.2 (d), o processo de gaseificação passou a funcionar corretamente sem interrupções de fluxo. Entre as paredes interna e externa do reator foi depositado vermiculita expandida a fim de isolar termicamente o reator. Com o envelopamento da parede externa do reator com uma camada de 60 mm de isolante térmico denominado fibrocerâmica a temperatura da parede externa do reator reduziu de 180 °C para 70 °C.

Após a modificação da parede interna do gaseificador, decidiu-se projetar um dispositivo capaz de romper a camada de cinzas que é formada sobre a grelha que suporta todo o leito do reator.

4.1.2 Projeto e implantação de um sistema de desobstrução da camada de cinzas suportada pela grelha

Para a realização do projeto de um sistema de desobstrução da camada de cinzas, foi construído um protótipo composto por 6 parafusos tipo L fixados em um bloco de madeira, ver Figura 4.3 (a). Em seguida, utilizou-se a camada de cinzas que estava depositada sobre a grelha, Figura 4.3 (b), e então com o protótipo fez-se um movimento de vai e vem com os parafusos através da grelha, Figura 4.3 (c) e (d). Após esse processo a camada de cinzas sobre a grelha foi removida, ver Figura 4.3 (e).

Figura 4.3 – (a) Protótipo do sistema de desobstrução da camada de cinzas suportada pela grelha, (b) Vista inferior da grelha apresentando uma camada de cinzas sobre ela, (c) movimento de descida do protótipo, (d) movimento de subida do protótipo e (e) Vista inferior da grelha após o processo de rompimento da camada de cinzas.

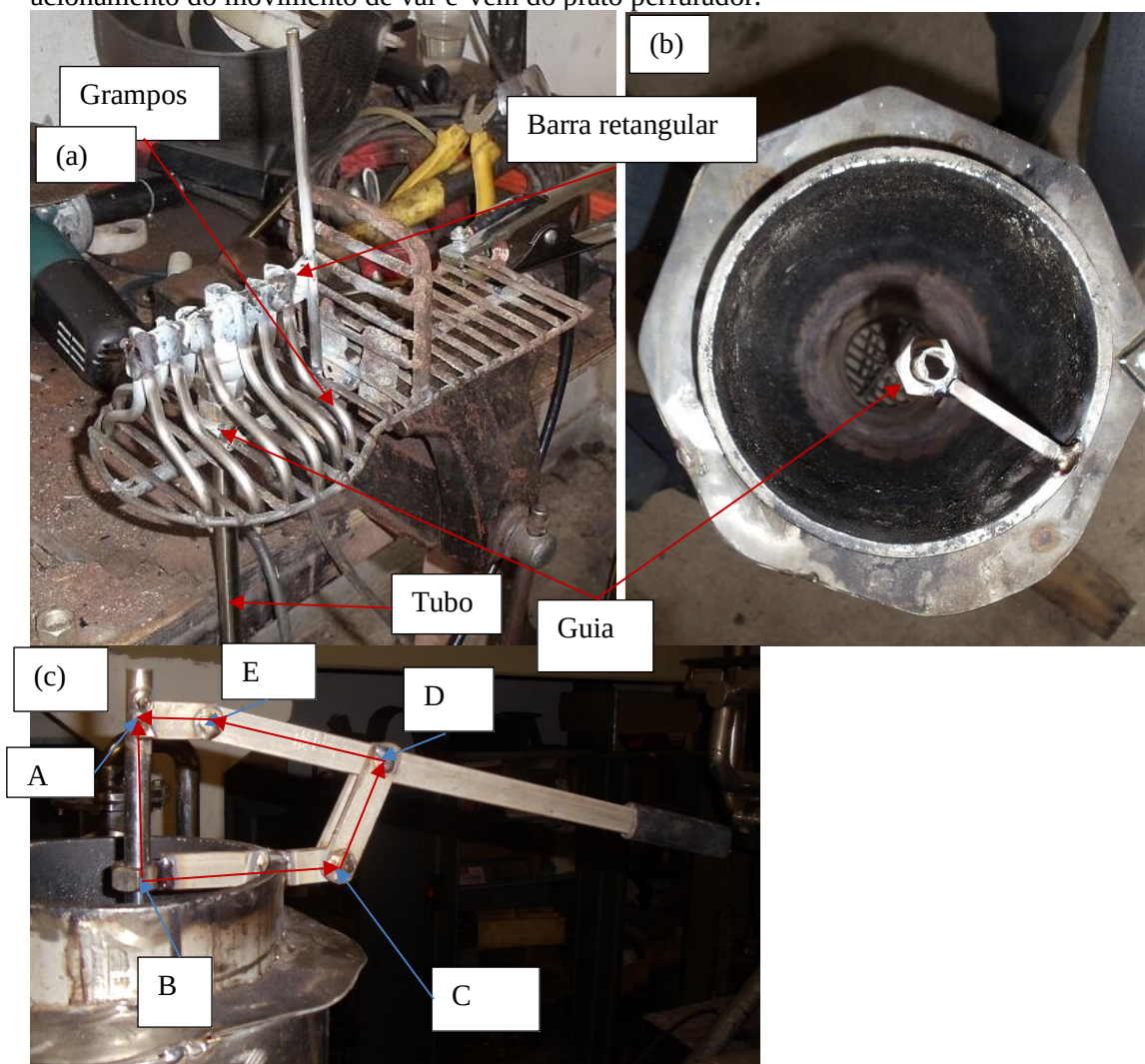


Através desse pequeno experimento verifica-se que o rompimento da camada de cinzas utilizando essa configuração é funcional e de fácil implementação. A partir disso, foi idealizado um dispositivo capaz de suportar elevadas temperaturas e que o movimento de vai-e-vem desse dispositivo fosse acionado pelo topo do reator, evitando modificações ao cinzeiro que provavelmente provocaria problemas de insuflamento de ar com essa intervenção; deve ser ressaltado também que o acionamento por cima permite-nos verificar se o dispositivo está, de fato, funcionando.

Para o bom funcionamento do sistema, o prato com os grampos que perfuram a camada de cinzas não deve se deslocar no mesmo plano da grelha. Dessa forma, um guia foi colocado na grelha e outro no topo do gaseificador, ver Figura 4.4 (a) e (b). Os grampos utilizados devem ser capazes de perfurar a camada de cinzas sobre a grelha e empurrá-las para o cinzeiro. Sendo assim, os grampos foram feitos a partir de uma barra circular, usinados em um dos lados para

formar uma ponta afiada e conformados com a ajuda de uma morsa de bancada e um braço de alavanca para que todos os grampos apresentassem o formato de um “S”, ver Figura 4.4 (a). Os grampos foram soldados em uma barra retangular, utilizando como gabarito para as posições de soldagem dos grampos a própria grelha, Figura 4.4 (a).

Figura 4.4 – (a) Montagem do dispositivo de rompimento de cinzas utilizando a grelha como gabarito, (b) Vista de topo do reator mostrando o guia superior montado. (c) Vista lateral do sistema de acionamento do movimento de vai-e-vem do prato perfurador.



O dimensionamento do dispositivo de acionamento foi determinado por trigonometria, para que na posição de perfuração máxima, o vetor $\overrightarrow{AB}$ apresentasse o seu módulo igual à 15 cm. Para tanto, foram definidos previamente os módulos dos vetores $\overrightarrow{AE}$ e $\overrightarrow{CB}$, que são iguais à 3 cm e 10 cm, respectivamente. O vetor $\overrightarrow{DC}$ e $\overrightarrow{ED}$ foram determinados por trigonometria e seus módulos, são iguais a 6,5 cm e 10 cm, respectivamente. Todas as peças foram confeccionadas em inox por estar exposta às condições de temperatura que variam de 30 °C à 1100 °C.

5.1.3 Componentes do gaseificador original

Os componentes do gaseificador original estão apresentados na figura 4.1 (a) em forma de esquema. Os componentes são:

- 1- Reator
- 2- Depósito de cinzas
- 3- Placa de condensação de alcatrão
- 4- Lavador venturi
- 5- Separador de fase líquido-gás
- 6- Placa de condensação de água no gás
- 7- Filtro de tecido
- 8- Depurador úmido
- 9- Dispositivo de coleta de alcatrão

Os componentes presentes no gaseificador original que fazem o condicionamento do gás pobre são: placa de condensação de alcatrão, lavador venturi, placa de condensação de água no gás e o filtro de manga.

Além desses componentes, foi adicionado um depurador úmido representado na Figura 4.1 (b) pelo número oito.

4.1.4 Montagem de um depurador úmido

Para a melhoria do sistema de lavagem do gás pobre, idealizou-se um sistema de fracionamento de gás através de um meio aquoso que seria capaz de remover as impurezas contidas no gás pobre, tais como particulados e os aerossóis condensados do alcatrão.

Um trabalho de monografia realizado por MONTEIRO (2017) e um artigo publicado por AHMAD E ZAINAL (2016), mostraram que é possível reduzir a quantidade de alcatrão em mais de 50 % quando se utiliza um depurador úmido. Contudo, eles não utilizaram o sistema em conjunto com um grupo gerador para geração de potência elétrica.

Para confecção do fracionador do gás foi utilizada uma chapa de polipropileno de 2 mm de espessura, sendo ela usinada para ficar no formato de um disco, de modo a encaixar em um chuveiro de piscina. Foram feitos 37 furos de 2 mm de diâmetro na chapa. Os furos estão espaçados em 10 mm de centro a centro de cada furo. A chapa foi fixada no chuveiro através de 4 parafusos. A Figura 4.5 (a), mostra a vista superior do depurador úmido sem a tampa, onde pode ser observado o fracionador de gás instalado no chuveiro e conectado a um tubo por onde

entra o gás. O tanque de lavagem, apresentado na Figura 4.5 (b), onde a chapa difusora foi instalada tem capacidade para 20 litros de água, porém os testes foram realizados com o nível d'água 5 cm acima do chuveiro, ver Figura 4.5 (c), que corresponde a uma altura de 19 cm acima do fundo do tanque e 11 cm abaixo da tampa. Essa distância do nível d'água para a tampa é crítica, pois parte da água estava sendo succionada para o motor impedindo a manutenção do nível da água. Devido a isso, instalou-se um tubo de duas polegadas de diâmetro na saída do depurador úmido de modo a evitar a sucção da água para o motor, aumentando-se assim a quantidade de combustível admitida pelo motor e consequentemente a potência gerada, ver Figura 4.5 (b) e (e).

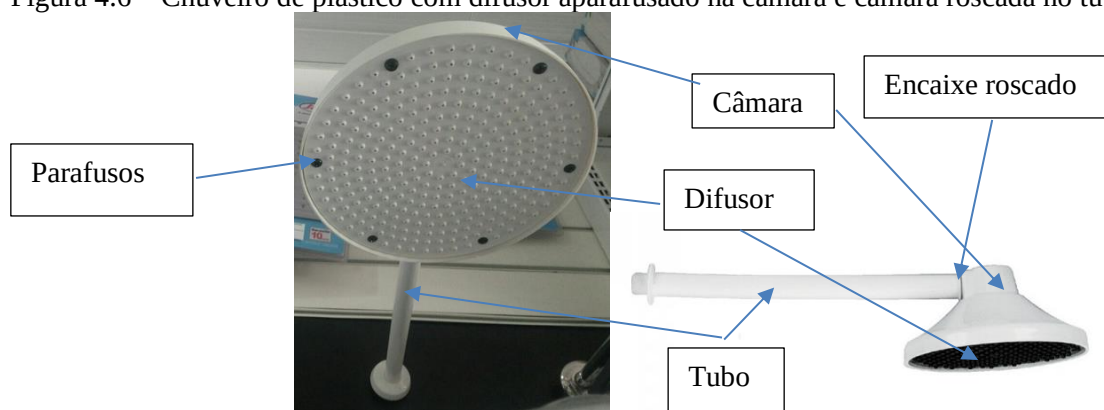
Figura 4.5 – (a) Vista de topo de fracionador de gás sem a tampa do reservatório, (b) vista lateral do sistema de lavagem implantado, (c) vista superior do fracionador de gás com nível de água 5 cm acima da chapa difusora, antes do sistema ser colocado em operação, (d) vista superior do fracionador após o funcionamento do gaseificador com a utilização do sistema novo de lavagem, (e) vista lateral do sistema novo de lavagem com a implementação do tubo removedor de umidade do gás.





Os materiais utilizados para construção do depurador úmido foram um chuveiro de plástico de piscina com a placa difusora aparafusada e a câmara do chuveiro rosqueada no tubo por onde flui a água. Dessa forma, a câmara do chuveiro pôde ser rosqueada em um tubo no interior do tanque mostrado na Figura 4.5 (a) e uma chapa de polipropileno pôde ser confeccionada para ser aparafusada na câmara do chuveiro. O formato do chuveiro utilizado está na Figura 4.6.

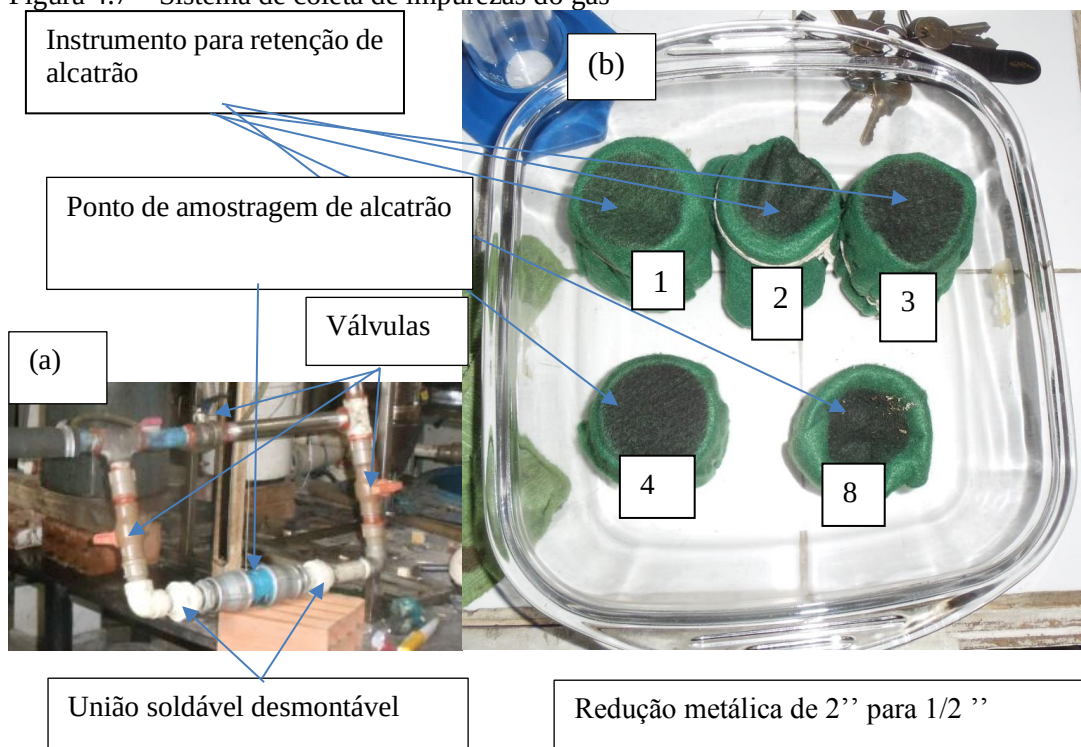
Figura 4.6 – Chuveiro de plástico com difusor aparafusado na câmara e câmara rosçada no tubo



4.1.5 Implantação do sistema de coleta de alcatrão

Para a quantificação da quantidade de alcatrão no gás foi construído um sistema composto por duas tubulações paralelas. Uma das tubulações é reta e possui uma válvula que impede a passagem do gás através dela. A outra tubulação possui duas válvulas que quando fechadas totalmente isolam um tubo, impedindo a entrada e/ou saída do gás, ver Figura 4.7 (a). Adjacentes a essas duas válvulas, existem duas uniões soldáveis e desmontáveis, que no momento em que essa tubulação é isolada, elas podem ser desmontadas através das duas uniões supracitadas. Na segunda tubulação foi colocado um tubo azul rosçado, que em seu interior fica alocado uma extensão de feltro, suportada por uma estrutura metálica, que é mostrado na Figura 4.7 (b).

Figura 4.7 – Sistema de coleta de impurezas do gás



Após a implantação do sistema de coleta de alcatrão. A medição do alcatrão foi realizada através de um filtro de feltro, que interceptava o fluxo de gás pobre, ver módulos desse filtro na Figura 4.7 (b). Por pesagem verifica-se a massa de alcatrão captada no espaço de 3 min.

4.2 Biomassa: condicionamento, análise e consumo

A biomassa cortada na forma de cubos foram separadas em 3 lotes que se distinguiram pelo comprimento das arestas dos cubos e pelo tipo de madeira (denominadas de mista, ou densa, de acordo com as suas massas específicas). Ou seja, 16 mm mista, 20 mm mista e 20 mm densa.

Tabela 4.1 – Características da biomassa

Teste	Aresta (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Umidade (%)	Cinzas (%)	Particulado (%)	TGA			
						Carbo-no fixo (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)	Úmidade (%)
1 (mista)	20	435,41	12,873	9,2	0,28	6,259	5,197	88,544	12,55
2 (densa)	20	862,44	7,61	-	-	15,413	2,031	82,556	11,62
3 (mista)	16	435,41	12,873	12,02	-	6,259	5,197	88,544	12,55

Na Tabela 4.1, podem ser observadas as características da biomassa utilizada nos testes, relacionadas à: tamanho da aresta, massa específica, umidade relativa, cinzas, particulados e voláteis.

Figura 4.8 – (a) Biomassa estocada, (b) serra de bancada em operação e (c) biomassa cortada em cubos.



A biomassa utilizada é proveniente de palletes de madeira, reciclados e desmontados, que são armazenados em um galpão, conforme mostrado na Figura 4.8 (a). Após a seleção, materiais estranhos à biomassa são removidos e a madeira é cortada em barrotes, e, posteriormente, em cubos. Para tanto utilizou-se uma serra de bancada, ver Figura 4.8 (b) e (c).
 Figura 4.9 – (a) Balança de resolução 0,0001 grama, (b) balança de resolução 1 grama e cronometro, (c) termobalança.



Para se medir a massa específica da biomassa, levou-se em conta as arestas dos cubos e a massa do cubo, avaliada através de uma balança de precisão, com resolução de 0,0001 g, ver Figura 4.9 (a).

Para se avaliar a umidade relativa das amostras, utilizou-se uma termobalança, ver Figura 4.9 (c).

As massas de cinzas e de particulados eram determinadas após a realização de cada teste, após se esvaziar os depósitos de particulados e de cinzas, ambos representados na Figura 4.1 (c) e (d). Para tanto utilizava-se uma balança com resolução de 1 g, ver Figura 4.9 (b).

Em parceria com o Laboratório de Carvão Ativado do Centro de Tecnologia da UFPB, através de um TGA, determinou-se a porcentagem de cinzas, carbono fixo, voláteis, umidade e o PCI da biomassa.

A alimentação do reator é realizada pelo topo, enchendo-se, no primeiro momento, a metade do reator com carvão, até que este atinja o nível acima das entradas laterais de ar. O restante do reator é preenchido com biomassa.

O consumo de biomassa foi aferido seguindo os seguintes passos:

- 1- Completa-se o reator completamente com biomassa;
- 2- Espera-se 5 minutos;
- 3- Com um recipiente de carga completamente cheio de biomassa e com peso conhecido, derrama-se a biomassa dentro do reator até que fique totalmente cheio;
- 4- Pesa-se a massa final do recipiente com a biomassa.

Com o peso do recipiente completamente cheio de biomassa e com o peso do recipiente após ser descarregado sobre o reator, e com o tempo de 5 minutos; temos que o consumo de biomassa pelo reator é dado pela subtração dos dois pesos dividido por 5 minutos.

4.3 Analisador de gases de escape

Figura 4.10 – Analisador de gases de escape Discovery G4



O analisador de gases de escape Discovery G4 tem a capacidade de mensurar hidrocarbonetos (hexano e propano), monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxigênio e Nox. Ele também fornece como resultado o lambda, que é a razão ar-combustível real dividido pela estequiométrica.

4.4 Analisador de energia

Figura 4.11 – Analisador de energia HIOKI 3197



O aparato HIOKI 3197 é um analisador de energia que é capaz de mensurar frequência, corrente, potência e voltagem tanto em redes monofásicas como trifásicas. Esse analisador é conectado aos fios do banco de lâmpadas de modo a medir a frequência elétrica e a potência gerada pelo grupo gerador, que alimenta aquele simulador de carga.

4.5 Procedimento experimental

O experimento seguiu os seguintes passos:

- 1- A biomassa foi cortada e separada segundo a Tabela 4.1;
- 2- A massa específica da biomassa foi mensurada;
- 3- O teor de umidade da biomassa foi medido;
- 4- A alimentação do gaseificador foi realizada pelo topo com carvão até a altura das entradas laterais do agente oxidante, e o restante foi preenchido com biomassa;
- 5- O simulador de carga, sem nenhuma carga, foi acoplado ao grupo gerado;
- 6- O analisador de energia foi conectado ao simulador de carga;
- 7- Pesa-se os módulos de coleta de alcatrão mostrados na Figura 4.7;
- 8- O gaseificador foi aceso através dos furos laterais, utilizando-se um maçarico, e a bomba utilizada para recirculação de água no venturi foi ligada;
- 9- A sonda lambda foi posicionada no cano de escape do motor para verificação da composição do gás;
- 10- Liga-se o grupo gerador após 7 minutos que o gaseificador foi aceso;
- 11- Aumentou-se a carga em uma lâmpada;
- 12- A mistura ar/combustível foi ajustada para um lambda próximo de 1, utilizando uma válvula em Y;
- 13- Ajustou-se a borboleta do carburador até que a frequência elétrica se estabiliza em 60 HZ;
- 14- Esperou-se até que todos os parâmetros de frequência e potência se estabilizassem;
- 15- Avaliou-se o consumo de biomassa pesando-se segundo o procedimento descrito na seção 5.2.
- 16- Verificou-se a potência elétrica gerada, a composição do gás de escape, as pressões de sucção no ponto anterior ao depurador úmido, a queda de pressão do depurador úmido e a queda de pressão do filtro de manga;
- 17- Posicionou-se a sonda lambda em um furo no tubo de admissão para verificar a composição do gás pobre;

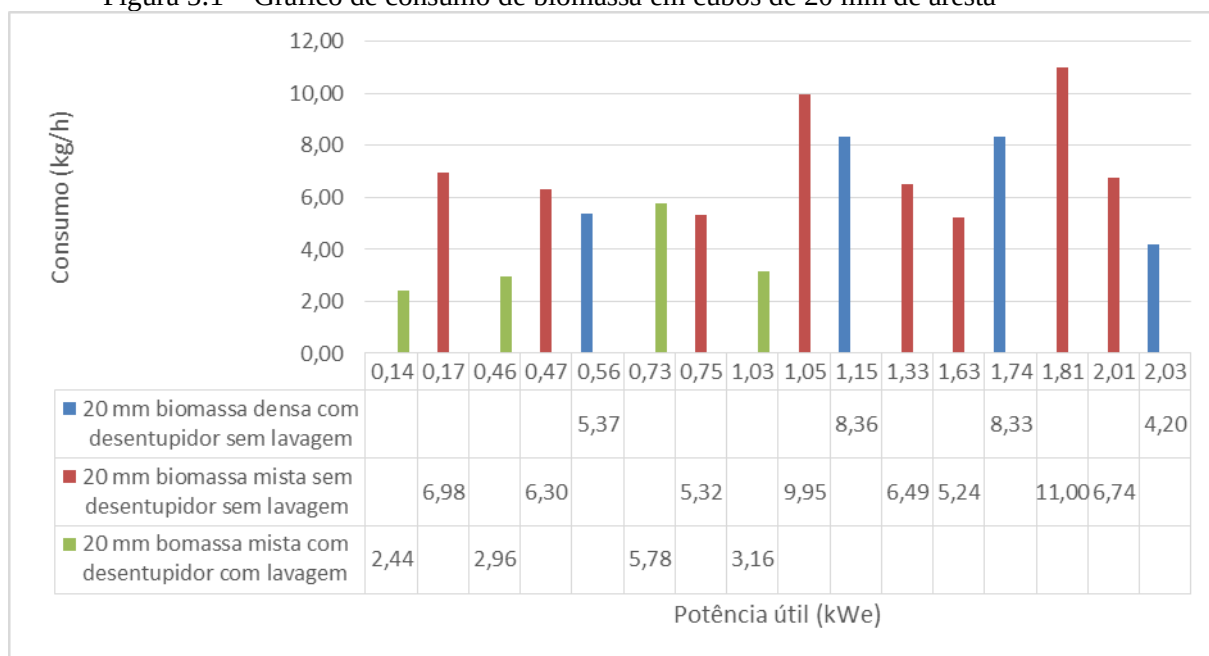
- 18- Verifica-se a qualidade do gás pobre
- 19- Realiza-se o by-pass através de uma manobra de válvulas do dispositivo mostrado na Figura 5.7 para conduzir o gás através dos módulos de tecido de feltro para coleta de alcatrão por 3 minutos.
- 20- Realiza-se uma nova manobra de válvulas para permitir a passagem do gás diretamente para o motor de combustão interna sem que passe pelos módulos de coleta de alcatrão, isolando-os do contato com o gás;
- 21- Os módulos são removidos do sistema e pesados;
- 22- Voltar ao passo 11 até que todas as lâmpadas já estejam acesas.

CAPITULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Implantação do sistema de desobstrução da camada de cinzas e do sistema de lavagem

Figura 5.1 – Gráfico de consumo de biomassa em cubos de 20 mm de aresta

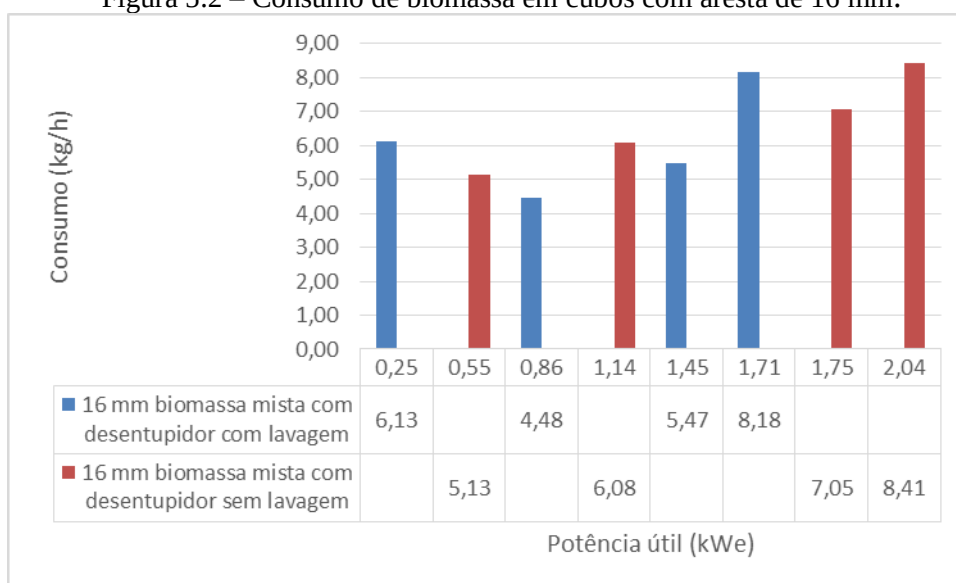


Examinando-se a Figura 5.1, observa-se que a utilização do sistema de desobstrução da camada de cinzas fez com que o consumo da biomassa de 20 mm de aresta, com e sem a utilização do sistema de lavagem, passasse a seguir um padrão crescente de consumo e diretamente proporcional à potência útil. Verifica-se, no entanto, que houve uma queda de consumo na máxima potência gerada. No caso em que se utilizou a biomassa de 20 mm de aresta, biomassa mista, sem aquele sistema, o padrão de consumo observado foi do tipo dente de serra, não apresentando um consumo de biomassa proporcional à potência útil.

Na Figura 5.1, observa-se que com a utilização do sistema de lavagem, a potência útil gerada pela gaseificação da biomassa de 20 mm, densa, com o desobstruidor da camada de cinzas reduziu de 2,03 kWe para 1,03 kWe quando se implantou o novo sistema de lavagem apresentado na Figura 4.5 (b).

5.2 Aumento da potência utilizando o sistema de lavagem melhorado

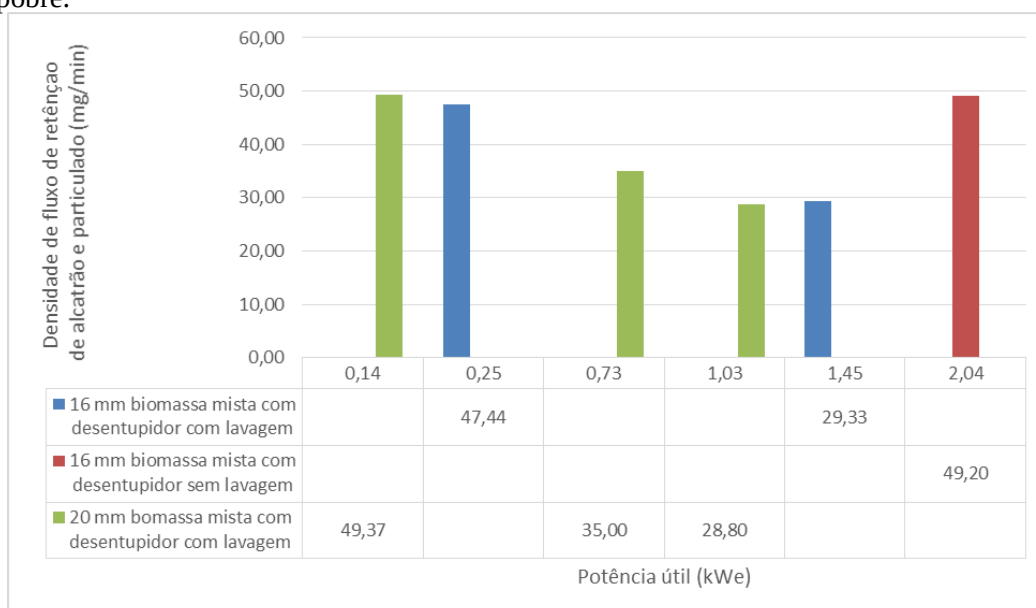
Figura 5.2 – Consumo de biomassa em cubos com aresta de 16 mm.



Na Figura 5.2, observa-se que o consumo da biomassa de 16 mm, mista, utilizando ou não o sistema novo de lavagem com o desumidificador, aumenta, proporcionalmente, com a potência útil. A potência máxima gerada chegou a 2,04 kWe, sem a utilização do sistema de lavagem e caiu para 1,71 kWe com a utilização daquele sistema.

5.3 Efeito do sistema de lavagem na densidade de fluxo de retenção de alcatrão

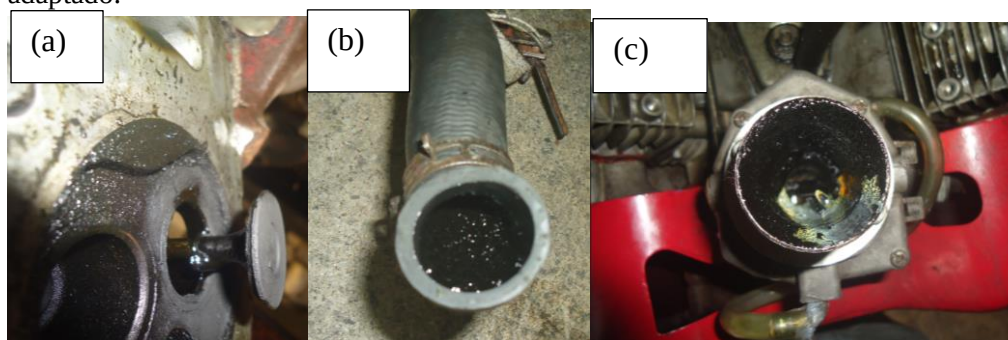
Figura 5.3 – Densidade de fluxo de retenção de alcatrão e particulado no analisador de impurezas do gás pobre.



Na Figura 5.3 observa-se que a densidade de fluxo de retenção de alcatrão é decrescente com a potência quando se utiliza o sistema de lavagem, tanto com a presença do desumidificador, ou sem ele. A densidade de fluxo de retenção para biomassa de 20 mm, mista, com o sistema de lavagem e sem o desumidificador é igual à 28,8 mg/min para a potência útil de 1,03 kWe. Para a biomassa de 16 mm, mista, com o sistema de lavagem novo e com o desumidificador, a densidade de fluxo de retenção de alcatrão é de 29,33 mg/min para a potência útil de 1,45 kWe. Para a biomassa de 16 mm, mista, sem o sistema de lavagem a densidade de fluxo de retenção de alcatrão é de 49,2 mg/min para a potência útil de 2,04 kWe.

5.4 Estado de alguns componentes após a utilização do sistema de lavagem.

Figura 5.4 – (a) válvula de admissão, (b) mangote de admissão do motor e (c) carburador adaptado.



Nas Figura 5.4 (a), (b) e (c) observa-se a presença de um óleo pegajoso no corpo da válvula, no mangote e no carburador, mesmo com a utilização do sistema de lavagem implementado.

5.5 Estado do bocal de nebulização e da tubulação antes do venturi

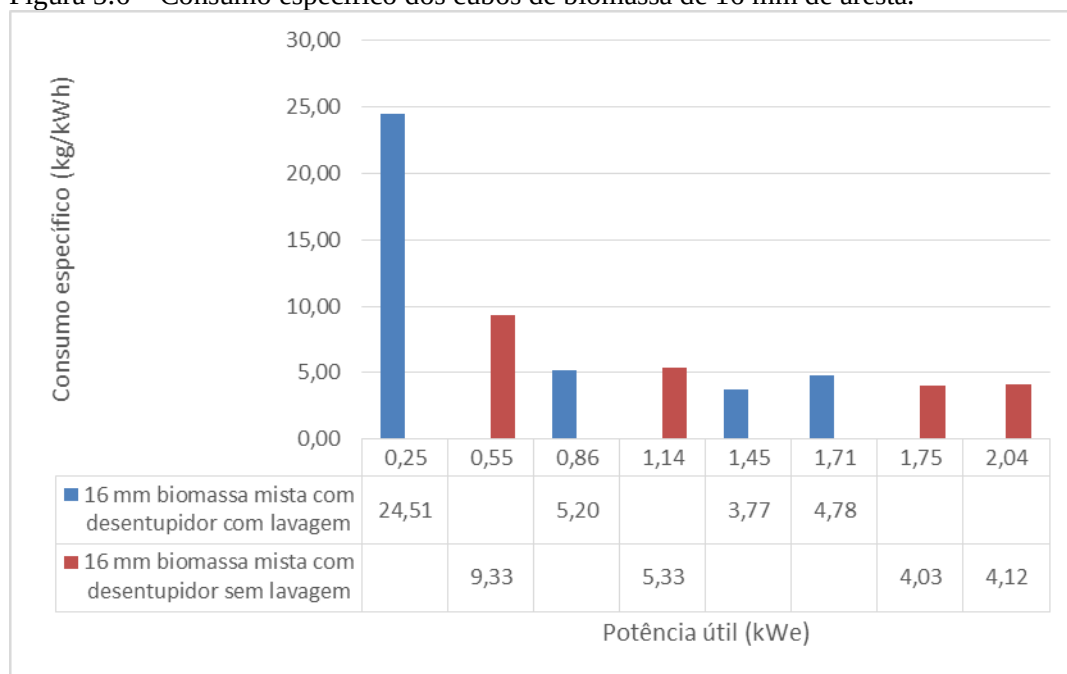
Figura 5.5 – (a) Dispensador de água do venturi e (b) tubulação antes do venturi.



Na Figura 5.5 (a) observa-se a presença de uma grande quantidade de particulado aglutinado pelo alcatrão recobrindo o bocal de nebulização e o tubo que o suporta. Na Figura 5.5 (b).

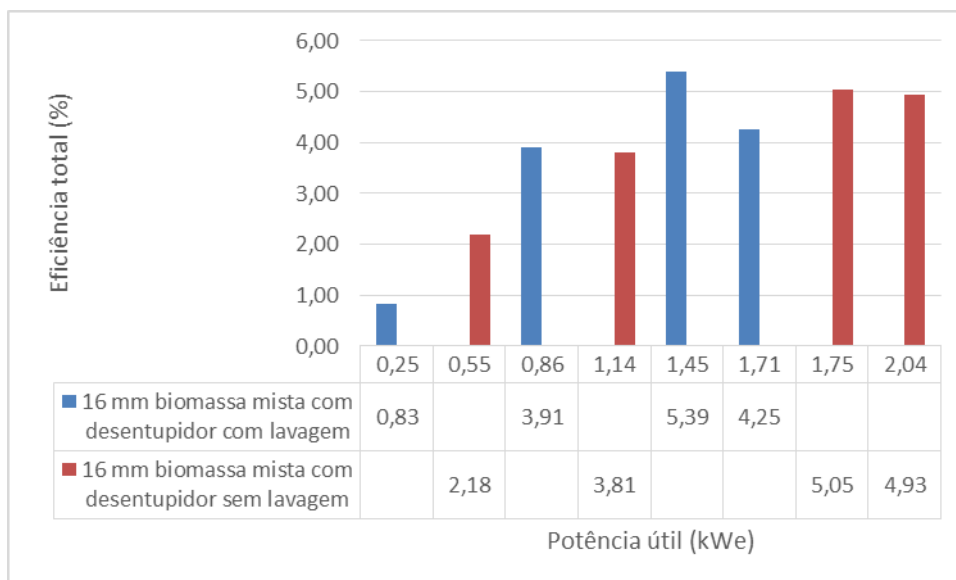
5.6 Caracterização do sistema com o depurador úmido com remoção de spray

Figura 5.6 – Consumo específico dos cubos de biomassa de 16 mm de aresta.



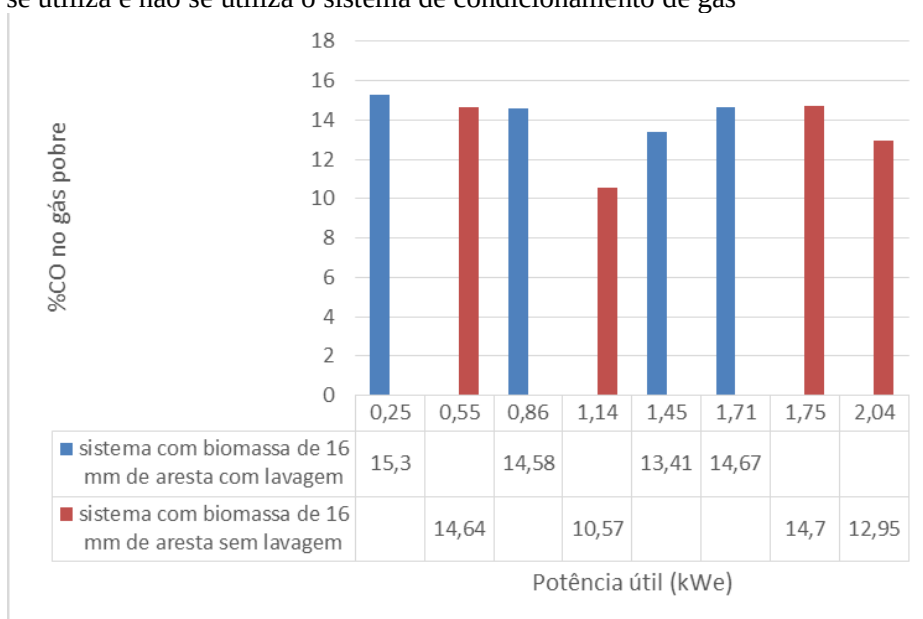
Na Figura 5.6, observa-se que o consumo específico da biomassa de 16 mm com e sem o sistema de lavagem novo, diminui em ambos os casos, com o aumento da potência útil. Sendo o menor consumo específico apresentado para o sistema com a utilização da lavagem igual a 3,77 kg/kWh, para a potência útil de 1,45 kWe. Para a biomassa de 16 mm sem a utilização do sistema de lavagem, o consumo específico mínimo é igual a 4,03 kg/kWh, para potência útil de 1,75 kWe.

Figura 5.7 – Eficiência total do sistema gaseificador/grupo gerador para biomassa de 16 mm de aresta.



Na Figura 5.7, observa-se que a eficiência total do sistema aumenta, proporcionalmente, com a potência útil, apresentando uma queda da penúltima para última potência, para os dois casos: biomassa de 16 mm, mista, com e sem o sistema novo de lavagem. A eficiência total é máxima e igual à 5,39 % para potência útil de 1,45 kWe, com a utilização do sistema de lavagem. Sem a utilização do sistema de lavagem novo, a eficiência é máxima e igual à 5,05 % para potência útil de 1,75 kWe.

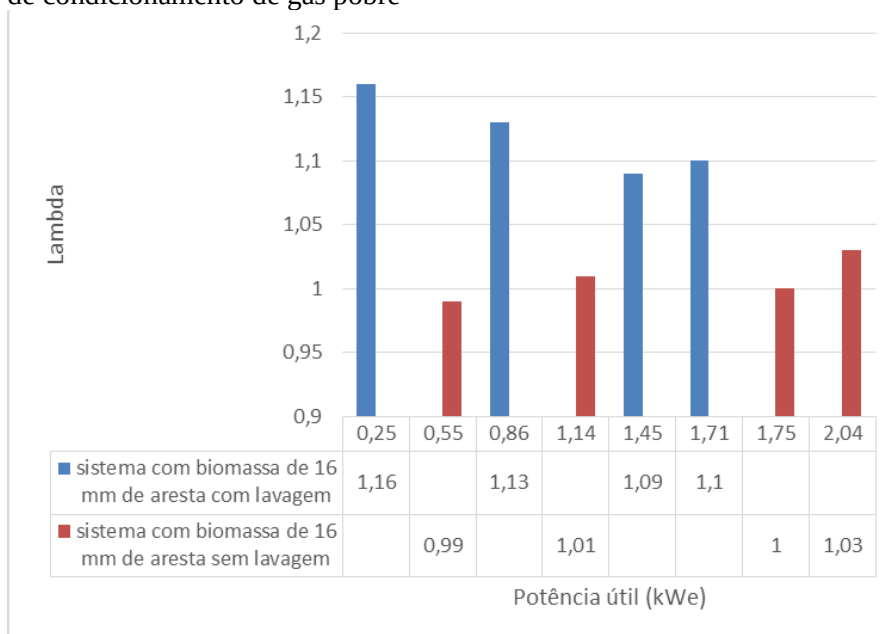
Figura 5.8 – Comparação entre a porcentagem de monóxido de oxigênio para o gás pobre quando se utiliza e não se utiliza o sistema de condicionamento de gás



Na Figura 5.8, observa-se que a média da % CO do sistema com a utilização do condicionamento do gás é de 14,49 %, sem a utilização do sistema de lavagem é de 13,22%. A

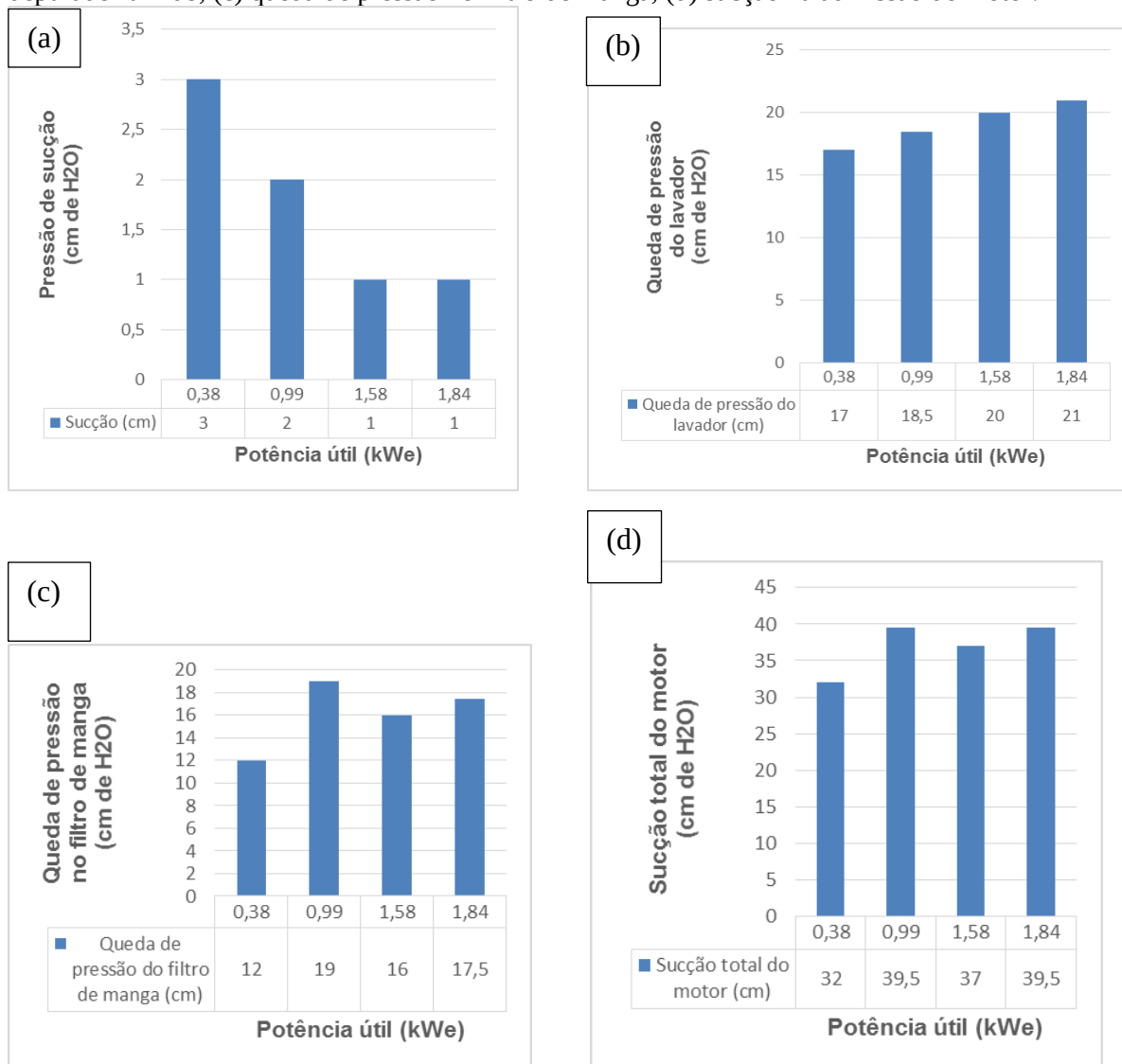
partir desses valores, se tem que o PCI do gás, para o primeiro caso, é 3,46 MJ/Nm³, enquanto que no segundo caso esse valor é de 3,22 MJ/Nm³.

Figura 5.9 – Comparação entre o lambda do gás de escape, quando se utiliza, ou não se usa, o sistema de condicionamento de gás pobre



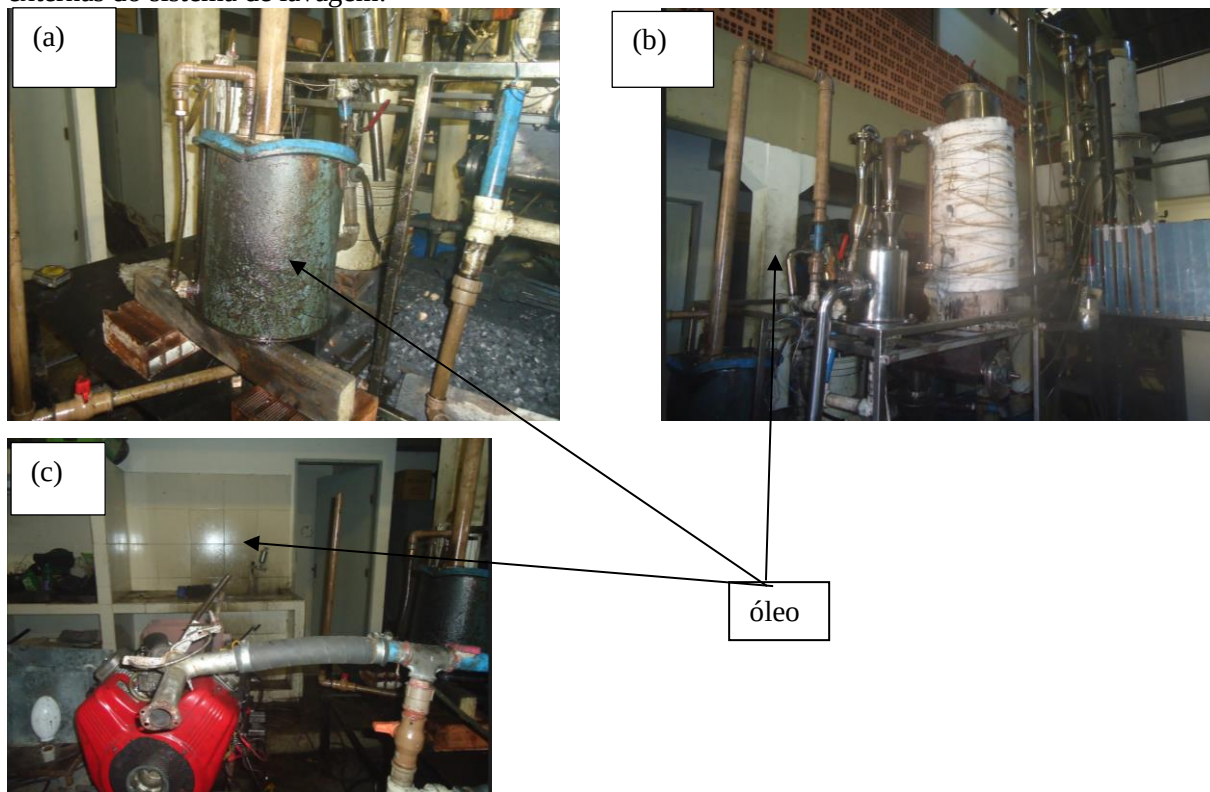
Na Figura 5.9, observa-se que, para o sistema que utiliza a lavagem, o lambda do gás de escape diminuiu com o aumento da potência e a sua média ficou por volta de 1,12. Para o caso em que não se utiliza o sistema de condicionamento do gás pobre, o lambda cresceu com a potência. Contudo, sua média foi de, aproximadamente, 1,01.

Figura 5.10 – Valores de pressão na utilização do sistema de lavagem para biomassa de 16 mm de aresta. (a) Pressão de sucção na saída da segunda placa condensadora, (b) queda de pressão no depurador úmido, (c) queda de pressão no filtro de manga, (d) sucção na admissão do motor.



Na Figura 5.10 (a), observa-se uma redução da pressão de sucção com o aumento da potência útil. Na Figura 5.10 (b), observa-se que a perda de carga imposta pelo depurador úmido é crescente com a potência útil do motor. Na Figura 5.10 (c), a queda de pressão imposta pelo filtro de manga também é crescente com a potência útil. Na Figura 5.10 (d), a aspiração total do motor é crescente com a potência útil.

Figura 5.11 – Presença de óleo nos: (a) depurador úmido, (b) tubos e paredes, (c) nas paredes externas do sistema de lavagem.



Na Figura 5.11 (a), (b) e (c) observa-se a presença de óleo nas paredes externas do sistema de lavagem novo, no desumidificador e nas paredes adjacentes ao motor, respectivamente.

CAPITULO VI

CONCLUSÃO

Para a realização desse trabalho foi observada a necessidade de se construir um sistema capaz de desobstruir a camada de cinzas presente na grelha do reator. Esse sistema fez com que o comportamento de consumo do reator deixasse de ser do tipo dente de serra e passasse a ter o consumo diretamente proporcional à potência útil gerada pelo sistema gaseificador/ grupo gerador.

Observa-se, também, que a implantação de um sistema de lavagem com um desumidificador de gás, aumentou a potência útil em 39,77 %, em relação à potência útil gerada pelo sistema de lavagem novo, sem a presença do desumidificador. E, diminuiu a potência útil gerada em 16,18 %, em relação a potência útil máxima obtida, quando não se utilizou o novo sistema de lavagem. Apesar da diminuição da potência útil com a utilização do novo sistema de lavagem, observa-se que foi importante a instalação de um sistema desumidificador para remover a água contida no gás pobre, aumentando a quantidade de combustível admitida pelo motor.

Constata-se, também, que com a utilização do sistema de lavagem novo (utilizando ou, não, um sistema de desumidificação de gás), a densidade de fluxo de retenção do alcatrão diminuiu com a potência útil, indicando, dessa forma, que a velocidade de impacto do gás pobre com a água do novo sistema de lavagem diminui a quantidade de alcatrão retida no sistema de coleta de alcatrão. Indicando, dessa forma, que o gás fica mais limpo. Contudo, observa-se nas Figuras 5.4 (a), (b) e (c) que a válvula, mangote e carburador apresentam-se bastante contaminados pelo alcatrão, inclusive com a utilização do novo sistema de limpeza, em conjunto com o desumidificador.

Na Figura 5.5 (a), identifica-se a presença de particulado aglutinado com alcatrão sobre toda a superfície do bocal de nebulização e de seu tubo de suporte. Essa presença é justificada pela alta velocidade de passagem do alcatrão pela zona de combustão, impossibilitando o craqueamento do mesmo, e pela velocidade elevada do gás através da grelha carreando cinzas e particulados.

Na Figura 5.6, nota-se uma diminuição do consumo específico com a potência útil, com a utilização ou não, o sistema de lavagem, indicando que a tendência de diminuição do consumo específico, com o aumento da potência foi mantida apesar da utilização do sistema de lavagem.

Na Figura 5.7, percebe-se que com a utilização do sistema de lavagem novo, a eficiência total máxima é obtida para uma potência 17,14 % menor do que quando aquele sistema não é utilizado.

Foi percebido, também, que a diferença entre o PCI do gás pobre produzido utilizando o novo sistema de lavagem, ou sem utilizá-lo, foi de aproximadamente 7,45 %. A diferença entre o λ médio de ambos os casos foi de aproximadamente 10,89 %.

Com o aumento da perda de carga produzida pela combinação filtro de manga e depurador úmido, o motor apresentou vazamento de óleo que pode ser divisado na Figura 5.11. Esse vazamento é devido ao aumento da rotação do motor, para superar a perda de carga imposta ao fluxo do gás, para que seja mantida a mesma potência elétrica útil. Dessa forma, a pressão interna onde o óleo está depositado aumenta e o óleo começa a vazar.

Esse trabalho mostrou que a utilização de um depurador úmido é capaz de remover parte das impurezas do gás. Contudo, o sistema ainda precisa ser melhorado para que o conjunto gaseificador/ grupo gerador possa funcionar continuamente.

REFERÊNCIAS

AHMAD, N. A., & ZAINAL, Z.. Performance and chemical composition of waste palm cooking oil as scrubbing medium for tar removal from biomass producer gas. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, n. 32, pp. 256-261, March 2016.

ANDRADE, R. V.. **Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2007.

ANIS, S., & ZAINAL, Z.. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 15, pp. 2355-2377, February 2011.

BAUMHAKL, C., & KARELLAS, S.. Tar analysis from biomass gasification by means of online fluorescence spectroscopy. **Optics and Lasers in Engineering**, n. 49, pp. 885-891, February 2011.

BEZERRA, A. F.. **Aprimoramento da eficiência de um sistema de geração de energia elétrica por grupo gerador alimentado com gás pobre**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2016.

CAPES. Gaseificação. **Banco de Teses e Dissertações**. Disponível em: <<http://bancodeteses.capes.gov.br/banco-teses/#!/>>. Acesso em: 26 Junho 2017

GODINHO, M.. **Gaseificação e combustão de resíduos sólidos da indústria calçadista**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA. Conceituando biomassa. **Instituto de energia e ambiente** – USP. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/conceituando-biomassa>>. Acesso em: 01 maio 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Aproveitamento da Biomassa da Cana para a Produção de Energia**. Piracicaba, São Paulo, 2012.

KULKARNI, A. A., & JOSHI, J. B.. Bubble Formation and Bubble Rise Velocity in Gas-Liquid Systems: A Review. **Ind. Eng. Chem. Res.**, n. 44, pp. 5873-5931, 2005.

MONTEIRO, I. R. L. **Limpeza do gás pobre**: um estudo de caso. João Pessoa: UFPB, 2017.

MICHAELIDES, E. E.. **Particles, bubbles and drops**- their motion, heat and mass transfer. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2006.

MILNE, T. A., & EVANS, R. J.. **Biomass gasifier "tars"**: their nature, formation, and conversion . Golden: National Technical Information Service, 1998.

MIN, Z.. **Catalytic steam reforming of biomass tar using iron catalysts**. Curtin: Curtin University of Technology, 2010.

PAETHANOM, A., NAKAHARA, S., KOBAYASHI, M., PRAWISUDHA, P., & YOSHIKAWA, K.. Performance of tar removal by absorption and adsorption for biomass gasification. **Fuel Processing Technology**, n. 104, pp. 144-154, May 2012.

REED, T. B., & DAS, A.. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems**. Golden: Solar Energy Research Institute, 1988.

RODRIGUES, R.. **Proposta de Modelagem Cinética e de Equilíbrio Combinada para Simulação de Processos de Gaseificação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

RODRIGUES, R.. **Modelagem cinética e de equilíbrio combinada para simulação de processos de gaseificação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

RUMÃO, A. S.. **Geração de potência e energia elétrica a partir da gaseificação de rejeitos de biomassa**. João Pessoa: UFPB, 2013.

SÁNCHEZ, C. G.. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: Editora Átomo, 2010.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO. **Resenha Energética Brasileira**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017.

SHEN, Y., WANG, J., GE, X., & CHEN, M. (30 de January de 2016). By-products recycling for syngas cleanup in biomass pyrolysis - An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 59, pp. 1246-1268, January 2016.

WISCONSIN GRASSLANDS- BIOENERGY NETWORK. Bioenergy conversion technologies. **Conversion technologies**. Disponível em: <<http://www.wgbn.wisc.edu/conversion/bioenergy-conversion-technologies>>. Acesso em: 10 junho 2017.

WOOLCOCK, P. J., & BROWN, R. C.. A review of cleaning Technologies for biomass-derived syngas. **Biomass and bioenergy**, n. 52, pp. 54-84, March 2013.