



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANA CAROLINE ROMÃO FERREIRA FEITOSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GASEIFICADOR OPERANDO COM
BIOMASSA RESIDUAL E CARVÃO VEGETAL**

JOÃO PESSOA

2019

ANA CAROLINE ROMÃO FERREIRA FEITOSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GASEIFICADOR OPERANDO COM
BIOMASSA RESIDUAL E CARVÃO VEGETAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
apresentado ao corpo Docente do Curso de
graduação em Engenharia Mecânica, da
Universidade Federal da Paraíba, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão

JOÃO PESSOA

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F311a Feitosa, Ana Caroline Romao Ferreira.
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GASEIFICADOR OPERANDO COM
BIOMASSA RESIDUAL E CARVÃO VEGETAL / Ana Caroline Romao
Ferreira Feitosa. - João Pessoa, 2019.
48 f. : il.

Orientação: Adriano Sitônio Rumão.
Monografia (Graduação) - UFPB/de Tecnologia.

1. Gaseificação. Biomassa Residual. Carvão Vegetal. I.
Rumão, Adriano Sitônio. II. Título.

UFPB/BC

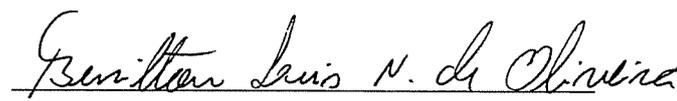
ANA CAROLINE ROMÃO FERREIRA FEITOSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM GASEIFICADOR OPERANDO COM
BIOMASSA RESIDUAL E CARVÃO VEGETAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO apresentado ao corpo Docente do curso de graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão
(Orientador)


Prof. Dr. Benilton Luis Nascimento de Oliveira
(Examinador)


Dr. Vicente de Vasconcelos Claudino Filho
(Examinador)

DEDICO este trabalho primeiramente a Deus, pois Ele é o Criador de Tudo e prova de amor infinito. A Ele dedico não somente este trabalho, como também à minha vida. Dedico aos meus pais, Ana Paula Romão de Souza Ferreira e Josenilton dos Santos Feitosa, por todo amor e dedicação que me deram em toda minha vida. Também a mulher de maior coragem, força e determinação que eu conheço à minha avó, Elidriana Geralda Romão. E aos meus irmãos Raul, Maria Eduarda e Gabriel por apoio e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que tem preparado em minha vida, sou grata por tudo que Ele me mostrou em minha caminhada;

Agradeço aos meus pais por carinho, dedicação e paciência;

Agradeço à minha avó, por todo amor e experiência de vida;

Aos meus tios Alexandre, Francisco, Freud, Josenira e Josivaldo por todo incentivo durante todo o curso. Aos meus primos e irmãos por toda paciência.

Agradeço, também, à minha outra família, a do EJC, que tem sido incrível pode participar desse extraordinário movimento.

Agradeço ao Professor Adriano por me orientar e por todo aprendizado. Agradeço, também, a todos que fazem parte da equipe do Laboratório de Inovação pelo apoio e compreensão; E, ao Professor Emerson Freitas Jaguaribe, ao Técnico do laboratório de Inovação Carlos e aos colegas Braúlio, Jandemarques, Henrique, Lucas, Merques, Micael, Samuel, Saulo, Vicente.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial Brenda, Jecielma, Priscila, Rafaela e Rayssa por todo apoio, companhia e carinho.

“A educação é o grande motor do mundo do desenvolvimento pessoal. É através dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que o filho de trabalhadores rurais se torna presidente de uma grande nação.”

(Nelson Mandela).

RESUMO

Para atender à crescente demanda por energia, principalmente, em países em desenvolvimento como o Brasil existe a necessidade de buscar por novas tecnologias na geração e distribuição deste insumo. A biomassa é uma das alternativas para substituir combustíveis fósseis, sem a necessidade de depender do sol, da velocidade dos ventos, ou mesmo dos períodos de chuva. O presente trabalho tem como objetivo comparar a eficiência do Gaseificador no processo de gaseificação utilizando como combustível a biomassa in natura e o carvão vegetal. Na metodologia adotada foram desenvolvidas por gaseificação, biomassa e carvão vegetal. Durante os experimentos foram utilizados: um gaseificador do tipo co-corrente, leito fixo e de topo aberto, com motor/gerador Toyama TG 2500 MX, um simulador de cargas do tipo resistivo com capacidade máxima de 280 We um analisador de gases para obter o percentual de monóxido de carbono (CO) presente no gás produzido no processo de gaseificação. Os resultados mostraram que o carvão vegetal apresentou um melhor consumo específico que a biomassa, além disso substituindo a biomassa in natura pelo carvão vegetal elimina os inconvenientes do alcatrão no sistema. Um outro ponto observado foi a máxima eficiência do gaseificador, que utilizando biomassa in natura ficou em 81,77% e com o carvão obteve-se 76,10%.

Palavras-Chave: Gaseificação. Geração de Energia. Biomassa Residual. Carvão vegetal.

ABSTRACT

In order to increase demand by energy, especially in developing countries as Brazil, it has been necessary to look for new technologies in generation and distribution of this energy. Biomass gasification is one of the ways to replace fossil fuel without the dependency of sun, wind speed and the rain season. The goal of the present work is to compare the efficiency of the gasifier in the gasification process with natural biomass and charcoal. The methodology was based on gasification, biomass and charcoal. Used an open top, fixed bed drawdraft gasifier, with engine / generator Toyama TG 2500 MX, a 280 W resistor type load simulator, and a gas analyzer. To obtain the percentage of carbon monoxide (CO) present in the gas produced in the gasification process. The results showed that charcoal presented a better consumption than natural biomass, in addition replacing natural biomass with vegetable charcoal eliminates the drawbacks of tar in the system. Another point of observation was the maximum efficiency of the gasifier, which using natural biomass was 81.77% and with charcoal it obtained 76.10%.

Keyword: Gasification. Biomass. Charcoal. Electrical Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira.	13
Figura 2 - Veículo movido a gás de biomassa.	16
Figura 3 - Gaseificador ContraCorrente.	21
Figura 4 - Gaseificador Co-Corrente.	21
Figura 5 - Gaseificador de fluxo Cruzado.	22
Figura 6 - Gaseificadores de Leito Borbulhante e Circulante.	23
Figura 7 - Gaseificador de leito Fixo utilizado nos testes.	33
Figura 8 - Esquema do Gaseificador.	34
Figura 9 - Grupo Gerador.	35
Figura 10 - Balança Digital.	36
Figura 11 - Termo-Balança.	36
Figura 12 - Simulador de cargas.	37
Figura 13 - Analisador de Energia.	37
Figura 14 - Analisador de Gases.	38
Figura 15 - Chama Piloto.	39
Figura 16 - Poder Calorífico Inferior do Gás utilizando Biomassa in Natura e Carvão Vegetal.	41
Figura 17 - Consumo específico utilizando Biomassa Residual e Carvão Vegetal.	42
Figura 18 - Eficiência do Gaseificador utilizando Biomassa in Natura e Carvão Vegetal.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos gaseificadores.....	20
Tabela 2. Principais componentes do alcatrão da gaseificação de biomassa.	28
Tabela 3. Composição volumétrica do gás produzido pela Forest Industry Division. ...	29
Tabela 4. Especificações do Grupo Motor/Gerador.	35
Tabela 5. Teor de Umidade da Biomassa	40

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Histórico da gaseificação.....	16
3.2 Gaseificação.....	17
3.3 Princípios básicos da gaseificação.....	18
3.4. Tipos de gaseificadores	19
3.4.1 <i>Gaseificador ContraCorrente</i>	20
3.4.2 <i>Gaseificador Co-corrente</i>	21
3.4.3 <i>Gaseificador Fluxo Cruzado</i>	22
3.4.4 <i>Gaseificador Leito Fluidizado-arrasto</i>	23
3.5 Caracterização da biomassa in natura e carvão vegetal.....	24
3.5.1 <i>Biomassa in Natura</i>	24
3.5.2 <i>Carvão Vegetal</i>	25
3.5.2 <i>Análise Imediata</i>	25
3.5.2.1 <i>Determinação de teor de umidade</i>	26
3.5.2.2 <i>Determinação de teor de voláteis</i>	26
3.5.2.3 <i>Determinação do teor de cinzas</i>	26
3.5.3 <i>Análise Elementar</i>	27
3.5.4 <i>Poder calorífico de sólidos</i>	27
3.6 Caracterização do alcatrão.....	28
3.7 Relações físico- matemático importantes	29
3.7.1 <i>Composição e poder calorífico do gás pobre</i>	29
3.7.2 <i>Poder Calorífico Inferior da Biomassa</i>	30
3.7.3 <i>Consumo de Biomassa</i>	30

<i>3.7.4 Consumo Específico de Biomassa</i>	30
<i>3.7.5 Velocidade do Gás Pobre</i>	31
<i>3.7.6 Vazão Volumétrica do Gás</i>	31
<i>3.7.7 Eficiência do Gaseificador</i>	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Gaseificador.....	33
4.2 Grupo gerador.....	35
4.3 Balança digital	36
4.4 Termo – balança	36
4.5 Simulador de cargas.....	37
4.6 Analisador de energia	37
4.7 Analisador de gases	38
4.8 Procedimento dos testes.....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Teor de umidade da biomassa	40
5.2 Poder Calorífico Inferior Gás (PCI) utilizando Biomassa in natura e Carvão Vegetal	41
5.3 Consumo Específico utilizando Biomassa in Natura e Carvão Vegetal.....	42
5.4 Eficiência do Gaseificador utilizando Biomassa in natura e Carvão Vegetal	43
6. CONCLUSÃO	44
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS	46

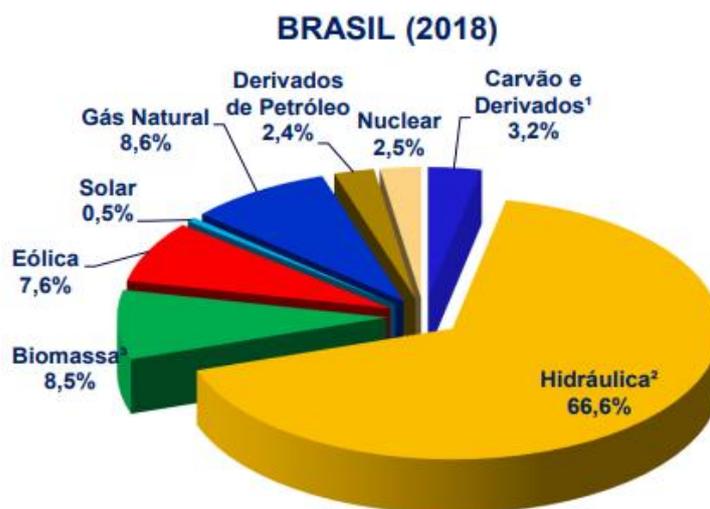
1.INTRODUÇÃO

Com o aumento da taxa de crescimento demográfico e pelo clamor da sociedade mundial por energias mais limpas e baratas, que não sofram tanto com a interferência política, cada vez mais aumenta a necessidade de desenvolver novas tecnologias para atender a demanda de geração e distribuição de energia.

Atualmente a maioria dos países no mundo tem recursos de combustíveis fósseis na utilização de geração de energia.

O Brasil é considerado um dos países que possuem uma das energias mais limpas do mundo, sua matriz energética é composta principalmente por hidrelétricas, além de possuir uma grande diversidade para ampliá-la com recursos renováveis. Pode se verificar, na Fig. 1, a influência da energia renovável na matriz energética do Brasil.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira.



Fonte: BEN (2019).

Apesar de ser considerada uma das energias mais limpas e baratas do mundo, as hidrelétricas possuem pontos negativos. A geração depende de períodos pluviais bem distribuídos. As instalações de usinas em muitas cidades brasileiras provocam problemas socioeconômico com a população local, além da probabilidade da ocorrência de impactos ambientais imensuráveis, provenientes de rompimentos de barragens

exemplo da barragem de Apertadinho que rompeu em 2008 em Vilhena em Rondônia. Devido a estas situações, o Brasil passou a conviver com uma variação constante das tarifas na distribuição da energia elétrica, as conhecidas bandeiras tarifárias verde, amarela e vermelha. Só não foi mais agravante por causas de crises econômicas que desaceleraram o crescimento econômico do país, podendo assim implementar medidas de racionamento de água, evitando blecautes (FREITAS, 2019; GEOGRAFIA EM FOCO, 2013). Esse episódio mostrou a fragilidade do Brasil depender exclusivamente das hidrelétricas, existindo assim, a necessidade de se buscar novas formas de geração de energia. Uma alternativa de recursos renováveis e que vem ganhando espaço é a utilização de biomassa neste processo de geração.

Atualmente, a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento para os próximos anos, tanto no mercado internacional quanto interno. Ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina. Um dos processos utilizados para obter energia elétrica é fazendo-se uso da biomassa, é a gaseificação, que com o Plano Nacional de Energia 2030, atualmente as pesquisas e inovações tecnológicas com gaseificadores de biomassa vem ganhando espaço no Brasil (ANEEL, 2008).

Entre os anos de 2002 e 2005, o projeto chamado GASEIFAMAZ, de pesquisa de gaseificação de biomassa in natura para geração de eletricidade em comunidades isoladas do Amazonas, foram importados para o Brasil gaseificadores indianos, do IISc (Instituto Indiano de Ciências), com o objetivo de suprir, de modo sustentável, a demanda de energia elétrica em comunidades isoladas no norte do país, oferecendo uma alternativa aos combustíveis fósseis, através do uso da biomassa (GASEIFAMAZ, 2019).

Em 2010, através de parceria com o Ministério de Minas e Energia, foi instalado no Laboratório de Inovações (LI), da Universidade Federal da Paraíba, um gaseificador, importado da Índia, do IISc, com o propósito de desenvolver a tecnologia de gaseificação, para a geração de energia elétrica (RUMÃO, 2013). Sendo assim, o presente trabalho tem a finalidade de comparar a eficiência desse equipamento operando com biomassa residual e carvão vegetal.

2.OBJETIVOS

2.1Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar e comparar a eficiência de um gaseificador do tipo co-corrente, leito fixo, topo aberto, utilizando como combustível biomassa residual e o carvão vegetal.

2.2Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica de gaseificação com biomassa;
- Descrição do processo experimental;
- Análise dos principais parâmetros do processo de gaseificação, obtidos pelo método experimental: teor de umidade, consumo de biomassa, poder calorífico inferior do gás, eficiência do gaseificador.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico da gaseificação

De acordo com SÁNCHEZ (2010) no ano de 900 D.C. da nossa era, os sábios chineses iluminaram alguns dos templos com gás do solo, transportado em tubulações de bambu. Contudo a tecnologia de conversão de material orgânico em gás combustível só ocorreu no final do século XVII, na Inglaterra, quando o pároco de Croften, John Clayton, descobriu uma forma de produzir gás a partir da gaseificação do carvão.

Em 1839, projetado por Bishoff surgiu o gaseificador de fluxo de contracorrente. Esse projeto foi modificado por Siemens em 1857, e utilizado em toda Europa pelos cem anos seguintes. O grande problema desses gaseificadores era a produção de alcatrão e a remoção das cinzas. Uma alternativa de resolver estes problemas, foi desenvolver vários desenhos propondo a existência de duas zonas de reação, ou a rejeição dos produtos da pirólise no reator visando a promover o craqueamento do alcatrão (SÁNCHEZ, 2010).

Na segunda Guerra mundial foi possível atingir o auge da produção de gaseificadores, quando cerca de um milhão de veículos, no mundo todo, utilizavam gaseificadores em leito fixo que eram chamados de gasogênios, como mostra a Fig. 2. No Brasil esses veículos eram em torno de 20.000 e utilizavam como combustível, pedaços de madeira, coque, turfa e antracito (ANDRADE, 2007). Entretanto, após a segunda guerra mundial esse tipo de tecnologia ficou estagnada.

Figura 2 - Veículo movido a gás de biomassa.



Fonte: ANDRADE (2007).

A utilização de combustíveis gasosos destacam-se em: maior facilidade de distribuição até os locais de utilização; melhor controle na combustão e com maior eficiência; queima rápida e com menor emissão de poluentes; utilização mais apropriada para cozimento e aquecimento em residências, possibilidade para utilização em motores de combustão interna ou turbinas a gás para geração de potência mecânica (REED, 1981 *apud* SÁNCHEZ, 2010).

No processo de gaseificação durante a formação dos gases combustíveis também é formado o alcatrão, uma substância nociva, poluente e que traz problemas operacionais como travamentos de válvulas e obstrução de eixos. Por isso, foram propostos projetos para gaseificadores que permitam um maior craqueamento do alcatrão, minimizando ou evitando estes tipos de inconvenientes.

Com as crises de energias, por causa da falta do petróleo durante os anos de 1970, ressurgiu o interesse na gaseificação. De acordo com SILVA (2017), um grupo de pesquisadores Indianos Combustion Gasification and Propulsion Laboratory do Indian Institute of Sciences, CGPL/IISc, em Bangalore, liderados pelo Prof. H. Mukunda que inovaram o conceito de gaseificação. Eles desenvolveram gaseificadores que produzem combustíveis gasosos, com menos resíduos sólidos e químicos, prejudiciais ao funcionamento de motores de combustão interna, para produção de energia elétrica quando acoplados a geradores.

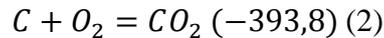
3.2 Gaseificação

A gaseificação é definida como a conversão de qualquer combustível sólido em um gás energético, pela oxidação parcial a temperaturas elevadas (800 - 1000°C) (SÁNCHEZ, 2010).

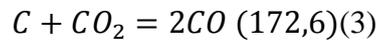
A gaseificação é uma tecnologia termoquímica que utiliza um tipo de biomassa como combustível para geração de energia. Esta tecnologia permite uma combustão incompleta da biomassa, produzindo os seguintes gases: CO_2 e vapor de água (H_2O), CO , H_2 e CH_4 , N_2 , assim como o alcatrão e os ácidos. As reações podem ser observadas nas Eq. de (1) a (9) (ANDRADE, 2010).

Reações Heterogêneas gás-sólido

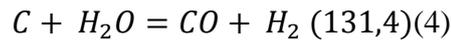
- Oxidação do carbono, C (kJ/mol);



- Reação de Boudourad:



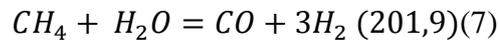
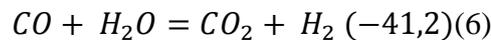
- Reação de gás-d' água:



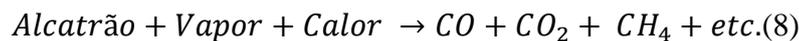
- Formação de metano:



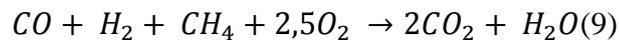
Reações Homogêneas (fase gasosa)



Craqueamento do alcatrão



Além dessas reações, temos de destacar a oxidação de parte dos produtos da pirólise:



3.3 Princípios básicos da gaseificação

A gaseificação consiste em diversas etapas, principalmente nas reações termoquímicas da combustão e a pirólise. A seguir apresentaremos os quatro processos básicos para que ocorra a gaseificação.

- **Secagem:** é o primeiro estágio da gaseificação e ocorre na parte superior do reator. Nesse estágio é removida a umidade, pelo processo de evaporação da umidade na biomassa. De acordo com RODRIGUES (2009) e PONTE FILHO (1988), conforme citado por VENTUROTTO e FERNANDES (2015) a umidade retirada dos resíduos é repassada para os gases, o que influencia no poder calorífico e na eficiência térmica global do gaseificador. Portanto, a gaseificação

de uma biomassa muito úmida gera um gás de baixa qualidade e diversos problemas operacionais como produção de muita fumaça.

- **Pirólise:** nessa etapa ocorre a degradação termoquímica da matéria, devido à ausência do oxidante. Inicia-se a pirólise em torno das faixas de temperaturas entre 250 °C à 450°C, onde acontece a decomposição dos carboidratos (celulose e lignina), formação de gases não condensáveis (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , O_2) e alcatrão. As características dos produtos da pirólise em termos de quantidade e qualidade dependem das condições de operação do processo. Neste sentido, a temperatura, a granulometria do material, a velocidade ou taxa de aquecimento, o tempo de residência e as características próprias da biomassa são variáveis importantes no desempenho do processo (CORTEZ *et al.*, 2011 *apud* BEZERRA, 2016).
- **Combustão:** é a reação do material com oxigênio. Esse processo é responsável pelo fornecimento de calor para as demais etapas. Essa fase pode ocorrer no próprio reator principal, em um gerador de vapor ou em câmara de combustão. O que se queima pode ser: parte do próprio gás de síntese, outros produtos da gaseificação (líquidos e sólidos), e até o combustível primário (RUMÃO, 2013).
- **Redução:** é a região onde ocorre as reações endotérmicas em uma faixa de temperatura compreendida entre 400 a 900°C. De acordo com RUMÃO (2013) a zona de redução, vista como a gaseificação em si, é a zona em queo carbono e os hidrocarbonetos do combustível reagem parcialmente com o oxigênio, gerando como combustíveis principalmente o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H_2).

3.4. Tipos de gaseificadores

De acordo com SÁNCHEZ (2010), os gaseificadores podem ser classificados a partir do poder de calorífico do gás produzido, do tipo de agente gaseificador, da direção do movimento relativo dos sólidos e do agente gaseificante, da pressão de trabalho e do tipo de combustível. A Tabela 1 mostra tal classificação.

Tabela 1. Classificação dos gaseificadores.

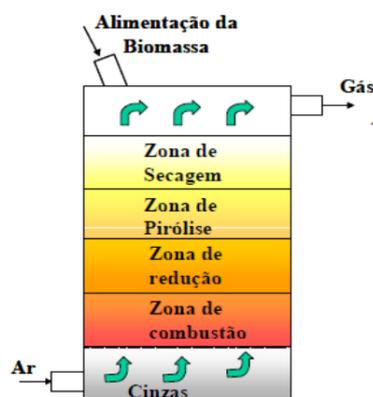
Parâmetro	Características
Poder calorífico do gás produzido	<ul style="list-style-type: none"> • Gás de baixo poder calorífico: até 5MJ/Nm³; • Gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm³; • Gás de alto poder calorífico: acima de 10 MJ/Nm³.
Tipo de agente gaseificador	<ul style="list-style-type: none">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

Fonte: SÁNCHEZ (2010).

3.4.1 Gaseificador ContraCorrente

Esse tipo de gaseificador tem sua construção mais simples, como pode ser visto na Fig. 3, onde a entrada de ar fica na parte inferior do gaseificador, com o fluxo ascendente dos gases, contrário ao fluxo de combustível que é introduzido pela parte superior e desce pela ação da gravidade conforme é consumido na zona de combustão. Estes gaseificadores geralmente possuem alta eficiência térmica, devido ao fato de os gases quentes provenientes da zona de combustão pré-aquecerem a carga de combustível ao passarem por ela. A principal característica é a simplicidade, em contrapartida sua desvantagem é produção de um gás com muito vapor de água e alcatrão(SÁNCHEZ,2010).

Figura 3 - Gaseificador ContraCorrente



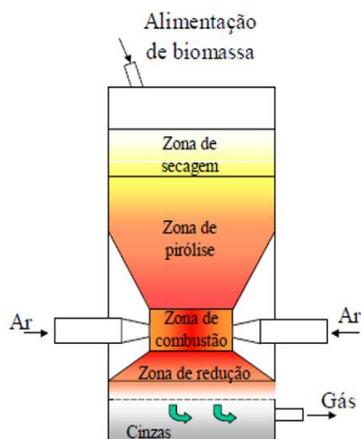
Autor: ANDRADE, 2007.

3.4.2 Gaseificador Co-corrente

É o gaseificador de leito fixo mais difundido e tendo sido amplamente utilizado, inclusive em veículos. Na Segunda Guerra Mundial a maioria dos veículos utilizavam este tipo de gaseificador (ANDRADE, 2007).

Neste tipo de gaseificador a alimentação de biomassa encontra-se na parte superior do reator e o ar é fornecido nas laterais, como mostra a Fig. 4. O gás gerado é direcionado para parte inferior do equipamento, passando por regiões de altas temperaturas, possibilitando o craqueamento do alcatrão que é arrastado.

Figura 4 - Gaseificador Co-Corrente



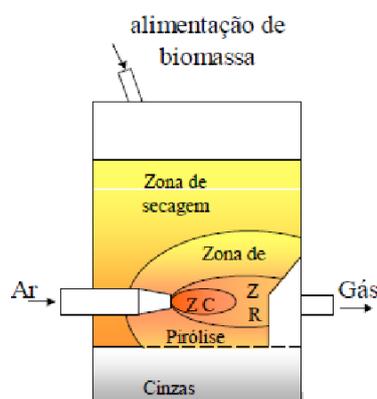
Autor: ANDRADE, 2007.

A disposição das zonas de reação, nesse tipo de reator, é bem distinguida assim como no gaseificador contracorrente, no entanto, sua disposição é diferente, onde inicialmente a biomassa passa pela região de secagem, seguindo para a região de pirólise, posteriormente é encaminhada para zona de combustão e finalmente a redução. Nesse último estágio o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H_2) são formados pela reação do carvão, proveniente da zona de pirólise, com o dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) vindos da zona de combustão (ANDRADE, 2007).

3.4.3 Gaseificador Fluxo Cruzado

Em um gaseificador de fluxo cruzado a biomassa move-se em fluxo descendente enquanto o ar é introduzido pela lateral, como mostra a Fig. 5, os gases são retirados pelo lado oposto do gaseificador no mesmo nível. A zona de combustão e gaseificação é formada ao redor da entrada de ar, enquanto as zonas de pirólise e secagem são formadas em um nível mais alto do gaseificador. A temperatura dos gases produzidos gira em torno de $900^\circ C$, razão pela qual a eficiência do processo é baixa e o gás produzido possui um elevado nível de alcatrão (MCKENDRY, 2002 *apud* CHAVES, 2012).

Figura 5 - Gaseificador de fluxo Cruzado.



Fonte: ANDRADE, 2007.

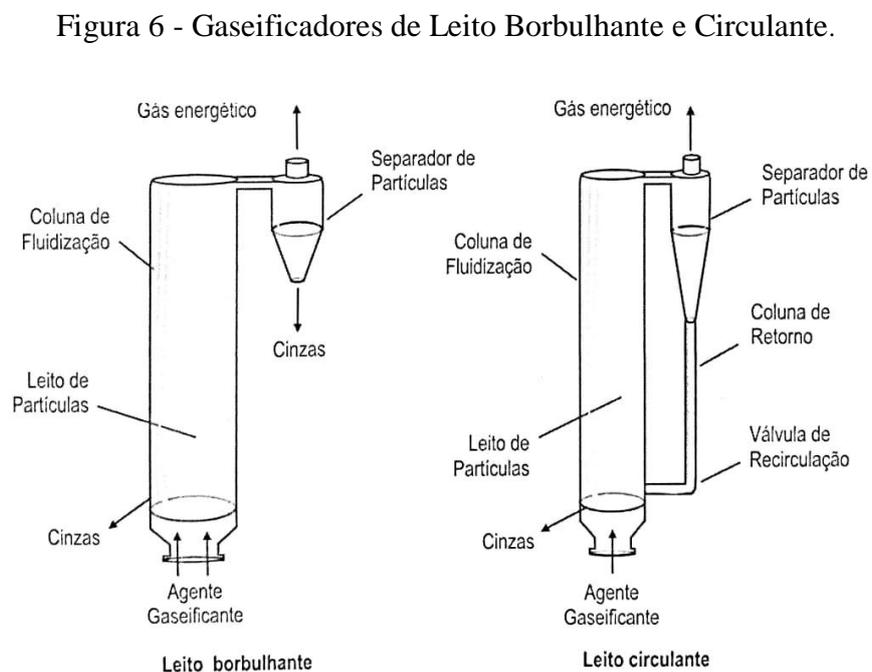
Como principais vantagens dos gaseificadores de fluxo cruzado tem-se: rápida resposta à variação de carga, sua simplicidade de construção e seu peso reduzido. Por outro lado, são muito sensíveis às variações na composição e umidade do combustível,

sendo que, para fins práticos, quase sempre é usado carvão vegetal limpo e seco(SÁNCHEZ, 2010).

3.4.4 Gaseificador Leito Fluidizado-arrasto

No gaseificador de leito fluidizado, o carvão que entra pela lateral é mantido suspenso pelo meio gaseificante (que entra próximo do carvão, mas de forma ascendente). Deste modo, a mistura e o aquecimento são feitos de forma mais rápida resultando em uma temperatura mais uniforme no leito. A temperatura é mantida abaixo do ponto de fusão das cinzas para evitar a formação de produtos sólidos provenientes de resíduos de calcário. Algumas partículas são arrastadas para fora do gaseificador na saída do gás, mas são recuperados e reciclados por meio de um ciclone. As principais características deste tipo de gaseificador são: a aceitação de um largo escopo de matérias-primas (inclusive resíduos sólidos, madeira e carvão com carga alta de cinzas); temperatura uniforme; requisitos moderados do oxigênio e do vapor; reciclagem de carvão extensa(MILLER, 2005*apud* CARDOSO, 2013).

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser do tipo borbulhante ou circulante, como mostra a Fig. 6.



Fonte: SÁNCHEZ (2010).

Nos gaseificadores borbulhantes as partículas arrastadas pelo processo não são enviadas de volta para o leito e trabalha com velocidades menores que a de arraste pneumático; e a alimentação de biomassa é feita diretamente na zona do leito. Nos gaseificadores de leito fluidizado circulante as partículas arrastadas pelo processo são enviadas de volta para o leito; e opera próximo ao regime de arraste pneumático e possui uma maior conversão de carbono, pelo maior tempo de residência das partículas(ANDRADE, 2007).

3.5 Caracterização da biomassa in natura e carvão vegetal

Biomassa pode ser definida como qualquer matéria orgânica que pode ser transformada em alguma forma de energia útil. No Brasil a biomassa é encontrada em diversas formas: florestal (madeira), agrícola (cana-de-açúcar, arroz, entre outros), rejeitos de resíduos urbanos e industriais(ANEEL,2008).

No referido trabalho a biomassa é apresentada de duas formas: biomassa in natura e carvão vegetal.

3.5.1 Biomassa in Natura

A biomassa in natura é composta de material orgânico pode ser encontrada no estado sólido. Neste trabalho, a biomassa in natura apresenta-se proveniente de rejeitos de madeira.

As vantagens de usar rejeitos de madeira são:

- É uma energia renovável;
- Tem grande densidade energética e capacidade de conversão;
- É pouco poluente, não emitindo dióxido de carbono (de acordo com o ciclo natural de carbono neutro) (ALIMENTOS, 2019);
- A biomassa sólida é extremamente barata, sendo as suas cinzas menos agressivas para o ambiente (ALIMENTOS, 2019).

3.5.2 Carvão Vegetal

O carvão vegetal é obtido pela pirólise lenta da biomassa. Como já foi mencionado a pirólise é a degradação térmica parcial ou completa devido à ausência de agente oxidante. De acordo com LISBOA (2016) a pirólise rápida é geralmente feita entre as temperaturas de 800 a 1100°C para obter a máxima produção de líquidos, enquanto a pirólise lenta, também conhecida como carbonização, é feita entre as faixas de temperaturas de 400 a 800°C para maximizar a produção de carvão vegetal.

De acordo com TRUGILHO & SILVA (2001) o processo de carbonização pode ser dividido em quatro etapas:

1. Abaixo de 200°C: praticamente só ocorre a secagem da madeira. Esta etapa aquece a madeira para vaporização e eliminação da água;
2. De 200 a 280°C: predominância de reações endotérmicas. Quando a temperatura atinge aproximadamente 260°C, a madeira começa a ser quimicamente degradada e materiais voláteis (ácidos acéticos, metanol, água, CO_2 e outros) começam a ser vaporizados;
3. De 280 a 500°C: predominância de reações exotérmicas, na qual parte da madeira é carbonizada e ocorre a liberação de gases combustíveis (CO , CH_4 e outros), além da maioria do alcatrão solúvel e do ácido pirolenhoso;
4. Acima de 500°C: liberação de pequenas quantidades de voláteis, em especial H_2 .

Ressalta-se ainda que durante este processo, essas etapas podem ocorrer de modo simultâneo (TRUGILHO & SILVA, 2001).

3.5.2 Análise Imediata

A análise imediata tem como objetivo quantificar os teores de umidade, voláteis (condensáveis e não condensáveis) e carbono fixo contido numa amostra de biomassa (RENDEIRO *et al.*, 2008).

3.5.2.1 Determinação de teor de umidade

De acordo com as normas NBR 8112 e E871, a amostra de uma biomassa é colocada numa estufa preaquecida (essa temperatura de aquecimento varia de 104°C A 110°C) por um determinado tempo (varia de 1 hora até 48 horas) com temperaturas constantes. O teor de umidade é dado pela Eq. (10):

$$w = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) 100\% (10)$$

Onde,

w é o valor do teor de umidade em percentual, m_1 é a massa inicial e m_2 é a massa final. Ambas as massas as grandezas são mensuradas em gramas (g).

3.5.2.2 Determinação de teor de voláteis

Para determinar o teor de voláteis utiliza-se as normas NBR 8112 e E872, onde mensura-se através de frações da biomassa volatizada durante o aquecimento de uma amostra (seca) até aproximadamente 850°C, num forno mufla, por 7 minutos. Após a extração de voláteis, o que resta são resíduos de carbono fixo e cinzas. A Eq.(11) determina o teor de voláteis é:

$$T_v = \frac{m_A - m_D}{m_A} 100\% (11)$$

Onde, T_v é o teor de voláteis, m_A é a massa da amostra antes do experimento e m_D é a massa residual após o experimento, ambos em gramas.

3.5.2.3 Determinação do teor de cinzas

Para determinar os teores de cinza, deve-se seguir as normas NBR 8112 e D1102.

As cinzas são resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e

atmosfera. Um grama de biomassa, já sem umidade e voláteis, é colocado num cadinho e levada ao interior de um forno. Sua temperatura é então elevada para 710°C, e nessa condição permanece por uma hora. Ao final, dentro do cadinho restam somente as cinzas. (RENDEIRO *et al.*, 2008).

Então o teor de cinzas é calculado a partir da Eq. (12):

$$z = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) 100\% \quad (12)$$

Onde,

Z é o teor de cinzas, m_i é a massa da amostra inicial do experimento e m_f é a massa da amostra após o experimento, ambos em gramas. É importante ressaltar que o teor de cinzas é expresso em base seca.

3.5.3 Análise Elementar

Neste tipo de análise são obtidas as frações, em peso, dos elementos constituídos da biomassa. Estas frações são constituídas principalmente dos elementos carbono, oxigênio e hidrogênio, e, também das concentrações de nitrogênio, enxofre e cloro. As análises elementares de carbono, hidrogênio, enxofre e cloro são determinadas pela norma ASTM D-3.176 e ASTM E777, E775 e E778, e a fração de oxigênio é determinada por diferença (SÁNCHEZ, 2010).

Da análise elementar, resulta um resíduo que é considerado como cinzas, na qual sua concentração é determinada por análise imediata. Ou seja, uma amostra que apresenta alto teor de cinzas possui também um alto teor de resíduos (SÁNCHEZ, 2010).

3.5.4 Poder calorífico de sólidos

De acordo com SÁNCHEZ (2010), o poder calorífico pode ser determinado utilizando-se a técnica da bomba calorimétrica (D-2015). Esta mede o calor liberado pela combustão do biocombustível com oxigênio, em que, todas as amostras devem passar por uma peneira de malha 60 (250µm) e depois passar por um processo de

combustão na presença de oxigênio puro a uma pressão de 3.000 kPa. Essa técnica determina o poder calorífico superior a volume constante, que pode ser convertido para poder calorífico inferior por métodos analíticos.

3.6 Caracterização do alcatrão

O alcatrão, proveniente do processo de gaseificação de biomassa, é uma complexa mistura de hidrocarbonetos, oxigenados ou não, cuja composição pode variar em função do tipo de gaseificador dentre outros. A Tabela 2, mostra a classificação dos componentes do alcatrão (SÁNCHEZ 2010).

Tabela 2. Principais componentes do alcatrão da gaseificação de biomassa.

Classificação	Compostos
Produtos Primários	Levoglucosano, acetaldeído, furfurais, derivados de hemicelulose e derivados de lignina
Produtos Secundários	Fenóis e olefinas
Produtos Terciários Alquilados	Metil aromáticos e derivados (metil naftaleno, tolueno, etc).
Produtos Terciários Condensados	Hidrocarbonetos poli aromáticos (benzeno, naftaleno, fenantreno, etc)

Fonte: EVANS e MILES, 1987a e 1987b, *apud* SÁNCHEZ, 2010.

A presença do alcatrão provoca travamento nas válvulas de admissão e exaustão do motor, comprometendo a eficiência, devido a diminuição da pressão no processo de compressão, além de ser altamente poluente e tóxico. Por isso é importante reduzir a produção de alcatrão no processo de gaseificação.

De acordo com SÁNCHEZ (2010) a minimização da produção de alcatrão depende do projeto do gaseificador e das condições de operação do mesmo.

3.7 Relações físico- matemático importantes

3.7.1 Composição e poder calorífico do gás pobre

A composição química do gás pobre depende da umidade da biomassa na gaseificação. O emprego de biomassa com umidade elevada reduz o teor de componentes combustíveis (CO , H_2 , CH_4) do gás produzido e aumenta o teor de inertes (H_2O e CO_2). A faixa da umidade da biomassa recomendada para a maioria dos gaseificadores é de 10 a 15%. Nessa faixa, o poder calorífico inferior situa-se entre 4,0 a 5,0 MJ/Nm³. Pelo fato do poder calorífico do gás pobre ser consideravelmente menor que o gás natural e do GLP, aliado à baixa pressão do gás, há necessidade de tubulações de distribuição de diâmetro grande e restrição da geração do gás em áreas próximas do consumo (SÁNCHEZ, 2010).

O gás pobre normalmente é constituído de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), podendo também conter parcelas significativas de dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), nitrogênio (N_2) e metano (CH_4), além de impurezas (BASU, 2006 *apud* BARATA, 2014). Destes elementos o CO influencia diretamente no poder calorífico do gás.

A Tabela 3 mostra os percentuais volumétricos do gás para a madeira e carvão.

Tabela 3. Composição volumétrica do gás produzido pela Forest Industry Division.

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

Fonte: FAO, 1986 *apud* RUMÃO, 2013.

O PCI do gás pobre, em MJ/Nm³, pode ser determinado a partir da Eq. (13), deduzida por Rumão (2013). Esta relaciona o PCI do gás produzido com o percentual de monóxido de carbono presente nele.

$$PCI_{Gás} = -0,004738 (\%CO)^2 + 0,3149 (\%CO) - 0,157(13)$$

Onde,

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

3.7.2 Poder Calorífico Inferior da Biomassa

Foi considerado o poder calorífico da biomassa in natura constante como 17747,484 kJ/kg de acordo com a literatura (LUNA, 2018). Já para o carvão vegetal foi utilizado um valor constante de 31380 kJ/kg (TABELA, 2019).

3.7.3 Consumo de Biomassa

O consumo de Biomassa, C_{Bio} , do gaseificador, é o valor da quantidade de biomassa consumida pelo processo durante um intervalo de tempo. É dado em kg/h, como mostra a Eq. (14)

$$C_{Bio} = \frac{M_{Bio}}{\Delta t}(14)$$

Onde,

M_{Bio} é a quantidade de Biomassa (em kg) adicionada ao gaseificador.

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

3.7.4 Consumo Específico de Biomassa

O consumo específico em kg/kWh, foi determinado como sendo a razão do consumo de biomassa, em horas, pela potência gerada, como mostra a Eq. (15)

$$C_{esp.} = \frac{C_{Bio}}{Pot_{ger.}}(15)$$

Onde,

C_{Bio} é a quantidade de consumo de biomassa (kg/h)

$Pot_{ger.}$ é a potência gerada no gerador elétrico (kW)

3.7.5 Velocidade do Gás Pobre

De acordo com LUNA (2018) a velocidade do gás pobre, em m/s, foi determinada pela Eq.(16).

$$V_{gás} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta h}{1000}}{100 \frac{\gamma_{liq}}{\gamma_{gás}}}} \quad (16)$$

Onde,

g é a constante gravitacional igual a 9,81 e é dada em m/s²;

Δh é a variação da coluna deslocada do fluido manométrico em mm;

γ_{liq} é o peso específico do líquido em N/m³;

$\gamma_{gás}$ é o peso específico do gás em N/m³.

3.7.6 Vazão Volumétrica do Gás

A vazão volumétrica do gás, em m³/s, foi determinada fazendo uso da Eq. (17).

$$Q_{gás} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot V_{gás}}{4} \quad (17)$$

Onde,

d é o diâmetro interno da tubulação em que escoo o gás, dado em m;

$V_{gás}$ é a velocidade do gás, dado em m/s.

3.7.7 Eficiência do Gaseificador

A eficiência térmica do processo de gaseificação depende basicamente da quantidade de calor dissipada no sistema e da quantidade de carbono não gaseificado removido. A eficiência final do processo depende, principalmente, da temperatura de utilização do gás, que é função do comprimento da tubulação e do seu isolamento térmico. O isolamento térmico é fundamental para se obter a alta eficiência energética, pois o calor sensível do gás representa uma parcela significativa de sua energia, por exemplo, a 450°C, o calor sensível do gás representa cerca de 12,5% de sua energia (SÁNCHEZ, 2010).

A eficiência do Gaseificador, η_s (%), pode ser definida pela equação (18):

$$\eta_s = \frac{PCI_{Gás} Q_{gás}}{PCI_{Bio} C_{Bio}} \quad (18)$$

Onde:

$PCI_{Gás}$ é o poder calorífico inferior do gás utilizada no gaseificador, dado em MJ/Nm³;

$Q_{gás}$ é a vazão do gás, dado em m³/s;

PCI_{Bio} é o poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador, dado em MJ/kg;

C_{Bio} é o consumo de biomassa utilizada no gaseificador kg/s.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado as características dos equipamentos e instrumentos, e, os procedimentos dos testes utilizados para o trabalho em estudo.

4.1 Gaseificador

O gaseificador utilizado nos experimentos foi importado pelo do Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, India. Ele é do tipo leito fixo, co-corrente e de “topo aberto”, como mostra a Fig. 7.

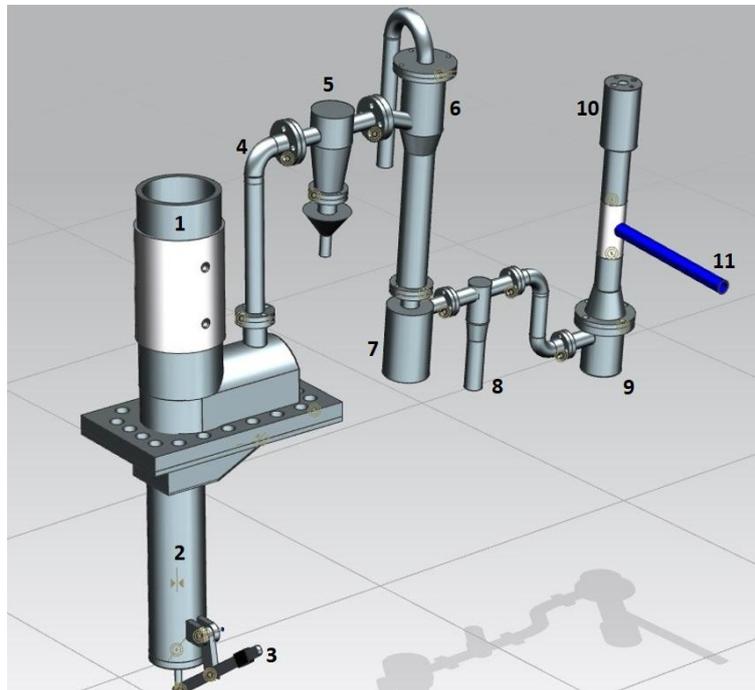
Figura 7 - Gaseificador de leito Fixo utilizado nos testes.



Fonte: AUTOR (2019).

Como já foi mencionado, nesse tipo de gaseificador a biomassa é inserida pela parte superior do reator, e desce por ação da gravitacional passando pelas zonas de secagem, pirólise, combustão e por último zona de redução. Na Figura 8, mostra os principais componentes do gaseificador.

Figura 8 - Esquema do Gaseificador



Fonte: ANDRÉ(2019).

1. Reator;
2. Cinzeiro;
3. Alavanca do perfurador de cinzas;
4. Tubulação de saída do gás produzido;
5. Purgador;
6. Tubulação de lavagem do gás produzido;
7. Difusor;
8. Placa de condensação de umidade;
9. Filtro de Manga;
10. Queimador;
11. Tubulação de alimentação.

4.2 Grupo/gerador

O grupo/gerador, ver Fig. 9, utilizado no experimento é composto por um motor à gasolina adaptado para funcionar com gás pobre e por um gerador elétrico, que está interligado ao gaseificador. A Tabela 4, mostra as especificações deste equipamento.

Figura 9 - Grupo Gerador



Fonte: AUTOR (2019).

Tabela 4. Especificações do Grupo Motor/Gerador.

Motor	Gerador
Tipo do Motor: Em V2, Refrigeração a ar, 4 tempos, OHV	Frequência Nominal: 60 Hz
Cilindrada: 163 cc	Potência Nominal: 2 Kw
Sistema de Partida: Manual Retrátil	Potência Máxima: 2,2 kW
Capacidade de Combustível: 15 L	Tensão de Saída Nominal: 110 V ou 220 V
Capacidade de Óleo: 0,6 L	Corrente Nominal: 17,4 A / 8,7 A
Filtro de Ar: Duplo Elemento	Número de fases: Monofásico
	Fator de Potência $\cos \phi$: 1
	Saída CC: 12 V / 8,3 A
	Estrutura: Com Quadro

Fonte: Ficha técnica do motor Toyama, TG 2500 MX, 2018.

4.3 Balança digital

Durante o procedimento foi indispensável a determinação da variação do consumo de massa da biomassa que alimenta o gaseificador. Para isso foi utilizada uma balança digital com capacidade máxima de 40 kg, e resolução de 2 g, ver Figura 10.

Figura 10 - Balança Digital



Fonte: AUTOR (2019).

4.4 Termo – balança

Para determinar o teor de umidade de biomassa utilizou nos experimentos uma Termo - balança analítica RADWAG, tipo MAC 210, com resolução de 0,001 % de umidade e 1 mg de massa, ver Fig. 11. O equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de Carvão Ativado (LCA), da UFPB.

Figura 11 - Termo-Balança



Fonte: AUTOR (2019).

4.5 Simulador de cargas

Utilizou um simulador de carga do tipo resistivo composto por um banco de lâmpadas para interpor cargas ao gerador elétrico. Tal dispositivo foi construído no próprio LI, sendo formado por seis lâmpadas de 250 a 280 W e duas lâmpadas de 150 a 180 W, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Simulador de cargas.



Fonte: AUTOR (2019).

4.6 Analisador de energia

Para determinar a potência da saída do gerador, utilizou-se um analisador de energia, modelo HIOKI 3197 portátil, ver Fig. 13. Além da potência, o instrumento também fornece dados de tensão, corrente e frequência.

Figura 13 - Analisador de Energia



Fonte: AUTOR (2019).

4.7 Analisador de gases

O equipamento utilizado para análise dos gases produzidos pelo sistema Gaseificador/ Grupo Gerador é um analisador de gases veiculares Discovery G4 da Alfateste, como mostra a Fig. 14. O analisador é constituído por uma central de análise eletrônica, uma sonda, regulador de pressão e compressor de ar, o qual está conectado a um computador que possui um software capaz de fornecer instantaneamente as características dos gases analisados.

Figura 14 - Analisador de Gases



Fonte: RUMÃO (2013).

4.8 Procedimento dos testes

Inicialmente, a cada experimento, checava-se as condições de funcionamento de todo o aparato envolvido (gaseificador, motor/gerador, banco de lâmpadas, instrumentação e equipamentos de aquisição de dados). Depois, alimentava-se o reator com biomassa in natura e/ou carvão vegetal até o topo. Feito isso, ligava-se a bomba para acionar o sistema de lavagem, depois de decorrido um certo intervalo de tempo utilizava-se de um maçarico direcionado aos orifícios laterais do reator para dar início ao processo de combustão da biomassa.

Após 15 minutos o gás produzido tem poder calorífico suficiente para se inflamar. Assim, acendia-se a chama piloto, Fig. 15, avaliando a mudança na intensidade da chama e sua coloração, até que esta ficasse na cor azulada, que mostrava estar apto para ser utilizado no motor. A partir deste momento, iniciava-se o funcionamento do motor fechando a passagem do gás utilizado para chama piloto e direcionando-o para o motor.

Figura 15 - Chama Piloto



Fonte: AUTOR (2019).

Quando se acionava a primeira carga elétrica, esperava-se em torno de 5 minutos para estabilizar o sistema e poder verificar os seguintes dados: composição dos gases, consumo de biomassa, tensão, corrente, frequência, potência e temperaturas.

Para determinar o fluxo mássico verificou-se a quantidade consumida de biomassa in natura e/ou carvão vegetal por um intervalo de tempo de 4 minutos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes foram analisados em função de quatro parâmetros: teor de umidade da biomassa, poder calorífico inferior do gás, consumo específico da biomassa e eficiência do gaseificador.

5.1 Teor de umidade da biomassa

Utilizando a Termo balança do LCA, com as condições especificadas das normas NBR 8112 e E871, ea Equação (10), a biomassa in natura apresentou um teor médio de 11% de umidade, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5. Teor de Umidade da Biomassa

Amostra	Teor de umidade	Teor médio
1	11%	11%
2	13%	
3	9%	

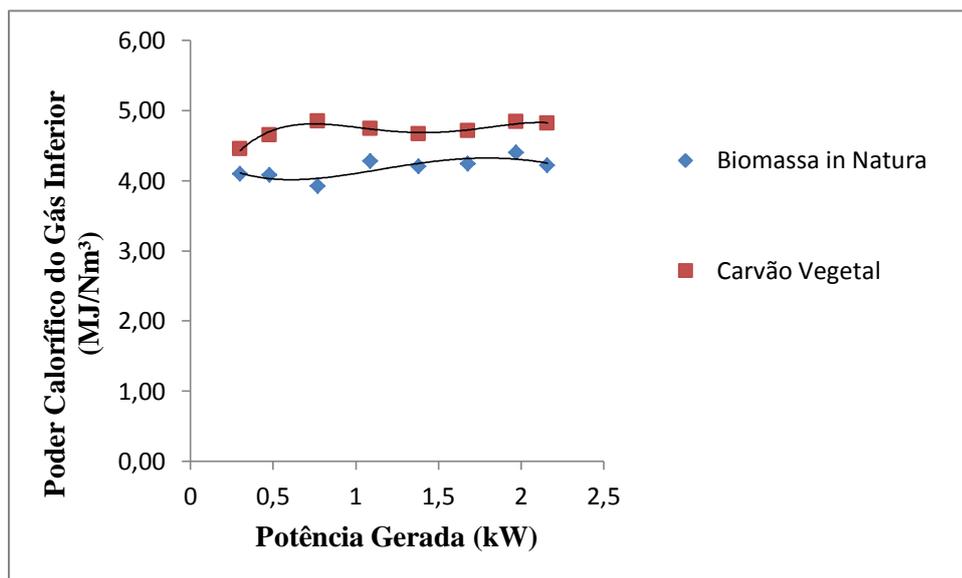
Fonte: AUTOR (2019)

Estes resultados mostram-se adequados de acordo com valores estabelecidos na literatura para processos de gaseificação, como mencionados no subitem 3.7.1.

5.2 Poder Calorífico Inferior Gás (PCI) utilizando Biomassa in natura e Carvão Vegetal

A variação do PCI do gás pobreutilizando a biomassa in natura e carvão vegetal, pela potência gerada, é mostrada na Fig. 16.

Figura 16 - Poder Calorífico Inferior do Gás utilizando Biomassa in Natura e Carvão Vegetal



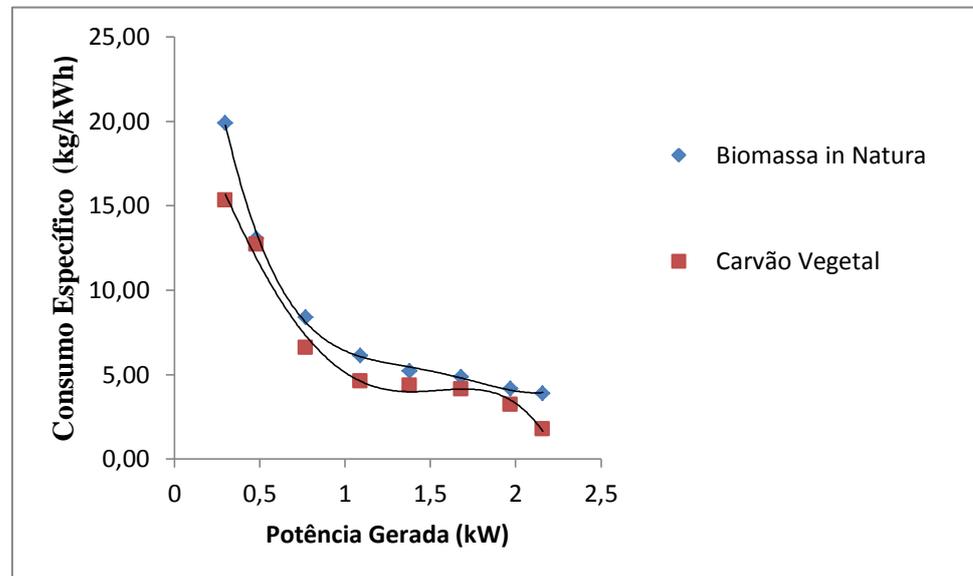
Fonte: AUTOR (2019).

Analisando a Fig. 16, podemos verificar que o PCI do gás produzido quando utilizando a biomassa in natura ficou sempre abaixo dos valores obtidos quando comparados aos do carvão vegetal. Fato este justificado, diferença de monóxido de carbono (CO) na utilização dos resíduos supramencionados.

5.3 Consumo Específico utilizando Biomassa in Natura e Carvão Vegetal

O consumo específico utilizando a biomassa in natura e carvão vegetal está representada na Figura 17.

Figura 17 - Consumo específico utilizando Biomassa Residual e Carvão Vegetal



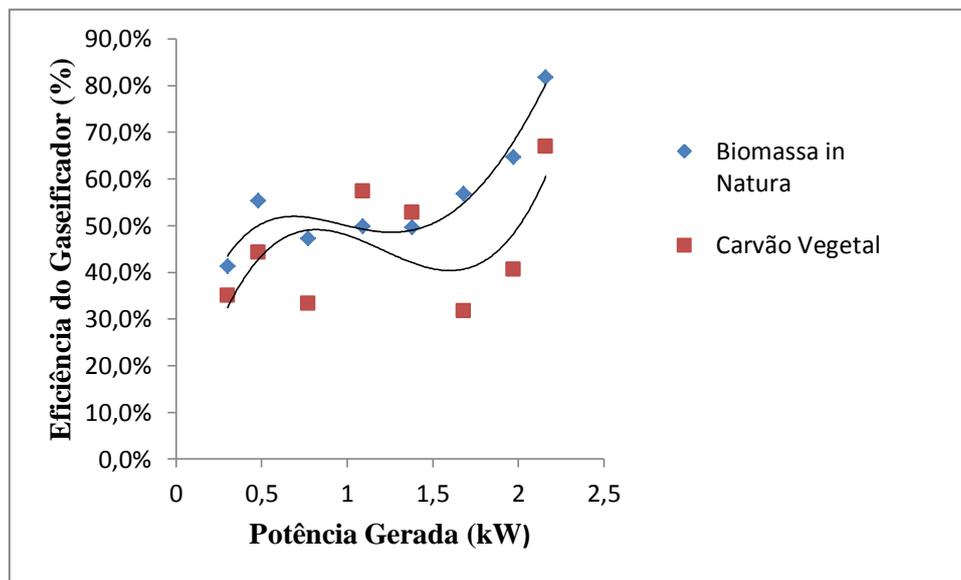
Fonte: AUTOR (2019).

Percebe-se pelo gráfico que o consumo específico da biomassa diminui ao aumentar a potência gerada. Ainda pode-se observar que na figura o consumo de carvão vegetal é menor que o consumo da biomassa in natura.

5.4 Eficiência do Gaseificador utilizando Biomassa in natura e Carvão Vegetal

A variação da eficiência do sistema Gaseificador para o conjunto de potências geradas pode ser vista na Fig. 18.

Figura 18 - Eficiência do Gaseificador utilizando Biomassa in Natura e Carvão Vegetal



Fonte: AUTOR (2019).

Observa-se na Fig. 18 que a curva de tendência em ambos, apresentam comportamento em que decresce e depois volta a crescer novamente a eficiência do gaseificador. Também se nota que os pontos na curva do carvão vegetal estão mais dispersos do que na biomassa in natura, isso ocorre devido a sua geometria irregular.

6. CONCLUSÃO

O principal objetivo do trabalho é a comparação da eficiência do Gaseificador utilizando biomassa residual e carvão vegetal. Para tanto, ao analisar os resultados dos testes pode-se verificar que:

- O teor de umidade da biomassa in natura apresentou um resultado dentro dos parâmetros recomendados na literatura, o que em prática significa que ajudou na otimização do processo evitando formação de muita fumaça e melhoria na queima;
- Ocorreu um maior consumo em massa de carvão vegetal quando comparado ao mesmo tempo de duração nos testes.
- Ao utilizar o carvão vegetal, decorreu-se um tempo maior, quando comparado a biomassa in natura, para o acionamento do motor;
- Os picos do PCI da biomassa in natura foram menores que os do carvão vegetal.

A partir destas observações, podemos concluir que a gaseificação utilizando biomassa in natura foi mais atrativa, quando comparada a produção utilizando o carvão vegetal. Fato este que pode ser observado na Fig. 18, tendo como eficiências máximas, 81,77 % para biomassa in natura e 76,10 % para o carvão vegetal.

Entretanto, quando comparada a eficiência da gaseificação para geração de energia elétrica, percebe-se que os valores obtidos fazendo uso do carvão vegetal se sobrepõe daqueles atingidos com a biomassa in natura, ver Figura 17.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na contribuição em melhorias para trabalhos futuros na área de tecnologia de gaseificação, temos as seguintes sugestões:

- Modificações e/ou projetos para tentar diminuir o tempo de espera no acionamento do motor, principalmente quando utilizar carvão vegetal;
- Utilizar a junção de biomassa residual com carvão vegetal nos experimentos, para obter melhores resultados na eficiência térmica do sistema;

REFERÊNCIAS

ALIMENTOS. Disponível em: <<https://alimentos.com.br/biomassa-o-que-e-vantagens-e-desvantagens/>>. Acessado em 20 de maio de 2019.

ANDRADE, Rubenildo Vieira. **Gaseificação de Biomassa: Uma análise Teórica e Experimental**. Itajubá, 2007. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0032784.pdf>>. Acessado em: 03 de dezembro de 2018.

ANDRE, Samuel dos Santos. **Laboratório de Inovação (LI)**. João Pessoa, 2019.

ANEEL, Jersonet *al.* **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3^oed. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acessado em 20 de março de 2019.

ÁNGEL, Juan Daniel Martínez. **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna**. Itajubá, 2009. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0035352.pdf>>. Acessado em 04 de dezembro de 2018.

BARATA, Diego Kretti Drummond. **Determinação da Composição dos Gases Combustíveis Resultante do Processo de Gaseificação de Biomassa em reator de leito fluidizado circulante utilizando a teoria de minimização da energia livre de Gibbs**. Ponta Grossa. 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7438/1/PG_COENQ_2014_2_03.pdf>. Acessado em 17 de julho de 2019.

BEN. Balanço de Energia Nacional. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acessado em 29 de julho de 2019.

BEZERRA, Alexandre Freire. **Aprimoramento da eficiência de um sistema de geração de energia elétrica por grupogerador alimentado com gás pobre**. João Pessoa, 2016.

CARDOSO, Marco Tsuyama. **Da Iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: História Técnica e econômica da gaseificação**. São Paulo, 2013. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11032014-171935/pt-br.php>. Acessado em: 18 de novembro de 2018.

CHAVES, Luiz Inácio. **Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador concorrente utilizando mazilaurus**. Itaúba, 2012. Disponível em: <http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Luiz_Chaves.pdf>. Acessado em 27 de março de 2019.

Ficha técnica do motor Toyama, TG 2500 MX. Disponível em:
<<http://www.toyama.com.br/arquivos/produtos/1467659024.pdf>>. Acessado em: 03 de dezembro de 2018.

FREITAS, Merques do Nascimento. **Produção de energia elétrica e carvão ativado a partir de um gaseificador de biomassa**. João Pessoa, 2019.

GASEIFAMAZ. Disponível em :
<<http://143.107.4.241/projetos/gaseifamaz/gaseifamaz.htm>>. Acessado em 27 de julho de 2019.

LCA. **Laboratório de Carvão Ativado**, UFPB. 2019.

LI. **Laboratório de Inovação**, UFPB.2019.

LISBOA, Fábio Cordeiro. **CARBONIZAÇÃO E GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA MACAÚBA, TUCUMÃ E CUPUAÇU PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE**. Brasília/DF, 2016. Disponível em:<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/21026/1/2016_F%C3%A1bioCordeirodeLisboa.pdf>. Acessado em 18 de março de 2019.

LUNA, Francisco Everton Tavares. **Efeito de um reservatório de gás (Pulmão) na melhoria da eficiência energética de um gaseificador de biomassa**. João Pessoa, julho de 2018.

GEOGRAFIA EM FOCO. Blog. 2013. Disponível em:
<<http://geomania2.blogspot.com/2013/11/o-rompimento-da-barragem-apertadinho-em.html>>. Acessado em 30 de maio de 2019.

QUÉNO, Laurent Roger Marie. **Produção de pellets de madeira no brasil: estratégia, custo e risco do investimento**. Brasília, 2015. Disponível em:
<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/20726/1/2015_LaurentRogerMarieQu%C3%A9no.pdf>. Acessado em 23 de março de 2019.

RENDEIRO, Gonçalo *et al.* **Combustão de Gasificação de Biomassa Sólida**. 1 edição, Brasília. Estado de Minas Gerais, 2008. Disponível em:>
<<http://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/863/2/combust%C3%A3o%20e%20gasifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20biomassa%20s%C3%B3lida.pdf>>. Acessado em 25 de fevereiro de 2019.

RUMÃO, Adriano Sitônio. **Geração de potência e energia elétrica a partir da gaseificação de rejeitos de biomassa**. João Pessoa, 2013.

SÁNCHEZ, Caio Glauco. **Tecnologia da gaseificação de Biomassa**. Editora: Átomo. São Paulo, 2010.

SILVA, Fernanda de Souza. **Efeito dos tamanhos padronizados de retalhos de madeira na melhoria do funcionamento de um gaseificador de biomassa**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPB. João Pessoa, 2017.

TABELA – Poder Calorífico Inferior. Disponível em:
<<http://www.teccalor.com.br/PDF/TabelaPoderCalorifico.pdf>>. Acessado em 20 de Abril de 2019.

TRUGILHO, Paulo Fernando & SILVA, Dilmás Agostinho da Silva. **Influência da Temperatura Final de Carbonização nas Características Físicas e Químicas do Carvão Vegetal de Jabotá**. Paraná, 2001. Disponível em:
<<http://www.redalyc.org/pdf/995/99517443006.pdf>>. Acessado em 29 de julho de 2019.

VENTUROTTO, Rodolfo de Melo e FERNANDES, Wanderson Araújo. **Modelo de Lagrange aplicado à simulação da conversão termoquímica de partículas de biomassa em um gaseificador downdraft**. Vitória, 2015. Disponível em:
<http://www.engenhariamecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2015.1_-_rodolfo_e_wanderson.pdf>. Acessado em 18 de março de 2019.