



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado – Doutorado

**EFEITO DE UM RESERVATÓRIO DE GÁS (PULMÃO) NA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

por

Francisco Everton Tavares de Luna

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

João Pessoa - Paraíba

Julho, 2018

FRANCISCO EVERTON TAVARES DE LUNA

**EFEITO DE UM RESERVATÓRIO DE GÁS (PULMÃO) NA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

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

Orientador: Professor Dr. Emerson Freitas Jaguaribe

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L961e Luna, Francisco Everton Tavares de.

Efeito de um reservatório de gás (pulmão) na melhoria da eficiência energética de um gaseificador de biomassa / Francisco Everton Tavares de Luna. - João Pessoa, 2018.

61 f. : il.

Orientação: Emerson Freitas Jaguaribe.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/Tecnologia.

1. Biomassa, gaseificador de biomassa, pulmão. I. Jaguaribe, Emerson Freitas. II. Título.

UFPB/BC

EFEITO DE UM RESERVATÓRIO DE GÁS (PULMÃO) NA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA

por

Francisco Everton Tavares de Luna

Dissertação aprovada em 27 de julho de 2018



Prof. Dr. EMERSON FREITAS JUGUARIBE
Orientador – UFPB



Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DE MIRANDA MONTENEGRO
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ADRIANO SITÔNIO RUMÃO
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por todas as conquistas aqui alcançadas, por ter me dado forças e iluminado as minhas escolhas. Aos meus pais, Elieser e Socorro, por terem batalhado tanto pela minha felicidade. À minha namorada Suzana, pelo apoio e compreensão dados. Aos meus irmãos, Eliane, Cleidiane, Erivelton, Aline e Júlio pelo apoio dado. A todos os meus familiares, colegas, amigos e professores que, de forma direta ou indireta, também contribuíram para a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar venho agradecer a Deus, pois todas as conquistas aqui alcançadas foram graças a Ele.

Aos meus pais, Elieser e Socorro, pelo suor derramado, por terem acreditado em mim e terem lutado pela minha felicidade.

Aos meus irmãos, Eliane, Cleidiane, Erivelton, Aline e Júlio pelo apoio e ajuda que me deram em tantos momentos.

À minha namorada Suzana, pelo apoio, compreensão e carinho.

Ao meu orientador Emerson Freitas Jaguaribe, pela ajuda dada na realização deste trabalho. Por ter sido paciente e compreensivo comigo, e pelo grande conhecimento repassado.

Ao professor Adriano Sitônio Rumão, por me acompanhar em vários momentos na realização deste trabalho, e pelos ensinamentos repassados.

Aos meus colegas do mestrado, Rennan, Vinicius, Anderson, Fábio, Júlio César e Kerolyne por terem contribuído com meu aprendizado, através dos grupos de estudos, e pelos momentos descontraídos que passamos juntos.

Aos amigos do Laboratório de Inovação, André, Herculano, Fernanda, Daniel, Alexandre, Carlos, Batista, Bráulio, Lucian, Otávio, Arthur, Luana, Sérgio, Yago, Bruno, Vinicio, Antônio, Jorge e Vicente pela amizade e ajuda dada no desenvolvimento e realização dos testes.

A todos que fazem a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro que foi de suma importância para esse trabalho.

EFEITO DE UM RESERVATÓRIO DE GÁS (PULMÃO) NA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA

RESUMO

A gaseificação de biomassa, tem se destacado nos últimos anos como uma das alternativas mais promissoras na geração de energia limpa, a qual transforma a biomassa em um combustível capaz de gerar energia através de sua queima direta, ou de alimentar motores de combustão interna, para geração de potência. Muito tem sido investido em pesquisas em gaseificação, com a finalidade de torná-la mais prática e mais eficiente. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo investigar o desempenho de um gaseificador de biomassa ao qual foi incorporado um reservatório de gás (pulmão). Toda a experimentação foi realizada no Laboratório de Inovação (LI) da Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Os aparatos utilizados na realização dos testes foram um gaseificador de biomassa com capacidade para 80 kWt, um motor MWM 229/6 a diesel, de seis cilindros, convertido para gás, um gerador Negrine, com potência nominal de 150 kVa, e potência ativa de 120 kW, um tanque de armazenamento de gás pobre (pulmão), um simulador de carga e vários instrumentos de medidas. Para se avaliar a importância do pulmão no funcionamento do sistema formado pelo gaseificador/grupo gerador, vários experimentos foram levados a cabo, inicialmente sem o pulmão, e em seguida incluindo-o. Verificou-se que o pulmão influenciou na ampliação da potência elétrica gerada, e também, possibilitou a redução no tempo de partida do sistema e na estabilização do motor, em todas as potências. Impediu, ainda, que a água de lavagem do gás, fosse arrastada para o filtro de manga, e para o motor. Os resultados do presente trabalho foram comparados com os de Rumão (2013) e de Bezerra (2016), permitindo-se observar que no presente trabalho foi possível se atingir potências mais elevadas, com altas eficiências. A potência máxima obtida nos testes foi de 32 kWe, tendo a eficiência chegado a 93,65% para o gaseificador, e 19,75% para o grupo gerador.

Palavras chaves: Biomassa; Gaseificador de biomassa; Pulmão; Tempo de resposta; Eficiência.

EFFECT OF A GAS RESERVOIR ON THE BIOMASS GASIFIER THERMAL EFFICIENCY

ABSTRACT

In recent years, biomass gasification has been one of the most promising alternatives to clean energy generation, which turns biomass into a fuel capable of generating energy through direct combustion or feeding internal combustion engines to power generation. Much has been invested in gasification research, with the purpose of making it more practical and more efficient. In this sense, the present work aims to investigate the performance of a biomass gasifier to which a gas tank (lung) has been incorporated. All the experiments were carried out at the Laboratory of Innovation (LI) of the Federal University of Paraíba - UFPB. The devices used in the tests were a biomass gasifier with a capacity of 80 kWt, a MWM 229/6 diesel engine, six-cylinder, converted to gas, a Negrine generator with a prime power of 150 kVa, and standby power of 120 kW, a poor gas storage tank, a load simulator and several measuring instruments. In order to evaluate the importance of the lung in the functioning of the system formed by the gasifier/generator set, several experiments were carried out, initially without the lung, and then including it. It was verified that the storage tank influenced in the amplification of the electric power generated, and also made it possible to reduce the system start time and stabilize the engine at all power levels. It also prevented the gas washing water from being drawn into the filter sleeve and into the engine. The results of the present work were compared with those of Rumão (2013) and Bezerra (2016), allowing to observe that in the present work it was possible to reach higher power, with high efficiencies. The maximum power obtained in the tests was 32 kWe, with efficiency of 93.65% for the gasifier, and 19.75% for the generator set.

Keywords: Biomass; Biomass gasifier; Response time; Efficiency.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	4
A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA.....	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. A BIOMASSA.....	4
2.3. A GASEIFICAÇÃO	5
2.3.1. Princípios do Processo de Gaseificação	6
2.3.2. Reações de Gaseificação	6
2.4. DESTRUIÇÃO DO ALCATRÃO	8
2.5. O GASEIFICADOR.....	8
2.5.1. Tipos de Gaseificadores	9
2.5.1.1. Os Gaseificadores Co-correntes	9
2.6. FORMAÇÃO DE CINZAS EM GASEIFICADORES.....	10
2.7. RESERVATÓRIO DE GÁS (PULMÃO).....	11
CAPÍTULO III.....	13
A EXPERIMENTAÇÃO	13
3.1. INTRODUÇÃO.....	13
3.2. OS EQUIPAMENTOS	13
3.2.1. O Gaseificador Utilizado neste Trabalho	13
3.2.1.1. Implantação do Sistema de Desobstrução da Grelha.....	15

3.2.2.	O Grupo Gerador.....	17
3.2.3.	O Reservatório de Gás (Pulmão).....	18
3.3.	APARATOS SUPLEMENTARES	18
3.3.1.	A Serra de Bancada Elétrica.....	19
3.3.2.	A Balança Digital	19
3.3.3.	A Termobalança Analítica	20
3.3.4.	O Analisador de Gases Veiculares	20
3.3.5.	O Simulador de Carga	21
3.4.	OS EXPERIMENTOS.....	22
3.5.	OS TESTES REALIZADOS.....	24
CAPÍTULO IV.....		28
RESULTADOS E DISCUSSÕES		28
4.1.	INTRODUÇÃO.....	28
4.2.	TEOR DE UMIDADE E A MASSA ESPECÍFICA DA BIOMASSA	28
4.3.	POTÊNCIA ELÉTRICA MÁXIMA ALCANÇADA.....	29
4.4.	MEDIDAS DE TEMPERATURAS.....	30
4.5.	PRESSÕES RELATIVAS.....	31
4.6.	A CONCENTRAÇÃO DE HC	32
4.7.	PERCENTUAL DE CO NO GÁS POBRE.....	33
4.8.	A VELOCIDADE DO GÁS.....	33
4.9.	O CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOMASSA.....	34
4.10.	O PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DA BIOMASSA.....	35
4.11.	O PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DO GÁS POBRE.....	35
4.12.	EFICIÊNCIAS	36
4.12.1.	A Eficiência do Gaseificador	36
4.12.2.	A Eficiência do Grupo Gerador	37
4.12.3.	Eficiência do Sistema Gaseificador/Grupo Gerador	38

4.13. O TEMPO DE RESPOSTA.....	39
CAPÍTULO V	40
CONCLUSÕES.....	40
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração do gaseificador co-corrente.....	10
Figura 2. O gaseificador utilizado neste trabalho.....	14
Figura 3. Ilustração do gaseificador Indiano.....	14
Figura 4. Nível de cinzas acumulado sobre a grelha.....	16
Figura 5. O sistema de desobstrução de grelha.....	17
Figura 6. O grupo gerador utilizado neste trabalho.....	17
Figura 7. O reservatório de Gás - Pulmão.....	18
Figura 8. A Serra de bancada elétrica.....	19
Figura 9. A balança digital.....	19
Figura 10. A termobalança analítica.....	20
Figura 11. O analisador de gases veiculares.....	21
Figura 12. Simulador de carga elétrica.....	21
Figura 13. Biomassa utilizada nos experimentos.....	22
Figura 14. Orifício lateral do gaseificador.....	23
Figura 15. Chama piloto acionada.....	23
Figura 16. Potência máxima alcançada em cada ângulo.....	29
Figura 17. Temperaturas do gás pobre na admissão do motor.....	31
Figura 18. O consumo específico de biomassa.....	34
Figura 19. Eficiências do gaseificador.....	37
Figura 20. Eficiência do grupo gerador.....	38
Figura 21. Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais reações químicas que ocorrem na gaseificação (Adaptado de GÓMEZ-BAREA E LECKNER, 2010 <i>apud</i> CASTELLANOS, 2012).....	7
Tabela 2. Relação entre as potências e os ângulos utilizados nos testes.....	24
Tabela 3. Dados referentes ao teor de umidade da biomassa utilizada.....	28
Tabela 4. Dados referentes à massa específica da biomassa utilizada.....	29
Tabela 5: Medidas de temperaturas nas seções de lavagem do gás pobre.....	30
Tabela 6. Medidas da pressão relativa após o chiller (P1) e antes do filtro de manga (P2).....	32
Tabela 7. A concentração de HC no gás de síntese.....	32
Tabela 8. Níveis de CO no gás de síntese.....	33
Tabela 9. Velocidade do gás de síntese.....	34
Tabela 10. PCI das quatro amostras de madeira.....	35
Tabela 11. PCI do gás pobre.....	36
Tabela 12. Tempo de resposta do motor.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

CB – Consumo de biomassa.

D – Diâmetro da tubulação de escoamento (m).

g – Aceleração devido à gravidade (m/s^2).

h – Deslocamento do fluido no tubo em “ U ” (m).

HC – Hidrocarbonetos.

IISc/CGPL – Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory.

LI – Laboratório de Inovação.

M_{ad} – Massa adicionada.

MAP – Manifold Absolute Pressure.

$PCI_{biomassa}$ – Poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador (J/kg).

$PCI_{carvão}$ – Poder calorífico inferior do carvão produzido pelo gaseificador (MJ/kg).

$PCI_{gás}$ – Poder calorífico inferior do gás produzido pelo gaseificador (J/Nm³).

$Pe_{útil}$ – Potência elétrica útil (W).

$P_{máx}$ – Pressão de desligamento do compressor, em bar.

P_{min} – Pressão de religamento do compressor, em bar.

$Q_{gás}$ – Vazão de gás pobre (m^3/s).

Q – Demanda do sistema (Compressor).

t – Tempo em que a massa foi consumida no gaseificador (h).

UFPB – Universidade Federal da Paraíba.

%CO – Porcentagem de monóxido de carbono.

γ_{gas} – Peso específico do gás que está escoando no tubo (N/m^3).

γ_{liq} – Peso específico do líquido no tubo em “U” (N/m^3).

$\eta_{gaseif.}$ – Eficiência de gaseificação.

$\eta_{global.}$ – Eficiência do sistema gaseificador / grupo gerador.

$\eta_{grupogrador}$ – Eficiência do grupo gerador.

ΔP – Variação de pressão

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Como se sabe, a principal fonte de energia no mundo advém de fontes não renováveis como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural (OECD/IEA, 2017). Esses combustíveis possibilitaram o desenvolvimento de grandes centros urbanos, e o crescimento econômico de muitos países em um curto espaço de tempo. Conforme Silva *et al.* (2003), essa dependência enorme dos combustíveis fósseis tem levado a preocupações com o esgotamento dessas fontes e os impactos ambientais causados, devido à emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Muitos especialistas associam o aumento da temperatura média da Terra nas últimas décadas ao Efeito Estufa, causado pelo acréscimo de CO₂ e outros gases na atmosfera. Procurando reduzir a emissão desses poluentes, investimentos vêm sendo feitos a fim de substituir esses combustíveis por combustíveis limpos, como as fontes eólica, solar, e os derivados de biomassa, que possuem baixa emissão de poluentes e/ou nenhuma emissão de CO₂.

No Brasil, 80,6% da energia utilizada advém de fontes renováveis, tendo como destaques a hídrica, com 64,57%, e a de biomassa com 9,45% (ANEEL, 2017). Devido as dificuldades de instalação de novas usinas hidrelétricas no país, em virtude da inexistência de sítios plausíveis (acessibilidade, topografia favorável, ausência de conflitos de ordem ecológica, ou social), e a escassez de chuvas, o número de termelétricas em utilização vem aumentando. Assim, cerca de 20% da energia elétrica no Brasil é proveniente de termelétricas. São dois os inconvenientes produzidos pelas termelétricas, poluição ambiental e energia que chega a custar 8 vezes mais do que a que tem origem nas hidrelétricas. Considerando, portanto, a grande vocação brasileira de utilizar a biomassa como fonte de energia, têm-se nessa opção a saída para se evitar o uso das termelétricas a combustíveis fósseis.

Por biomassa se entende qualquer matéria orgânica capaz de gerar energia. Pode

ser de origem animal, vegetal ou de micro-organismos. Mais especificamente, a biomassa está relacionada à uma variedade de materiais orgânicos, que podem tomar diversas formas como: cultivares, madeiras, serragem, palha, estrume, lixo de papel, refugo doméstico, esgotos, entre outros. Além disso, resíduos florestais, agrícolas e matéria orgânica provenientes de processos industriais, domésticos, comerciais e rurais, também se configuram como fontes energéticas (SCHUTZ, 2013). Dentre as formas de utilização da biomassa como fonte de energia, pode-se empregar a abordagem direta, em que a combustão da mesma gera calor como produto energético imediato, ou a abordagem indireta, em que a combustão ocorre após a biomassa passar por outro processo físico, termodinâmico (pirólise, gaseificação ou liquefação) ou biológico (digestão anaeróbica e fermentação). A abordagem indireta tem como produto uma fonte energética secundária, que pode ser sólida, líquida ou gasosa. Alguns exemplos são os biocombustíveis, o carvão vegetal e o gás.

A gaseificação é a forma mais eficiente de se extrair a energia química da biomassa, para aplicações térmicas ou para a produção de energia elétrica. Na gaseificação a oxidação se dá em quantidades abaixo das estequiometricamente necessárias. A gaseificação e a pirólise são processos integrados, uma vez que a pirólise representa a etapa inicial do processo de gaseificação é responsável pela decomposição térmica da biomassa, desempenhando também um papel importante nas mudanças físicas subsequentes (ARDILA, 2015).

O equipamento responsável por realizar o processo de gaseificação é chamado de gaseificador. Um gaseificador é formado por um reator onde acontecem as reações de gaseificação e pelos acessórios responsáveis pela limpeza e resfriamento do gás pobre. De acordo com Andrade (2007), dentre os vários tipos de gaseificadores existentes, os gaseificadores co-correntes são os mais difundidos, sendo empregados em diversas aplicações devido ao gás com baixo teor de alcatrão gerado pelos mesmos. A prática do uso de gaseificadores tem demonstrado a necessidade de evoluir no projeto dos gaseificadores no sentido de aumentar sua eficiência térmica e facilitar sua operação.

Tendo em vista que durante a realização da tese de Bezerra (2016), foi verificado que o reservatório de gás, conhecido como pulmão, favorecia a estabilização mais rápida do motor, este trabalho tem como objetivo analisar o efeito na eficiência energética de um gaseificador co-corrente, a partir da introdução de um reservatório de gás. Para isso, faz-se necessário estudar o arranjo estrutural bem como o princípio de funcionamento do gaseificador e do reservatório de gás, e realizar testes experimentais do sistema

funcionando com e sem o pulmão, para assim, se correlacionar os dados obtidos com as eficiências energéticas resultantes.

O gaseificador co-corrente utilizado na experimentação foi importado da Índia, do Indian of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory (IISc/CGPL), sendo que no seu projeto original deveria alimentar um motor dual (diesel/gás pobre) para produzir potência elétrica máxima de 20 kW.

O reservatório de gás foi introduzido, pela primeira vez, como componente do sistema gaseificador/grupo gerador por Bezerra (2016).

Antes de se proceder aos testes de análise de desempenho do sistema gaseificador/grupo gerador, determinou-se os teores de umidade, a massa específica, e o poder calorífico inferior da biomassa utilizada.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo I trata da Introdução. No Capítulo II é apresentada uma Revisão Bibliográfica sobre a gaseificação de biomassa, onde é discutido o princípio do processo de gaseificação, considera-se os principais tipos de gaseificadores e as funções dos reservatórios de ar comprimido. O Capítulo III apresenta os detalhes da experimentação, descrevendo-se os equipamentos e aparatos utilizados, bem como os procedimentos e testes realizados. No Capítulo IV são apresentados os dados obtidos a partir dos testes realizados, discutindo-se e comparando-se os resultados no contexto das eficiências energéticas alcançadas. Por fim, no Capítulo V são apresentadas as Conclusões.

CAPÍTULO II

A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar o embasamento técnico-teórico empregado na realização deste trabalho, a fim de dar o suporte necessário para a compreensão dos temas tratados neste trabalho.

2.2. A BIOMASSA

Conforme ANEEL (2008) e Andrade (2007), biomassa é qualquer matéria orgânica e vegetal capaz de gerar energia, seja ela na forma mecânica, térmica ou elétrica. A mesma pode ser classificada conforme a sua origem em: florestal, agrícola e rejeitos. Os rejeitos por sua vez podem ser de origem urbana ou industrial e ainda, sólidos ou líquidos.

A biomassa é considerada uma fonte renovável, devido sua capacidade de reprodução. Além disso, ela é capaz de se desenvolver rapidamente, sem necessitar de milhões de anos, como foi o caso dos combustíveis fósseis. Outro fator relevante acerca da biomassa é que, a mesma absorve o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera para se desenvolver, e quando ela queima, parte do CO_2 liberado é absorvido por outra planta (BASU, 2010). Dessa maneira, pode-se afirmar que a queima da biomassa influencia menos no efeito estufa do que os combustíveis fósseis (ÁNGEL, 2009).

Conforme Kinto, *et al* (2002) e Cortez, Lora e Ayarza (2008) há muito tempo a biomassa já era utilizada como fonte de energia. No entanto, há pouco mais de 100 anos ela caiu em desuso, devido à crescente utilização dos combustíveis fósseis. Cortez, Lora

e Ayarza (2008) afirmam que, devido à busca por alternativas renováveis capazes de substituir os derivados do petróleo, grandes emissores de gases causadores do efeito estufa, o emprego da biomassa vem se intensificando ao longo dos últimos anos.

Muitas são as técnicas para obtenção de energia a partir da transformação da biomassa em um combustível. Os produtos obtidos dependem do tipo de técnica empregada, o que gera uma diversidade de aplicações (ANEEL, 2008). No entanto, se o uso da biomassa for feito de modo incorreto, a produção de energia advinda dessa fonte pode gerar efeitos negativos no ambiente (BREEZE, 2004).

Uma das técnicas que emprega a biomassa na geração de energia é a gaseificação, que será apresentada no tópico a seguir.

2.3. A GASEIFICAÇÃO

Pode-se definir a gaseificação como um processo que transforma a matéria orgânica em gás combustível. Essa conversão se dá através da queima da biomassa com baixa percentagem de ar em relação à queima estequiométrica (ANDRADE, 2007).

Lora, *et al* (2008) definem a gaseificação como sendo um processo de conversão termoquímica que transforma um material sólido orgânico, em um gás combustível. Esse processo de conversão se dá através da oxidação parcial em temperaturas elevadas, e em pressões que podem variar da atmosférica até 33 bar.

O agente oxidante responsável pela gaseificação pode ser o ar, vapor de água, oxigênio ou mesmo uma mistura destes. O poder calorífico do gás produzido varia conforme o tipo e a quantidade do agente oxidante utilizado. Quando este for o ar, o poder calorífico fica entre 4 e 7 MJ/Nm³, enquanto que se for vapor de água, está entre 10 e 18 MJ/Nm³, e oxigênio entre 12 e 28 MJ/Nm³ (CASTELLANOS, 2012). O gás gerado neste processo é chamado de gás pobre devido seu baixo poder calorífico.

Quando o agente oxidante for o ar, o gás gerado é uma mistura de gases: CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂. Além destes, tem a presença de outros elementos e vários contaminantes como particulados de alcatrão (ANDRADE, 2007)

A gaseificação de biomassa ainda está em fase de desenvolvimento, mas promete alta eficiência e pode oferecer a melhor opção para geração futura de energia (BREEZE, 2004).

2.3.1. Princípios do Processo de Gaseificação

O processo de gaseificação realiza-se no interior do reator, onde a biomassa passa por quatro etapas até ser transformada em um gás combustível. As etapas são: secagem; pirólise; oxidação ou combustão; e redução. A região em que ocorre essas etapas são chamadas de zonas, e nelas acontecem todas as reações da gaseificação.

Em gaseificadores do tipo co-corrente, dá-se início a gaseificação com a etapa de secagem, onde, através do aquecimento da biomassa, parte da umidade contida na mesma é convertida em vapor de água. À medida que o aquecimento continua, a biomassa sofre pirólise. Esta por sua vez, envolve a queima completa da biomassa na ausência total do oxigênio. Os produtos obtidos através da pirólise são: O carvão vegetal; os gases de combustão (H_2 , CO , CO_2 , CH_4); e o alcatrão (LORA *et al*, 2008). A etapa seguinte é a oxidação ou combustão, nela o carvão vegetal produzido na zona anterior reage com o ar, que é inserido no gaseificador, para produzir dióxido de carbono e calor. Por fim, ocorre a etapa da redução, onde, em temperaturas mais elevadas e sob condições redutoras, isto é, quando não há oxigênio suficiente, reações químicas ocorrem formando monóxido de carbono, hidrogênio e metano.

2.3.2. Reações de Gaseificação

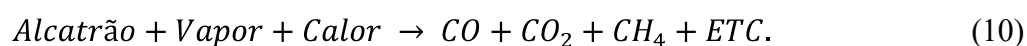
O processo de gaseificação é caracterizado por um conjunto de reações químicas, que ocorrem no interior do reator, nas quatro zonas da gaseificação citadas anteriormente. A Tabela 1 apresenta as principais reações, assim como os seus respectivos calores de reação.

O sinal positivo atribuído antes do valor do calor da reação indica que essa reação é endotérmica, enquanto que o sinal negativo é atribuído para reações exotérmicas.

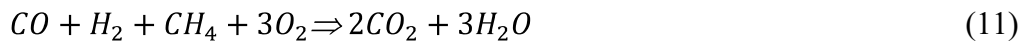
Tabela 1. Principais reações químicas que ocorrem na gaseificação (Adaptado de GÓMEZ-BAREA E LECKNER, 2010 *apud* CASTELLANOS, 2012).

Nome da reação	Estequiometria	Calor de Reação [kJ/mol]	Número da Eq.
Reações homogêneas			
Oxidação de monóxido de carbono	$CO + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO_2$	-283	(1)
Oxidação de hidrogênio	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow H_2O$	-242	(2)
Oxidação de metano	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$	-803	(3)
Reação de deslocamento de água	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41	(4)
Reações heterogênea			
Gaseificação de carbonizado			
Reação de Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+173	(5)
Gaseificação com vapor	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131	(6)
Hidro-gaseificação	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75	(7)
Combustão do carbonizado			
Combustão completa do carbonizado	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394	(8)
Combustão parcial do carbonizado	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	-111	(9)

Outra reação importante que acontece durante a gaseificação é o craqueamento do alcatrão. Essa reação se dá em altas temperaturas, onde ocorre a destruição térmica das moléculas que formam o alcatrão (OLIVEIRA, 2008). A mesma é de extrema importância, uma vez que esse composto prejudica o funcionamento dos equipamentos que formam o sistema gaseificador grupo gerador.



Além dessas, deve-se salientar a reação de oxidação que ocorre por meio dos produtos da pirólise:



2.4. DESTRUIÇÃO DO ALCATRÃO

Dentre os produtos da pirólise na gaseificação, o alcatrão é o mais indesejado. Ele se encontra no estado líquido e possui alta viscosidade. Em altas temperaturas ele permanece vaporizado, no entanto, quando resfriado, o mesmo se condensa nas partes do gaseificador, obstruindo a passagem de gás, ou até mesmo no motor de combustão interna, prejudicando o funcionamento deste (BASU, 2010).

Através do documento lançado em março de 1998, que foi elaborado em uma reunião em Bruxelas, pelos membros da IEA Bioenergy (US DOE e DGXVII da Comissão Europeia) o alcatrão foi definido como sendo hidrocarbonetos com peso molecular acima do benzeno (LAURENCE, ASHENAFI, 2012). Os hidrocarbonetos de alto peso molecular (alcatrão), não possuem aplicações no processo de gaseificação, a presença destes gera perda de rendimento do processo e prejudica o funcionamento dos equipamentos do sistema. No entanto, os de baixo peso molecular podem ser utilizados em turbinas e até mesmo em motores de combustão interna (LAURENCE, ASHENAFI, 2012).

Chen et al (2009) e Dabai et al (2010) constataram em suas pesquisas que a concentração de alcatrão no gás produzido diminui à medida que aumenta a temperatura na zona de combustão, e que, quanto maior for o tempo de residência do gás de síntese nessa zona, menor será a quantidade de alcatrão gerado. Segundo Quadros e Fernandes (2017) um outro fator que interfere na concentração de alcatrão gerado, é o tamanho da partícula de biomassa empregado no processo, onde maiores partículas geram menos alcatrão. Isso ocorre pelo fato de que “partículas maiores fornecerem mais locais para que o alcatrão seja destruído e também da pirólise ocorrer mais lentamente em relação a partículas pequenas” (QUADROS, FERNANDES, 2017).

2.5. O GASEIFICADOR

O gaseificador é o equipamento responsável por realizar o processo de pirólise.

Ele é formado pelo reator, onde acontecem todas as reações da gaseificação, e os acessórios, responsáveis por realizarem a limpeza e resfriamento do gás pobre.

2.5.1. Tipos de Gaseificadores

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidos diversos tipos de gaseificadores, a fim de suprir as necessidades e exigências tecnológicas atuais. Estes por sua vez são classificados segundo a pressão em atmosféricos ou pressurizados, e ainda de acordo com o tipo de leito, que pode ser: em movimento (fixo); fluidizado; e arrastado (SALES, 2007).

A classificação segundo o tipo de leito é a mais usual, podendo ainda subdividir os gaseificadores de leito fixo, tomando por base a direção do movimento que a biomassa e os agentes da gaseificação realizam no interior do reator, em: contra-fluxo ou contra-corrente; co-corrente ou fluxo direto ou paralelo; e fluxo cruzado.

O gaseificador utilizado neste trabalho é do tipo co-corrente. O mesmo será descrito no tópico a seguir.

2.5.1.1. Os Gaseificadores Co-correntes

Os gaseificadores co-correntes são os mais difundidos, sendo utilizado até em veículos. Seu arranjo estrutural permite gerar um gás com baixo teor de alcatrão, o que possibilita sua aplicação em diversos equipamentos (ANDRADE, 2007).

Nesse tipo de gaseificador a alimentação de biomassa é feita pelo topo do reator, enquanto que o ar é fornecido tanto por cima como pela lateral, e a extração do gás é feita pelo fundo, conforme mostrado na Figura 1. Com isso, o gás é forçado a passar pela zona de combustão, que possui alta temperatura, possibilitando o craqueamento do alcatrão (SALES, 2007). Conforme Bhattcharya et al (2001) apud Angel (2009) o nível de concentração de alcatrão gerado neste tipo de gaseificador pode chegar a 500 mg/m³. Esse valor é considerado relativamente baixo, considerando assim como um gaseificador de baixo teor de alcatrão.

Os gaseificadores co-correntes possuem zonas de reação bem definidas, onde a biomassa passa primeiramente pela zona de secagem, em seguida pela pirólise, posteriormente pela combustão e por fim, pela zona de redução, onde são formados o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H₂) (ANDRADE, 2007, SALES, 2007).

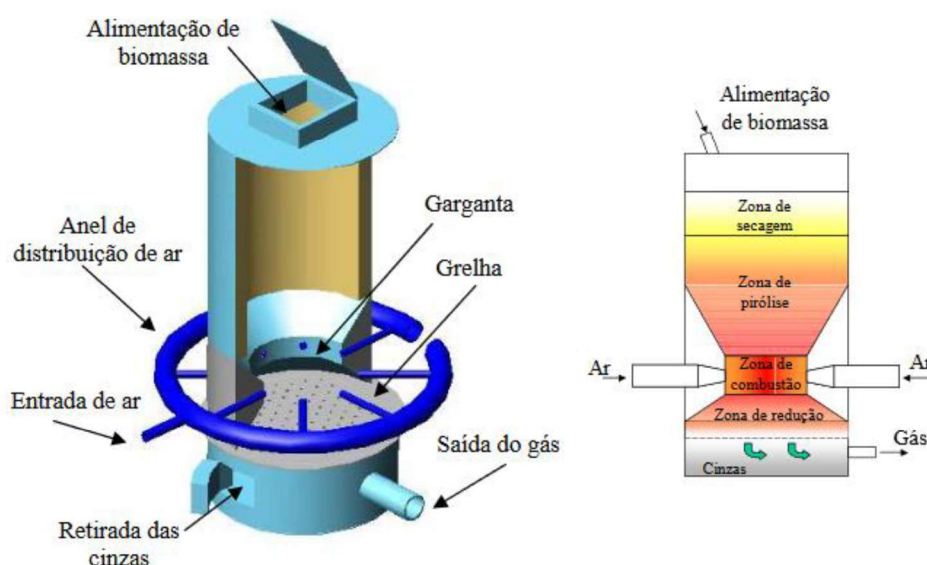


Figura 1. Ilustração do gaseificador co-corrente (ANDRADE, 2007).

As principais vantagens desse tipo de gaseificador é a sua simplicidade estrutural e o baixo custo de investimento. Por outro lado, a biomassa não pode apresentar um percentual de umidade acima de 20% (DABAI, et al 2010), possui dificuldade de lidar com as cinzas e é adequado apenas em unidades de pequeno porte (QUADROS e FERNANDES, 2017).

2.6. FORMAÇÃO DE CINZAS EM GASEIFICADORES

Um dos subprodutos da gaseificação de biomassa é a cinza. Essa, por sua vez, é formada por compostos inorgânicos, tendo como principais componentes a sílica, o alumínio, o ferro e o cálcio, podendo apresentar ainda em sua composição magnésio, titânio, sódio e potássio (NOGUEIRA, 2012). De acordo com Muraro (2006) a cinza pode ser utilizada na agricultura como adubo, ou ainda, na indústria de cimentos. Por outro lado, a presença da mesma nos gaseificadores, pode gerar problemas operacionais como aglomeração, incrustação e corrosão (MCKENDRY, 2002a *apud* NOGUEIRA, 2012).

No processo de gaseificação, o grande acúmulo de cinzas sobre a grelha do gaseificador é indesejado, pois o seu excesso pode gerar obstruções à passagem do ar e consequente descontinuidade no processo. No entanto, é necessário que se tenha uma quantidade mínima de cinzas sobre a grelha para protegê-la de um aquecimento excessivo

(RIBEIRO, 2010). Em gaseificadores do tipo co-corrente, modelo utilizado neste trabalho, a variação de temperatura no reator pode dar origem a pontos quentes, que favorecem a fusão das cinzas, e conseqüentemente a obstrução na grelha (ÁNGEL, 2009). Para evitar que isso ocorra, pode-se utilizar de mecanismos de remoção de cinzas ou até mesmo projetar a grelha de modo a garantir a oxigenação suficiente de combustível e o escoamento das cinzas (MARTIN *et al*, 2010).

Duarte *et al* (1983) relatam que durante seus experimentos, foi possível notar que a partir de um certo tempo de funcionamento do gaseificador, o mesmo apresentava valores de perda de carga bem altos no reator, identificando a existência de entupimentos causados pelas cinzas, necessitando de uma limpeza do equipamento a cada 3 ou 4 testes.

A seguir serão citados alguns trabalhos que utilizaram em seus gaseificadores dispositivos para remoção de cinzas:

- **Coronado, Silveira e Arauzo (2006):** Desenvolveram um dispositivo para remoção das cinzas na grelha, o qual era formado por 3 discos de aço refratário decrescentes, arranjados excêntricamente, sendo acionado automaticamente, em tempos regulares, por um motor elétrico de 1 CV de potência.
- **Ángel (2009) e Nogueira (2012):** Utilizaram em seus trabalhos um gaseificador do tipo co-corrente com duplo estágio, projetado pela empresa TERMOQUIP ENERGIA ALTERNATIVA LTDA, o qual está instalado nos laboratórios do NEST/UNIFEI. Esse gaseificador possui um mecanismo de vibração fixado na grelha. Esse equipamento é acionado por um temporizador, permitindo o movimento da grelha em tempos regulares, de modo a favorecer a descarga das cinzas.
- **Quadros e Fernandes (2017):** O gaseificador utilizado foi do tipo co-corrente com duplo estágio. O mesmo possui uma grelha rotativa, que serve como dispositivo para remoção de cinzas. A grelha possui ranhuras e lacunas, a qual, quando acionada, gira e o seu movimento faz com que as cinzas sejam retiradas e transportadas para o reservatório. O dispositivo de rotação é acionado duas vezes por hora, girando no sentido horário ou anti-horário.

2.7. RESERVATÓRIO DE GÁS (PULMÃO)

O reservatório de gás, conhecido como pulmão, foi primeiramente introduzido em um gaseificador de biomassa por Bezerra (2016), com a finalidade de reter a água que

era arrastada dos reservatórios utilizados na lavagem do gás, evitando que a mesma chegasse ao filtro de manga, e assim interrompesse o processo. No entanto, Bezerra (2016) notou em seus experimentos que o pulmão contribuía para uma estabilização mais rápida do motor no momento que era solicitado uma nova carga. Com isso, foi possível observar que o pulmão realizava funções semelhantes aos reservatórios de ar comprimido, que são utilizados em compressores, as quais são: redução da condição de pulsação; coleta do condensado; e atender a picos de demanda.

Semelhantemente ao reservatório de ar comprimido, o pulmão de gás pode exercer funções de grande valia ao sistema gaseificador/grupo gerador. Uma diferença é que neste caso as pressões internas são inferiores à atmosférica, chegando nos testes executados no presente trabalho a $-7,9 \times 10^{-2}$ bar. Desta forma, suas paredes devem ter reforços suficientes para que não implodam.

Tendo em vista que recebe o gás refrigerado depois de ter passado pelo “chiller”, é necessário que ele seja isolado termicamente, para ao transitar por aquele estágio o gás pobre não eleve, significativamente, sua temperatura.

Considerando que uma outra função do pulmão é impedir que a água que é arrastada pelo gás pobre chegue até o motor, ele é instalado entre a segunda lavagem e o filtro de manga.

Sua introdução no circuito do gaseificador deve ser feita de forma a não gerar muita perda de carga.

CAPÍTULO III

A EXPERIMENTAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo se discute todo o aparato utilizado, nos ensaios, os procedimentos experimentais, e os experimentos realizados. Todos os aparatos utilizados neste trabalho, pertencem ao Laboratório de Inovação (LI), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

3.2. OS EQUIPAMENTOS

O sistema em estudo é formado, basicamente, pelo gaseificador Indiano, ver Figura 2, e o grupo gerador, ver Figura 6. O gaseificador é o responsável pela produção do gás pobre que será usado como combustível para o motor.

3.2.1. O Gaseificador Utilizado neste Trabalho

O gaseificador utilizado neste trabalho é do tipo leito fixo, co-corrente, “topo aberto”, que foi importado da Índia, do Indian of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory (Figura 2). O mesmo foi desenvolvido, originalmente, para alimentar um motor do tipo Dual, com uma capacidade máxima de geração de 20 kWe. Após se promover algumas alterações no gaseificador, ele pôde ser empregado em motores do ciclo Otto (RUMÃO, 2013, e BEZERRA, 2016), que chegaram a obter potências ainda maiores do que a especificada pelo fabricante. Rumão (2013), gerou, em seus ensaios, potência de 26 kWe, requerendo menos energia do que o modelo original, enquanto que Bezerra (2016), alcançou potência de 29 kWe.



Figura 2. O gaseificador utilizado neste trabalho.

A Figura 3 ilustra o gaseificador utilizado neste trabalho, assim como seus principais componentes.

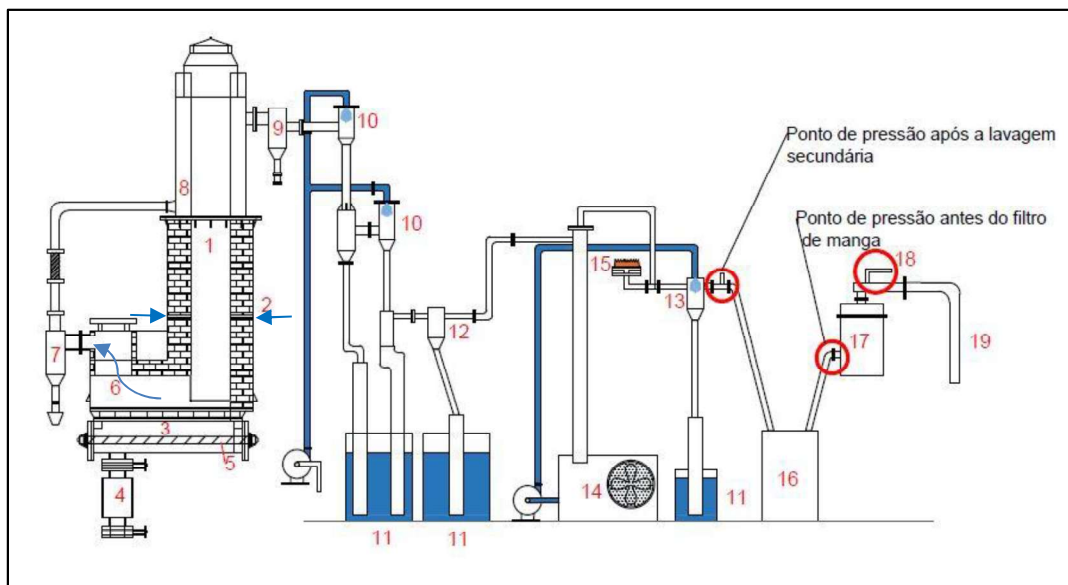


Figura 3. Ilustração do gaseificador Indiano.

Nesse gaseificador a biomassa é inserida pela parte superior do reator, por onde, também é admitida, a maior porcentagem de ar, que é necessária ao processo de gaseificação.

O local em que ocorrem todas as reações da gaseificação é chamado de reator (1). Esse por sua vez é o principal item do gaseificador.

Os orifícios laterais (2) são utilizados como entrada de ar secundária, servindo, também, para passagem da chama de um maçarico, para se inflamar o carvão, no início do processo.

Abaixo do reator encontra-se o depósito de cinzas (base) (3), que é o responsável pelo armazenamento das cinzas geradas na combustão. O eliminador de cinzas (4) é o responsável pela extração das cinzas. No entanto, para que essas cinzas cheguem ao eliminador é necessário o acionamento do sem-fim (5), feito automaticamente por um motor em baixa velocidade.

O gás pobre gerado na gaseificação sai do reator através da tubulação (6) e passa pelo ciclone (7) que busca extrair os particulados do gás. Em seguida, o gás entra na região de secagem do gaseificador, passando entre duas paredes, permitindo o pré-aquecimento da biomassa (8).

Ao sair do gaseificador, o gás pobre percorre vários componentes até poder ser utilizado como combustível no motor. Esses componentes são: conduto com placa de condensação de alcatrão (9); Dois resfriadores (“coolers”), em que ocorre a lavagem primária do gás com água (10); conduto com placa de condensação da água no gás (12); trocador de calor (cooler) (13), que utiliza água proveniente de uma central de refrigeração (chiller) (14) para realizar a lavagem secundária, a fim de aumentar a massa específica do gás; queimador de chama piloto (15) (primeiro destino); reservatório de gás (pulmão) (16); filtro de manga (17), que tem como função reter os particulados que não foram eliminados durante o processo de lavagem; válvula de passagem e de controle do fluxo do gás pobre (18); e tubulação de distribuição do gás para o motor (19). Deve-se observar que após o contato com o gás, a água de lavagem é transportada para um reservatório de armazenamento, que permite seu reuso, posteriormente.

3.2.1.1. Implantação do Sistema de Desobstrução da Grelha

A partir dos testes preliminares, percebeu-se que com um certo tempo de funcionamento do gaseificador, a vazão de gás produzido se reduzia, ao tempo em que a

mistura ar/gás, se tornava pobre. Verificou-se, então, que a causa do problema se devia, a grande quantidade de cinzas que se acumulava sobre a grelha, dificultando a oxigenação do reator e a passagem do gás pobre, ver Figura 4. Para se retirar completamente as cinzas era necessário que toda a biomassa restante no interior do reator fosse queimada, o que exigia cerca de um dia de trabalho.



Figura 4. Nível de cinzas acumulado sobre a grelha.

Com intuito de solucionar esse problema, foi introduzido um sistema de desobstrução de grelha (Figura 5), o qual foi fixado na base do gaseificador, de modo que o seu acionamento era feito, manualmente, através de uma manivela. O projeto do dispositivo de desobstrução foi planejado e desenvolvido buscando-se a simplicidade construtiva, a facilidade de manutenção, e o baixo custo. Sua utilização implicou em pequenas modificações no projeto original do gaseificador, tendo-se, inclusive, removido, um sem-fim, cuja finalidade era a remoção das cinzas de seu depósito. Ver item 5 da Figura 3. O acionamento do sistema de desobstrução era realizado apenas no início do processo, antes de se iniciar a queima da biomassa, para promover a limpeza do sistema de gaseificação.



Figura 5. O sistema de desobstrução de grelha.

3.2.2. O Grupo Gerador

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

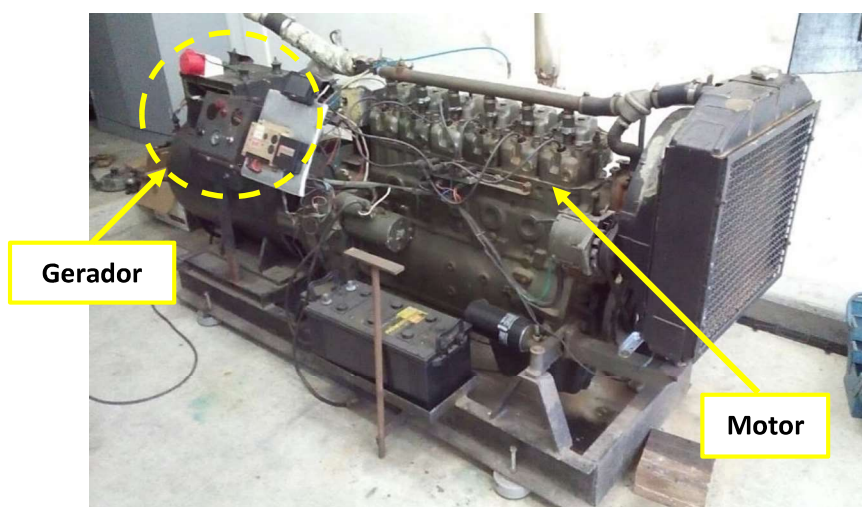


Figura 6. O grupo gerador utilizado neste trabalho.

O motor trabalha segundo o ciclo Diesel, de 4 tempos. Porém, Queironga (2009) promoveu a otolização desse motor para poder utilizá-lo com etanol. Mais recentemente foram realizadas novas adaptações no motor para utilizá-lo com gás pobre (MELO, 2018).

3.2.3. O Reservatório de Gás (Pulmão)

O reservatório utilizado neste trabalho foi inicialmente introduzido por Bezerra (2016), com o intuito de evitar que água fosse arrastada para o filtro de manga, o que prejudicava o funcionamento do motor. No entanto, pôde-se perceber que além de resolver o problema da água no filtro de manga, o pulmão passou a ter as mesmas funcionalidades de um reservatório de ar comprimido, o qual no momento da partida do motor estabilizava mais rapidamente a pressão.

O primeiro recipiente utilizado como pulmão era feito de PVC. O mesmo foi conectado a uma tubulação em PVC entre o cooler da lavagem secundária, item 13 da Figura 3, e o filtro de manga, item 17 da Figura 3, ver Figura 7. No entanto, devido à alta sucção do motor, foi necessário trocar esse reservatório por um mais resistente, feito de aço 1020.

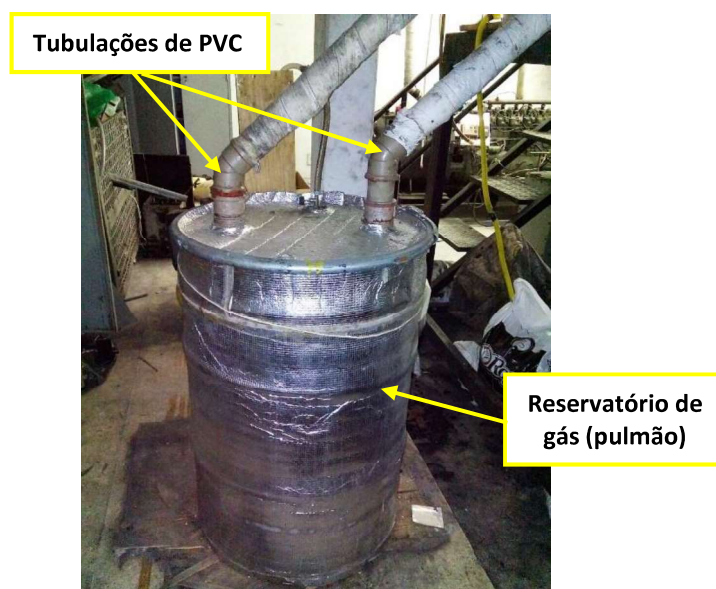


Figura 7. O reservatório de Gás - Pulmão.

3.3. APARATOS SUPLEMENTARES

3.3.1. A Serra de Bancada Elétrica

Para garantir a padronização das dimensões da madeira, foi utilizada uma serra de bancada elétrica, ver Figura 8.



Figura 8. A Serra de bancada elétrica (Rumão, 2013).

3.3.2. A Balança Digital

Para calcular o consumo de biomassa no gaseificador, foi necessário se pesar a biomassa que era adicionada no interior do reator utilizando uma balança digital da marca TOMATE, especificação SF – 400, com capacidade de 10 kg, ver Figura 9.



Figura 9. A balança digital.

3.3.3. A Termobalança Analítica

A fim de determinar a umidade da biomassa, utilizou-se de uma Termobalança semi analítica, com resolução de 0,001 g, 0,01% de umidade e capacidade de 160 g, ver Figura 10. Essa Termobalança usa o infravermelho, com comprimento de onda de 2,5 μm , para obter os resultados de umidade, que são expressos em porcentagem (%) de umidade, ou sólidos secos (BEZERRA, 2016).



Figura 10. A termobalança analítica (BEZERRA, 2016).

3.3.4. O Analisador de Gases Veiculares

O analisador de gases veiculares Discovery G4 da Alfatest (Figura 11), foi utilizado para analisar a emissão gasosa proveniente dos gases. Esse equipamento é composto por quatro componentes, os quais são: central de análise eletrônica, sonda, compressor de ar e regulador de pressão.

Além da composição do gás, dado em volume percentual, o analisador de gases veiculares possui um sensor de O_2 , que prevê se o motor está funcionando com uma queima estequiométrica ($\lambda = 1$), ou não ($\lambda \neq 1$) (BEZERRA, 2016).

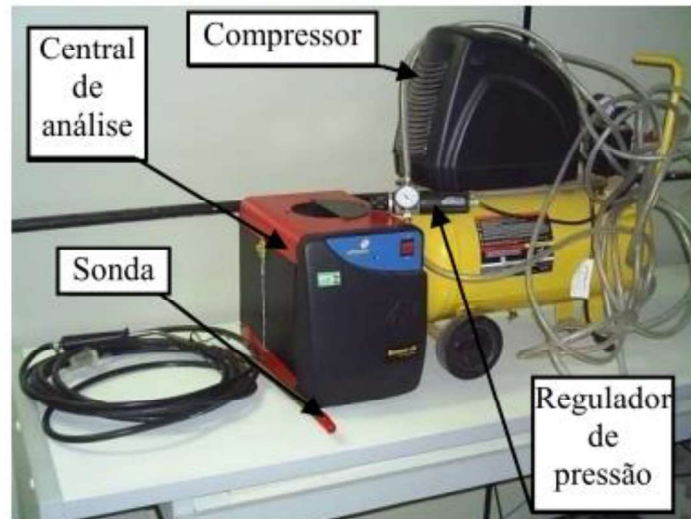


Figura 11. O analisador de gases veiculares (Rumão, 2013).

3.3.5. O Simulador de Carga

O simulador de carga é um equipamento utilizado para obter de forma direta e contínua a potência do motor, através do gerador que está acoplado ao mesmo. Possui um painel de controle com dois módulos de resistores. A capacidade máxima de cada módulo de resistores é de 45 kW.

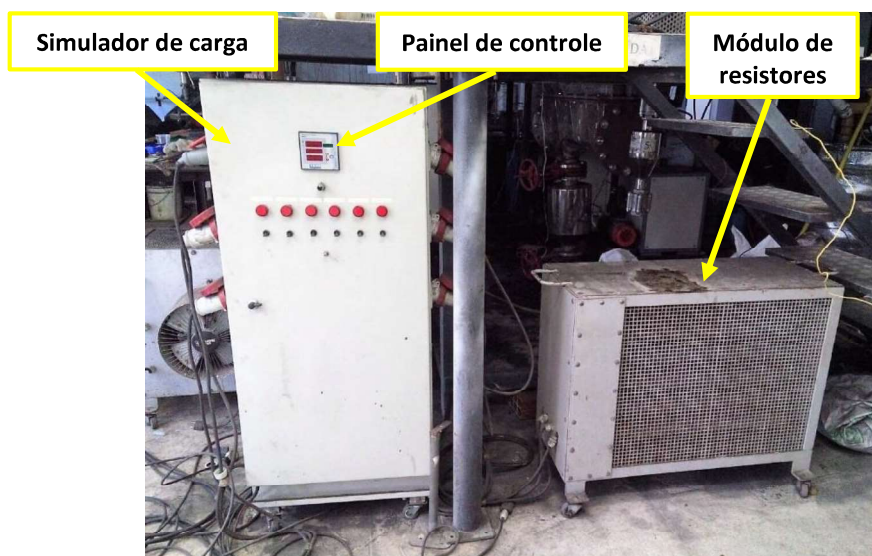


Figura 12. Simulador de carga elétrica.

3.4. OS EXPERIMENTOS

A biomassa utilizada nos testes foi obtida através de rejeitos de madeira, parte deles oriundos da UFPB (cadeiras, mesas, portas e ripas) e outra parte advinda de serrarias (pallets). Para garantir o melhor empacotamento da biomassa no reator e assim uma queima mais uniforme, essas madeiras foram cortadas em cubos, com tamanhos uniformes, conforme estabelecido por Rumão (2013), (60 mm x 25 mm x 25 mm), ver Figura 13.



Figura 13. Biomassa utilizada nos experimentos.

Antes de se iniciar os ensaios, fazia-se necessário verificar o funcionamento de todos os instrumentos de medição que seriam utilizados nos testes, assim como o nível de água dos reservatórios. Feito isso, alimentava-se o gaseificador com carvão, até chegar no nível correto (próximo aos orifícios laterais do gaseificador), e completava-se com biomassa até o topo. Em seguida, eram acionadas as bombas e a central de refrigeração (chiller).

Antes de se iniciar as operações com o gaseificador, era necessário aguardar que a temperatura da água do chiller atingisse os 5 °C. Na sequência, fazendo-se uso de um maçarico a gás, introduzia-se a chama através dos orifícios localizados na parede externa do reator. A biomassa era então inflamada, ver Figura 14.



Figura 14. Orifício lateral do gaseificador.

Após o início da queima da biomassa no reator, com a válvula de passagem e de controle do fluxo do gás pobre, item 18 da Figura 3, o gás encaminhava-se para o queimador de chama piloto, item 15 da Figura 3, onde era inflamado, ver Figura 15. Esperava-se um certo tempo (em média 15 minutos) até a chama obter uma coloração azulada, significando que o gás já tinha poder calorífico suficiente para dar a partida no motor. Nesse momento, abria-se a válvula de passagem e de controle do fluxo do gás pobre, fechava-se a válvula do queimador da chama piloto, e de imediato dava-se partida ao motor.



Figura 15. Chama piloto acionada.

Os procedimentos para dar a partida ao motor são os mesmos adotados por Rumão (2013) e Bezerra (2016).

3.5. OS TESTES REALIZADOS

O intuito deste trabalho é verificar a contribuição do pulmão durante o funcionamento do sistema gaseificador/grupo gerador, utilizando-se das mesmas configurações que Bezerra usou no gaseificador, trocando apenas o grupo gerador, formado pelo motor MWM D229-4 de 4 cilindros e o gerador da Bambozzi, com capacidade para 36 kW, pelo motor MWM 229/6 de 6 cilindros, e gerador Negrine, com capacidade para 120 kW. Para isso, foi necessário coletar dados tanto para configuração com pulmão, como sem pulmão, no sistema gaseificador grupo gerador.

Para coleta dos dados, foram utilizados apenas o melhor ângulo de cada potência, definidos por Bezerra (2016), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação entre as potências e os ângulos utilizados nos testes.

Potência:	8,4	13	18	23	25	26	29	32
Ângulo:	12	12	12	16	9	9	7	9

Para evitar interrupções no processo devido a camada de cinzas acumuladas sobre a grelha, foi desenvolvido um sistema de desobstrução de grelha, conforme já citado no Item 3.2.1.1. Esse mecanismo possibilitou um maior tempo de funcionamento do sistema gaseificador/grupo gerador.

Feito a alteração no gaseificador, novos testes foram realizados, onde foram coletados todos os dados essenciais para este trabalho, usando inicialmente a configuração com pulmão e depois sem pulmão. A fim de analisar mais precisamente a influência do pulmão, foram medidos, através de um cronômetro, os tempos que o motor demorava para estabilizar, tempo este chamado de tempo de resposta. Os tempos medidos foram: partida do motor; e nos acréscimos de potência.

Somente dava-se início a coleta dos dados quando havia a estabilização dos parâmetros. Nesse momento, eram coletados os dados de pressão e de temperatura em

vários pontos do sistema, assim como a composição do gás e o consumo de biomassa.

Para se obter o consumo de biomassa no gaseificador, após a estabilização dos parâmetros, preenchia-se o reator com biomassa, e de imediato acionava-se o cronômetro. À medida que fosse necessitando de mais biomassa, uma nova quantidade desta era adicionada. Ao final de cada ensaio, os valores da massa consumida e do tempo decorrido eram registrados e através da Eq. (12) era calculado o consumo em kg/h.

$$CB = \frac{M_{ad}}{t} \quad (12)$$

Onde,

CB – Consumo de biomassa;

M_{ad} - Massa adicionada

t - Tempo em que a massa foi consumida no gaseificador (h).

A vazão volumétrica do gás produzido pelo gaseificador, $Q_{gás}$ (m^3/s), foi determinada utilizando-se um manômetro em U acoplado a um tubo de Pitot, localizado na tubulação de alimentação do motor. O manômetro em U possui querosene no seu interior. Através da diferença de altura do volume de querosene pode-se calcular a vazão, a partir da Eq. (13).

$$Q_{gás} = \frac{\pi * D^2}{4} * \sqrt{2 * g * h * \left(\frac{\gamma_{liq} - 1}{\gamma_{gás}}\right)} \quad (13)$$

Onde:

g - Aceleração devido a gravidade (m/s^2);

h - Deslocamento do fluido no tubo em “U” (m);

γ_{liq} - Peso específico do líquido no tubo em “U” (N/m^3);

$\gamma_{gás}$ - Peso específico do gás que está escoando no tubo (N/m^3).

D - Diâmetro da tubulação de escoamento (m).

O peso específico do gás utilizado foi o mesmo determinado por Rumão (2013):

$\gamma_{gás} = 11,01 \text{ kg}/m^2 * s^2$, e o diâmetro da tubulação foi: $D = 0,061 \text{ m}$.

As eficiências foram calculadas, utilizando-se das mesmas equações que Rumão (2013) e Bezerra (2018) usaram em seus trabalhos. Nelas foram calculadas as eficiências do gaseificador, do grupo gerador e a eficiência global, conforme Eqs. (14), (15) e (16).

- **Eficiência do gaseificador:**

$$\eta_{gaseificador} = \frac{PCI_{gás} * Q_{gás}}{PCI_{biomassa} * M_s} * 100 \quad (14)$$

Onde:

$PCI_{gás}$ - Poder calorífico inferior do gás produzido pelo gaseificador (J/Nm³);

$PCI_{biomassa}$ - Poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador (J/kg);

M_s - Vazão mássica da biomassa utilizada no gaseificador (kg/s).

$Q_{gás}$ - Vazão de gás pobre (m³/s).

- **A Eficiência do grupo gerador:**

$$\eta_{grupogenerator} = \frac{Pe_{util}}{Q_{gás} * PCI_{gás}} * 100 \quad (15)$$

Onde:

Pe_{util} - potência elétrica útil (W).

- **A Eficiência global:**

$$\eta_{global} = \frac{\eta_{gaseif} * \eta_{grupogenerator}}{100} \quad (16)$$

O poder calorífico inferior do gás, $PCI_{gás}$ (MJ/Nm³), foi determinado fazendo-se uso da equação deduzida por Rumão (2013), Eq. (17).

$$PCI_{gás} = -0,004738 * (\%CO)^2 + (\%CO) * 0,3149 - 0,1057 \quad (17)$$

Já o PCI da biomassa, em kcal/kg, foi determinado utilizando a Equação (18) (GARCIA, 2002, apud RUMÃO, 2013).

$$PCI_{madeira} = 4756 - 53,418 * Umidade(\%) \quad (18)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos neste trabalho. Em muitas das situações são feitas comparações com os dados de Rumão (2013) e de Bezerra (2016).

4.2. TEOR DE UMIDADE E A MASSA ESPECÍFICA DA BIOMASSA

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos referentes ao teor de umidade da biomassa em quatro amostras, enquanto que a Tabela 4 mostra os valores da massa específica dessas mesmas amostras.

Tabela 3. Dados referentes ao teor de umidade da biomassa utilizada.

Amostras	Teor de Umidade 1 (%)	Teor de Umidade 2 (%)	Teor de Umidade 3 (%)	Média (%)	Média Bezerra (%)	Média Rumão (%)
1	9,772	9,790	10,569	10,044	9,42	9,51
2	10,892	10,455	9,134	10,160	8,97	8,80
3	8,380	9,832	9,588	9,267	8,07	8,49
4	8,386	10,224	9,354	9,231	9,01	7,13

Tabela 4. Dados referentes à massa específica da biomassa utilizada.

Amostras	Massa Específica 1 (kg/m ³)	Massa Específica 2 (kg/m ³)	Massa Específica 3 (kg/m ³)	Média (kg/m ³)	Média Bezerra (kg/m ³)	Média Rumão (kg/m ³)
1	822,876	866,784	892,768	860,809	524,48	533,37
2	1052,255	1083,248	1077,325	1070,943	723,16	720,38
3	773,818	688,664	810,442	757,641	598,96	601,84
4	707,722	735,551	788,891	744,055	753,25	739,15

4.3. POTÊNCIA ELÉTRICA MÁXIMA ALCANÇADA

Os experimentos mostraram que apenas com a troca do conjunto grupo gerador, formado pelo motor MWM D229-4 de 4 cilindros e o gerador da Bambozzi, com capacidade para 36 kW, usado nos ensaios feitos por Rumão (2013) e Bezerra (2016), pelo motor MWM 229/6 de 6 cilindros, e gerador Negrine, com capacidade para 120 kW, foi possível alcançar a potência de 32 kWe, para a configuração com o pulmão, e a potência de 25 kWe na configuração sem pulmão. Os resultados aqui obtidos mostraram-se superiores aos alcançados por Rumão (2013) e por Bezerra (2016), conforme é mostrado na Figura 16.

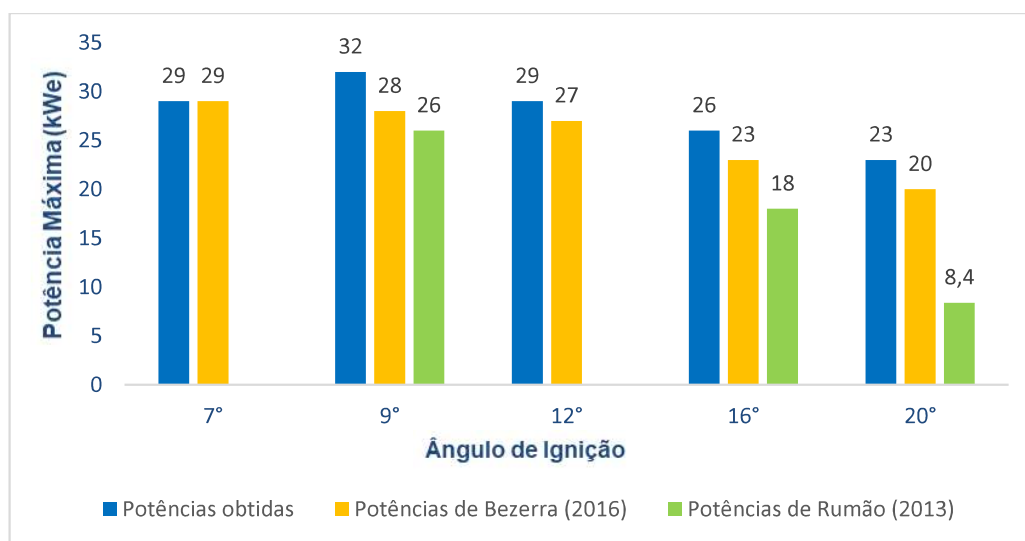


Figura 16. Potência máxima alcançada em cada ângulo.

A baixa potência alcançada sem o uso do pulmão, se deve ao fato de que, ao se tentar ultrapassar a potência de 25 kWe, houve o arraste de água dos reservatórios para dentro do filtro de manga, o que interrompeu o processo. Isso ocorreu por não existir um reservatório para reter essa água e impedir que fosse até para o filtro de manga. Além do mais, a flutuação de carga do motor e o tempo para sua estabilização foram maiores, e por isso, tornou o processo mais instável, proporcionando o arrasto de água dos reservatórios em potências menores. Vale ressaltar que com o uso do pulmão, apenas houve aspiração de água dos reservatórios a partir da potência de 27 kWe.

4.4. MEDIDAS DE TEMPERATURAS

As temperaturas nas seções de lavagem do gás pobre tiveram poucas variações em todo o processo. Com o uso do pulmão, as temperaturas medidas tanto depois da primeira lavagem como depois do chiller permaneceram constantes (27 °C depois da lavagem primária, e 10 °C depois do chiller). Entretanto sem o uso do pulmão, as temperaturas medidas depois da primeira lavagem foram maiores do que as medidas nos testes com pulmão, tendo uma pequena variação (31 °C nas potências de 8,4 – 13 kWe, e 32 °C nas potências 18 – 25 kWe), e a temperatura medida depois do chiller permaneceu constante e igual à medida no outro teste, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Medidas de temperaturas nas seções de lavagem do gás pobre.

Potência (kWe)	Temperatura depois da primeira lavagem (°C)		Temperatura depois do chiller (°C)	
	Com Pulmão	Sem Pulmão	Com Pulmão	Sem Pulmão
8,4	27	31	10	10
13	27	31	10	10
18	27	32	10	10
23	27	32	10	10
25	27	32	10	10
26	27	-	10	-
29	27	-	10	-
32	27	-	10	-

A Figura 17 apresenta os valores coletados das temperaturas na admissão do motor, tanto para os testes com pulmão como para os testes sem pulmão, e os dados apresentados por Rumão (2013) e Bezerra (2016).

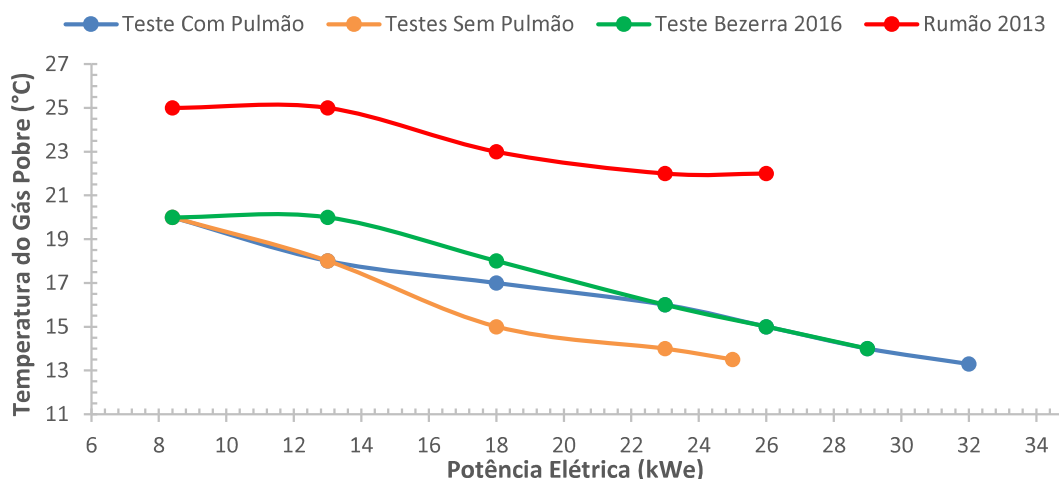


Figura 17. Temperaturas do gás pobre na admissão do motor.

Nota-se através desses valores que o pulmão interfere na temperatura do gás na admissão do motor, devido as trocas de calor que o mesmo faz com o meio. Os resultados também mostraram que as temperaturas aqui obtidas foram menores do que as de Rumão (2013), e iguais às de Bezerra (2016), variando apenas nas potências de 13 e 18 kWe, onde as temperaturas medidas por Bezerra foram maiores.

4.5. PRESSÕES RELATIVAS

A Tabela 6 apresenta os dados coletados das pressões relativas após o chiller (P1) e antes do filtro de manga (P2), que são pontos de medidas de pressão antes e depois do pulmão.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 6, pode-se observar que a configuração com o pulmão apresentou uma perda de carga média de $0,4 \times 10^{-2}$ bar entre os dois pontos do sistema, enquanto que sem o pulmão a variação da pressão entre os dois pontos foram de $0,2 \times 10^{-2}$ bar.

Tabela 6. Medidas da pressão relativa após o chiller (P1) e antes do filtro de manga (P2).

Potências (kWe)	Com o Pulmão		Sem o Pulmão	
	P1 (10 ⁻² bar)	P2 (10 ⁻² bar)	P1 (10 ⁻² bar)	P2 (10 ⁻² bar)
8,4 (12°)	-2,0	-2,5	-3,0	-3,1
13 (12°)	-3,8	-4,1	-3,1	-3,5
18 (12°)	-4,7	-5,2	-5,1	-5,3
23 (16°)	-5,3	-5,8	-5,8	-6,0
25 (9°)	-	-	-6,9	-7,1
26 (9°)	-6,4	-6,7	-	-
29 (9°)	-7,1	-7,5	-	-
32 (9°)	-7,9	-8,2	-	-

4.6. A CONCENTRAÇÃO DE HC

Na Tabela 7 estão apresentados os valores da concentração de HC (hidrocarbonetos) no gás de síntese, tanto para os testes com pulmão, como para os testes sem pulmão.

Tabela 7. A concentração de HC no gás de síntese.

Potência (kWe)	Concentração de HC	
	Com o Pulmão	Sem o Pulmão
8,4 (12°)	376	714
13 (12°)	183	516
18 (12°)	115	333
23 (16°)	59	241
25 (9°)	-	256
26 (9°)	81	-
29 (9°)	96	-
32 (9°)	74	-

Os resultados apresentados na Tabela 7, mostram que o pulmão favorece a redução na concentração de HC. Pode-se também verificar que, o nível de HC reduz à medida que a potência aumenta.

4.7. PERCENTUAL DE CO NO GÁS POBRE

A Tabela 8 apresenta o percentual de CO no gás pobre, para as duas configurações em estudo, com e sem pulmão.

Tabela 8. Níveis de CO no gás de síntese.

Potências (kWe)	Níveis de CO (%)	
	Com Pulmão	Sem Pulmão
8,4 (12°)	17,04	15,76
13 (12°)	17,57	16,02
18 (12°)	18,09	15,86
23 (16°)	17,44	16,03
25 (9°)	-	16,70
26 (9°)	16,31	-
29 (9°)	15,44	-
32 (9°)	14,78	-

Conforme os dados apresentados na Tabela 8, pode-se observar que em todas as potências os valores do percentual de CO foi maior para o sistema com pulmão.

4.8. A VELOCIDADE DO GÁS

A Tabela 9 apresenta os valores medidos das velocidades do gás na tubulação de distribuição para o motor.

Tabela 9. Velocidade do gás de síntese

Potências (kWe)	Velocidade do Gás (m/s)	
	Com Pulmão	Sem Pulmão
8,4 (12°)	8,112	9,372
13 (12°)	9,750	10,367
18 (12°)	11,150	11,149
23 (16°)	12,683	12,683
25 (9°)	-	13,788
26 (9°)	13,790	-
29 (9°)	14,051	-
32 (9°)	14,562	-

Conforme os resultados apresentados na Tabela 9, verifica-se que, a velocidade do gás para o sistema sem pulmão foi maior apenas nas duas primeiras potências. Nas outras potências (18 kWe e 23 kWe), os resultados foram basicamente os mesmos.

4.9. O CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOMASSA

A Figura 18 apresenta os valores referentes ao consumo específico de biomassa para cada potência, tomando como base os dois sistemas em análise (com o pulmão e sem o pulmão).

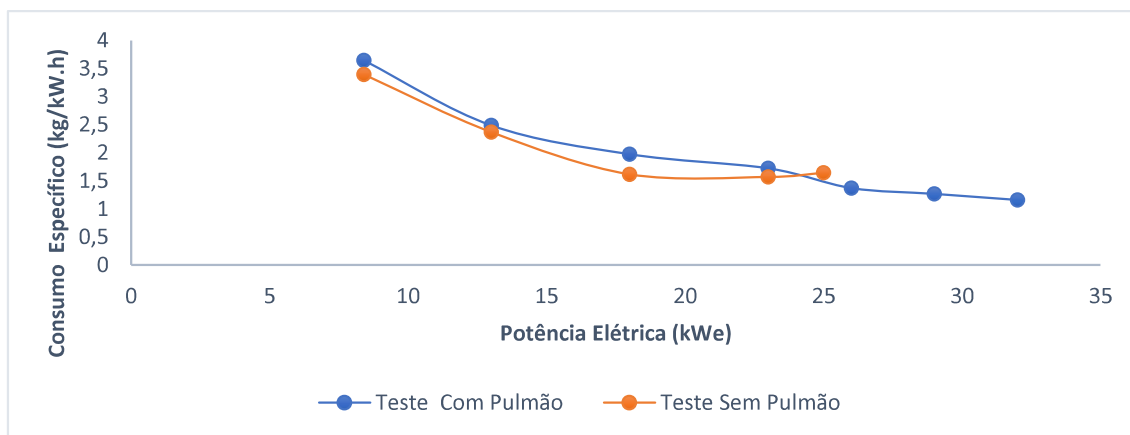


Figura 18. O consumo específico de biomassa.

Como se pode observar, o consumo específico teve pouca variação entre as duas configurações em estudo (com pulmão e sem pulmão). Nas quatro primeiras potências, o sistema sem pulmão apresentou o consumo específico menor do que o sistema com pulmão. No entanto, essa diferença foi mínima.

4.10. O PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DA BIOMASSA

A Tabela 10 apresenta os valores referentes ao poder calorífico inferior da biomassa utilizada nos ensaios, obtidos através da Eq. (18), tomando como base a umidade das quatro amostras de madeira. Verifica-se dessa forma, a partir dos dados da Tabela 9, que os valores médios do poder calorífico do presente trabalho, de Bezerra (2016) e Rumão (2013) foram respectivamente $17.748,491 \text{ kJ/m}^3$, $17.929,2 \text{ kJ/m}^3$ e $18.015,306 \text{ kJ/m}^3$.

Tabela 10. PCI das quatro amostras de madeira

Amostras	PCI da madeira (kJ/m^3)		
	Trabalha atual	Bezerra	Rumão
1	17666,075	17805,633	17785,505
2	17640,132	17906,276	17944,297
3	17839,852	18107,561	18013,628
4	17847,903	17897,33	18317,793

4.11. O PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DO GÁS POBRE

A Tabela 11 apresenta os valores referentes ao PCI do gás pobre, obtidos através da Eq. (17) e de dados apresentados na Tabela 8. Verifica-se com esses resultados, que o sistema com pulmão apresentou em média um poder calorífico 4,6 % maior do que sem o uso daquele aparato.

Tabela 11. PCI do gás pobre

Potências (kWe)	PCI do gás pobre (MJ/Nm ³)	
	Com Pulmão	Sem Pulmão
8,4	3,88446274	3,68031093
13	3,96444918	3,72303578
18	4,0403395	3,69681938
23	3,94507624	3,76833078
25		3,83174918
26	3,76993472	
29	3,62684712	
32	3,51351348	

4.12. EFICIÊNCIAS

4.12.1. A Eficiência do Gaseificador

O gráfico ilustrado na Figura 19 mostra os valores das eficiências do gaseificador em função das potências, obtidos a partir da Eq. (14). Verifica-se que os valores das eficiências tendem a crescer com o aumento de potência, com ressalva para as potências de 29 e 32 kWe, onde a eficiência do gaseificador teve uma queda. O gráfico em questão ainda mostra que, o sistema sem pulmão apresentou-se mais eficiente em quase todas as potências do que o sistema com pulmão.

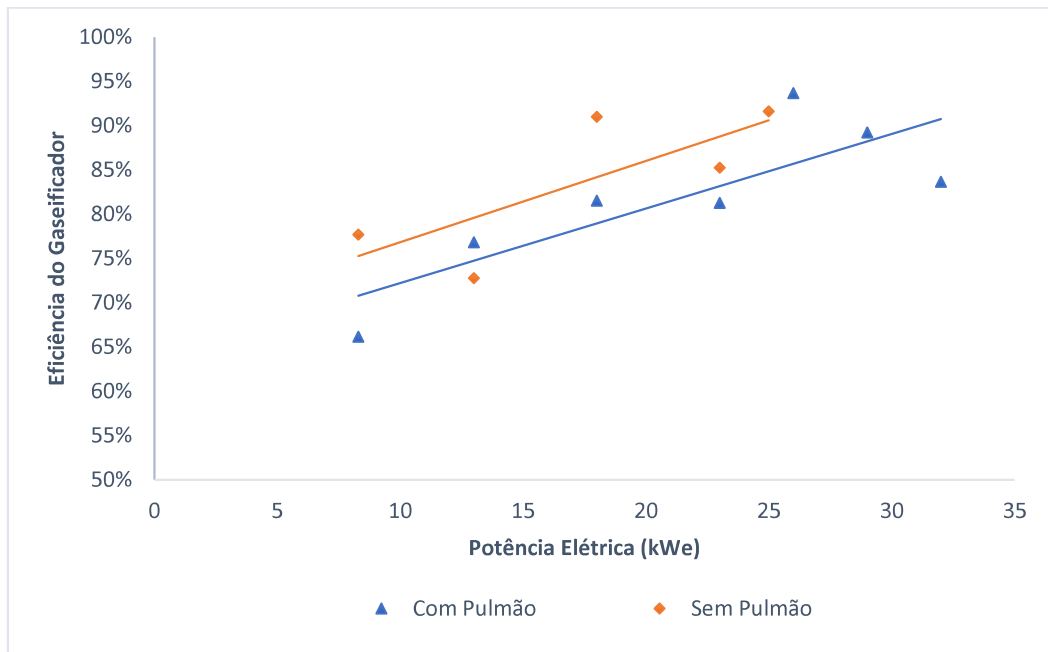


Figura 19. Eficiências do gaseificador.

4.12.2. A Eficiência do Grupo Gerador

A Figura 20 apresenta os valores das eficiências do grupo gerador, tanto para o sistema com pulmão como para o sistema sem pulmão. Observa-se com esses resultados, que a eficiência do grupo gerador cresce com o aumento de potência, e que o sistema sem pulmão foi mais eficiente do que o sistema com pulmão.

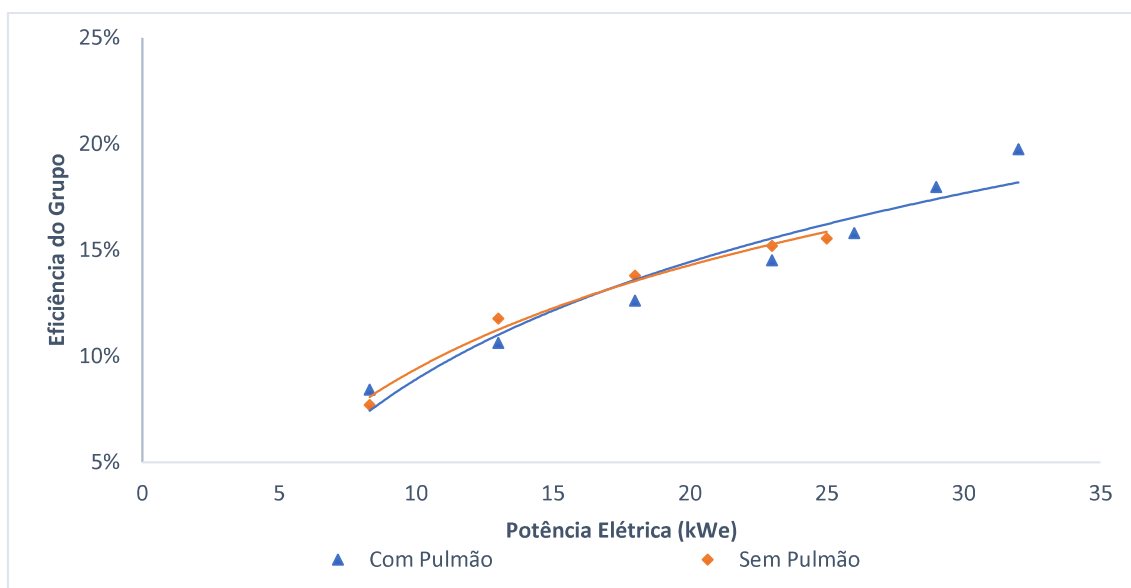


Figura 20. Eficiência do grupo gerador.

4.12.3. Eficiência do Sistema Gaseificador/Grupo Gerador

A Figura 21 apresenta as curvas de eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador, na configuração atual, em função das potências elétricas, para as duas configurações em estudo (com pulmão e sem pulmão).

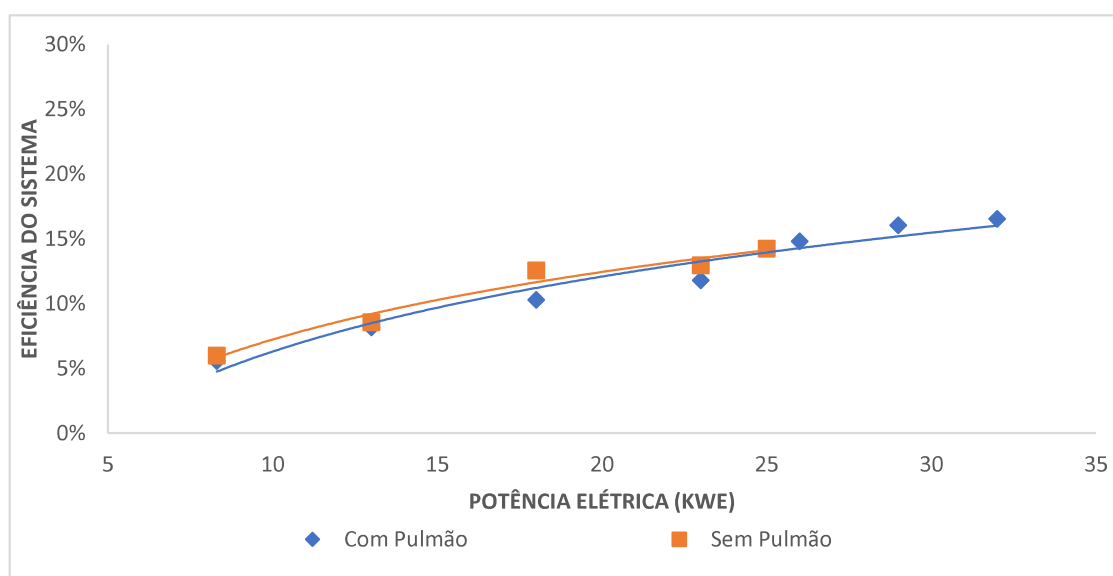


Figura 21. Eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador.

4.13. O TEMPO DE RESPOSTA

O tempo para estabilização do motor, no momento de se dar a partida, adicionar carga, para estabilizar em cada potência e para passar de uma potência para outra estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12. Tempo de resposta do motor.

Tempo de Resposta do Motor (min)		
Processo	Com o Pulmão	Sem o Pulmão
Dar a partida no motor	5:36	11:22
Adicionar carga ao motor	4:06	5:47
8,4 kWe	3:46	4:57
(8,4 – 13) kWe	0:57	1:01
13 kWe	0:23	0:36
(13 – 18) kWe	1:53	1:45
18 kWe	0:33	0:40
(18 – 23) kWe	0:28	0:32
23 kWe	0:40	1:00
(23 – 25) kWe	-	1:04
25 kWe	-	0:31
(23 – 26) kWe	1:10	-
26 kWe	0:37	-

A partir dos resultados expressos na Tabela 11, pode-se observar que, no momento de se dar a partida no motor, o tempo de resposta para o sistema sem pulmão é basicamente o dobro do tempo para a configuração com o pulmão. Isso ocorreu pelo fato de que, ao tentar dar a partida no motor, sem o uso desse aparato, o gás produzido pelo gaseificador não tinha poder calorífico suficiente. Além disso, em todas as outras potências, o sistema sem pulmão demorou mais tempo para estabilizar o motor, com exceção para passar da potência de 13 kWe para 18 kWe.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente trabalho trouxe uma análise mais detalhada acerca da influência do reservatório de gás, pulmão, em sistemas de geração de potência, através da gaseificação de biomassa. O mesmo foi implementado em um gaseificador de biomassa com capacidade de 80 kWt, do Laboratório de Inovações da Universidade Federal da Paraíba, por Bezerra (2016). No entanto, só foi possível analisar a sua influência no atual trabalho. Através dos resultados obtidos em cada ensaio, expostos no Capítulo 4, pode-se elencar algumas conclusões:

- Os teores de umidade das biomassas apresentaram valores, em média, 9,11% e 14,06% maiores que os de Bezerra (2016) e de Rumão (2013), respectivamente.
- Com relação à potência elétrica máxima alcançada para cada ângulo, verificou-se que a troca do motor MWM 229/4 de quatro cilindros pelo motor MWM 229/6 de seis cilindros, possibilitou alcançar potências ainda maiores, em todos os ângulos, que as obtidas por Bezerra (2016), que já havia superado as de Rumão (2013). Tendo em vista que, o gaseificador utilizado nos testes, foi projetado para 20 kWe (sistema dual), e que Rumão (2013) e Bezerra (2016) já tinham ultrapassado esses valores, neste trabalho foi possível chegar a potência de 32 kWe. No entanto, sem o uso do pulmão, só foi possível alcançar a potência de 25 kWe, devido a interrupção no processo, causado pelo arrasto de água dos reservatórios para dentro do filtro de manga, verificando assim, a importância de se ter esse aparato acoplado ao sistema de gaseificação.
- A temperatura do gás na admissão do motor diminuiu com o aumento da potência. Além disso, o sistema sem pulmão obteve valores de temperatura menores do que com o pulmão, com exceção para as duas primeiras

potências onde os valores foram iguais. Isso mostra que o pulmão contribui para um pequeno aumento de temperatura do gás, devido ao recipiente não está, totalmente, isolado termicamente.

- Nota-se através dos valores das pressões relativas medidas na saída da lavagem secundária, antes do pulmão, e as medidas depois do pulmão, que o uso do reservatório de gás gera uma perda de carga na tubulação, o que pode interferir negativamente nas eficiências.
- Verificou-se com esse trabalho que os níveis de HC reduziram com a implantação do pulmão, ocasionando diminuição na formação do alcatrão. Por outro lado, os níveis de CO foram maiores com a utilização desse aparato.
- A velocidade do gás na linha de admissão do motor foi maior para o sistema sem pulmão, o que influenciou tanto na temperatura do gás na lavagem primária, como também nos níveis de HC, pois quanto maior a sua velocidade, menor é o tempo para troca de calor entre o gás e a água de lavagem, e conseqüentemente, maior será a temperatura do mesmo na saída da lavagem primária. Por outro lado, maior velocidade do gás na admissão requer o menor tempo de residência do mesmo na zona de combustão, onde ocorre o craqueamento do alcatrão, e com isso, menos alcatrão será craqueado, favorecendo ao aumento nos níveis de HC.
- O consumo específico de biomassa é em média 5,74% maior com a utilização do pulmão.
- A eficiência do gaseificador tende a crescer com o aumento da potência, porém, para as últimas potências, essa eficiência caiu. Isso ocorreu pelo fato de que o gaseificador não está produzindo gás combustível suficiente, em razão da obstrução da grelha, devido à camada de cinzas. A eficiência máxima alcançada foi de 93,65 %, na potência de 26 kWe, para o sistema com pulmão, e 91,62 %, na potência de 25 kWe, para o sistema sem pulmão. Observa-se que não houve muita variação na eficiência do gaseificador, quando se compara esses dois supracitados percentuais.
- Percebe-se que quanto maior a potência maior é a eficiência do grupo gerador. A eficiência máxima obtida pelo mesmo foi de 19,75 %, para o sistema com pulmão, na potência de 32 kWe, e 15,54 %, para o sistema

sem pulmão, na potência de 25 kWe. Também nesse caso, os resultados formam bem próximos.

- De forma semelhante à do grupo gerador, a eficiência do sistema gaseificador grupo gerador, tende a crescer com o aumento da potência. Os dois sistemas em estudo apresentaram similaridade nos resultados, podendo-se concluir que o uso do pulmão não influenciou nas eficiências. Vale ressaltar que a eficiência máxima obtida foi de 16,52 %, para o sistema com pulmão, na potência de 32 kWe, e 14,24 % sem o uso do pulmão, na potência de 25 kWe.
- Com relação ao tempo de resposta, fica clara a influência do pulmão, pois, em todos os estágios o sistema com pulmão apresentou um tempo menor para estabilização, exceto no intervalo entre 13 kWe e a potência de 18 kWe. Pode-se observar, ainda, que ao se dar partida no sistema, o tempo necessário para que o poder calorífico do gás pobre fosse suficiente para se acionar o motor, reduziu-se pela metade com o uso do pulmão, tendo passado de 11:22 min para 5:36 min.

Com tudo que foi exposto acima, pode-se concluir que o uso do pulmão é de extrema importância para um bom funcionamento do sistema de geração de potência através da gaseificação de biomassa. Uma vez que, além das vantagens citadas acima, o pulmão favoreceu alcançar potências maiores (25 kWe sem o uso do pulmão, para 32 kWe com o uso do pulmão), diminuiu o risco de água ser arrastada para o filtro de manga, o que pode causar interrupções no processo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Buscando-se melhorar o funcionamento do sistema gaseificador grupo gerador, sugere-se:

- Tornar o sistema de limpeza do gás mais eficiente, aumentando a área de contato do gás com a água.
- Determinar o volume ideal do pulmão, de modo a obter menores tempo de resposta.
- Estudar o funcionamento do sistema de desobstrução de grelha, a fim de verificar a influência do mesmo nas zonas de combustão e redução, e na região de craqueamento do alcatrão. Além disso, pode-se determinar o melhor tempo de acionamento do dispositivo, a fim de reduzir o consumo de biomassa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R., 2007. “Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental”. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. Pág. 205.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017, “Fontes de energia elétrica no Brasil – Renováveis e não renováveis”, Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Renov%C3%A1veis+e+N%C3%A3o+Renov%C3%A1veis/aba3cfc6-a27f-a7af-6cac-1d859a2f0d1d?version=1.1>.
- ANNEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008, “Atlas: Parte II – Fontes Renováveis”, Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf.
- ÁNGEL, J. D. M., 2009. “Estudo experimental do conjunto gaseificador de biomassa em reator cocorrente com duplo estágio de fornecimento de ar e motor de combustão interna”. Itajubá-MG UNIFEI.
- ARDILA, Y. C. *et al*, 2015. “Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo”.
- BASU, P., 2010. “Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design”, Kidlington, Oxford, ELSEVIER, 375p.
- BEZERRA, A. F., 2016, “Aprimoramento da Eficiência de um sistema de Geração de Energia Elétrica por Grupo Gerador Alimentado com Gás Pobre”, Universidade Federal da Paraíba, Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica, Paraíba.

- BREEZE, P., 2004. "The future of global biomass power generation the technology, economics and impact of biomass power generation". Strategic Management Report. Business Insights.
- CASTELLANOS, A. B. V., 2012. "Análise Unidimensional Detalhada da Gaseificação de Bagaço de Cana em Reator de Leito Fluidizado Borbulhante".
- CHEN, Y. *et al*, 2009. "Experimental investigation on tar formation and destruction in a lab-scale two-stage reactor". Energy & Fuels, v. 23, n. 9, p. 4659-4667.
- CORONADO, C. R.; SILVEIRA, J. L.; ARAUZO, J. P., 2006. "Metodologia de dimensionamento, análise energética e seleção de equipamentos de um gaseificador de biomassa para o acionamento de um motor de combustão interna". Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E.; AYARZA, J. A., 2008. "Biomassa no Brasil e no mundo. IN: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa et al.(Orgs.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, p. 15-30.
- DABAI, F. *et al*, 2010. "Tar formation and destruction in a fixed-bed reactor simulating downdraft gasification equipment development and characterization of tar-cracking products". Energy & Fuels, v. 24, n. 8, p. 4560-4.
- DA SILVA, E. P. *et al*, 2003. "Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento".
- DUARTE, M. M. L. *et al*, 1983. "Estudos sobre a gaseificação da madeira com ar em gaseificador co-corrente".
- KINTO, O. T. *et al*, 2002. "Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo". Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural.

- LAURENCE, L. C.; ASHENAFI, D., 2012. “Syngas treatment unit for small scale gasification-application to IC engine gas quality requirement”.
- LORA, E. E. S. *et al*, 2008. “Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis”.
- MARTIN, S. *et al*, 2010. “Tensão térmica e taxa de reação em um reator para gaseificação de biomassa do tipo concorrente”. Revista Ceres, v. 57, n. 2.
- MELO, V. M., 2018. “Influência da potenciando motor do grupo gerador na limitação de produção de energia elétrica de um sistema formado por um gaseificador/grupo gerador”. Universidade Federal da Paraíba, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.
- MURARO, W. *et al*, 2006. “Avaliação do funcionamento de motor ice com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz”.
- NOGUEIRA, A. L., 2012. “Análise dos efeitos das condições operacionais de um gaseificador co-corrente de duplo estágio na qualidade do gás”. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Energia.
- OECD/IEA, World Energy Outlook 2017, International Energy Agency, OECD/IEA, 2017. <https://webstore.iea.org/download/summary/196?fileName=English-WEO-2017-ES.pdf>
- OLIVEIRA, E., 2008. “Gaseificação da macaúba”. Itapetinga-BA: UESB.
- QUADROS, A.; FERNANDES, F., 2017. “Avaliação da produção de alcatrão no syngas produzido a partir de biomassa em gaseificador piloto co-corrente com vista a seu uso em motor a explosão”. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 38, n. 1, p. 11-20.
- QUEIROGA, B. L. C., 2009. “Conversão de um motor diesel para álcool hidratado usando sistema de injeção eletrônica multiponto de combustível e ignição estática”.

Universidade Federal da Paraíba, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.

RIBEIRO, R. Da S., 2010. “Investigação experimental e integração de um sistema de geração de energia elétrica por gaseificação de biomassa para comunidades isoladas”.

RUMÃO, A. S., 2013, “Geração de Potência e Energia Elétrica a Partir da Gaseificação de Rejeitos de Biomassa”, Universidade Federal da Paraíba. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.

SALES, C. A. V. B., 2007. “Avaliação Técnico Econômica da Conversão da Biomassa em Eletricidade Utilizando Tecnologias de Gaseificação”. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 188p.

SCHUTZ, F.; MASSUQUETTI, A.; ALVES, T. W., 2013. “Demanda e oferta energética: uma perspectiva mundial e nacional para o etanol”. *Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)*, v. 16, n. 16, p. 3167-3186.