

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado – Doutorado

**INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DO MOTOR DO GRUPO GERADOR
NA LIMITAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM
SISTEMA FORMADO POR UM GASEIFICADOR/GRUPO
GERADOR**

por

Vinicius Mafra Melo

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para a obtenção do grau de Mestre.*

VINICIUS MAFRA MELO

**INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DO MOTOR DO GRUPO GERADOR
NA LIMITAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM
SISTEMA FORMADO POR UM GASEIFICADOR/GRUPO
GERADOR**

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

Orientador: Prof. Dr. Emerson Freitas Jaguaribe

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M528i Melo, Vinicius Mafra.

Influência da potência do motor do grupo gerador na
limitação de produção de energia elétrica de um sistema
formado por um gaseificador/grupo gerador / Vinicius
Mafra Melo. - João Pessoa, 2018.

56 f. : il.

Orientação: Emerson Freitas Jaguaribe.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/Tecnologia.

1. Gaseificação, biomassa, energia renovável, motores.
I. Jaguaribe, Emerson Freitas. II. Título.

UFPB/BC

**INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DO MOTOR DO GRUPO GERADOR
NA LIMITAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM
SISTEMA FORMADO POR UM GASEIFICADOR/GRUPO
GERADOR**

por

VINICIUS MAFRA MELO

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 mestrado, aos meus Avós, José Roque (*In Memoriam*) e Geraldo Mafra, Celina (*In Memoriam*) e Rosa, por todo amor, dedicação, e grande exemplo de honestidade, e perseverança em tudo que realizam.

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Ao meu orientador, prof. Dr. Emerson F. Jaguaribe, pela imensa contribuição para realização deste trabalho, com seu vasto conhecimento e experiência em Pesquisa e Inovação, sempre acreditando no meu potencial;

Ao Prof. Dr. Adriano Sitônio Rumão pela grande contribuição dada a esse trabalho, com seu profundo conhecimento na área de gaseificadores e motores, além de sempre estar disponível durante as dificuldades apresentadas nos testes;

Aos Técnicos do Laboratório de Inovação e de Motores, Carlos e Batista, pela grande contribuição com suas experiências práticas na área de motores;

Aos amigos do Laboratório de Inovação, Everton, Rennan, André, Fernanda, Herculano, Bráulio, Otávio e Lucian, pela grande contribuição prestada ao longo deste trabalho;

Aos professores, que muito me honraram com suas participações na banca examinadora;

À coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (Capes), pelo incentivo ao desenvolvimento científico do país e pela bolsa concedida;

À minha família, pela compreensão nos tantos momentos em que precisei estar ausente.

INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA DO MOTOR DO GRUPO GERADOR NA LIMITAÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM SISTEMA FORMADO POR UM GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR

RESUMO

Ao longo de toda a era moderna, a humanidade vem usando combustíveis fósseis para atender às suas necessidades. O carvão, o petróleo e o gás natural têm contribuído para a iluminação e o funcionamento de máquinas, promovendo a qualidade de vida. O contínuo uso desses recursos tem evidenciado, todavia, as suas limitadas disponibilidades. Concomitantemente, tais fontes poluem, grandemente, o meio ambiente, estimulando a busca por recursos mais ecológicos. Dentre os principais combustíveis não fósseis, a biomassa, no Brasil, vem ganhando destaque, pelas grandes reservas disponíveis e sua natural vocação para os biocombustíveis. A gaseificação da biomassa fornece um meio de derivar formas mais diversas de energia a partir da conversão termoquímica, representando um processo eficiente para a produção de energia e calor. Buscando-se melhorar a produtividade dos gaseificadores de biomassa, o presente trabalho examina se a limitação da produção de energia elétrica de um sistema formado por um gaseificador de biomassa e um grupo gerador pode ser determinada pela escolha do motor do grupo gerador. O gaseificador em questão é do tipo leito fixo, co-corrente, “topo aberto”, importado da Índia, do Indian of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, com capacidade térmica de 80 kWt, que foi aqui adaptado para servir a motores a gás. Para a consolidação dos objetivos foi feita a substituição do grupo gerador composto por um motor MWM 229-4 e gerador de 36 kVA, por outro formado pelo motor MWM 229-6 e gerador de 150 kVA. Em ambos os casos os motores a diesel foram otimizadas para poderem funcionar com o gás pobre, operando com sistema de ignição comandada. A realização dos testes ocorreu no Laboratório de Inovação em Conversão Térmica da Universidade Federal da Paraíba-UFPA e comprovou que a utilização de um grupo gerador com capacidade maior permitiu que a potência anteriormente gerada de 29 kW passasse a 32 kW, embora a eficiência média térmica do sistema, nas potências mais altas tenha se passado de 98% para 93,65%.

Palavras Chaves: Gaseificação, Biomassa, Energia Renovável, Motores de Combustão Interna.

INFLUENCE OF A GENERATOR ENGINE ON THE ELECTRICAL POWER PRODUCED BY A SYSTEM FORMED BY A GASIFIER AND A GENSET

ABSTRACT

Throughout the modern era, humanity has been using fossil fuels to meet their needs. Coal, oil and natural gas have contributed to the lighting and functioning of machines, promoting the quality of life. The continued use of these resources has, however, evidenced their limited availability. At the same time, these sources greatly pollute the environment, stimulating the search for more ecological resources. Among the main non-fossil fuels, biomass, in Brazil has been gaining prominence due to the large reserves available and its natural calling for biofuels. Biomass gasification provides a mean of deriving more diverse forms of energy from thermochemical conversion, representing an efficient process for the production of energy and heat. In order to improve the productivity of biomass gasifiers, the present work examines whether the limitation of the electric energy production of a system formed by a biomass gasifier and a generator set can be determined by the choice of generator set engine. The gasifier in question is a fixed-bed, co-current, open top type, imported from the Indian of Science / Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc / CGPL, with a thermal capacity of 80 kWt, which has been adapted to serve to gas engines. In order to consolidate the objectives, the generator set was replaced by a MWM 229-4 engine and a 36 kVA generator, to other consisting of the MWM 229-6 engine and a 150 kVA generator. In both cases the diesel engines were converted to otto cycle and set to work with poor gas, operating with a commanded ignition system. The tests were carried out at the Laboratory of Innovation in Thermal Conversion of the Federal University of Paraíba-UFPB and verified that the use of a generator group with greater capacity allowed the previously generated power of 29 kW to pass to 32 kW, although the average thermal efficiency of the system, the highest power is from 98% to 93.65%.

Keywords: Gasification, Biomass, Renewable Energy, Internal Combustion Engines.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	4
CONCEITOS ASSOCIADAS À MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA VISANDO A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO.	4
2.1. INTRODUÇÃO	4
2.2. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	4
2.3. COMBUSTÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	6
2.4. A IGNIÇÃO POR CENTELHA	6
2.5. A IMPORTÂNCIA DO ÂNGULO DE IGNIÇÃO	7
2.6. O SISTEMA ELETRÔNICO DE IGNIÇÃO COMANDADA.....	7
2.7. O MAPA DE IGNIÇÃO.....	8
2.8. A GASEIFICAÇÃO	9
2.9. VARIÁVEIS DE DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR-GASEIFICADOR 12	
2.9.1. Consumo de Biomassa	12
2.9.2. Vazão de Gás Produzido.....	12
2.9.3. A Eficiência do Gaseificador.....	13
2.9.4. Eficiência do grupo gerador:	14
2.9.5. Eficiência Global	14
CAPÍTULO III	15
EXPERIMENTAÇÃO	15

3.1.	INTRODUÇÃO	15
3.2.	O MOTOR UTILIZADO NESTE TRABALHO	15
3.3.	INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE IGNIÇÃO COMANDADA E SEUS PERIFÉRICOS NO MOTOR MWM 229/6.	16
3.3.1.	O SparkPro 3 e as Bobinas de Ignição	16
3.3.2.	A Roda Fônica e Sensor Indutivo.....	17
3.3.3.	O Sensor MAP.....	18
3.3.4.	O Sensor de Temperatura	18
3.3.5.	A Instalação da Central de Ignição comandada - FT400.....	19
3.4.	OS PERIFÉRICOS DE CONTROLE A/F (AR/COMBUSTÍVEL) E ROTAÇÃO 20	
3.4.1.	A Instalação do sistema de Alimentação.....	20
3.4.2.	A Instalação da Unidade de Controle de Rotação	21
3.5.	CONFIGURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DA IGNIÇÃO.....	21
3.6.	O GERADOR UTILIZADO NESTE TRABALHO	23
3.7.	O GASEIFICADOR UTILIZADO NESTE TRABALHO.	23
3.8.	APARATOS SUPLEMENTARES.....	24
3.9.	EXPERIMENTOS	26
3.10.	OS TESTES REALIZADOS	28
	CAPÍTULO IV	29
	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1.	INTRODUÇÃO	29
4.2.	TEOR DE UMIDADE E A MASSA ESPECÍFICA DA BIOMASSA.....	29
4.3.	POTÊNCIA ELÉTRICA MÁXIMA ALCANÇADA	30
4.4.	TEMPERATURA DE GÁS POBRE.....	30
4.5.	MEDIDAS DE PRESSÃO	31
4.6.	CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOMASSA	33

4.7. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DA BIOMASSA.....	33
4.8. EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR	34
4.9. EFICIÊNCIA DO GRUPO GERADOR.....	35
4.10. EFICIÊNCIA GLOBAL DO SISTEMA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR 35	
CAPÍTULO V	37
CONCLUSÕES	37
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases de um motor quatro tempos.....	5
Figura 2: Propagação da chama.....	7
Figura 3: Sinal do sensor indutivo em conjunto com roda fônica.....	8
Figura 4: Mapa de ignição.....	9
Figura 5: Gaseificador indiano instalado no laboratório de inovação.....	10
Figura 6: Motor Mwm 229/6, adaptado.	16
Figura 7: Sparkpro 3 e bobinas de ignição.....	17
Figura 8: Sensor Indutivo e roda fônica.....	17
Figura 9: Tomada de pressão para aferição do sensor map.....	18
Figura 10: Sensor de temperatura.....	19
Figura 11: Sistema de ignição montado.....	19
Figura 12: (a) Tbi do golf 2.0, (b) Regulador de fluxo de ar, (c) Dispositivo instalado no motor Mwm 229/6.....	20
Figura 13: (a) Controlador de rotação, (b) Atuador do corpo de borboleta.....	21
Figura 14: Ponto de referência do pms do 1º cilindro do motor, para calibração.....	22
Figura 15: Gerador de energia elétrica.....	23
Figura 16. Gaseificador instalado no li-ufpb.....	24
Figura 17: a) Analisador de gases veicular, b) Simulador de carga, c) Serra de bancada elétrica, d) Bomba de vácuo, e) Manômetros em U, f) Termômetros e mostradores digitais, g) Balança digital, h) Cronômetro digital, i) Termo balança analítica.....	25
Figura 18: Biomassa pronta para uso.	26
Figura 19: Orifício localizado no reator do gaseificador.....	27
Figura 20: Chama piloto acesa.....	27
Figura 21: Potência máxima alcançada em cada ângulo.....	30
Figura 22: Temperatura de gás pobre.....	31
Figura 23: Pressão relativa na saída da lavagem secundária.....	32

Figura 24: Pressão relativa no coletor de admissão.....	32
Figura 25: Consumo específico de biomassa	33
Figura 26: Eficiência do gaseificador	34
Figura 27: Eficiência do grupo gerador	35
Figura 28: Eficiência global do sistema	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de entrada na Ft400, para calibração do motor	22
Tabela 2: Relação entre as potências e os ângulos utilizados nos testes.	28
Tabela 3: Teor de umidade da biomassa utilizada.....	29
Tabela 4: Massa específica da biomassa utilizada.....	30
Tabela 5: Poder calorífico da biomassa utilizada	33

LISTA DE SÍMBOLOS

LI – Laboratório de Inovação em Conversão Térmica

UFPB – Universidade Federal da Paraíba.

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).

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).

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

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

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

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

γ_{gas} – Peso específico do gás que está escoando no tubo (N/m³).

γ_{liq} – Peso específico do líquido no tubo em “U” (N/m³).

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

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

$\eta_{grupogenerador}$ – Eficiência do grupo gerador

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

É notório que o Brasil atravessa uma crise de energia sem precedentes, fruto de práticas de políticas energéticas governamentais sem planejamento, associadas ao aumento natural da demanda, desvios de verba e a escassez de chuvas. Numa tentativa de minimizar os problemas de consequência desastrosa para a economia foram acionadas usinas termelétricas a carvão, a óleo e a gás natural.

Além do mais, as providências atuais impuseram elevação de tarifas, a partir do início de 2015, e o aumento da poluição ambiental, com o emprego das usinas a óleo pesado.

Sabe-se, por outro lado, que o nosso País tem um potencial agrário e florestal extraordinário, ou seja, detém um acervo grandioso de biomassa sólida, ou ainda, uma importante reserva de energia, por se constituir essa biomassa, sobretudo, de carbo-hidratos (Higman, 2003).

Uma das formas mais eficientes de se extrair a energia interna da biomassa é através da gaseificação. Por gaseificação deve-se entender a queima controlada da biomassa, (ou do carvão), isto é, fazendo-se, durante sua queima, de uso de ar, ou de oxigênio (O₂) em quantidades inferiores à estequiométrica, ou seja, menor do que à necessária para a combustão, havendo como resultado a emissão de uma mistura de gases. Esta mistura gasosa pode ser denominada de gás pobre, ou gás produzido. A utilização desse gás pode ser feita através da queima direta, a exemplo do uso fogões, ou de forma indireta ao se alimentar motores do ciclo Otto. Neste último caso, pode-se gerar eletricidade, ou simplesmente trabalho de eixo. (Mukunda, 1994)

Há vários tipos de gaseificadores de biomassa, os mais notáveis sendo os de origem

chinesa e os indianos. Verifica-se, todavia, que os gaseificadores do tipo indiano desenvolvidos pelo Indian Institute of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL (Srinivas,1992), têm um sistema de lavagem de gases mais eficiente do que os do tipo chinês, onde tal limpeza faz reduzir sua eficiência energética (Wu, 2002). O gaseificador indiano de biomassa, tipo “leito fixo, topo aberto, fluxo descendente com entrada dupla de ar”, que se mostrou economicamente viável operando no campo, (Dassapa, 1998), possui uma zona de temperatura elevada no reator, onde o alcatrão é craqueado. Um ciclone é, então, empregado para uma primeira separação do gás das partículas em suspensão. Em seguida, o gás é resfriado, através de um trocador de calor, (o que pode permitir um aproveitamento do calor de rejeito), e lavado (3 estágios). O tal sistema se constitui, hoje, uma importante fonte de energia alternativa, que poderá minimizar os problemas de energia no Brasil.

Considerando a potencialidade dos gaseificadores do tipo indiano como uma alternativa para minorar a demanda insatisfeita de energia no País, tanto no atendimento às regiões não servidas pelo sistema de abastecimento de energia, como para indústrias, foi importado pelo Laboratório de Termofluidos, hoje Laboratório de Inovação em Conversão de Energia Térmica, LI, com recursos do Ministério das Minas e Energia, MME, um gaseificador de biomassa. Tal gaseificador é considerado de última geração, e tinha capacidade de gerar 20 kWe. Originalmente, o gaseificador na Índia deveria servir a um grupo gerador, cujo motor era dual, isto é, partia com o diesel e durante o seu funcionamento operava com 18 a 20 % daquele combustível.

Uma vez que o MME obstaculizou o uso de diesel, o LI, iniciou um estudo de P&D visando a conversão de motores diesel para gás, inclusive, para gás pobre. Uma vez que o gaseificador importado havia sido projetado para funcionar parcialmente com diesel, foi necessário se proceder a uma primeira modificação em seus componentes e em sua distribuição espacial (Rumão, 2013). Os resultados dessas mudanças proporcionaram tanto um aumento na eficiência do sistema e na potência gerada, que passou a 26 kWe, bem como na elevação da energia líquida útil produzida (Rumão, 2014).

Por outro lado, Bezerra (2016), com a implementação de alguns procedimentos e de alguns artifícios mecânicos conseguiu aumentar a eficiência deste sistema de geração de energia elétrica, elevando a potência gerada para 29 kWe.

Percebendo-se que o gaseificador projetado na Índia permitia ampliações na potência produzida, bem como na eficiência térmica do sistema, o presente estudo tem como objetivo, verificar as implicações que causará a substituição do grupo gerador utilizado por Rumão (2014) e Bezerra (2016) por outro capaz de gerar maior potência elétrica. O grupo gerador a ser utilizado é composto por um motor MWM 229-6, já otolizado, e um gerador Negrini de 150 kVA. Quando dessa substituição, tomou-se o cuidado de que o motor pudesse ser alimentado com gás pobre, e operado com um sistema de ignição comandada.

Este trabalho foi distribuído em cinco capítulos. Assim, além deste Capítulo I, com a Introdução, que contempla a contextualização, a problemática e os objetivos, no Capítulo II faz-se uma breve explanação sobre motores de combustão interna e gaseificação. O Capítulo III foi reservado à experimentação, onde se faz uma descrição minuciosa dos procedimentos metodológicos, das adaptações necessárias para uso do motor com o gaseificador e dos aparatos experimentais utilizados. O Capítulo IV é responsável por apresentar e discutir os resultados obtidos em termos dos objetivos pré-definidos. Por fim, o Capítulo V encerra esse estudo, ao apresentar as conclusões obtidas.

CAPÍTULO II

CONCEITOS ASSOCIADAS À MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA VISANDO A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO.

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo explicar, de forma sucinta, os fundamentos teóricos envolvendo motores de combustão interna e gaseificação.

2.2. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Sabe-se que o objetivo dos motores de combustão interna é a produção de energia mecânica proveniente da energia química contida nos combustíveis. Tal energia é liberada devido à oxidação ou queima do combustível dentro do motor. Essas máquinas térmicas operam com base em ciclos termodinâmicos específicos (Heywood,1988).

O motor de combustão interna opera em fases distintas comumente chamadas de tempo. A Figura 1, contém uma representação esquemática de um motor do tipo quatro tempos. Como o próprio nome remete, neste tipo de sistema, o pistão realiza o movimento alternativo quatro vezes (duas revoluções completas do eixo virabrequim) para a conclusão de um ciclo completo (HOAG e DONDLINGER, 2006).

No primeiro tempo, admissão, uma carga de ar e combustível pré-misturados são admitidos no cilindro por meio de uma abertura na válvula de admissão, juntamente com um gradiente de pressão negativa gerado pela movimentação descendente do pistão, que vai do

ponto morto superior ao ponto morto inferior.

No segundo tempo, compressão, a válvula de admissão se fecha e a mistura ar-combustível é comprimida pelo movimento ascendente do pistão, indo do ponto morto inferior ao ponto morto superior. No terceiro, a mistura está submetida a alta pressão e temperatura devido a compressão no tempo anterior, só então uma centelha elétrica de alta energia, proveniente da vela de ignição, é liberada, iniciando assim, o processo de combustão dessa mistura. A frente de chama dessa combustão gera um gradiente de pressão positivo no interior do cilindro, fazendo o pistão se movimentar do ponto morto superior ao inferior. No quarto tempo, exaustão, a mistura de gases queimados é expelida ao ambiente devido a abertura da válvula de expansão juntamente com a movimentação do pistão que vai do ponto morto inferior ao superior.

O processo acima explanado equivale à descrição do ciclo Otto. O ciclo Diesel consistiria nos mesmos processos, com algumas alterações. No primeiro tempo (admissão) seria admitido apenas ar ambiente, e no terceiro tempo (combustão) a vela de ignição é substituída por um bico injetor de combustível, capaz de pulverizar o combustível para o interior da câmara a alta pressão. Com o fluido submetido a alta temperatura e pressão inicia-se o processo combustão.

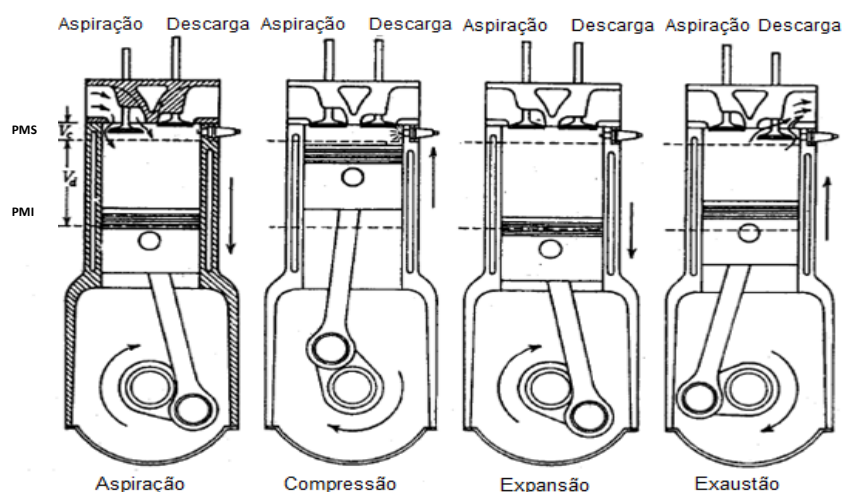


Figura 1: Fases de um motor quatro tempos (HOAG e DONDLINGER, 2006)

2.3. COMBUSTÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os motores de combustão interna podem queimar uma variedade de combustíveis, incluindo gás natural, óleos combustíveis, biodiesel, biocombustíveis e petróleo bruto. Os motores diesel são, geralmente, mais eficientes por possuir uma alta taxa de compressão, fato possível devido a sua robustez geométrica permitindo este trabalhar com altas pressões na câmara de combustão. Essa disponibilidade física torna possível a extração de energia térmica de combustíveis gasosos com baixo poder calorífico, por meio de sua combustão. Para isso, é necessário que seja instalado nesses motores uma fonte térmica capaz de iniciar o processo de queima desta mistura. A ignição por centelha é o método mais eficiente para esse tipo de uso, podendo ter controle direto sobre quando iniciar a queima, conseguindo atingir picos de eficácia para cada aplicação.

2.4. A IGNIÇÃO POR CENTELHA

Em um motor convencional do ciclo Otto, o combustível e o ar são misturados no sistema de admissão, induzidos através da válvula de admissão no cilindro e, em seguida, comprimido. Em condições normais de operação, a combustão é iniciada por uma descarga elétrica, que é causada por um sistema de ignição. Após a inflamação, desenvolve-se uma chama turbulenta, que se propaga através da mistura, até atingir as paredes da câmara de combustão e, em seguida, extinguir-se.

O processo de desenvolvimento da chama não ocorre de maneira imediata, devido a atrasos físicos e químicos relacionados com atomização e vaporização da mistura como também por reações de pré-combustão. Durante esse processo tem-se diferentes estágios, desde a pré-ignição da mistura até sua extinção final, à qual está diretamente relacionada com a elevação da pressão no interior do cilindro. Na Figura 2, pode-se verificar o crescimento da pressão no interior do cilindro em relação à propagação da chama



Figura 2: Propagação da Chama. Fonte: Adaptada de (TURNNS, 2012)

2.5. A IMPORTÂNCIA DO ÂNGULO DE IGNIÇÃO

Com a finalidade de se aproveitar a máxima energia possível do processo proveniente da combustão, é necessário utilizar um ângulo de ignição adequado. Este representa o momento em que a centelha elétrica é liberada pela vela, e é considerado o ponto crucial para o início da combustão. Como já mencionado no tópico anterior, para que o pico de pressão ocorra em um ponto ótimo, é necessário que a centelha seja liberada pela vela um pouco mais cedo, para que o pico de pressão ocorra em um ponto ótimo (ligeiramente após o PMS).

A ocorrência da centelha não sincronizada com a movimentação do pistão pode levar a redução da pressão no interior do cilindro e, conseqüentemente, provocar danos estruturais ao motor.

2.6. O SISTEMA ELETRÔNICO DE IGNIÇÃO COMANDADA

Os sistemas eletrônicos de ignição têm como função analisar dados obtidos através de sensores enviados a ECU (Módulo de Injeção/Ignição) e com isto definir a melhor estratégia (Performance/Consumo) a ser adotada. Estas estratégias são denominadas mapas de ignição, e definidos pelo corpo de engenharia de cada montadora através da calibração de seus respectivos motores. Para funcionamento mínimo de um sistema de ignição por centelha é essencial a existência de pelo menos dois dispositivos: o sensor de indução e uma

roda fônica.

Os sensores indutivos estão presentes nos automóveis com a finalidade de detectar a movimentação das partes mecânicas do motor, como velocidade do eixo virabrequim, posição do virabrequim e posição do eixo de comando. Esses sensores são compostos por um ímã permanente acoplado a uma bobina, com núcleo de material ferromagnético, e são instalados próximos as rodas fônicas. O funcionamento deste sensor é baseado na variação do campo magnético à frente dele. A movimentação da roda fônica faz o campo magnético, antes constante por conta do ímã permanente, variar. Para que seja detectado o início de uma nova volta, as rodas fônicas possuem referências, como a falta de um, ou mais, dentes. Dessa maneira, é induzida uma corrente na bobina do sensor, proporcional à variação do campo magnético, conforme apresentado na Figura 3.

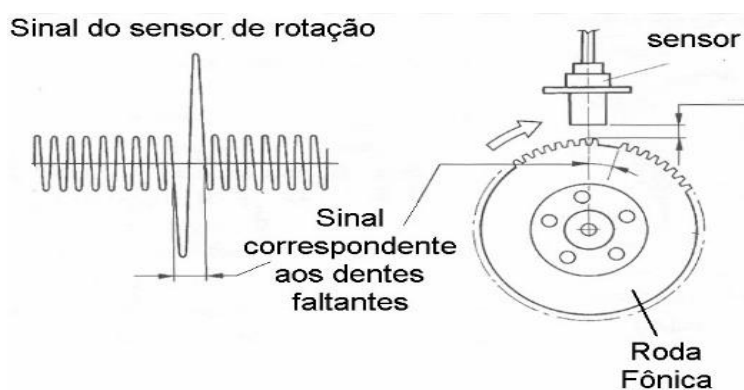


Figura 3: Sinal do Sensor Indutivo em conjunto com roda fônica (Santos,2013)

2.7.O MAPA DE IGNIÇÃO

O sistema eletrônico de ignição comandada permite a imposição de diferentes valores de avanço de ignição em toda a faixa de rotação. Isso significa a possibilidade de uma otimização do ângulo de avanço para cada rotação e carga.

Para que isto ocorra a central recebe sinal de sensores específicos, onde em sua maioria são utilizados sensores indutivos para a determinação da rotação/posição do eixo virabrequim e transdutores compostos por extensômetros aplicados sobre um diafragma de silício (Sensor MAP) capazes de medir a pressão absoluta no coletor de admissão (Ribbens, 1998). Através da aquisição dos sinais de rotação e carga do motor, a central eletrônica de controle determina, em função do mapa de avanço alocado em uma memória interna, o

ângulo ideal de avanço de ignição para a condição lida e realiza o chaveamento da bobina em função desse parâmetro. Na Figura 4, pode-se visualizar a superfície de um mapa de ignição comumente utilizado por montadoras.

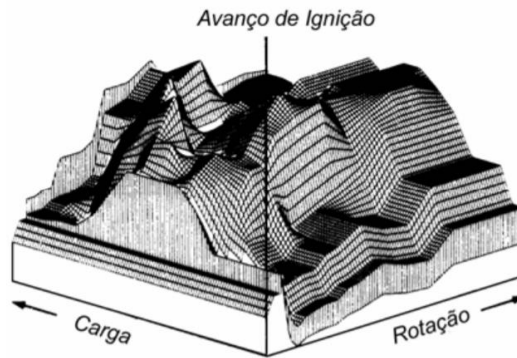


Figura 4: Mapa de Ignição (Denton,2000)

2.8. A GASEIFICAÇÃO

Segundo Andrade (2007), a gaseificação pode ser definida como um processo de transformação da matéria orgânica em gás combustível. Tal conversão se dá através da queima da biomassa, aliada com uma baixa porcentagem de ar, em relação à queima estequiométrica, tornando, assim, a queima parcial.

O gaseificador utilizado neste trabalho é do tipo leito fixo, co-corrente, “topo aberto”, importado da Índia, do Indian of Science/Combustion Gas Propulsion Laboratory, IISc/CGPL, com uma capacidade térmica de 80 kWt. Na Figura 5, pode-se observar o esquema atual do gaseificador instalado no LI, bem como seus componentes.

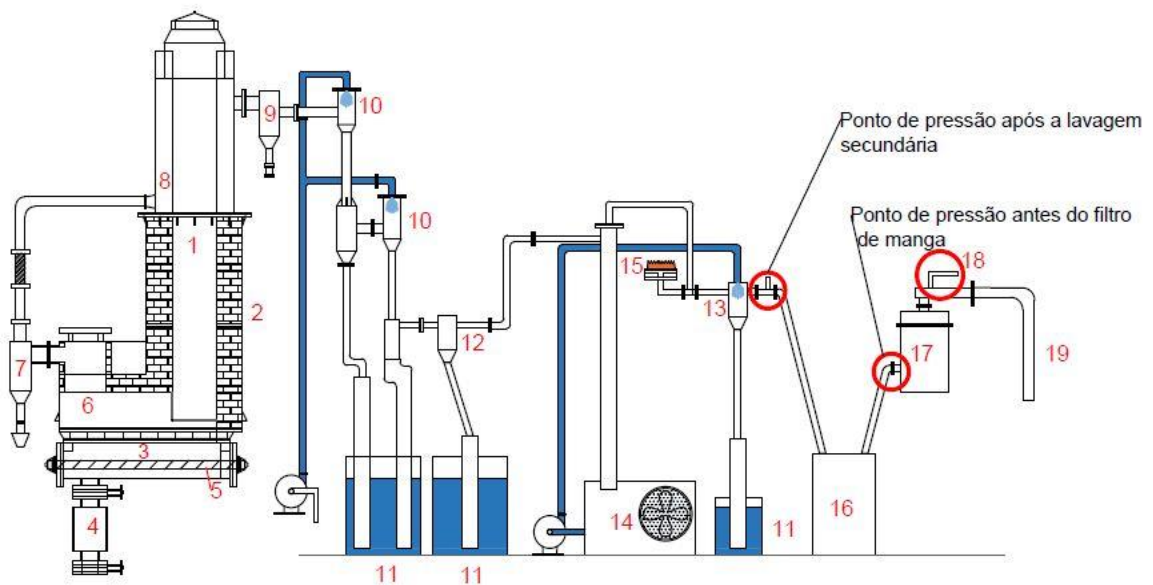


Figura 5: Gaseificador Indiano Instalado no Laboratório de Inovação – UFPA. Fonte: De Luna(2018)

Abaixo descreve-se o funcionamento do sistema de gaseificação, montado no LI:

- Componente 1: (Topo do Gaseificador). Por esse componente, a maior porcentagem de ar do processo é admitida, servindo, também, para se proceder a alimentação da biomassa.
- Componente 2: (O Reator). No seu interior ocorrem todas as reações responsáveis pela gaseificação,
- Componente 3: (O Depósito de Cinzas). Recipiente das cinzas geradas no processo de combustão. Em seu interior existe um transportador helicoidal,
- Componente 4: (O Eliminador de Cinzas) A cinza depositada no estágio anterior, pode ser retirada através da abertura e fechamento do jogo de válvulas posicionadas entre os extremos do Eliminador de Cinzas.
- Componente 5: (O Transportador helicoidal). Responsável pelo transporte das cinzas para o estágio posterior, quando são eliminadas.
- Componente 6: (Gás Produzido em transição). A partir deste ponto é iniciado o processo de limpeza,
- Componente 7: (O Ciclone). Tem a finalidade a extração de particulados,

gerados durante o processo,

- Componente 8: (Espaçamento entre as paredes do reator). Em seu trajeto o gás aquecido serve no pré-aquecimento da biomassa,
- Componente 9: (Placa de Condensação do Alcatrão). Chicana para a condensação do alcatrão,
- Componente 10: (Chuveiros para a Lavagem do Gás). Promovem a lavagem primária do gás, com água, pelo método co-corrente,
- Componente 11: (Tonéis de Armazenamento). Neles a água utilizada para lavagem primária e secundária, é armazenada,
- Componente 12: (Placa de Condensação de Água). Serve para separar o condensado de água, formado no processo de lavagem primária,
- Componente 13: (Chuveiros para Resfriamento do Gás). Neste componente se dá o resfriamento do gás pela troca de calor com a água que serviu à lavagem. Visa-se, assim, a diminuição da temperatura e o consequente aumento de sua densidade, e a condensação do alcatrão. Tendo em vista a presença do alcatrão lança-se mão da lavagem secundária,
- Componente 14: (A Central de Refrigeração, Chiller). Visa o resfriamento da água a 5 °C, chuveiro para resfriamento do gás, descrito acima.
- Componente 15: (A Chama Piloto). Elemento de observação da qualidade do gás.
- Componente 16: (Reservatório de Gás - Pulmão). Dispositivo capaz de atender às flutuações das demandas de gás proporcionadas pelas variações das potências do motor,
- Componente 17: (O Filtro de Manga). Tem como função reter os particulados que não foram eliminados durante o processo de lavagem,
- Componente 18: (Válvula de Liberação de Gás Pobre). Válvula que libera a passagem de gás pobre para o motor,
- Componente 19: (A Tubulação de Distribuição do Gás ao motor). Duto que transportará o gás pobre ao motor.

2.9. VARIÁVEIS DE DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR-GASEIFICADOR

Para se avaliar o funcionamento do grupo é necessário calcular diversos parâmetros, tais como: Consumo de Biomassa, Vazão de Gás Produzido, Eficiência do Gaseificador, Eficiência do Grupo Gerador e Eficiência Global. As eficiências que serão calculadas neste trabalho, utilizam das mesmas equações que (RUMÃO, 2013) e (BEZERRA, 2016) usaram em suas teses.

2.9.1. Consumo de Biomassa

A obtenção do consumo de biomassa no gaseificador é realizada com a aferição do peso de uma quantidade de massa adicionada, e o tempo necessário para queima-la, tal parâmetro só deve ser medido após a estabilização do gaseificador, através da Equação 2.1, pode-se calcular o consumo.

$$CB = \frac{Mad}{t} \quad (2.1)$$

Onde: CB = Consumo de biomassa (kg/s)

M_{ad} = Massa adicionada (kg)

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

2.9.2. Vazão de Gás Produzido

A vazão do gás produzido pelo gaseificador, é determinada utilizando-se um manômetro em U acoplado a um tubo de Pitot, instalado na tubulação de alimentação do motor. Através da diferença de altura do volume do fluido contido no manômetro, pode-se calcular a vazão a partir da Eq. (2.2):

$$Q_{gás} = \frac{\pi * D^2}{4} \sqrt{2 * g * h * \frac{\gamma_{liq} - 1}{\gamma_{gás}}} \quad (2.2)$$

Onde: g = Aceleração devido a gravidade (m/s²);

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

γ_{liq} = Peso específico do líquido no tubo em “U” (N/m³);

$\gamma_{gás}$ = Peso específico do gás que está escoando no tubo (N/m³).

D = Diâmetro da tubulação de escoamento (m).

2.9.3. A Eficiência do Gaseificador

Através da Eq. (2.3), determina-se a eficiência do gaseificador:

$$\eta_{Gaseif} = \frac{PCI_{gás} * Q_{gás}}{PCI_{biomassa} * M_s} * 100 \quad (2.3)$$

Onde: $PCI_{gás}$ = é o poder calorífico inferior do gás produzido pelo gaseificador (J/Nm³);

$PCI_{biomassa}$ = o poder calorífico inferior da biomassa utilizada no gaseificador (J/kg);

M_s = a vazão mássica da biomassa utilizada no gaseificador (kg/s).

$Q_{gás}$ = a vazão de gás pobre (m³/s).

O poder calorífico inferior do gás (PCI) é determinado fazendo-se uso da Eq. (2.4), deduzida por (RUMÃO, 2013).

$$PCI_{gas} = -0,004738 * (\%CO)^2 + (\%CO) * 0,3149 - 0,1057 \quad (2.4)$$

O PCI da biomassa é determinado utilizando-se a Eq. (2.5) (GARCIA, 2002, apud RUMÃO, 2013).

$$PCI_{biomassa} = 4756 - 53,418 * Umidade(\%) \quad (2.5)$$

2.9.4. Eficiência do grupo gerador:

A Eq. (2.6) é usada para se determinar a eficiência do grupo gerador:

$$\eta_{\text{grupogerador}} = \frac{P_{\text{útil}}}{Q_{\text{gás}} * PCI_{\text{gás}}} * 100 \quad (2.6)$$

Onde: $P_{\text{útil}}$ = Potência elétrica útil (W).

$Q_{\text{gás}}$ = a vazão de gás pobre (m^3/s).

$PCI_{\text{gás}}$ = é o poder calorífico inferior do gás produzido pelo gaseificador (J/Nm^3);

2.9.5. Eficiência Global

A Eq. (2.7), serve para o cálculo da eficiência global:

$$\eta_{\text{global}} = \frac{\eta_{\text{gaseif}} * \eta_{\text{grupogerad}}}{100} \quad (2.7)$$

Onde: η_{gaseif} = Eficiência do Gaseificador,

$\eta_{\text{grupogerad}}$ = Eficiência do Grupo Gerador.

CAPÍTULO III

A EXPERIMENTAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo destina-se à descrição dos experimentos realizados neste trabalho, e à apresentação dos equipamentos utilizados.

3.2. O MOTOR UTILIZADO NESTE TRABALHO

O motor utilizado neste trabalho foi o MWM 229/6, quatro tempos do tipo Diesel. O mesmo possui 6 cilindros em linha com 5,88 L de cilindrada, com cabeçotes individuais, aspiração natural, injeção mecânica e razão de compressão de 17:1. Possui uma potência mecânica bruta de 70 kW à 1800 RPM, utilizando Diesel como combustível (MWM, 2017). Este, passou por um processo de Ottolização, para funcionar com etanol Queiroga (2009). Para realizarmos a presente dissertação foi necessário a adaptação do referido motor, de forma a que pudesse operar com o gás pobre, ver Figura 6.



Figura 6: Motor MWM 229/6, adaptado.

3.3. INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE IGNIÇÃO COMANDADA E SEUS PERIFÉRICOS NO MOTOR MWM 229/6.

Neste tópico será explanada a instalação de todos os dispositivos do sistema de ignição utilizado, dentre eles: o Spark PRO 3 e as Bobinas de Ignição, a Roda Fônica e o Sensor Indutivo, o Sensor MAP, o Sensor de Temperatura e por fim a central de Ignição FT 400.

3.3.1. O SparkPro 3 e as Bobinas de Ignição

O equipamento empregado neste trabalho foi o SPARK PRO 3. Este é um módulo de ignição indutiva, de alta energia, que permite a formação de arcos elétricos em altas tensões, aplicando até 400 V no primário da bobina de ignição, o que representa 40.000 V na vela de ignição (com uma bobina de 1:100), possibilitando uma maior abertura dos eletrodos em comparação a sistemas comuns de ignição (BEZERRA, 2016). Possui ainda, alta capacidade de corrente e pode trabalhar com bobinas de baixa impedância, possibilitando centelhas com maior energia e duração.

A bobina utilizada é do tipo ignição indutiva de duas saídas do fabricante Bosch, possui resistência mínima no primário de indução de 0,3 ohms. A mesma é recomendada pela fabricante da central de ignição, valores abaixo deste podem causar a queima do SparkPro.

No presente projeto foram instaladas 3 bobinas, com a configuração de centelha perdida, no qual uma das centelhas não tem função. A instalação do equipamento foi realizada conforme recomendação do fabricante. Na Figura 7 pode se verificar a Spark Pro 3, e bobinas instaladas no motor.

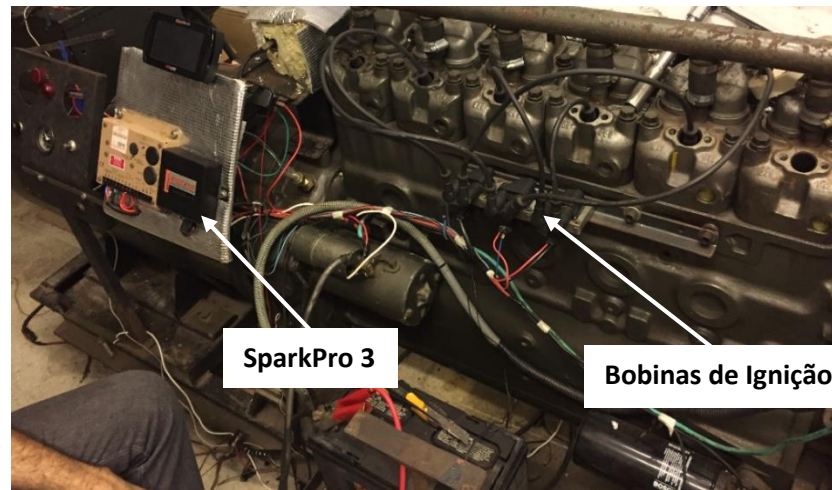


Figura 7: SparkPro 3 e Bobinas de Ignição

3.3.2. A Roda Fônica e Sensor Indutivo

Para instalação da roda fônica foi necessário fabricar uma peça-suporte capaz de torná-la intercambiável entre os motores existentes no Laboratório.

A instalação do novo conjunto só foi possível com a retirada momentânea do radiador, para se ter acesso ao centro do eixo virabrequim. Para garantir o perfeito funcionamento do sensor, foi elaborado um suporte ajustável. Na Figura 8, pode-se verificar o sensor e a roda fônica instalados no motor.

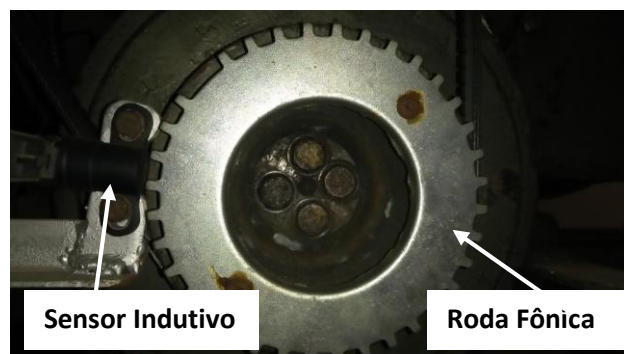


Figura 8: Sensor Indutivo e Roda Fônica

3.3.3. O Sensor MAP

O sensor MAP (Manifold Absolute Pressure) mede a depressão gerada pelo motor no coletor de admissão. Esse dado serve como referência para a elaboração do mapa de ignição. A central de ignição possui uma entrada capaz de medir essa depressão e exibir esse dado em tempo real. Na Figura 9, visualiza-se o local da instalação da tomada de pressão no coletor de admissão.



Figura 9: Tomada de Pressão para aferição do Sensor MAP

3.3.4. O Sensor de Temperatura

A medição de temperatura nos motores é baseada em termistores. Esses dispositivos variam sua resistência elétrica com a modificação da temperatura. Com o intuito de prevenir um possível aquecimento do motor, foi instalado um sensor de temperatura, padrão Delphi/NTK ($3,3\Omega$ a 20°C), modelo MTE-4053, capaz de medir a temperatura da água de arrefecimento. Conforme orientação do manual, o mesmo foi instalado próximo ao cabeçote. Na Figura 10, pode-se observar o sensor já instalado.

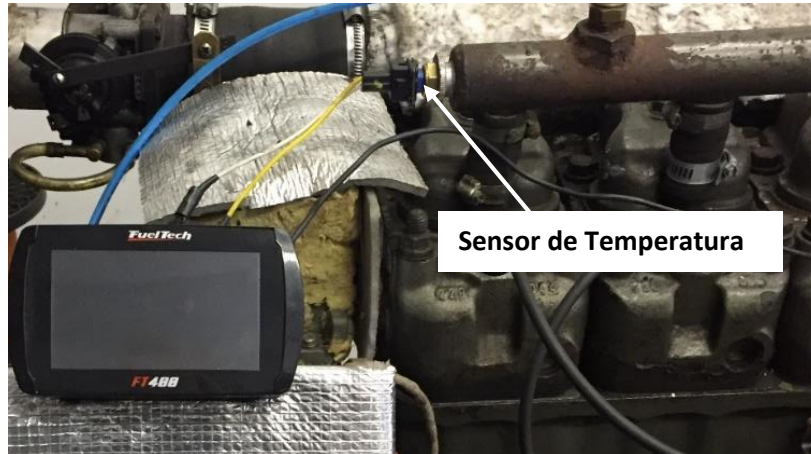


Figura 10: Sensor de Temperatura

3.3.5. A Instalação da Central de Ignição comandada - FT400

Feita a instalação dos sensores e dispositivos essenciais para o funcionamento do sistema de ignição, realizou-se a instalação do chicote elétrico do motor, acoplado com o módulo FT (FuelTech). Todo o procedimento de instalação foi feito seguindo o manual do equipamento.

Para melhor acomodação e facilidade de uso por parte do operador, foi confeccionado um painel capaz de suportar a própria FT400, juntamente com o SparkPro 3 e o controle de rotação (será explanado posteriormente). Na Figura 11, pode-se observar o sistema montado.

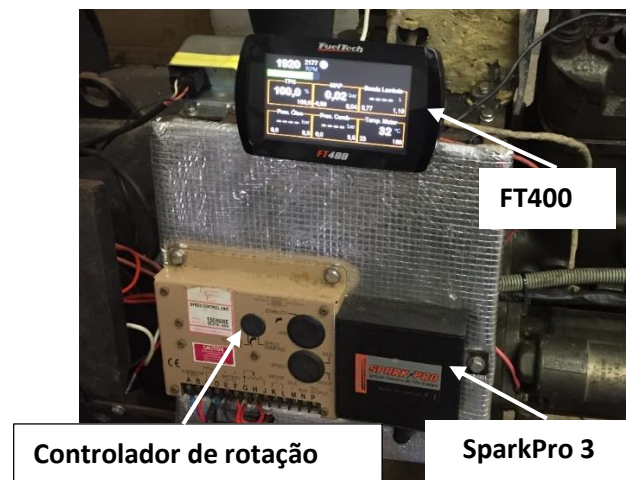


Figura 11: Sistema de Ignição montado

3.4. OS PERIFÉRICOS DE CONTROLE A/F (AR/COMBUSTÍVEL) E ROTAÇÃO

Este tópico diz respeito à instalação dos equipamentos responsáveis pelo ajuste estequiométrica da mistura, bem como, do controlador de rotação do motor.

3.4.1. A Instalação do sistema de Alimentação

Para que o motor admita o gás proveniente do gaseificador, é necessário que se instale um sistema capaz de fracionar a quantidade de gás com ar, e controlar o quanto dessa mistura será admitida no motor.

O TBI, comumente chamado de corpo de borboleta, é o mais indicado para a realização do controle da quantidade de mistura que será admitida pelo motor. O sistema utilizado nesse trabalho é comercializado para automóveis VW Golf 2.0, conforme visualizado na Figura 12-a. Para o funcionamento desse sistema, com gás pobre, todavia, Rumão (2013) desenvolveu um regulador de fluxo de ar, simples e de fácil operação, capaz de controlar a razão Ar-Gás Pobre, ver Figura 12-b. O mesmo é conectado à entrada do coletor de admissão do motor.

Bezerra (2016), percebeu que esse sistema de regulagem estava recebendo demasiado calor, proveniente do motor durante o funcionamento, reduzindo assim a massa específica do combustível, e realizou a instalação de um revestimento térmico no componente. No presente trabalho, utilizou-se a mesma estratégia a fim de diminuir as perdas térmicas. Na Figura 12-c visualiza-se todos os dispositivos relatados, instalados.



Figura 12: (a) TBI do Golf 2.0, (b) Regulador de Fluxo de Ar (RUMÃO, 2013), (c) Dispositivo Instalado no Motor MWM 229/6

3.4.2. A Instalação da Unidade de Controle de Rotação

Com o intuito de manter a rotação do motor em 1800 RPM (rotação de trabalho do gerador) durante a aplicação de uma carga, é necessário a instalação de um sistema de controle de abertura da borboleta. O sistema de controle de rotação, conhecido também como governador eletrônico, é um conjunto de equipamentos responsáveis por essa manutenção da rotação. Este sistema é constituído de um sensor magnético, que emite uma tensão alternada quadrada para uma unidade controladora de velocidade, que por sua vez, determina a tensão contínua adequada para um atuador magnético que está interligado com o eixo do corpo de borboleta, que acelera o motor. Na Figura 13, pode-se observar o controlador (a), e o atuador magnético (b).

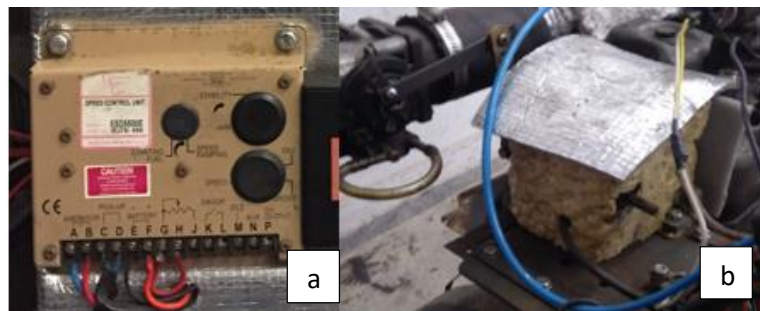


Figura 13: (a) Controlador de Rotação, (b) Atuador do Corpo de Borboleta

3.5. CONFIGURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DA IGNIÇÃO

Após a instalação de todo o sistema, iniciou-se a configuração do sistema de ignição, na unidade de comando. O procedimento consistiu em informar à FT 400, as características relacionadas ao motor (número de cilindros) e ao sistema sensorial escolhido (roda fônica). Adicionou-se, ainda, o tipo de modo de ignição (SparkPRO 3 fios), Dwell da Ignição (isto é, o tempo de carga da bobina de ignição em milissegundos).

A contagem dos dentes é feita a partir da falha (dentes em falta na roda fônica), no sentido contrário ao de rotação da polia do virabrequim. O motor MWM 229 utilizado possui 6 cilindros, e alinhou-se o sensor com o 11º dente da roda fônica, no momento em que o cilindro 1 se encontrava no PMS, durante o tempo de ignição.

A configuração informada ao FT-400, pode ser observada na Tabela 1:

Tabela 1: Dados de Entrada na FT400, para calibração do motor

Número de Cilindros do Motor	6 cilindros
Sensor de Rotação	Indutivo
Alinhamento Dente/Sensor	11º dente
Módulo de Ignição Indutiva	SparkPro 3
Dwell de Ignição	3,6 ms

Realizada a configuração da ignição do FT 400, diretamente na tela, deu-se a partida do motor, fazendo-se, na sequência, a calibração da ignição. O procedimento de calibração é informado no manual do equipamento e foi seguido à risca neste trabalho.

Com o auxílio da pistola estroboscópica verificou-se a posição da ignição da unidade de comando, com o ponto indicado pelo fabricante do motor. O ponto indicado pelo fabricante do motor é próximo à polia acoplada ao eixo virabrequim, conforme observado na Figura 14.

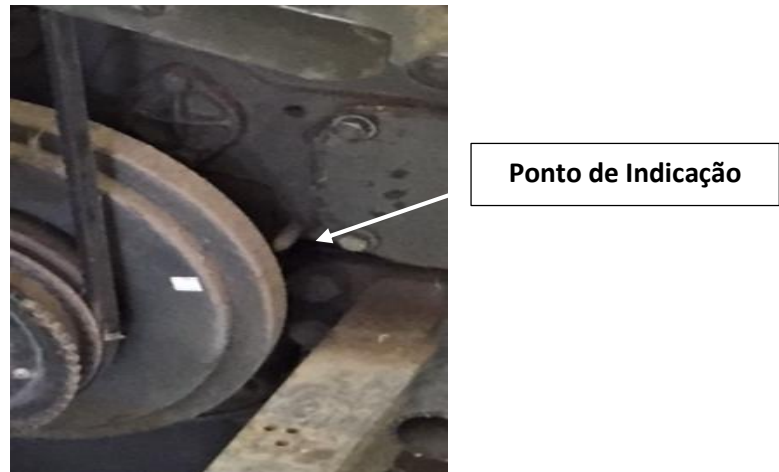


Figura 14: Ponto de Referência do PMS do 1º cilindro do motor, para calibração

Ao acionar a calibração, o FT 400, trava-se o ponto de ignição aplicado ao motor em 20º, em qualquer rotação. O manual do fabricante indica uma rotação entre 700 e 900 rpm para o procedimento de calibração. Com a pistola de ponto e fazendo-se uso do goniômetro instalado na polia do virabrequim, compara-se as leituras instantâneas. Caso o valor apresentado no goniômetro seja diferente de 20º corrige-se no FT 400, acrescentando-

se ou reduzindo-se valores de $0,25^\circ$ até que seja observado o valor de 20° nos dois métodos.

Finalizado todo o processo de calibração, o motor está pronto para uso com o gás pobre.

3.6. O GERADOR UTILIZADO NESTE TRABALHO

O gerador elétrico utilizado neste trabalho, é o Negrini, possui potência aparente nominal de 150 kVA, fator de potência de 0,8 e potência ativa nominal de 120 kW, ver Figura 15.



Figura 15: Gerador de Energia Elétrica

3.7. O GASEIFICADOR UTILIZADO NESTE TRABALHO.

O gaseificador utilizado neste trabalho é do tipo co-corrente de topo aberto, com uma capacidade térmica de 80 kWt. Originalmente, o gaseificador foi projetado na Índia, para servir a um grupo gerador, com motor operando no ciclo dual, ou seja, realizava-se a partida utilizando o diesel e durante seu funcionamento consumiria 18 a 20 % daquele combustível. Em sua configuração original o sistema gaseificador/grupo gerador estava limitado a produzir, no máximo 20 kWe de potência.

Rumão (2013) realizou a instalação do gaseificador no Laboratório de Inovação e prosseguiu com adaptações significativas no projeto original, conseguindo atingir uma potência maior do que a nominal de projeto, tendo chegado a 26 kWe, utilizando apenas o

gás pobre como combustível. Posteriormente, Bezerra (2016), alcançou a potência de 29 kWe. Na Figura 16, pode-se verificar parte do gaseificador instalado no LI-UFPB.



Figura 16. Gaseificador Instalado no LI-UFPB

3.8. APARATOS SUPLEMENTARES

Os aparatos experimentais usados neste trabalho foram os mesmos que Rumão (2013) e Bezerra (2016). Na Figura 17 pode-se observar a lista simplificada de tais aparatos.



Analisador de Gases Veicular

- Modelo: Discovery G4 da Alfateste
- Verificação do Fator Lambda e Composição do Gás Pobre



Simulador de Carga

- Capacidade Total Instalado no LI - 90kWe.
- Avaliar Potencia Útil do Grupo em termos de Potencia Elétrica.



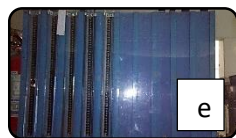
Serra de Bancada Elétrica

- Serra Circular de Bancada
- Padronização das dimensões geométricas da biomassa



Bomba de Vácuo

- Deslocamento Positivo com funcionamento a seco
- Sucção de Gás Pobre para análise de composição



Manômetros em U

- Flúidos de Trabalho: Água e Querosene
- Medição de Pressão



Termômetros e Mostradores Digitais

- Termopares do Tipo K, com mostradores digitias
- Verificação de Temperatura



Balança Digital

- Marca TOMATE - sf 400, com capacidade de 100kg
- Verificação da massa da Biomassa



Cronômetro Digital

- Marca NAKO, modelo NA-613D
- Verificação do tempo de consumo de Biomassa



Termo Balança Analítica

- Marca RADWAG do tipo MAC 210, resolução de 0,001% de unidade de 1 mg de massa.
- Verificar o teor de humidade da biomassa utilizada na gaseificação

Figura 17: a) Analisador de Gases Veicular, b) Simulador de Carga, c) Serra de Bancada Elétrica, d) Bomba de Vácuo, e) Manômetros em U, f) Termômetros e Mostradores Digitais, g) Balança Digital, h) Cronômetro Digital, i) Termo Balança Analítica.

3.9. EXPERIMENTOS

A biomassa utilizada como combustível no processo de gaseificação, foi obtida através de rejeitos de madeira da UFPB (portas, cadeiras, mesas) e paletes. Com o intuito de garantir a melhor acomodação desse material no reator e uma queima mais uniforme, os rejeitos foram cortados em forma retangular com tamanhos (60mm x 25mm x 25mm) o mais próximo possível do utilizado por Rumão (2013). As biomassas já em tamanho padrão podem ser observadas na Figura 18.



Figura 18: Biomassa pronta para uso.

Com todo o aparato experimental instalado (motor MWM 229/6 adaptado, gaseificador e instrumentos de medição), prosseguiu-se para realização dos testes propostos.

Inicialmente, verificou-se o nível de água de todos os reservatórios (Componente 11) e logo após realizou-se a alimentação do gaseificador com biomassa. Em seguida ligou-se as bombas e o sistema de lavagem secundária (Chiller). Como já mencionado, é importante que a temperatura da água do Chiller atinja 5º C, antes de iniciar a queima no gaseificador.

Realizados esses procedimentos, removiam-se as tampas dos três orifícios laterais, localizados na parte externa do reator, e com a utilização de um maçarico a gás (GLP) inflamava-se a biomassa, ver Figura 19.

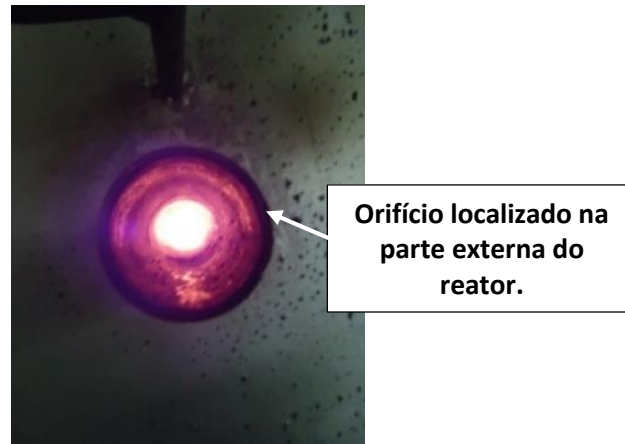


Figura 19: Orifício localizado no reator do gaseificador. (BEZERRA, 2016)

Iniciada a queima da biomassa no gaseificador, se aguardar cerca de 5 min, e então, acendia-se a chama piloto, ver Figura 20.

Um indício de que o gás está com o poder calorífico suficiente para se dar partida no motor é obtido através da coloração azulada da chama piloto (indicação de aumento de poder calorífico do gás pobre), que ocorre após um período de aproximadamente 15 minutos. Com a chama na coloração desejada, dava-se partida no motor, e em passos progressivamente lentos, fechava-se a válvula de alimentação da chama piloto. É importante ressaltar que todos os procedimentos operacionais para se dar partida no sistema formado pelo gaseificador/grupo gerador, foram os mesmos já utilizados por Rumão (2013) e por Bezerra (2016).



Figura 20: Chama Piloto acesa

3.10. OS TESTES REALIZADOS

Para verificar a capacidade de geração de energia elétrica, do grupo formado pelo gaseificador instalado no LI com o grupo gerador. Seguiu-se com as mesmas metodologias de testes utilizada por Rumão (2009) e Bezerra (2016).

Para esse trabalho foi utilizado o mesmo mapa de ignição construído por Bezerra (2016), a partir da Tabela 2.

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

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

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados experimentais obtidos neste trabalho e suas análises pertinentes. Em nossas considerações foram adotados como parâmetros de comparação os dados, bem como os resultados de Rumão (2013) e de Bezerra (2016).

4.2. TEOR DE UMIDADE E A MASSA ESPECÍFICA DA BIOMASSA

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentados os resultados dos teores de umidade das quatro amostras de biomassa residual, avaliados em triplicata, e de suas massas específicas, respectivamente, assim como os valores das médias obtidos por Bezerra (2016) e Rumão (2013).

Tabela 3: 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	9,72	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: 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

A potência elétrica máxima alcançada pelo sistema gaseificador/grupo gerador foi de 32 kWe. Na Figura 21 pode-se observar as potências alcançadas em função do ângulo de ignição.

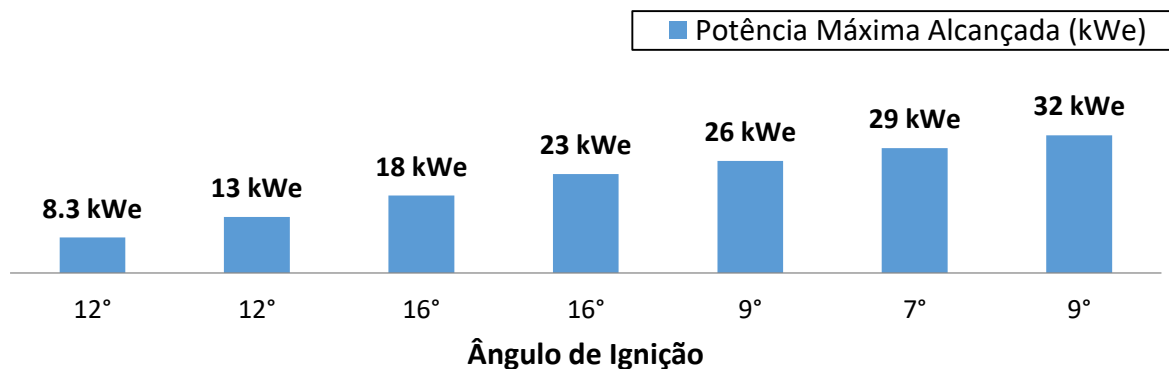


Figura 21: Potência máxima alcançada em cada ângulo

4.4. TEMPERATURA DE GÁS POBRE

A temperatura de gás pobre foi medida na entrada do coletor de admissão do motor. Esta influencia diretamente na massa específica da mistura, que por consequência influi na potência útil final. Na Figura 22, pode-se observar os valores obtidos durante os testes.

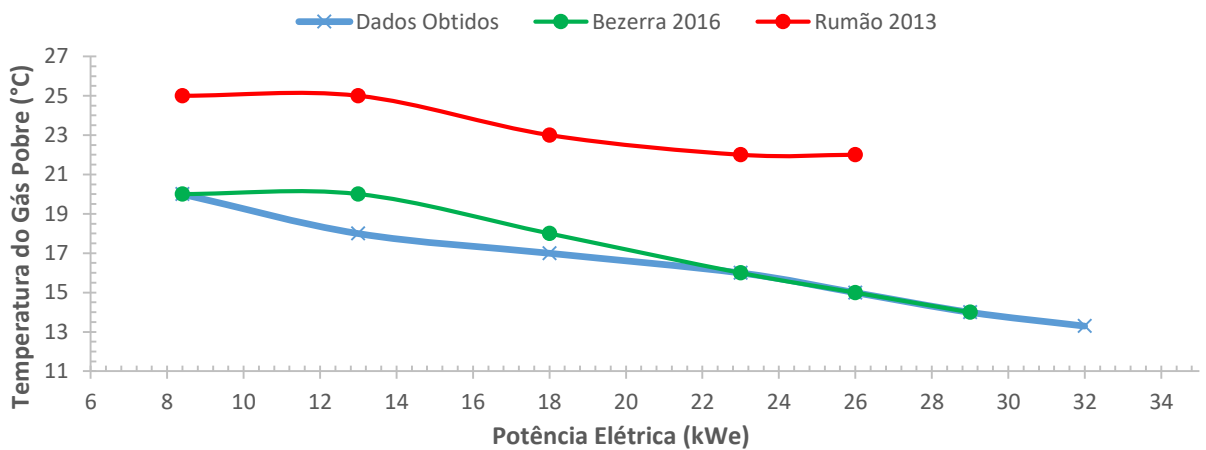


Figura 22: Temperatura de Gás Pobre

Pode-se observar que existe um delta de temperatura de aproximadamente 5°C entre o valores obtidos por Bezerra (2016) e Rumão (2013). Essa variação ocorreu devido Bezerra (2016) optar pela a instalação de um revestimento térmico nas tubulações de passagem do gás e em diversas partes do motor, ocasionando a diminuição de perdas térmicas. Para esse trabalho foi utilizada a mesma estratégia de Bezerra (2016), e por consequência obteve-se temperaturas semelhantes.

4.5. MEDIDAS DE PRESSÃO

Diferentes pontos de pressão também foram coletados, dentre eles pode-se elencar dois principais: Pressão Relativa na Saída da Lavagem Secundária (Chiller) e Pressão Relativa no Coletor de Admissão (MAP). Na Figura 23, pode-se observar a pressão relativa na saída da lavagem secundária. Ao analisar esta, verifica-se uma faixa de depressão causada pelo motor nesse sistema, semelhante às constatadas por Bezerra (2016) e Rumão (2009). A partir da potência de 29 kWe identificou-se um aumento linear de aproximadamente 1×10^{-2} bar de depressão, causado pelo aumento abrupto da angulação do eixo da borboleta localizado no TBI.

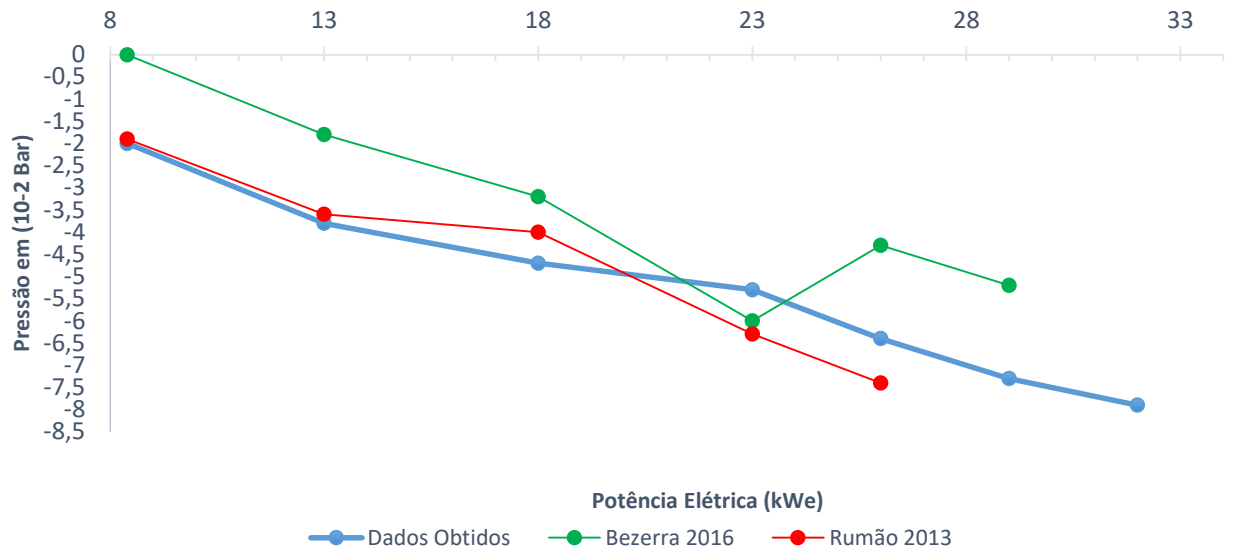


Figura 23: Pressão Relativa na saída da Lavagem Secundária

Na Figura 24, pode-se observar a variação da pressão no coletor de admissão em função da potência elétrica gerada. Verifica-se que por se ter aspiração maior, a pressão no coletor de admissão se mostrou com variação média, aproximada, de -0,15 bar, inferior ao assinalado por Bezerra (2016).

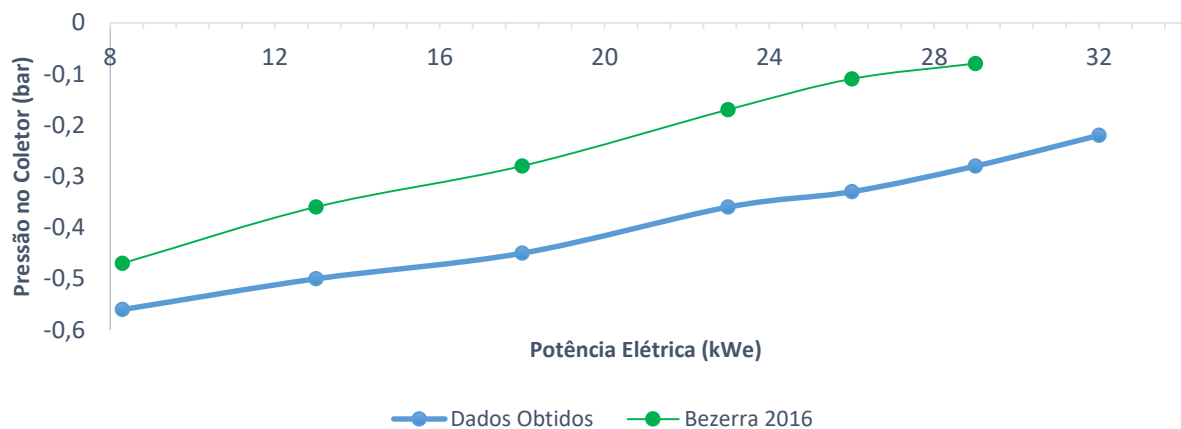


Figura 24: Pressão Relativa no Coletor de Admissão

4.6. CONSUMO ESPECÍFICO DE BIOMASSA

O consumo de biomassa foi determinado utilizando-se a mesma metodologia de Rumão (2013) e de Bezerra (2016). Na Figura 25 pode-se observar os valores referentes ao consumo específico de biomassa para cada potência. Verifica-se um consumo superior aos constatados por Rumão (2013) e Bezerra (2016).

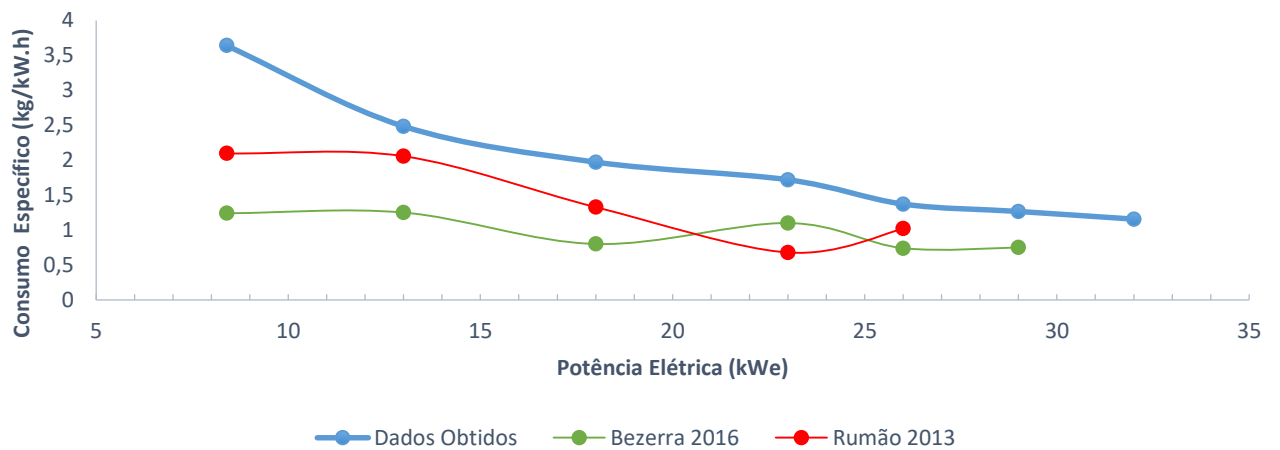


Figura 25: Consumo Específico de Biomassa

4.7. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DA BIOMASSA

De posse dos valores de umidade da biomassa utilizada, calcula-se o PCI (poder calorífico inferior) da madeira. Na Tabela 5 pode-se observar os valores calculados a partir da Eq. (2.5), assim como os valores calculados por Bezerra (2016) e Rumão (2013).

Tabela 5: Poder Calorífico da Biomassa Utilizada

PCI da madeira (kJ/m ³)			
Amostras	Dados Obtidos	Bezerra (2016)	Rumão (2013)
1	17666,075	17805,633	17785,505
2	17640,132	17906,276	17944,297
3	17839,852	18107,561	18013,628
4	17847,775	17897,33	18317,793

Ao calcular a média das quatro amostras contidas na Tabela 5, para esse trabalho obtivemos 17748,45 kJ/m³, Bezerra (2016) o valor de 17929,2 kJ/m³, e Rumão (2013) o valor de 18015,3 kJ/m³. Tal variação constatada deve-se aos diferentes valores de umidade, apresentados na Tabela 3. Apesar da diferença, os valores obtidos são bastante próximos dos obtidos por Bezerra (2016) e Rumão (2013).

4.8. EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR

Na Figura 26, pode-se observar o gráfico no qual mostra-se os valores da eficiência do gaseificador, calculados a partir da Eq. (2.3), em função das potências obtidas. A maior eficiência alcançada do gaseificador foi de 93,65% com o motor trabalhando no ângulo de 16°, na potência gerada de 26 kWe. A menor eficiência encontrada foi 66,16% com o motor trabalhando no ângulo de 12°, na potência gerada de 8,3 kWe.

Rumão (2013) alcançou eficiência de 80% e Bezerra (2016) de 98%, ambos no ângulo de 9°. As razões para essa diferença decorrem das modificações efetuadas por Bezerra (2016) com a instalação do revestimento térmico, causando melhora no poder calorífico do gás.

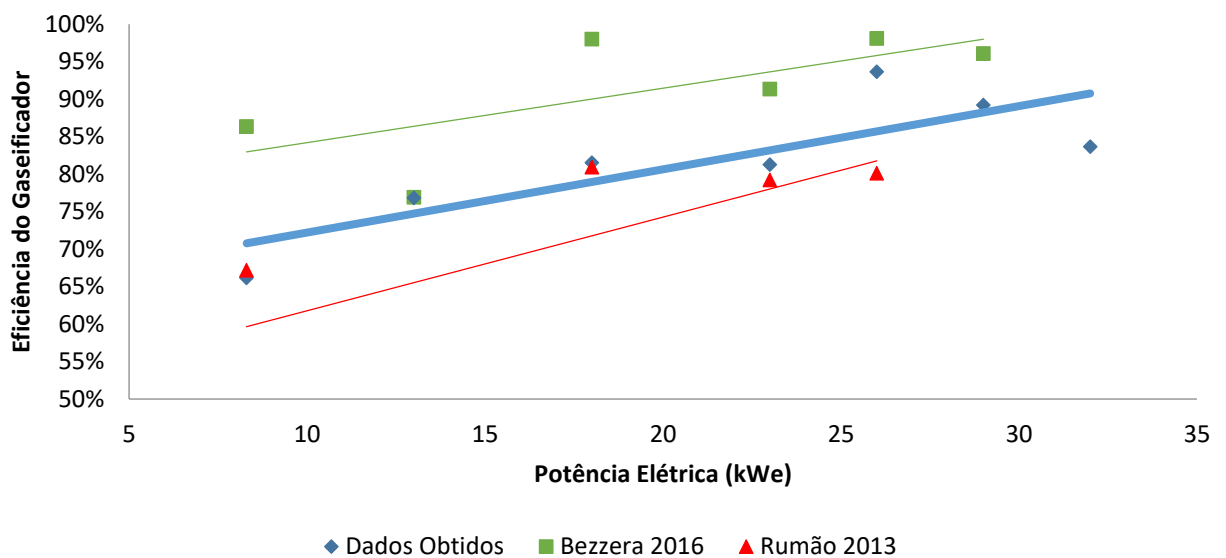


Figura 26: Eficiência do Gaseificador

4.9. EFICIÊNCIA DO GRUPO GERADOR

Na Figura 27 é disponibilizado o gráfico de eficiência do grupo gerador. O valor de maior eficiência se dá com o motor trabalhando no ângulo de 9° com uma potência gerada de 32 kWe, atingindo um pico máximo de 19,72% de eficiência. O menor valor é constatado na menor potência, de 8,3 kWe, atingindo 8,47% de eficiência, no ângulo de 12° . Verifica-se nos dados de Rumão (2013), o valor máximo de 24,35%, e nos de Bezerra (2016) de 28,34%.

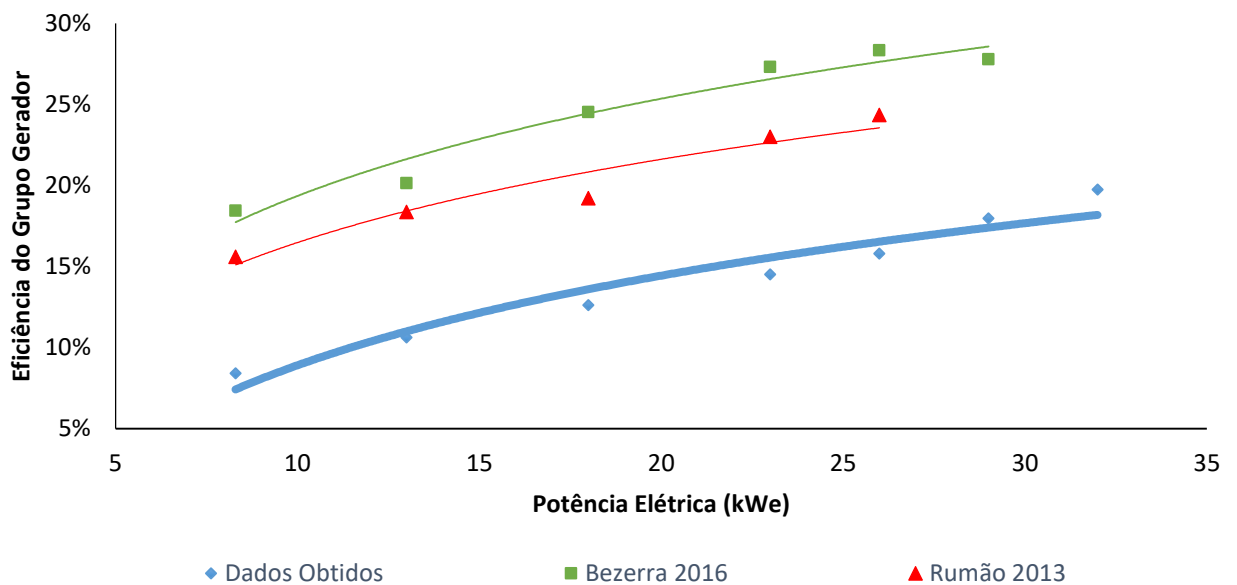


Figura 27: Eficiência do Grupo Gerador

4.10. EFICIÊNCIA GLOBAL DO SISTEMA GASEIFICADOR/GRUPO GERADOR

Na Figura 28, são apresentadas as curvas de eficiência do sistema gaseificador/grupo gerador, em função das potências elétricas.

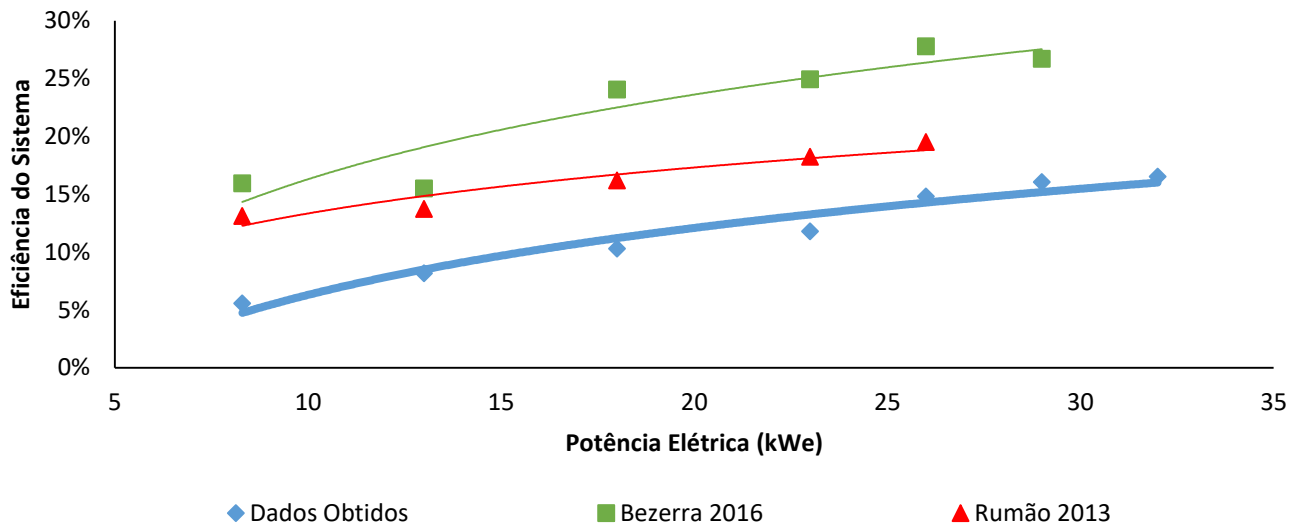


Figura 28: Eficiência Global do Sistema

Analisando a Figura 28, verifica-se que a maior eficiência se dá na potência de 32 kWe, com o motor trabalhando no ângulo de 7° , atingindo o valor de 16,51%. Nos experimentos de Bezerra (2016) o valor máximo foi de 27,8% na potência de 26 kWe. Nos de Rumão (2013), para a mesma potência verifica-se que o valor máximo da eficiência foi de 19,5%.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Foi possível observar, a partir da Fig. 25, que, como era esperado, ao se aumentar a potência do grupo gerador, o consumo de biomassa tornou-se mais elevado. A consequência imediata é reproduzida nas Figs. 26 a 28, demonstrando que nos três casos considerados as eficiências relacionadas ao presente trabalho ficaram abaixo das obtidas por Bezerra (2016) e por Rumão (2013). Particularmente com relação a Bezerra (2016), as eficiências do gaseificador, do grupo gerador e do sistema, foram, em média, 4%, 8% e 9%, respectivamente, menores.

Foi visto, ainda, que, neste estudo, com o mesmo gaseificador, aumentou-se em 6 e 3 kW, respectivamente, às potências máximas atingidas por Rumão (2013) e por Bezerra (2016).

Analisando a Fig. 23, verifica-se que a partir da potência de 29 kWe identificou-se um aumento linear de aproximadamente 1×10^{-2} bar de depressão, causado pelo aumento abrupto da angulação do eixo do corpo de borboleta. Porém, ao se tentar ultrapassar a potência de 32 kWe, o manômetro estava marcando uma depressão de 8×10^{-2} bar, o que causou sucção de água dos reservatórios do Chiller, e distúrbios em todo o sistema, levando o motor a não conseguir atingir potência mais elevada.

A diferença média de -0,2 bar de depressão observado na Fig. 24, é consequência da maior cilindrada do motor utilizado, que possui dois cilindros a mais do que o motor utilizado por Bezerra (2016) e Rumão(2013), tendo um acréscimo de 2,06 L de volume deslocado.

Foi identificado, ainda, que a limitação da potência em 32 kW, adveio do aumento de cinzas acumulado na grelha, em virtude da elevação de consumo de biomassa, que impediu a oxigenação do reator, o fluxo natural do gás pobre, e a consequente progressão

da potência. O uso, portanto, de um dispositivo como um removedor de cinzas, já desenvolvido no LI, poderá ampliar a capacidade de geração de potência do motor, desde que se garanta a existência de uma camada mínima de cinzas na grelha. Por conseguinte, deverá elevar a eficiência térmica do sistema gaseificador/grupo gerador.

Com os resultados obtidos nesse trabalho, fica evidenciado o enorme progresso que se tem produzido no Laboratório de Inovação da UFPB, nos últimos anos de pesquisa e desenvolvimento na área de geração de energia elétrica, através da gaseificação de biomassa e da otimização de motores Diesel.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Aprimoramento de um dispositivo para promover a remoção de cinzas da grelha de gaseificadores de biomassa, visando o aumento dos limites de potência já atingidos na atualidade, e contribuindo para elevar a eficiência térmica do sistema gaseificador/grupo gerador.

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.
- 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.
- C.Z. Wu *, H. Huang, S.P. Zheng, X.L. Yin, An economic analysis of biomass gasification and power generation in China. *Bioresource Technology* 83 (2002) 65–70.
- DASAPPA, S., Paul, P. J., Mukunda, H. S., Shrinivasa, U. “Wood-char Gasification: Experiments and Analysis on Single Particles and Packed Beds” 27th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1335-1342, 1998.
- DE LUNA. F. E. T, 2018, “Efeito de um Reservatório de Gás (Pulmão) na Melhoria da Eficiência Energética de um Gaseificador de Biomassa”, Universidade Federal da Paraíba, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.
- DENTON, T. Automobile electrical and electronic systems. 3rd Edition. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 2000.
- HIGMAN C., Van Der Burgt, M. Gaseification. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2003, ISBN 0-7506-7707-4.

- HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988.
- HOAG, K.; DONDLINGER, B. Vehicular Engine Design. 2ª. ed. Wiscosin: Springer, 2006.
- LUI, A. L. Módulo de Controle de Motor de Combustão Interna, baseado na arquitetura dsPIC, São Carlos, 2016.
- MUKUNDA, H.S., Dasappa, S., Paul, P.J., Rajan, N.K.S., Shrinivasa, U., “Gasifiers and Combustors for biomass – technology and field studies”, Energy for Sustainable Development, pp. 27-38, Vol. 1., no. 3, September 1994.
- MWM, 2017. "Folheto técnico de apresentação de produtos". Disponível em: <http://www.mwm.com.br/site.aspx/Industrial>
- 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.
- RIBBENS, W. B., Understanding Automotive Electronics, Fifth Edition, ButterworthHeinemann Publishing Co., Woburn, 1998.
- RUMÃO, A. S., Geração de Potência e Energia Elétrica a partir da Gaseificação de Rejeitos de Biomassa. Tese de doutorado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB, em março de 2013
- RUMÃO, A. S., Jaguaribe, E.F., Bezerra, A., F., Oliveira, A. F., B. L. N., Electricity Generation from Biomass Gasification. Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 13 • No. 1 • June 2014 • p. 28-31.

SANTOS, Bruno de Oliveira. Implementação de Sistema de Ignição Mapeada em um Motor de Baixa Cilindrada. Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva apresentado à Faculdade de Tecnologia de Santo André. Santo André. 2013.

SRINIVAS, S.N., Ravindranath, N.H., Dasappa, S., Shrinivasa, U., Mukunda, H.S., “Wood gasifier based rural power generation system: a case study”, Pacific and Asian Journal of Energy, pp. 81-91, Vol. 2., no. 2, December 1992.

TURNS, S. R. An Introduction to Combustion. Wisconsin : Mc Graw Hill, 2012.