unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CARLOS EDUARDO IGNÁCIO DA SILVA

ESTUDO DO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR ROTATIVO DE COMBUSTÃO INTERNA DENOMINADO POR IGNA

Guaratinguetá
2017

CARLOS EDUARDO IGNÁCIO DA SILVA

ESTUDO DO ESTADO DE FUNCIONAMENTO DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR ROTATIVO DE COMBUSTÃO INTERNA DENOMINADO POR IGNA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Profa. Dra. Ivonete Ávila

Coorientador: Prof. Dr. Luis Carlos Rios Quiroga

Guaratinguetá
2017

Silva, Carlos Eduardo Ignácio da Silva
S586 Estudos do estado de funcionamento de um protótipo de motor rotativo de combustão interna denominado por igna / Carlos Eduardo Ignácio da Silva – Guaratinguetá, 2017.
49 f : il.
Bibliografia: f. 49

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientadora: Profª. Drª. Ivonete Ávila
Coorientador: Luis Carlos Rios Quiroga

1. Motores de combustão interna. 2. Gases de combustão. 3. Eixos. I. Título

CDU 621.43

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CARLOS EDUARDO IGNÁCIO DA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. **MARCELO SAMPAIO MARTINS**
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof.ª Dra. IVONETE ÁVILA
Orientadora/UNESP-FEG

Profa. Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG

Prof. Dr. CARLOS MANUEL ROMERO LUNA
UNESP-FEG

Março de 2017

DADOS CURRICULARES

CARLOS EDUARDO IGNÁCIO DA SILVA

NASCIMENTO 10.07.1990 – São Paulo -SP

FILIAÇÃO Juvenal Ignácio da Silva Neto
Márcia Christiano Ignácio da Silva

2010/2017 Engenharia Mecânica - Graduação
UNESP – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Campus de Guaratinguetá

Dedico este trabalho à minha família, aos meus colegas de infância e de república que sempre estiveram ao meu lado nos momentos mais alegres e nos mais difíceis

.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que me incentivou ao longo da minha carreira estudantil e sempre me ajudou com o que eu precisasse, não se importando com as dificuldades enfrentadas.

Agradeço também à minha orientadora Prf.ª Dra. Ivonete Ávila e co-orientadores por todo o apoio e conhecimento fornecidos durante a realização deste trabalho de graduação, e a todos os professores que contribuíram para a minha formação.

Agradeço aos meus colegas de infância e da república Ama-Zonas, que apoiaram as minhas escolhas, proporcionaram os melhores momentos da minha vida e que sempre foram sinceros e verdadeiros comigo.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa decisiva em minha vida.

.

A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda.

Oliver Goldsmith.

SILVA CARLOS, C. E. I. **Estudo do estado de funcionamento de um protótipo de motor rotativo de combustão interna denominado IGNA.** 2017. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

Este trabalho de graduação tem por objetivo estudar o estado de funcionamento de um protótipo de motor rotativo de combustão interna denominado IGNA. Foi realizada uma revisão bibliográfica abordando propriedades da combustão de um combustível, conceitos do funcionamento de motores de combustão interna alternativos e rotacionais, métodos e normas para a determinação da potência de eixo em motores e formação dos gases de combustão. Após a revisão bibliográfica foram realizados testes através de medições de potência, posteriormente analisados a fim de encontrar relações entre os valores obtidos com a teoria. De acordo com os resultados obtidos, observamos que o protótipo IGNA desenvolveu uma potência máxima de aproximadamente 3,00 kW, que quando comparado com um motor de 5,0 hp fabricado pela Mercury Marine, evidenciou que ainda existem melhorias a serem feitas para que a sua eficiência seja elevada. A melhoria na sua performance será feita através da utilização de materiais mais adequados, vedações mais eficientes e um sistema de ignição eficaz.

PALAVRAS-CHAVE: Protótipo. Motor de combustão interna. Rotativo.

SILVA CARLOS, C. E. I. **Study of the operation state of a rotational internal combustion engine prototype called IGNA.** 2017. 49 f. Graduation Work (Graduation in Mechanical Engineering) – School of Engineering, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

This graduation work aims to study on the state of operation of an internal combustion rotary engine prototype called IGNA. A literature review was carried out on the properties of combustion of a fuel, concepts of the operation of reciprocating and rotational internal combustion engines, methods and standards for the determination of shaft power in engines and the formation of flue gases. After the literature review, tests were carried out through power measurements, later analyzed in order to find relationships between the values obtained with the theory. According to the results obtained, we observed that the prototype IGNA developed a maximum power of approximately 3.00 kW, which when compared to a 5.0 hp engine manufactured by Mercury Marine, showed that there are still improvements to be made so that the efficiency is improved. Improved performance will be achieved through the use of more suitable materials, more efficient seals and an effective ignition system.

KEYWORDS: Prototype. Internal combustion engine. Rotary.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Situações de perda de contato da vedação. 16
Figura 2 - Forças exercidas nas vedações. 17
Figura 3 - Sistema de múltiplas vedações. 18
Figura 4 - (a) Vedação simples e (b) Vedação composta por dois componentes. 19
Figura 5 - Protótipo IGNA 21
Figura 6 - Componentes utilizados no protótipo IGNA. 22
Figura 7 - (a) Pistão articulado e (b) As cinco vedações utilizadas 22
Figura 8 - (a) Câmara quente e (b) Câmara fria 23
Figura 9 - Ciclo de operações da câmara fria. 24
Figura 10 - Ciclo de operações da câmara quente. 25
Figura 11 - (a) Vedações em seus alojamentos, (b) Vedações detalhadas e (c) Esquema de montagem das cinco vedações utilizadas. 26
Figura 12 - Bancada para ajustes iniciais. 27
Figura 13 - Bancada dinamométrica do laboratório de máquinas térmicas do DEN. 28
Figura 14 - Apoios e conectores usinados para a adaptação. 28
Figura 15 - Bancada dinamométrica da empresa Dynamo LC. 29
Figura 16 - Ruptura do pistão articulado: (a) Vista frontal e (b) Vista inferior 31
Figura 17 - Novo projeto da região afetada: (a) Vista frontal e (b) Vista inferior. 32
Figura 18 - Soldagem da nova peça no pistão articulado. 32
Figura 19 - Modificação na superfície do rotor. 33
Figura 20 - Deformação no estator. 34
Figura 21 - Suavização da curva do estator. 34
Figura 22 – (a) Rolamento danificado e (b) Mancal substituto. 35
Figura 23 - Sentido de giro do protótipo IGNA e do motor elétrico. 36
Figura 24 - Danos no pistão articulado: (a) Cisalhamento (b) Deformação plástica 36
Figura 25 - Partes substitutas das regiões danificadas. 37
Figura 26 – Ensaios (teste 1, teste 2 e teste 3) obtidos na bancada dinamométrica da Dynamo LC: resultados da potência (power) em função da rotação do motor (speed) para 38
Figura 27 - Motor de poupa Mercury Marine de 5,0 hp 39
Figura 28 - Proposta de vedações para o rotor do protótipo IGNA. 43
Figura 29 - Solução para uma melhor ignição nos motores Wankel. 44
Figura 30 - Possíveis velas adicionais para o protótipo IGNA. 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da gasolina comum 20
Tabela 2 - Potência e torque obtidos 39
Tabela 3 - Dados técnicos do motor de poupa Mercury Marine de 5,0 hp 40
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do alumínio, ferro fundido e aço.....42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
2.1 MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA 14
2.2 MOTORES ROTATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA 15
3 MATERIAS E MÉTODOS 20
3.1 COMBUSTÍVEL UTILIZADO 20
3.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO IGNA 20
3.3 BANCADA DE TESTES PARA OS AJUSTES INICIAIS 26
3.4 ENSAIO EM BANCADA DINAMOMÉTRICA 28
3.4.1 Bancada Dinamométrica da UNESP (DEN) 28
3.4.2 Bancada Dinamométrica da Dynamo LC 29
3.4.3 Cálculo do Torque 30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
4.1 TESTES PARA OS AJUSTES INICIAIS 31
4.1.1 Projeto dos Pistões Articulados 31
4.1.2 Estrutura do Estator 33
4.1.3 Rolamentos do Rotor 34
4.1.4 Palhetas da Câmara Fria 35
4.2 PROBLEMA NA MONTAGEM DO MOTOR NA BANCADA DINAMOMÉTRICA 35
4.3 ENSAIOS DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO IGNEA 37
4.4 MELHORIAS SUGERIDAS 41
4.4.1 Materiais Utilizados 41
4.4.2 Vedação entre o Rotor e o Estator da Câmara Quente 42
4.4.3 Sistema de Ignição 43
5 CONCLUSÕES 46
REFERÊNCIAS 47

1 INTRODUÇÃO

Desde a sua invenção em 1867, por Nikolaus August Otto e Eugen Langen, os motores de combustão interna demonstraram uma grande aplicabilidade em diversas áreas. Estes motores cumprem bem a sua função em diversos tipos de veículos, sendo aplicados desde pequenas motocicletas até embarcações de grande porte, fazendo com que a sua demanda aumentasse e, consequentemente, a busca pelo seu aprimoramento. Isto levou os engenheiros a pesquisarem inovações em busca de um menor consumo de combustível e um maior aproveitamento da energia de combustão através da diminuição do atrito entre os componentes do motor, melhorando as trocas térmicas entre componentes e fluídos e aprimorando o projeto dos pistões, gerando grandes evoluções e novos conceitos de funcionamento (HEYWOOD, 1988).

Dentre os novos conceitos para motores de combustão interna, um dos destaques foi o motor rotativo concebido pelo engenheiro Felix Wankel em 1924, que não utiliza o princípio da biela e manivela, deixando-o com menos vibrações, menos atrito e mais silencioso (HEYWOOD, 1988). Estas vantagens o tornam atraente para uma vasta gama de aplicações, mas desvantagens fizeram com que o conceito fosse adotado somente por um pequeno nicho de usuários. Dentre elas, as três principais são: baixa durabilidade, alto consumo de combustível e, principalmente, dificuldade na vedação da câmara de combustão (ROSE; YANG, 2014).

Com um cenário composto por importantes questões ambientais, desenvolvimento sustentável, eficiência energética e emissões veiculares, o protótipo de motor rotativo denominado por IGNA tem como objetivo ser mais eficiente quando comparado com os motores existentes.

Sua proposta é apresentar um novo projeto para os motores rotativos que visa solucionar parte dos problemas dos motores rotativos, que vão desde possuir um número menor de peças, uma relação peso/potência mais elevada e menor atrito até um projeto inovador da câmara de combustão.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de graduação (TG) tem por objetivo geral estudar e avaliar o estado de

funcionamento de um protótipo de motor rotativo de combustão interna denominado por IGNA, que apresenta um novo projeto para os motores rotativos. Neste trabalho foram analisados o dimensionamento dos seus componentes e o seu torque.

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão estabelecidos:

1. Estudar os conceitos do funcionamento de motores de combustão interna alternativos e rotacionais;
2. Proceder ensaios experimentais preliminares de forma a verificar o funcionamento do protótipo IGNA;
3. Proceder ajustes no protótipo IGNA para as melhores condições de operação e realizar ensaios no mesmo;
4. Avaliar os resultados finais e discutir os resultados;
5. Elaboração de propostas para melhoria do sistema.

O protótipo utilizado neste trabalho, denominado por IGNA, foi projetado pelo Eng. Juvenal Ignácio da Silva Neto (Patente nº: BR 10 2015 001488-0 de 22/01/2015) e é um motor de combustão interna com um êmbolo rotativo que opera por um princípio muito semelhante ao dos motores Wankel. Este protótipo foi fabricado, porém não havia sido verificado seu funcionamento de forma metódica e comparado com as condições de operação de motores comerciais, sendo este o objetivo deste trabalho de graduação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão destaca alguns conceitos gerais relacionados aos motores de combustão interna que servirão como base deste trabalho. Embora o foco seja nas máquinas rotativas, serão feitas comparações com os motores alternativos pois seus ciclos são semelhantes.

2.1 MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores mais utilizados hoje em dia são os alternativos, que são assim intitulados pelos movimentos ascendentes e descendentes realizados pelos pistões durante a sua operação (BOSCH, 2005). Estes motores podem ser classificados em dois principais grupos: os de ciclo Otto, em homenagem a seu inventor, o técnico alemão Nikolaus August Otto, e os de ciclo Diesel, inventado pelo engenheiro Rudolf Christian Karl Diesel (BOSCH, 2005).

Mesmo depois de 100 anos da sua invenção, muitos desenvolvimentos foram concebidos para melhorar a sua eficiência. Na última década os sofisticados sistemas eletrônicos que gerem os motores, aliados a novos conceitos de combustão, permitiram o aumento da taxa de compressão para valores próximos de 11:1, reduziram as emissões de poluentes e otimizaram o consumo de combustível. A potência gerada aumentou devido a melhores relações entre o curso e diâmetro dos pistões, redução no peso pela introdução de novas ligas metálicas e a introdução de sistemas turbo-compressores (MARTINS, 2013).

Embora muitos avanços tenham sido concebidos, desperdícios energéticos são elevados neste tipo de máquina por conta do seu princípio de funcionamento. A mudança no sentido de movimento dos pistões faz com que a sua velocidade seja nula nos pontos morto inferior e superior, consumindo energia para acelerar e desacelerar o pistão repetidamente (HEYWOOD, 1988). Outro desperdício de energia é causado pelo sistema de válvulas do motor. A abertura das válvulas é realizada pelo comando de válvulas, que consome energia para deformar as molas utilizadas para mantê-las fechadas (MARTINS, 2013). Além disso, as polias e correias que são utilizadas para manter o sistema em sincronia consomem energia para se movimentarem (HEYWOOD, 1988).

A estrutura de um motor alternativo é composta por diversos componentes de geometrias complexas e que consomem energia por precisarem estar em movimento síncrono com o restante do motor. Todos estes componentes móveis aumentam o atrito enfrentado pelo

trabalho exercido pela expansão dos gases, diminuindo a eficiência do motor e gerando aquecimento (HEYWOOD, 1988).

Além do elevado número de componentes, a geometria de muitos deles não é de fácil fabricação devido à sua complexidade para produção. Por exemplo, no caso do virabrequim percebe-se que a sua produção é dificultosa, necessitando de equipamentos avançados para que seja produzido e uma ótima precisão para que se adeque aos demais componentes do motor. O mesmo ocorre com o comando de válvulas que requer diversos processos de usinagem para que fique com os cames nas dimensões corretas para abrir e fechar as válvulas de admissão e exaustão no tempo certo.

2.2 MOTORES ROTATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA

A busca por motores que substituíssem os convencionais motores alternativos de combustão interna vem gerando uma enorme quantidade de patentes e desenvolvendo muitos projetos. Muitas alternativas estão sendo estudadas e uma das escolhas mais promissoras são os motores rotativos de combustão interna, que consistem em dispositivos sem o tradicional sistema de biela-manivela, possuem ciclos de trabalho muito semelhantes aos dos motores alternativos e funcionam utilizando êmbolos rotativos (MARTINS, 2013). Dentre os motores rotativos existentes, o que apresentou maiores avanços foi o motor Wankel.

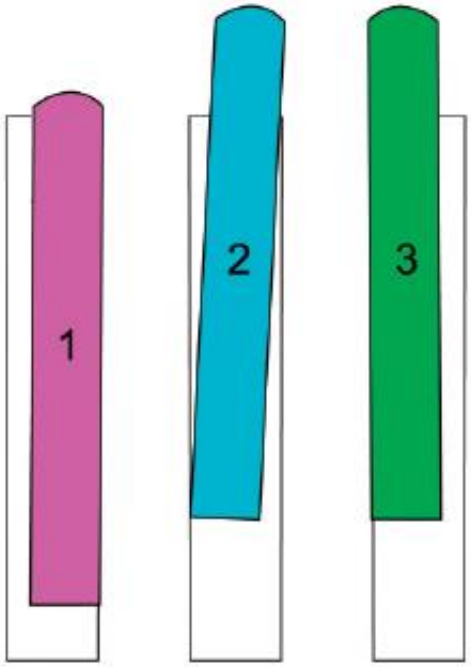
Sua composição por poucas peças e o seu princípio de funcionamento trouxeram algumas melhorias em relação aos motores alternativos. Devido à ausência do comando de válvulas e do mecanismo biela-manivela, houve redução de atrito entre os componentes e de vibrações, deixando o motor mais silencioso. Sua quantidade reduzida de peças também possibilitou uma elevada relação peso / potência nestes motores, permitiu uma rápida fabricação e maior facilidade para manutenção (YAMAMOTO, 1910).

Uma grande dificuldade enfrentada por motores rotativos é a vedação eficaz das câmaras de combustão. A vedação convencional destes motores possui uma superfície cilíndrica em contato com a superfície interna do estator, que foi projetada para evitar que o contado se dê em um único ponto em sua superfície. Em contrapartida a superfície interna do estator mantem-se em contato por apenas um ponto para cada vedação e não por um trecho com múltiplos pontos contato. Para melhor acomodar as variações da distância entre o rotor e o estator estas vedações tem que se movimentar radialmente e lateralmente, o que permite

uma possível separação entre os dois em determinadas condições e, consequentemente, fazendo com que gases de combustão escapem.

Na Figura 1 mostra-se as três possíveis situações em que a vedação perde o contato: deslizamento para dentro do alojamento (1), inclinação da vedação (2) e deslocamento completo para uma das extremidades do alojamento (3). Estes movimentos são causados pela variação de pressão dentro das câmaras de combustão adjacentes e ocorrem quando o lado de pressão mais baixa se torna o lado de pressão mais alta. Durante o ciclo normal de operação, essa inversão ocorre duas vezes por rotação devido aos estágios simultâneos do processo ocorrendo em cada face da vedação.

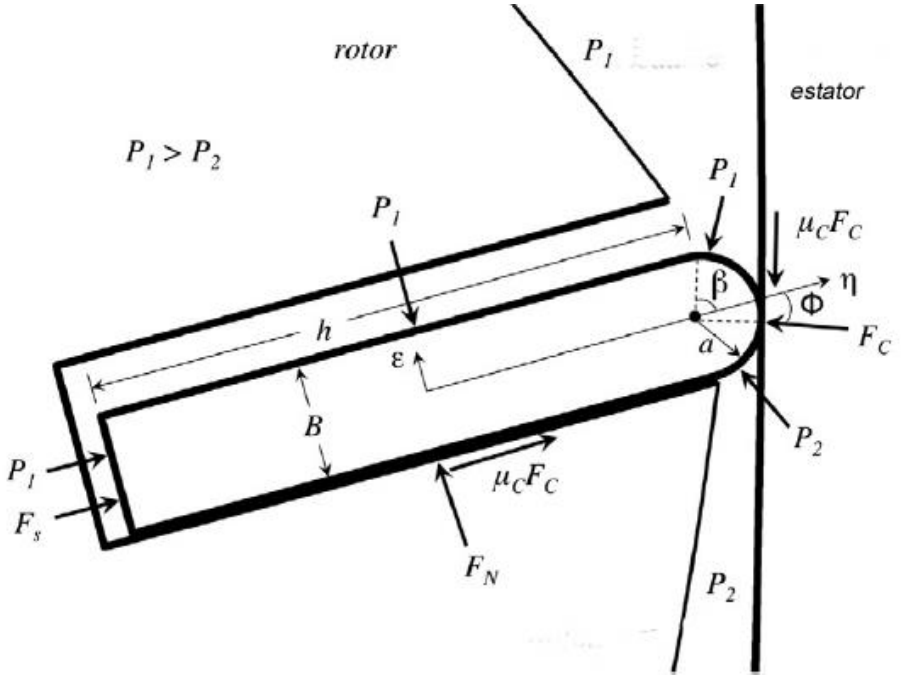
Figura 1 - Situações de perda de contato da vedação.



Fonte: (CIPOLLONE, 2013).

Embora existam molas que empurram a vedação para que fique em contato com o estator, é a força centrípeta e a pressão dos gases que exercem maior influência sobre o seu posicionamento (ROSE; YANG, 2014). Ao mesmo tempo em que as forças atuantes nas vedações, vistas na Figura 2, podem ser insuficientes para garantir uma boa eficiência, também podem ser excessivas ao ponto de aumentar significativamente o atrito, chegando a representar 50% de todo o atrito no motor (GERAMI; SHADLOO; GHASEMPOUR, 2010).

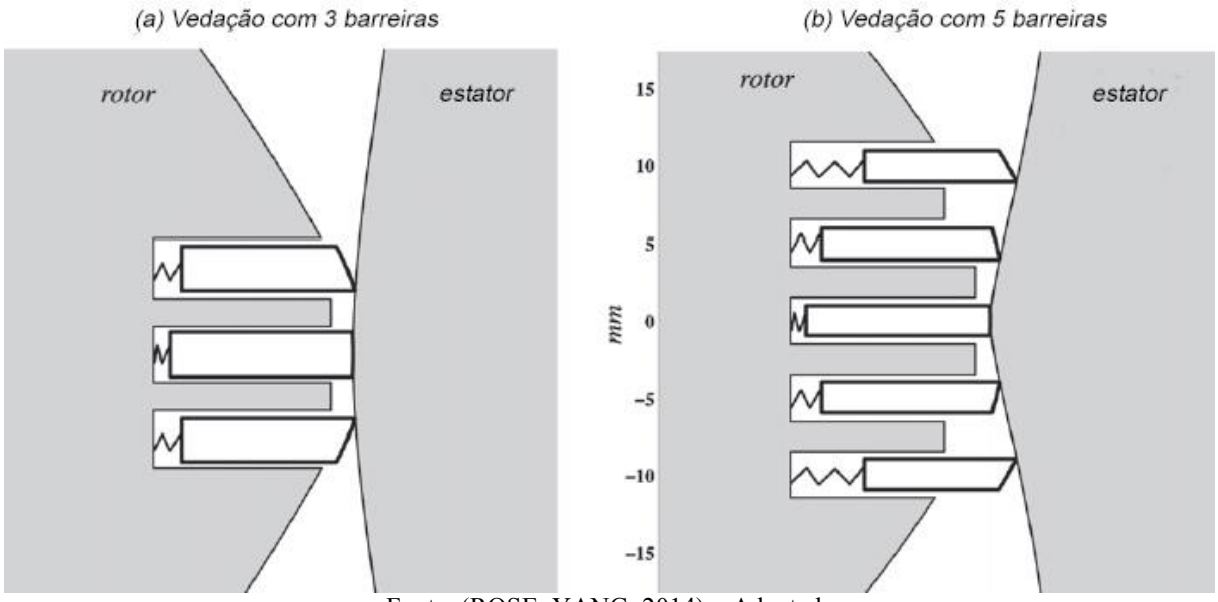
Figura 2 - Forças exercidas nas vedações.



Fonte: (ROSE; YANG, 2014) – Adaptada.

Comparando este sistema com a vedação nos motores alternativos observa-se uma ineficiência pois, usualmente, são utilizados três anéis de vedação para cada pistão contra apenas uma vedação nos motores rotativos e, além disso, os anéis dos pistões tem um maior contato com o cilindro, o que proporciona maior eficiência energética. Um método para melhorar o contato da vedação de um motor rotacional com a superfície interna do estator é utilizar múltiplas vedações, similar aos motores alternativos (Figura 3). Com todas as vedações em contato com o estator, múltiplas barreiras contra o vazamento de gases são criadas e os efeitos causados pela variação da pressão nas câmaras de combustão são reduzidos pois cada vedação das extremidades enfrentará altas pressões provenientes apenas de uma câmara (ROSE; YANG, 2014).

Figura 3 - Sistema de múltiplas vedações.

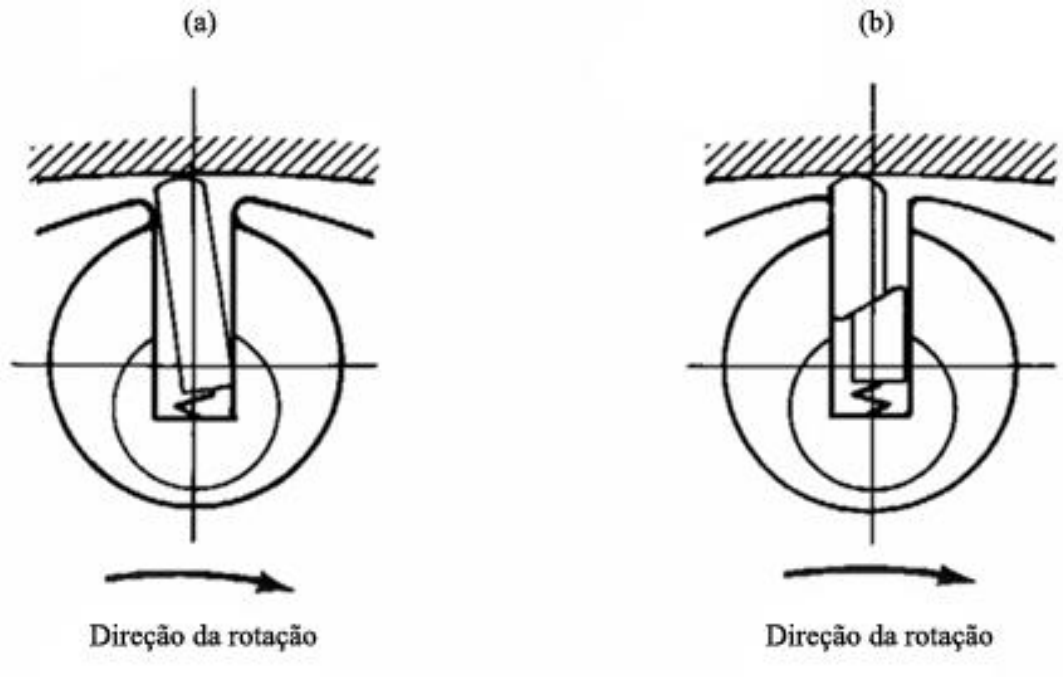


Fonte: (ROSE; YANG, 2014) – Adaptada

Este arranjo é mais estável e previne os movimentos causados pela diferença de pressões das câmaras, permitindo que as vedações permaneçam em suas posições dentro de seus alojamentos durante a rotação do rotor. Isto melhora a eficiência do motor e a efetividade da estanqueidade (ROSE; YANG, 2014).

A Figura 4 mostra outra melhoria nas vedações dos motores rotativos. A mudança da vedação simples (a) para a composta por dois componentes (b) melhorou a área de contato com o estator e reduziu o atrito geral no motor (WESTON, 2000).

Figura 4 - (a) Vedação simples e (b) Vedação composta por dois componentes.



Fonte: (WESTON, 2000)

A combustão da mistura ar/combustível nos motores rotativos é mais lenta quando comparada com a combustão dos motores alternativos. Por apresentar menor turbulência na sua admissão e, geralmente, tendo a faísca gerada por apenas uma vela, a propagação da chama não é eficiente e reduz a potência do motor. Além disso, esta ineficiência na queima do combustível eleva a quantidade de hidrocarbonetos emitidos por não entrarem em combustão antes do final do ciclo (KWEON, 2011).

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 COMBUSTÍVEL UTILIZADO

O combustível utilizado nos testes do motor foi gasolina comercial comum, proveniente de um único estabelecimento local. Suas características estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da gasolina comum

Parâmetro	Valor
Estado físico	Líquido límpido (isento de material em suspensão)
Cor	Avermelhada
Odor	Forte característico
Faixa de destilação	27 – 220 ºC @ 101,325 kPa (760 mmHg)
Ponto de fulgor	< 0 ºC
Pressão de vapor	79 kPa @ 37,8 ºC (máximo)
Densidade	0,73 – 0,77
Solubilidade em água	Insolúvel
Solubilidade em solventes orgânicos	Solúvel
Taxa de evaporação	> 1 (acetato de n-butila = 1)
Parte volátil	100% (v/v)

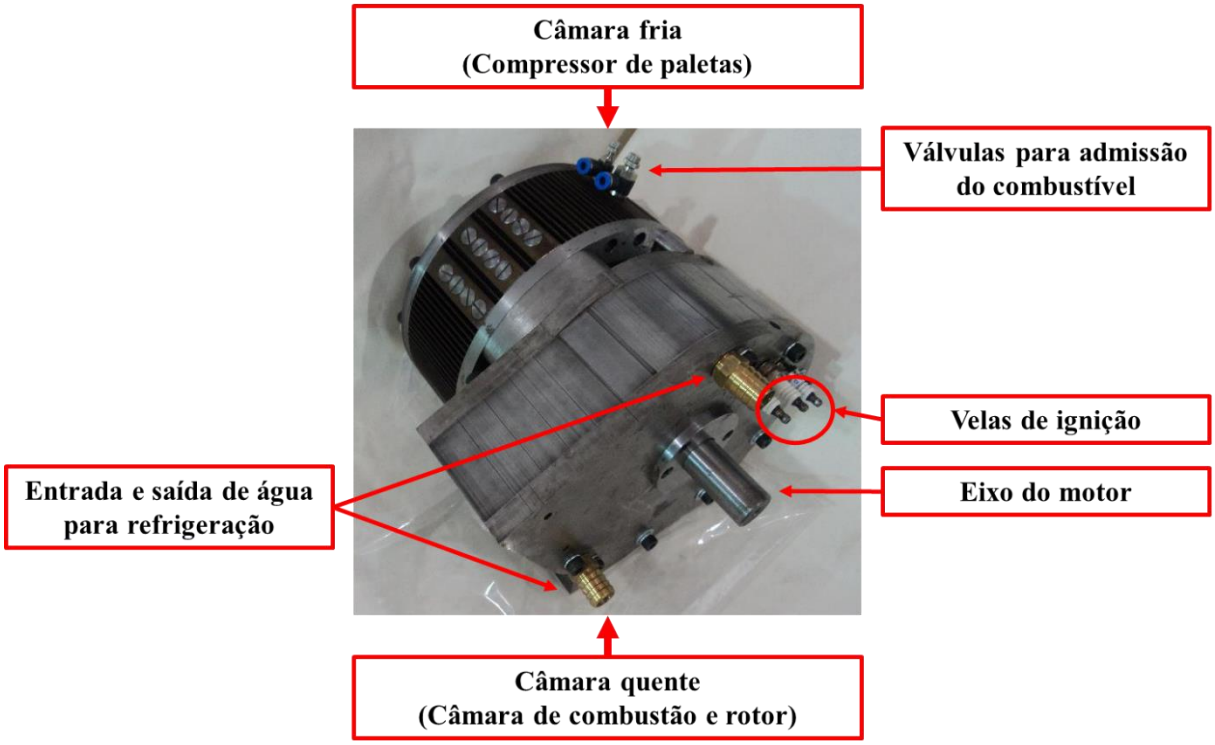
Fonte: http://www.gpcombustiveis.com.br/arquivos/FISPQ_gasolina_comum.pdf.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO IGNA

O protótipo denominado por IGNA estudado neste trabalho é mostrado na Figura 5. Este é motor de combustão interna com um êmbolo rotativo que opera por um princípio muito semelhante ao dos motores Wankel.

Este protótipo utiliza uma quantidade menor de componentes quando comparado aos motores alternativos e rotativos usuais, sendo composto por sete peças estáticas e seis peças móveis que podem ser observadas vistas na Figura 6.

Figura 5 - Protótipo IGNA



Fonte: Próprio autor.

O projeto do rotor deste protótipo é o grande diferencial quando comparado com outros motores rotativos. Ele possui duas partes articuladas, como mostrado na Figura 7(a), que acompanham a superfície interna do estator. Estas peças articuladas, chamadas de pistões articulados, desempenham uma função semelhante à dos pistões em um motor alternativo pois promovem o aumento do volume da câmara de combustão ao longo do ciclo de trabalho, alcançando um volume de 1000 cm³. Em sua face de contato com o estator existem cinco hastes de vedação munidas de molas planas em seus alojamentos, mostradas na Figura 7(b).

Figura 6 - Componentes utilizados no protótipo IGNA.

Fonte: Próprio autor.

Figura 7 - (a) Pistão articulado e (b) As cinco vedações utilizadas

Fonte: Próprio autor.

O protótipo possui uma câmara de combustão que juntamente com o seu rotor, é denominada por câmara quente, detalhada na Figura 8(a), e o compressor utilizado para a

injeção da mistura ar/combustível, é denominada por câmara fria, detalhada na Figura 8(b).

Figura 8 - (a) Câmara quente e (b) Câmara fria

(a) (b)

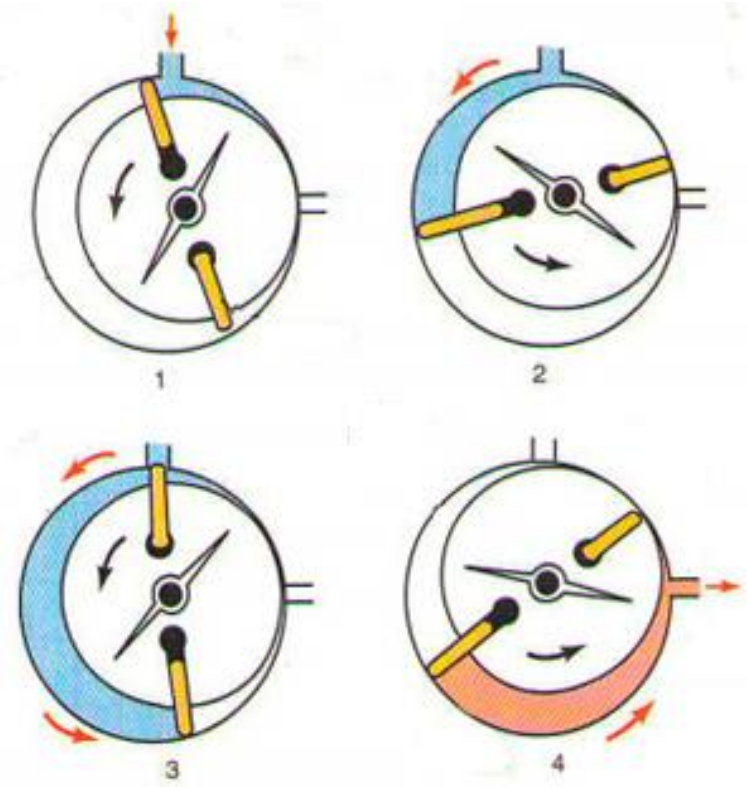
Fonte: Próprio autor.

Sua câmara fria funciona pelo mesmo princípio de um compressor de palhetas convencional, onde seu rotor possui palhetas móveis que estão sempre em contato com a superfície interna do estator. Durante a rotação, as palhetas são lançadas contra a parede do estator e formam uma câmara fechada cujo volume decresce a medida que o rotor gira, comprimindo a mistura (CIPOLLONE, 2013).

A Figura 9 mostra a janela de admissão de ar conectada ao meio externo, que admite o ar atmosférico juntamente com o combustível e o comprime. A mistura continua a ser comprimida até uma abertura de conexão com a câmara quente onde é lançada no interior da câmara de combustão.

A câmara quente funciona por um princípio parecido com o ciclo de operações dos motores rotativos Wankel sendo que a sua principal diferença está no projeto do rotor, que possuí os pistões articulados. Assim que a mistura ar/combustível entra pela janela de admissão, é comprimida pelo rotor e entra em combustão com o acionamento das velas de ignição. Assim como os motores Wankel utilizam mais de uma vela para garantir uma melhor combustão, o protótipo IGNA conta com três delas dispostas ao longo do percurso do rotor, permitindo uma combustão mais rápida e completa para que a eficiência do motor seja maior.

Figura 9 - Ciclo de operações da câmara fria.

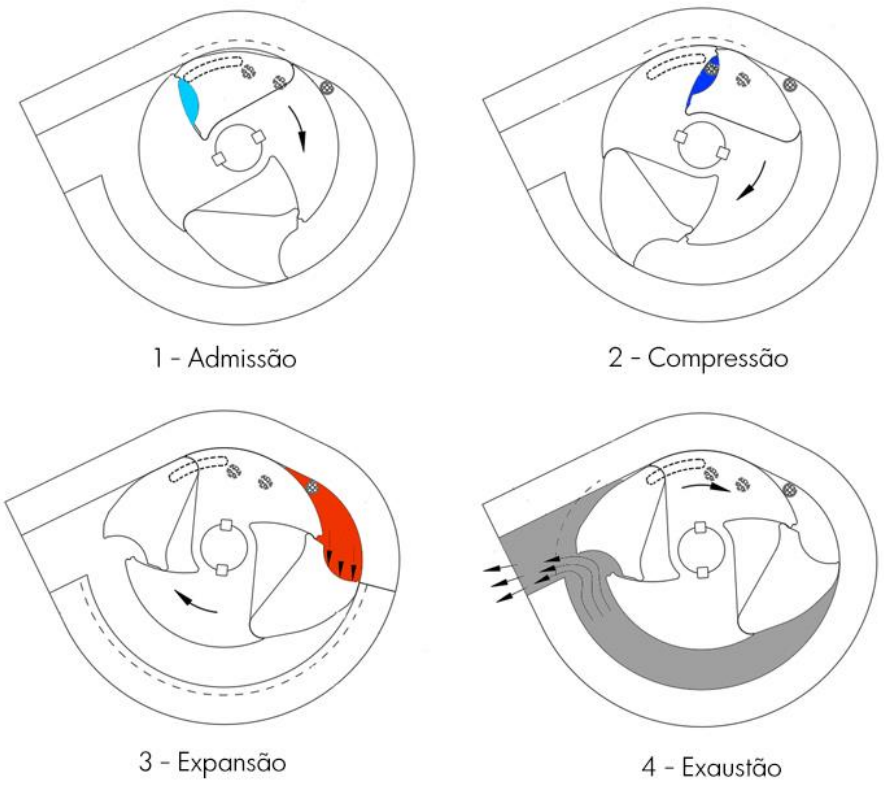


Fonte: http://www.ref-wiki.com/technical-information/145-compressors/31445-rotary-compressors.html.

A sincronização das faíscas foi ajustada com o uso do platinado, permitindo o acionamento sequencial das velas a medida que o rotor gira. O ciclo de operações da câmara quente pode ser visto na Figura 10.

Como visto na Figura 10, a rotação do rotor abre e fecha as janelas de admissão e exaustão, exercendo a função das válvulas de admissão e escape dos motores alternativos, eliminando a necessidade da sua utilização. Por não usar válvulas, os componentes que fazem parte do comando de válvulas também não precisam estar presentes e consequentemente reduz-se o atrito no motor. Outra vantagem é que o caminho percorrido pelos gases queimados fica livre para saírem da câmara quente, diminuindo a energia necessária que o motor tem que fazer para que sejam expulsos.

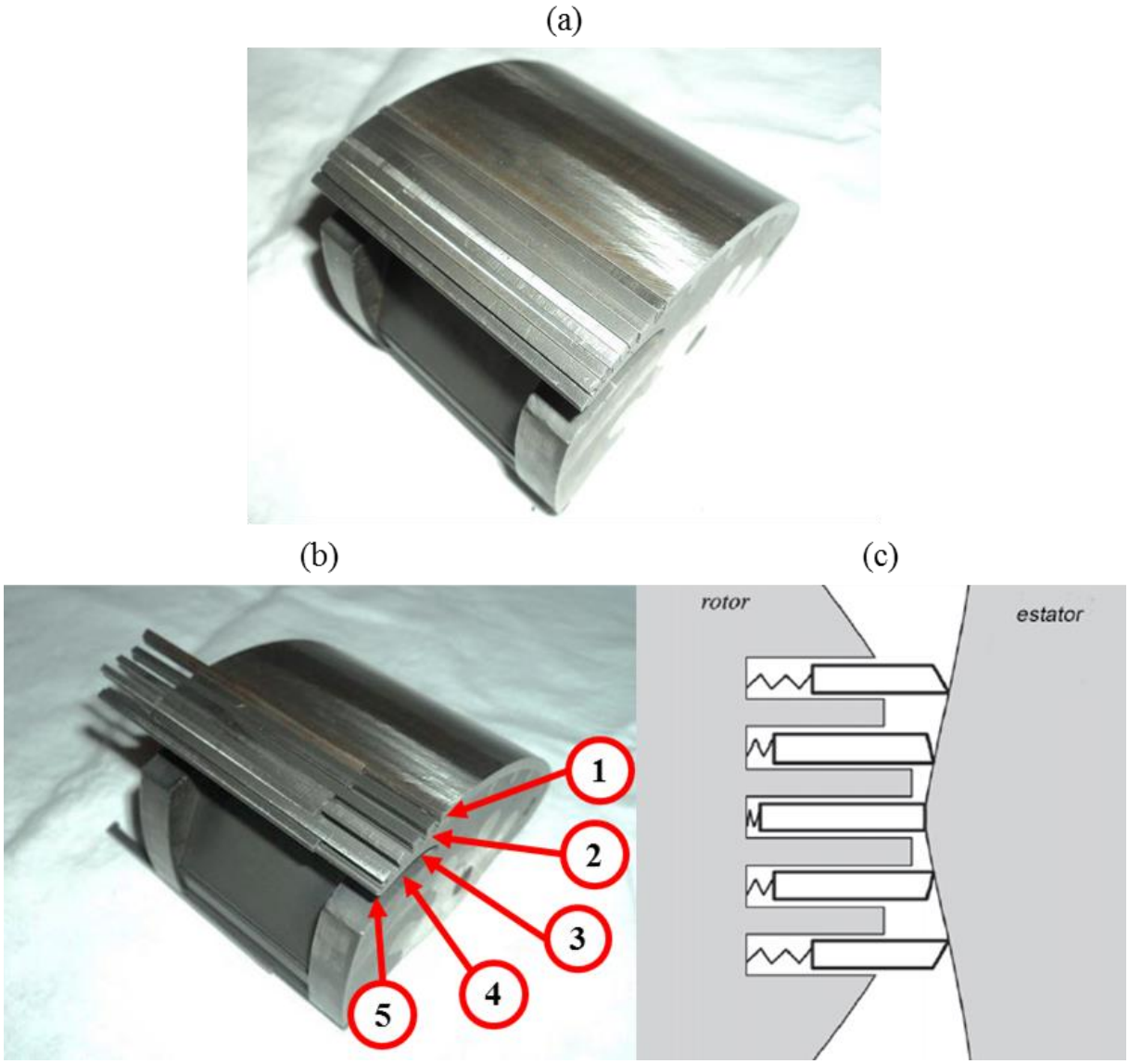
Figura 10 - Ciclo de operações da câmara quente.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 11(a) mostra as vedações utilizadas neste motor, que seguem o mesmo princípio de estancamento por múltiplas barreiras mostrado em detalhes na Figura 3. Em cada superfície de contato com o estator são alojadas cinco hastes para vedação, Figura 11(b), com molas anexadas para garantir um melhor isolamento, cujo esquema de montagem é visto na Figura 11(c).

Figura 11 - (a) Vedações em seus alojamentos, (b) Vedações detalhadas e (c) Esquema de montagem das cinco vedações utilizadas.



Fonte: Próprio autor

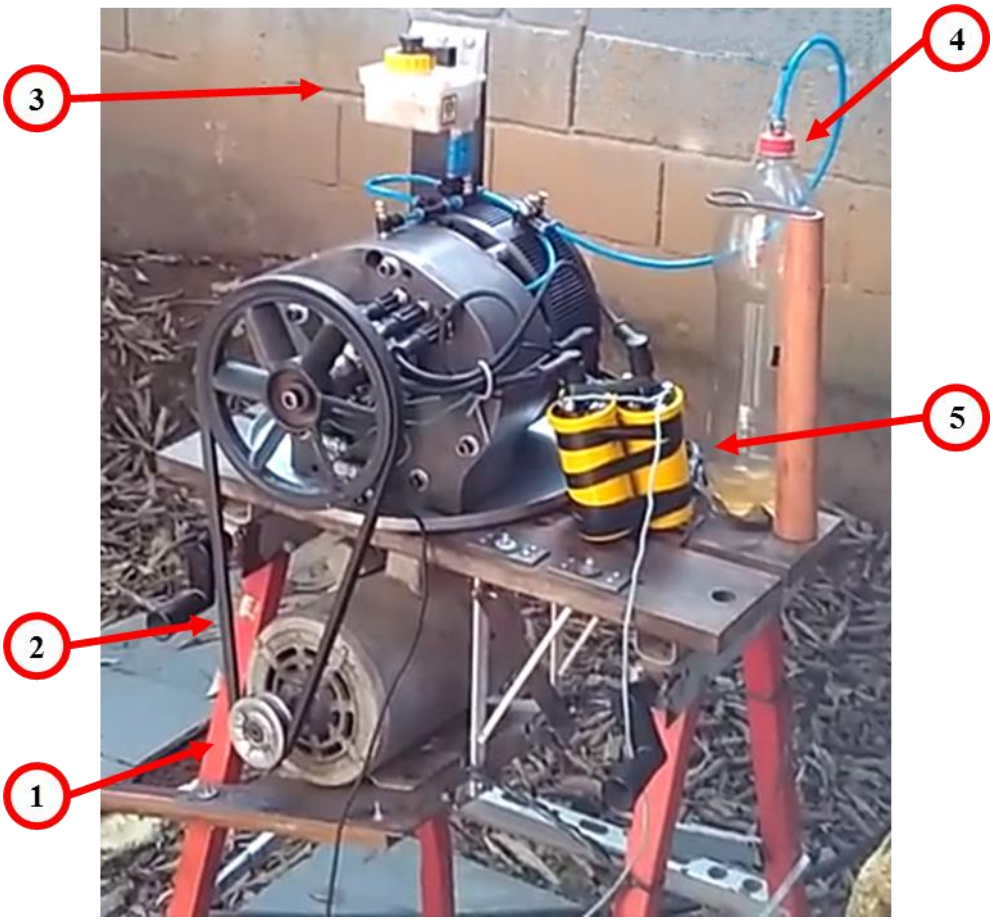
3.3 BANCADA DE TESTES PARA OS AJUSTES INICIAIS

Com a finalidade de realizar os ajustes iniciais do protótipo, foram feitos testes de operação em uma bancada mostrada na Figura 12. Esta bancada possui um motor monofásico, fabricado pela Weg com uma potência de 1400W (1), uma correia que conecta o eixo do motor trifásico ao eixo do protótipo (2), um reservatório de óleo lubrificante da marca Castrol

(3), um reservatório de combustível para armazenamento de gasolina comercial comum (4), bobinas da marca Magneti Marelli (5), e uma bateria automobilística da marca Moura.

O motor monofásico fica em uma base articulada e o seu próprio peso faz com que a correia fique esticada para a transmissão do torque. Para dar a partida no protótipo, aciona-se o motor monofásico e o ciclo operacional se iniciava. Assim que o protótipo começava a gerar trabalho, o motor trifásico era desconectado erguendo-o com a alavanca de sua base, deixando a correia frouxa e permitindo que o protótipo funcione por si só. A operação durava até o esgotamento da gasolina do reservatório, que era sempre abastecido com 250 mL do produto a cada teste. É importante mencionar que o consumo de combustível não foi controlado nestes testes iniciais pois o seu objetivo era apenas verificar o funcionamento do motor IGNA.

Figura 12 - Bancada para ajustes iniciais.



Fonte: Próprio autor.

3.4 ENSAIO EM BANCADA DINAMOMÉTRICA

3.4.1 Bancada Dinamométrica da UNESP (DEN)

Inicialmente, era previsto executar ensaios em uma bancada dinamométrica para testes de motor no Laboratório de Máquinas Térmicas do DEN (Departamento de Energia) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP (

Figura 13). Houve a necessidade da usinagem de apoios e conectores para a adaptação do motor IGNA à bancada utilizada, como mostrada na Figura 14.

Figura 13 - Bancada dinamométrica do laboratório de máquinas térmicas do DEN.

Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Apoios e conectores usinados para a adaptação.

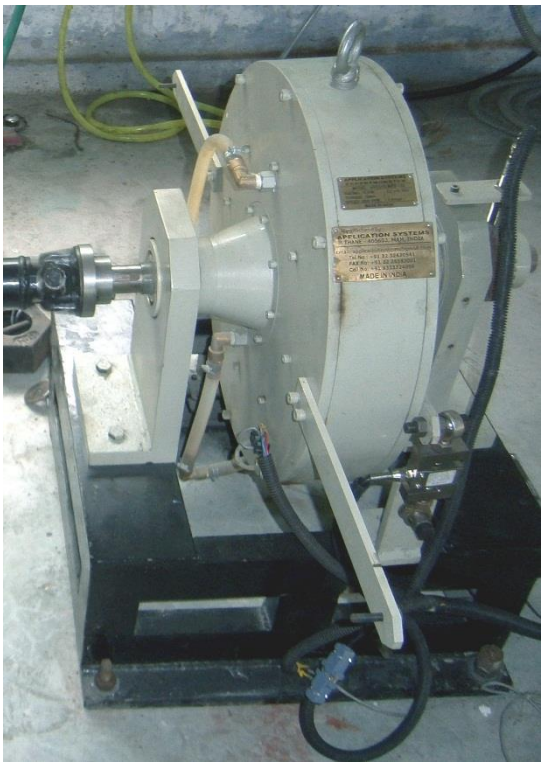
Fonte: Próprio autor

Após a fabricação das peças, conectou-se o eixo do motor com eixo do motor trifásico da bancada a partida é dada no sistema e, após o ciclo do protótipo se iniciar, seria possível medir o torque com um dinamômetro analógico Salter. Entretanto, ocorreu problema na montagem do motor nesta bancada e não foi possível executar este ensaio.

3.4.2 Bancada Dinamométrica da Dynamo LC

Os testes para avaliar a condição de funcionamento do protótipo IGNA foi realizado em uma bancada dinamométrica para testes de motor de combustão interna, vista na Figura 15, em uma empresa chamada Dynamo LC, especializada em serviços automotivos e localizada na cidade de São Paulo – SP. Diferentemente da estrutura utilizada no Laboratório de Máquinas Térmicas do DEN – UNESP, esta bancada é desprovida de sensores para análise dos gases de emissão. A análise do torque foi feita através de um software desenvolvido no LabVIEW pela Application Systems, empresa fornecedora do dinamômetro, e colocamos o protótipo IGNA para operar três vezes durante o teste.

Figura 15 - Bancada dinamométrica da empresa Dynamo LC.



Fonte: Próprio autor.

3.4.3 Cálculo do Torque

Para o cálculo do torque fornecido pelo motor, utiliza-se a equação (1).

$$\text{Potência (kW)} = \frac{\text{Torque (N.m)} \times 2 \times \pi \times \text{Velocidade angular (RPM)}}{60000} \qquad (1)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTES PARA OS AJUSTES INICIAIS

Os ajustes iniciais permitiram a obtenção de informações importantes em relação aos pontos fracos do protótipo que precisaram ser corrigidos para que o mesmo opere. Problemas estruturais, como o dimensionamento incorreto de alguns componentes e utilização de materiais cuja resistência mecânica não foi adequada, levaram a falhas que foram estudadas.

4.1.1 Projeto dos Pistões Articulados

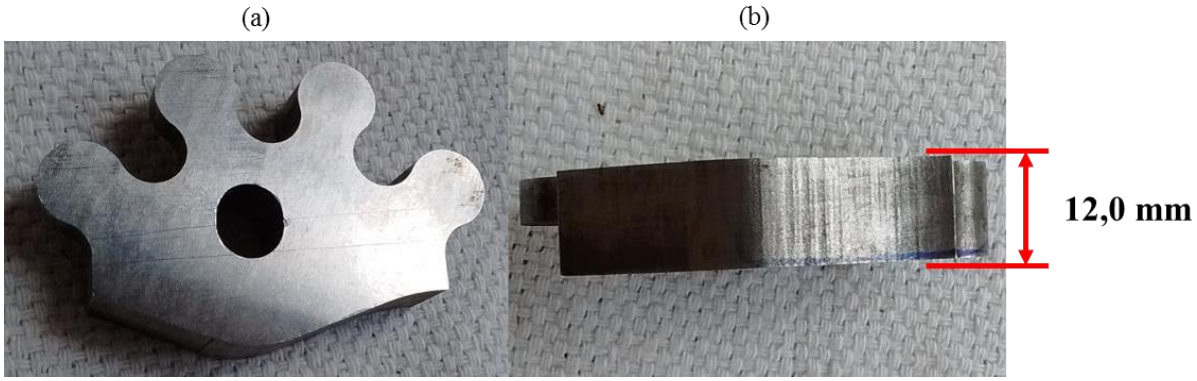
Por conta da rotação atingida e dos movimentos repetitivos dos pistões articulados houve fadiga do material na região onde o pino de fixação se encontra, ocasionando em ruptura e consequentemente prejudicando o funcionamento do motor. Para não precisar usinar novos pistões articulados, foi retirada as partes afetadas para posterior substituição. A Figura 16 mostra com maior detalhe a zona afetada e o material danificado.

Figura 16 - Ruptura do pistão articulado: (a) Vista frontal e (b) Vista inferior

Fonte: Próprio autor.

Devido às características da falha, concluiu-se que o dimensionamento da região do furo estava incorreto pois a espessura de 5,00 mm era insuficiente para suportar os esforços solicitados durante a operação. A parte retirada foi substituída por uma nova peça com uma espessura de 12,00 mm (Figura 17).

Figura 17 - Novo projeto da região afetada: (a) Vista frontal e (b) Vista inferior.



Fonte: Próprio autor.

A espessura adotada foi superdimensionada e não houveram cálculos estruturais para determinar o seu valor ideal, tendo em vista que a espessura do material já estava pré-determinada comercialmente pelo fornecedor do aço. O componente recebeu um tratamento termoquímico de nitretação para aprimorar a sua resistência mecânica e a união entre as peças foi feita por soldagem, como mostrada na Figura 18.

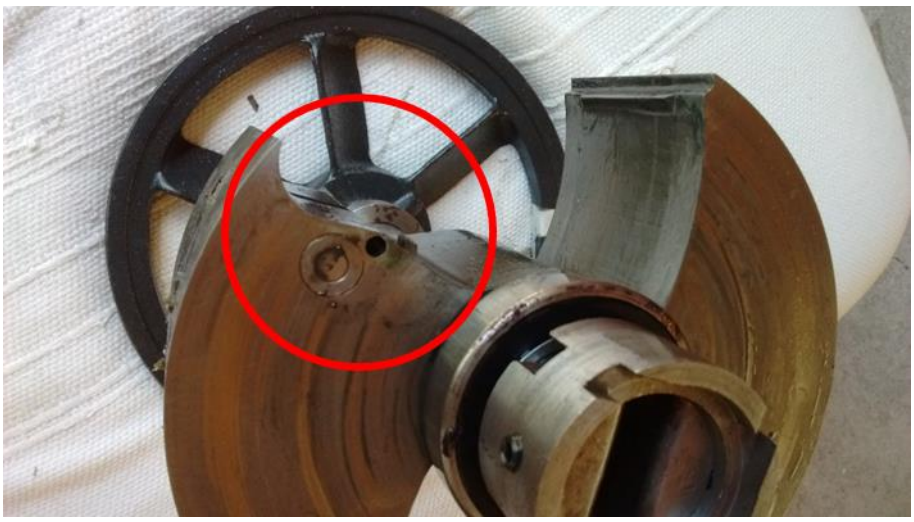
Figura 18 - Soldagem da nova peça no pistão articulado.

Fonte: Próprio autor.

Para que o novo dimensionamento dos pistões articulados se adeque ao sistema, algumas modificações foram feitas no rotor do motor. Sua superfície de contato com o pistão

teve de ser usinada para acomodar o novo design, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Modificação na superfície do rotor.



Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Estrutura do Estator

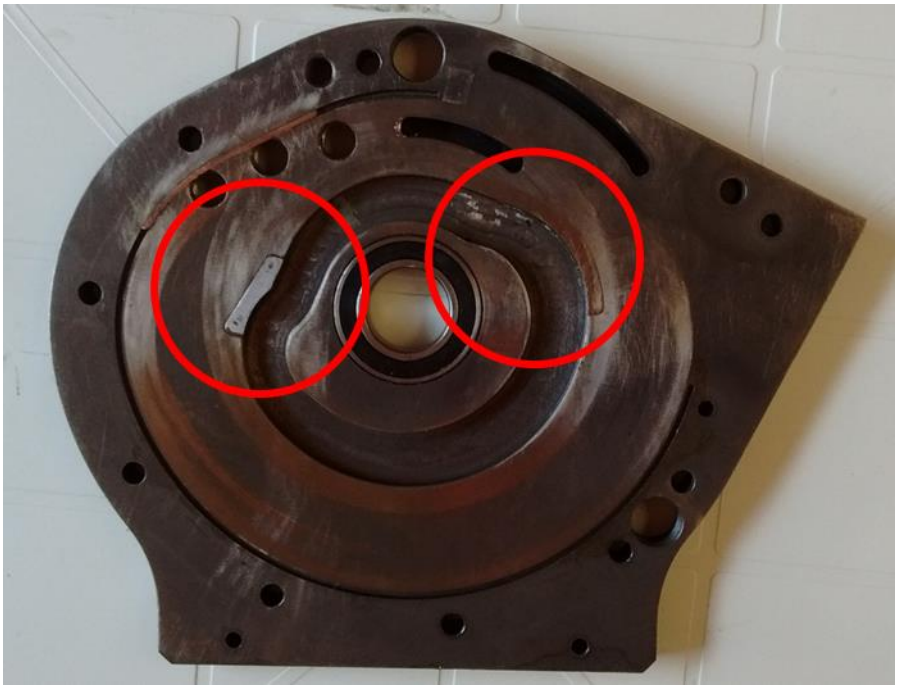
Durante a operação do motor, foram verificadas deformações na estrutura do estator que impediram o movimento dos pistões articulados. O material deformado criou uma interferência mecânica, mostrada na Figura 20, no percurso do pistão articulado e assim travou a sua movimentação. A natureza desta falha é de dureza do material, cuja resistência aos movimentos bruscos realizados pelo pistão articulado naquela região não foi suficiente para impedir a sua deformação plástica.

A solução para este problema foi a usinagem da superfície do estator e a suavização da curva para que o impacto seja menor e diminua a possibilidade de deformação do material. A Figura 21 mostra o projeto da curva após a suavização realizada.

Figura 20 - Deformação no estator.

Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Suavização da curva do estator.



Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Rolamentos do Rotor

Os grandes esforços atuantes nos rolamentos instalados no rotor ocasionaram a sua

ruptura (Figura 22a), e a correção aplicada foi a substituição por um mancal (Figura 22b). Esta substituição acarretou em um maior atrito no rotor mas elimina o risco de futuras falhas que podem causar danos maiores no protótipo. Se algum rolamento for danificado e o rotor continuar operando com fragmentos soltos em seu interior, o motor pode sofrer danos em outros componentes e o seu funcionamento será comprometido.

Figura 22 – (a) Rolamento danificado e (b) Mancal substituto.

(a) (b)

Fonte: Próprio autor

4.1.4 Palhetas da Câmara Fria

As palhetas de nylon utilizadas na câmara fria sofreram um aumento volumétrico por conta da absorção do óleo lubrificante e houve a necessidade de diminuir a sua espessura para acomodar esta variação volumétrica. O volume adquirido impediu a sua movimentação dentro do seu alojamento e a mistura ar/combustível não foi admitida, impedindo o funcionamento do motor.

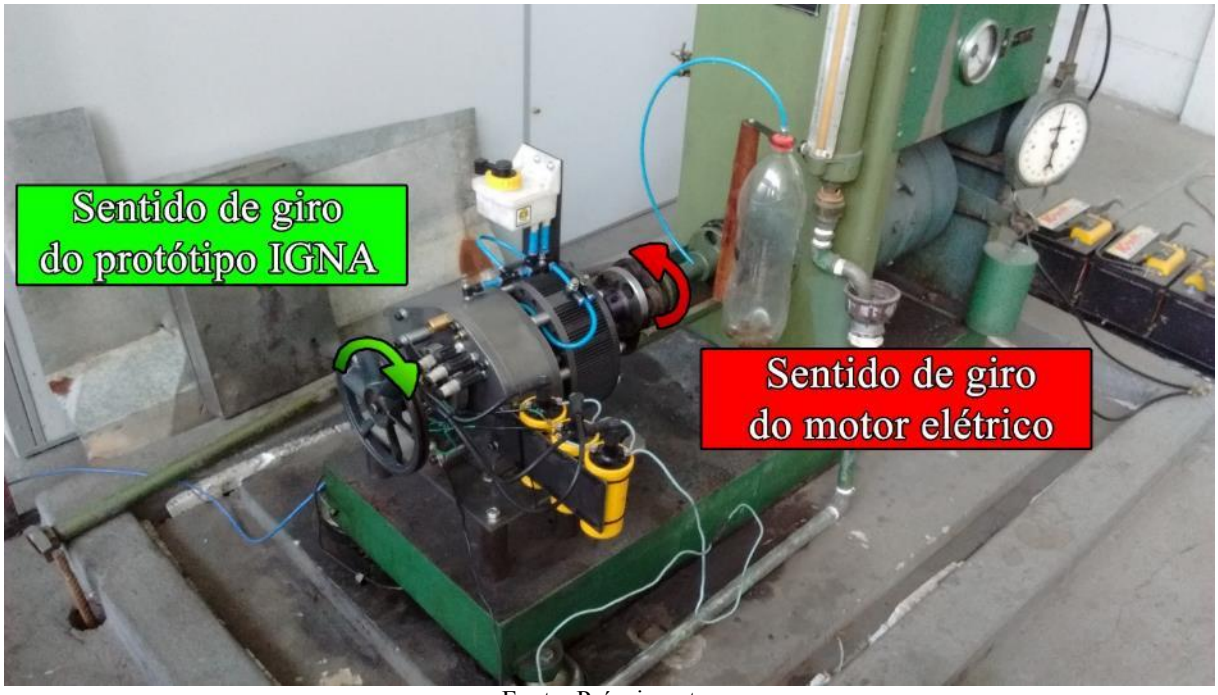
Um desbaste realizado com lixas diminuiu a espessura das palhetas para eliminar este problema sem que haja grandes modificações.

4.2 PROBLEMA NA MONTAGEM DO MOTOR NA BANCADA DINAMOMÉTRICA

Para o primeiro teste laboratorial foi previsto utilizar a bancada dinamométrica da

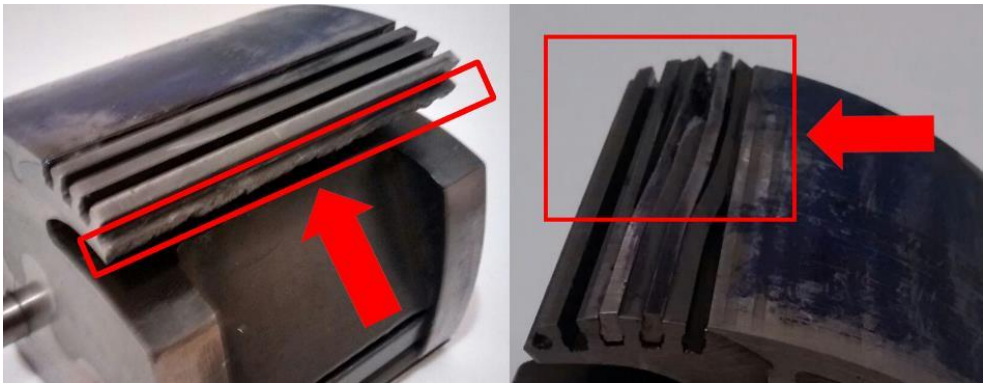
UNESP (DEN). Este ensaio forneceria os dados relacionados ao torque através dos equipamentos utilizados. Por conta da instalação incorreta na bancada, o rotor do protótipo IGNA girou no sentido oposto do ciclo projetado (Figura 23). Isso deformou bruscamente os pistões, causando danos severos ao protótipo e impedindo a continuidade dos testes laboratoriais. Na Figura 24 podemos observar os danos causados.

Figura 23 - Sentido de giro do protótipo IGNA e do motor elétrico.



Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Danos no pistão articulado: (a) Cisalhamento (b) Deformação plástica



(a) (b)

Fonte: Próprio autor

Para repara-los foi necessária a usinagem de partes substitutas, Figura 25, e a retirada do material afetado. As partes usinadas serão unidas ao pistão articulado por meio de solda do tipo MIG.

Figura 25 - Partes substitutas das regiões danificadas.

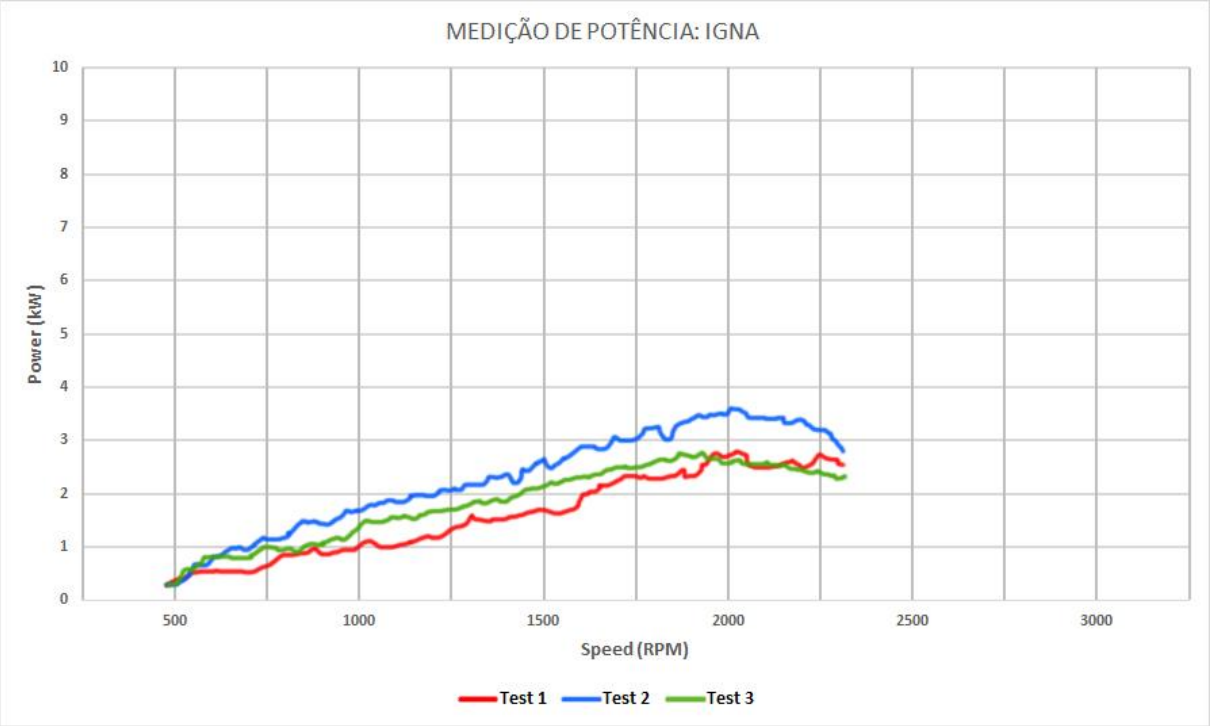
Fonte: Próprio autor.

4.3 ENSAIOS DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO IGNEA

Para os ensaios desempenho do protótipo foi utilizada a bancada dinamométrica da Dynamo LC. Foram executados três testes para uma melhor avaliação dos resultados. O primeiro ensaio (teste 1) foi responsável por fazer com que a lubrificação penetrasse em todas as cavidades e para que os componentes se acomodem melhor em suas posições. Procedeu-se o segundo ensaios (teste 2) de forma que o motor operasse bem lubrificado e com os componentes posicionados corretamente. O terceiro ensaio (teste 3) foi realizado para verificar se o desempenho do motor permaneceria o mesmo do segundo teste.

A medição pelo dinamômetro forneceu dados referentes à potência do motor. Os resultados obtidos nos três ensaios são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Ensaios (teste 1, teste 2 e teste 3) obtidos na bancada dinamométrica da Dynamo LC: resultados da potência (power) em função da rotação do motor (speed) para



Fonte: Software desenvolvido em LabVIEW, pela Application Systems.

De acordo com as curvas obtidas nos ensaios apresentadas na Figura 26, observa-se que o protótipo IGNA obteve um menor desempenho no teste 1 justamente por ser o teste de operação inicial, para que a lubrificação penetre em todas as cavidades necessárias e para que os componentes se acomodem melhor em seus lugares, permitindo um melhor funcionamento conforme a rotação aumenta.

Seu melhor desempenho se deu durante o teste 2, no qual o motor desenvolveu a potência máxima de aproximadamente 3,70 kW assim que atingiu uma rotação de 2000 RPM. Sua segunda operação foi a mais bem sucedida pois o teste de operação inicial o deixou pronto para atingir rotações mais altas com maior estabilidade e menor atrito.

Durante a terceira operação (teste 3) observa-se na Figura 26 uma queda na potência que ocorreu devido a pequenos desgastes nas palhetas de nylon da câmara fria, prejudicando o fornecimento correto de combustível. O óleo lubrificante em excesso nas velas de ignição

prejudicou a qualidade da faísca gerada.

A partir dos dados obtidos nos três ensaios (teste 1, teste 2 e teste 3) e da equação (1), foram calculados os valores de torque para diferentes rotações. A média dos resultados são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Potência e torque obtidos

Rotação (RPM)	Potência (kW)				Torque (N.m)			
	1º Teste	2º Teste	3º Teste	Média	1º Teste	2º Teste	3º Teste	Média
750	0,60	1,10	0,95	0,88	7,64	14,01	12,10	11,25
1000	0,90	1,80	1,40	1,37	8,59	17,19	13,37	13,05
1250	1,30	2,05	1,70	1,68	9,93	15,66	12,99	12,86
1500	1,70	2,60	2,05	2,12	10,82	16,55	13,05	13,48
1750	2,40	3,00	2,50	2,63	13,10	16,37	13,64	14,37
2000	2,70	3,70	2,60	3,00	12,89	17,67	12,41	14,32
2250	2,60	3,30	2,30	2,73	11,03	14,01	9,76	11,60

Fonte: Próprio autor.

Com os dados da Tabela 2 observa-se que a potência média máxima foi de 3,00 kW, atingida a 2000 RPM. Verifica-se também que o torque médio máximo de 14,37 N.m foi atingido a 1750 RPM.

De forma a comparar com os motores comerciais, devemos transformar esta potência em quilowatts (kW) para horse-power (hp) – Potência (hp)=1,34102×Potência (kW), que é a unidade utilizada pelos fabricantes no mercado. Assim, a potência média máxima (3,00 kW) será aproximadamente 4,02 hp, que é uma potência próxima a de motores de poupa utilizados em pequenas embarcações.

A Figura 27 mostra um motor de poupa feito pela fabricante Mercury Marine e a sua potência fornecida é de 5,0 hp, que é bem próxima da potência média máxima obtida pelo protótipo IGNA. Seus dados técnicos são listados na Tabela 3.

Figura 27 - Motor de poupa Mercury Marine de 5,0 hp

Fonte: https://www.mercurymarine.com/pt/br/engines/outboard/twostroke/33-5-hp/

Tabela 3 - Dados técnicos do motor de poupa Mercury Marine de 5,0 hp

Parâmetro	Valor
Potência	5,00 hp – 3,70 kW
Cilindrada	102 cc
Nº de cilindros	1
RPM de aceleração máxima	4000 – 5000 RPM
Sistema de indução de combustível	Carburador com fluxo em loop (1 carburador)
Sistema de partida	Manual
Massa	20 kg

Fonte: https://www.mercurymarine.com/pt/br/engines/outboard/twostroke/33-5-hp/

Comparando o protótipo IGNA ao motor Mercury Marine de 5,0 hp, ressalta-se que ainda existem muitas melhorias a serem feitas para que a sua eficiência seja aumentada. Com uma massa de 20 kg, o motor Mercury Marine fornece uma potência de 5,0 hp, enquanto o

protótipo IGNA fornece uma potência de 4,02 hp com 43,7 kg de massa.

4.4 MELHORIAS SUGERIDAS

Com as análises obtidas pelos testes iniciais e laboratoriais verificaram-se algumas possíveis melhorias para o motor IGNA. A sua vedação e sistema de ignição de combustível podem ser melhorados para uma otimização do consumo de combustível, emissões de gases de combustão e um aumento no torque gerado.

Outros aspectos como a utilização de diferentes materiais para cada parte do motor podem elevar o rendimento e durabilidade do mesmo, podendo ser estudado por diferentes áreas da engenharia. A seguir são apresentadas algumas destas melhorias sugeridas.

4.4.1 Materiais Utilizados

Desde os primeiros testes feitos com o protótipo foi observada a necessidade da utilização de materiais mais resistentes e com diferentes tipos de tratamentos térmicos e químicos para resistirem aos movimentos impostos pelo funcionamento do motor e do compressor.

O alumínio pode ser utilizado para a construção do pistão articulado por ser um metal mais leve e que dissipa mais calor do que o aço utilizado no protótipo. O único problema em se adotar este metal é a sua dilatação térmica, que pode ser de até duas vezes maior do que a do aço e com isso poderá causar interferências mecânicas por conta do calor gerado pela combustão, como visto na Tabela 4. O alumínio também pode ser utilizado para a composição do rotor da câmara fria e suas palhetas, deixando-o mais leve e facilitando a dissipação de calor.

Visando a redução do custo de manufatura e aumento da resistência em relação ao atrito, o ferro fundido pode ser um material excelente para substituir o aço utilizado nos estatores das câmaras quente e fria. Geralmente, os blocos de motor usuais são feitos de ferro fundido cinzento ou nodular (HEYWOOD, 1988), que pode ser adotado no protótipo estudado.

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do alumínio, ferro fundido e aço.

Propriedades físicas	Alumínio	Ferro fundido	Aço
Densidade (g/cm³)	2,70	7,19	7,86
Temperatura de fusão (°C)	660	1175	1500
Módulo de elasticidade (MPa)	70000	196000	205000
Coeficiente de dilatação térmica ($x10^{-6}$/°C)	23,0	12,0	11,7
Condutividade térmica (Cal/cm/°C)	0,53	0,16	0,12

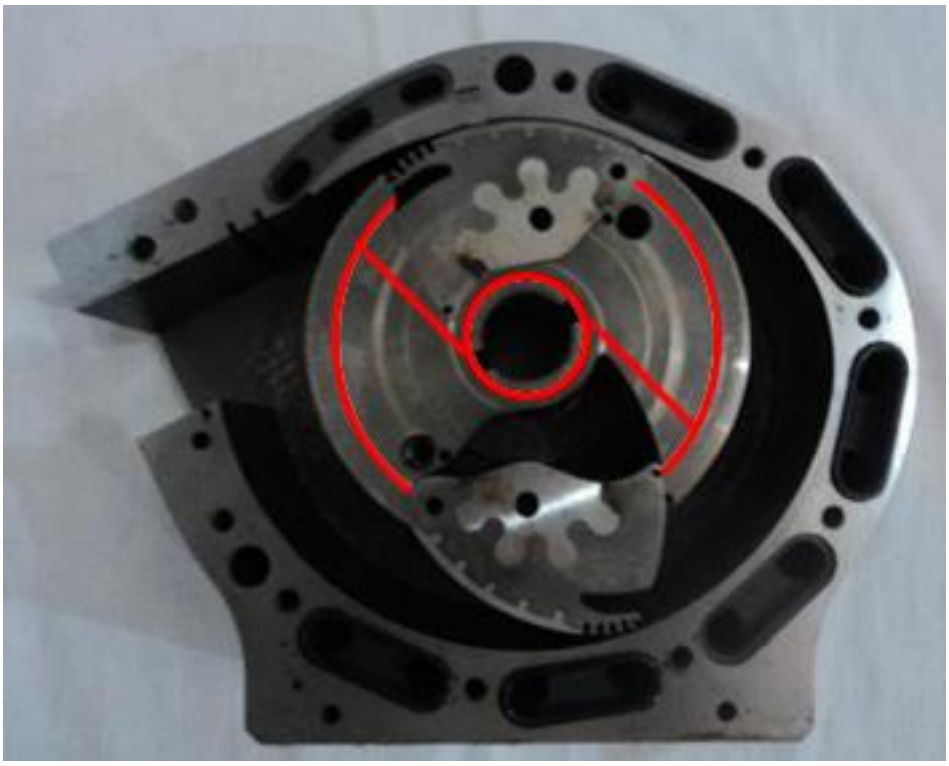
Fonte: Young, Hugh D., University Physics, 7th Ed. Table 15-5

4.4.2 Vedação entre o Rotor e o Estator da Câmara Quente

Vedações nas extremidades e laterais do rotor são componentes críticos para proporcionar uma boa eficiência em motores rotacionais e a utilização de vedações compostas por três partes e duas molas, mostradas no item 2.2, podem ser utilizadas no protótipo IGNA. A melhoria na vedação entre o rotor e o estator levará a um menor consumo de combustível e aumentará o torque fornecido pelo motor, pois os gases provenientes do processo de combustão escapam pelas folgas das laterais do estator por não possuir um sistema de vedação como o dos pistões articulados. Além disso, esse tipo de vedação reduz o atrito gerado quando comparado com as vedações tradicionais, que é estimado em até 25% do atrito total desses motores (WESTON, 2000).

Estas novas vedações poderiam ser instaladas próximas ao eixo do motor, evitando com que os gases de combustão fluam entre as câmaras. A Figura 28 indica a possível localização destas vedações para que gerem o mínimo atrito possível.

Figura 28 - Proposta de vedações para o rotor do protótipo IGNA.



Fonte: Próprio autor

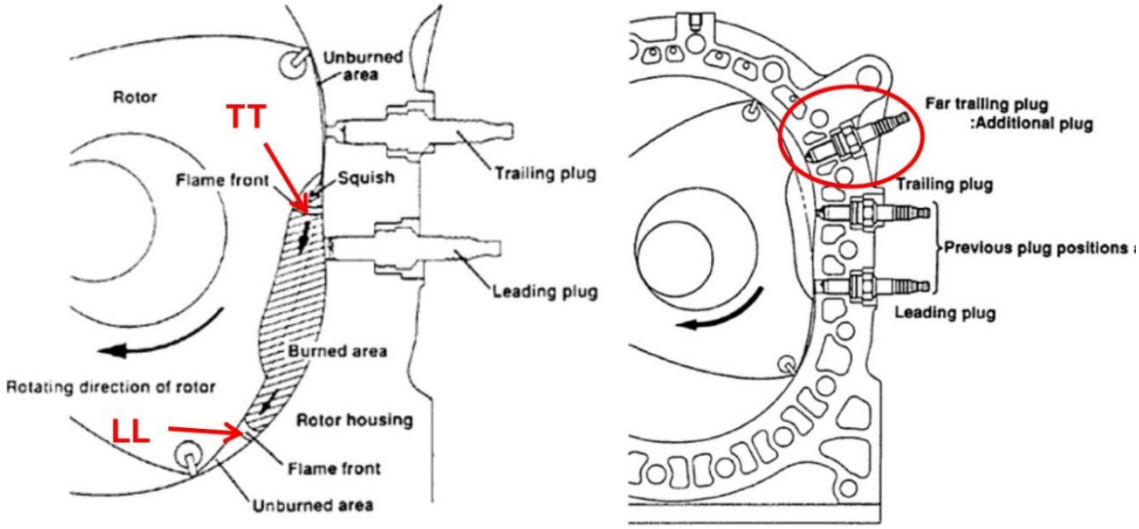
4.4.3 Sistema de Ignição

A dinâmica da combustão dentro da sua câmara quente, o posicionamento e número correto de velas de ignição não foram estudados no protótipo IGNA, onde a sua disposição deveu-se pela facilidade na fabricação e para facilitar a instalação dos demais itens do motor. Melhorias no seu sistema de ignição podem aumentar a sua eficiência energética e reduzir a quantidade de hidrocarbonetos liberados na atmosfera. Estas melhorias podem ser realizadas através de um novo posicionamento das velas de ignição e até a substituição por tecnologias mais recentes, que utilizam feixes de laser ao invés da tradicional faísca.

A alta rotação do rotor e o grande volume da câmara de combustão em motores rotativos do tipo Wankel apresentam um obstáculo para a propagação da chama de combustão, resultando em combustível não queimado. Para contornar este problema, o posicionamento de velas de ignição adicionais em pontos anteriores à compressão total do combustível, vista na Figura 29, demonstrou-se eficaz pois a região que não era atingida pelas

chamas passou a entrar em combustão antes do arrasto interferir no processo de propagação da chama principal (KWEON, 2011).

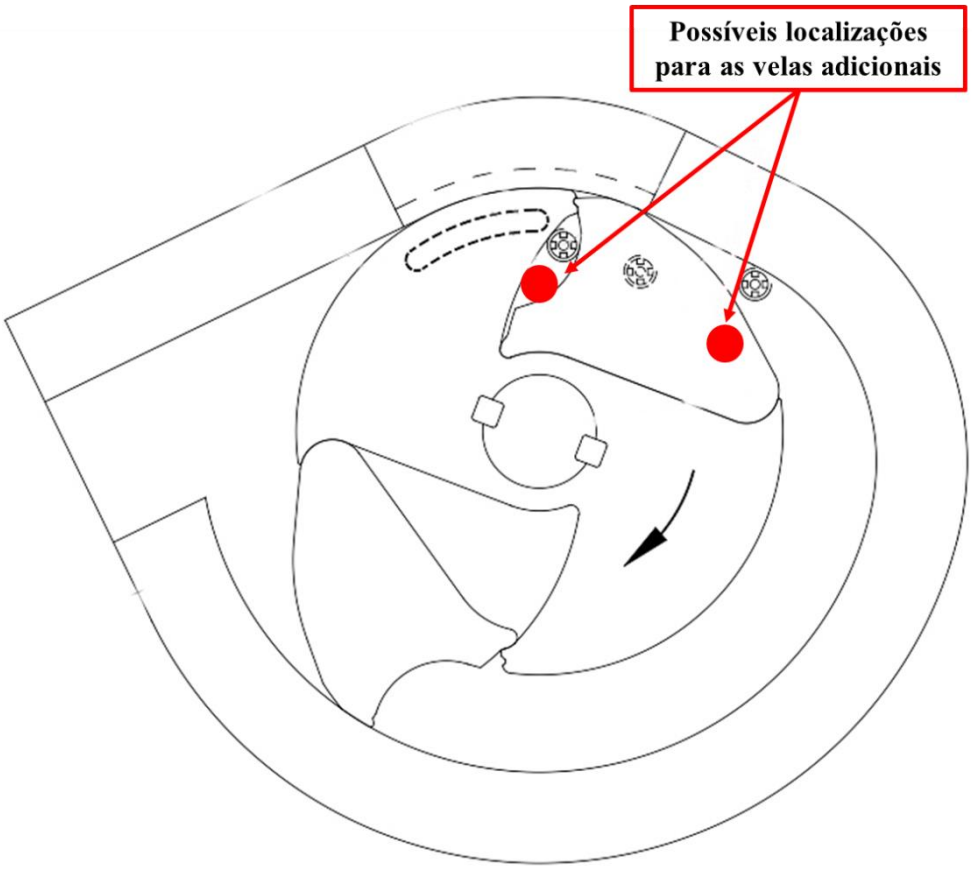
Figura 29 - Solução para uma melhor ignição nos motores Wankel.



Fonte: (KWEON, 2011).

O mesmo princípio pode ser utilizado no protótipo IGNA, posicionando uma vela de ignição logo após a admissão do combustível na câmara quente ou adicionando uma nova vela, na posição indicada na Figura 30, para garantir a queima do combustível não atingido pela chama.

Figura 30 - Possíveis velas adicionais para o protótipo IGNA.



Fonte: Próprio autor.

Além do posicionamento das velas, novas velas que utilizam feixes de laser para iniciar a combustão estão surgindo no mercado atual. Esta tecnologia ainda está em seu estado inicial e ainda não existem muitos estudos concretos, mas o seu princípio de funcionamento promove uma combustão mais eficaz e com menos agentes poluentes por facilitar a propagação da chama dentro da câmara de combustão.

5 CONCLUSÕES

O protótipo IGNA apresenta um novo projeto de motor rotativo de combustão interna, onde o seu funcionamento, tamanho reduzido e menor quantidade de itens pode proporcionar um futuro bem promissor para esta área.

Os testes para ajustes iniciais apontaram algumas falhas relacionadas ao dimensionamento de componentes e a necessidade da utilização de materiais mais resistentes e tratados termicamente. Após as alterações realizadas não foram observados mais problemas desta natureza.

O primeiro teste realizado em laboratório teve como finalidade a análise do torque do protótipo IGNA, porém a sua instalação incorreta na bancada de testes do Laboratório de Máquinas Térmicas da UNESP acarretou em graves danos estruturais. Um dos pistões articulados deformou-se plasticamente e o outro rompeu-se por cisalhamento, sendo necessária a usinagem de componentes substitutos para as partes danificadas. Com a substituição realizada, foram feitos testes em um dinamômetro na empresa Dynamo LC, que possibilitaram a análise da potência gerada pelo protótipo, indicando que a potência média máxima do protótipo foi de 3,00 kW, ou 4,02 hp, para uma rotação de 2000 RPM.

Comparando o desempenho do protótipo com um motor fabricado pela Mercury Marine de 5,0 hp vimos que muitas melhorias devem ser realizadas para aumentar a sua eficiência, principalmente através da utilização de materiais mais adequados, vedações mais eficientes e um sistema de ignição mais eficaz.

REFERÊNCIAS

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva.** 25 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2005.

CIPOLLONE, R. Sliding vane rotary compressor technology and energy saving. Institution of Mechanical Engineers**.** INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPRESSORS AND THEIR SYSTEMS, 8., 2013, L'Aquila. **Proceedings ...** L'Aquila: Part. E. Journal of Process Mechanical Engineering v. 230, n. 4, p. 27–54, 2013.

GERAMI, A. K. N.; SHADLOO, M. S.; GHASEMPOUR, M. Analysis of the forces acting on apex seal of a wankel engine. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Aalborg, v. 4, n. 9, p. 4205–4212, ago. 2010.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundementals**. [s.l.] : McGraw-Hill Inc., 1988. v. 21

KWEON, C. M. **A review of heavy-fueled rotary engine combustion technologies.** Washington: U.S. Army Research Laboratory, 2011.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. [s.l.]: Publindústria, 2013. v. 53

ROSE, S. W.; YANG, D. C. H. Wide and multiple apex seals for the rotary engine: (Abbr.: Multi-Apex-Seals for the Rotary Engine). **Mechanism and Machine Theory**, v. 74, p. 202–215, dec. 2013.

WESTON, K. **Energy Conversion**. [s.l.]: K. Weston, 2000.

YAMAMOTO, K. **Rotary engine.** Tokyo: Sankaido, 1981.