

UFES - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME BIANCARDI CECCON
VINÍCIUS PIRES FALCHETTO

PROJETO DE GRADUAÇÃO

CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR PULSOJATO

VITÓRIA

2010

GUILHERME BIANCARDI CECCON

VINÍCIUS PIRES FALCHETTO

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UM MOTOR PULSOJATO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Juan Sérgio Romero Saenz.

VITÓRIA - ES

2008

GUILHERME BIANCARDI CECCON
VINICIUS PIRES FALCHETTO

CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR PULSOJATO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 29 de junho de 2010.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profº. Dr. Juan Sérgio Romero Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Profº. Me. Elias Antônio Dalvi
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Profº Dr. Rogério Silveira de Queiroz
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiro a Deus por tudo.

Agradecemos às nossas famílias por ter sempre se interessado e se preocupado pelos nossos projetos, sempre apoiando, e ajudando quando era possível.

Agradecemos aos nossos colegas e verdadeiros amigos, os que dividiram as preocupações e os conhecimentos, os que deram ajuda e os que pediram também.

Agradecemos especialmente ao colega e amigo Bruno Lopes Valentim por ter realizado todas as soldagens de nosso projeto e por ter ajudado outras inúmeras vezes.

Guilherme Biancardi Ceccon

e

Vinicius Pires Falchetto

RESUMO

O uso de motores pulsativos teve seu auge na Segunda Guerra Mundial como propulsores de mísseis alemães e depois entrou em declínio devido a baixa eficiência energética deste motor em comparação com as turbinas. Hoje estudos sobre o motor pulsojato avançam sobre a tecnologia de micropropulsão e aquecimento. A vantagem do motor pulsojato sobre as turbinas são sua simplicidade e a ausência de partes móveis, exceto uma válvula quando utilizada. A motivação deste projeto é projetar e construir um motor pulsojato operável e testá-lo para verificar o empuxo gerado pelo mesmo em operação com objetivo de verificar se sua construção é realmente tão simples e se os métodos de projeto apresentados pelas literaturas mais populares são válidos. As melhores literaturas sobre o assunto são antigas e de difícil acesso, na maioria dos casos as informações de pesquisas feitas na área são obtidas através de referências em trabalhos mais novos e não diretamente da fonte. O projeto cumpriu o objetivo de projetar e construir o motor e mesmo foi testado. Esse texto apresentará todo o trabalho envolvido desde a concepção até o teste do motor. Todo o trabalho foi feito nos laboratórios da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelos autores desse projeto ou colaboradores ligados à instituição.

Palavras Chave: motor pulsojato, motor de combustão interna, propulsão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina de Heron.....	11
Figura 2 - Chaminé de Leonardo Da Vinci (canto superior esquerdo), carruagem de Newton (inferior) e a máquina de Barber (canto superior direito)	12
Figura 3 - Motor desenvolvido por Whittle, na Inglaterra.	12
Figura 4 - Esquema do motor de combustão Esnault-Peltre.....	14
Figura 5 - Esquema da válvula de Marconnet para pulsojato.	15
Figura 6 - Esquema do Tubo Schmidt.	15
Figura 7 – Vaso de Pressão Cilíndrico.	28
Figura 8 – Vaso de Pressão, corte <i>mnpq</i>	29
Figura 9 – Vaso de Pressão, corte <i>mn</i>	29
Figura 10 - Válvula V.	36
Figura 11 - Diagrama do Circuito Elétrico para Sistema de Ignição.	55

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Dynajet	10
Fotografia 2 - Míssil V-1 “Buzz Bomb” parado (esquerda) e em vôo (direita).	16
Fotografia 3 - Modelo de pulso jato em “Drones”, modelo Russo.	16
Fotografia 4 - Valvula de pétalas ou “margarida”.	36
Fotografia 5 - Câmara de combustão e tubo de exaustão dos gases.	44
Fotografia 6 - Processo de soldagem do tubo de exaustão dos gases.	45
Fotografia 7 - Detalhe da fixação da placa de válvulas ao corpo do pulsojato.	46
Fotografia 8 – Placa de Válvulas	46
Fotografia 9 – Pintura das Folhas de Metal para Fabricação da Válvula.	50
Fotografia 10 - Contorno da válvula na chapa de aço para fazer o ataque eletroquímico.	51
Fotografia 11 - Válvula sofrendo o ataque eletroquímico.	52
Fotografia 12 - Sistema de ignição utilizado em aeromodelos com motores a gasolina.	54
Fotografia 13 - Circuito elétrico para ignição da vela.	56
Fotografia 14 - Sistema para gerar centelha em fogões domésticos.	57
Fotografia 15 – Válvula de Agulha.	58
Fotografia 16 – Válvula de Retenção.	58
Fotografia 17 - Sistema de injeção de gás.	59
Fotografia 18 - Sistema de injeção de gasolina com difusor improvisado.	59
Fotografia 19 – Rolamento montado ao Motor.	61
Fotografia 20 – Montagem para o Primeiro Teste.	62

SIMBOLOGIA

A	-- área, constante
C	-- calor específico, velocidade do som
c_p	-- calor específico a pressão constante
c_v	-- calor específico a volume constante
$v.c.$	-- volume de controle
D	-- diâmetro
E	-- espessura da parede do tubo
F	-- força de empuxo
H	-- poder calorífico
H	-- entalpia específica
h_0	-- entalpia de estagnação
$\overline{h}_f^0$	-- entalpia de formação
K	-- razão entre calores específicos
L	-- comprimento
M	-- número de Mach
M	-- massa
P	-- pressão
p_0	-- pressão atmosférica
Q	-- transferência de calor, vazão
R	-- constante do gás
R	-- raio
T	-- temperatura
T_0	-- temperatura atmosférica
V	-- velocidade
$\forall$	-- volume
W	-- trabalho
η_{th}	-- eficiência global
B	-- distância
P	-- pressão interna
Π	-- a constante π
Σ	-- tensão superficial, tensão circunferencial
N	-- quantidade
Gap	-- espaçamento entre furos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. HISTÓRICO	11
3. TEORIA	17
3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS - TERMODINAMICA	17
3.1.1. Adição de Calor a Volume Constante (Processo 1-2)	19
3.1.2. Expansão Isentrópica (Processo 2-3).....	20
3.1.3. Rejeição de Calor à Pressão Constante (Processo 3-1)	20
3.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS – FLUIDOS COMPRESSIVEIS.....	21
3.2.1. Relações com o Número de Mach.....	22
3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS – RESISTENCIA DOS MATERIAIS	27
3.3.1. Vasos de Pressão Cilíndricos.....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1. DIMENSIONAMENTO.....	32
4.1.1. Exaustor	32
4.1.2. Válvula e Placa de Válvula	35
4.1.3. Câmara de Combustão.....	38
4.1.4. Sistema de Injeção e Combustível	40
4.2. FABRICAÇÃO.....	44
4.2.1. Corpo.....	44
4.2.2. Flange e Placa de Válvulas	45
4.2.3. Válvula.....	47
4.2.4. Ignição	54
4.2.5. Injeção	57
4.2.6. Bancada	60
4.3. TESTE.....	61
5. RESULTADOS	64
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
7. REFERENCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Existem dois tipos de processos de combustão em motores de foguetes. O primeiro processo de combustão é por deflagração. Neste processo, as chamas da mistura ar-combustível viajam lentamente, normalmente a poucos metros por segundo. O segundo processo de combustão, o qual é utilizado pelo motor pulsojato, é a combustão por detonação onde uma onda de detonação se propagada pela mistura ar-combustível. A onda viaja a uma velocidade de algumas centenas de metros por segundo, comprimindo o fluido à sua frente, aumentando sua densidade, pressão, e conseqüentemente sua temperatura, causando assim o início de reações químicas.¹

Uma onda de detonação é formada por uma onda de choque, juntamente com uma fina chama frontal. A alta pressão produzida pela detonação, sem a utilização de um compressor, deu origem a várias propostas de dispositivos de propulsão baseados na detonação. Recentemente a tecnologia de motores de detonação por pulso recebeu uma grande consideração devido ao seu potencial para produzir empuxo com maior eficiência do que os motores baseados nas turbomáquinas, em que o combustível é queimado por deflagração.¹

Os motores pulsojato até hoje desenvolvidos podem ser divididos em duas categorias, os motores com válvula e os sem válvula.

Os motores com válvula são mais comuns e mais fáceis de fabricar, nestes motores a válvula é geralmente operada pela variação de pressão gerada pelo próprio funcionamento do motor e tem a função de selar uma das extremidades do tubo tornando o motor um envelope com uma única extremidade aberta por onde saem os gases de combustão gerando empuxo. Os projetos mais conhecidos são o Dynajet, um motor comercial usado em aeromodelos, e o Argus V1, um projeto de Paul Schmidt que foi usado pelos alemães na Segunda Guerra.



Fotografia 1 - Dynajet

Os motores sem válvula são mais simples, porém, mais difíceis de fabricar, pois possuem uma geometria mais complexa. Esta geometria tem o mesmo objetivo da válvula, mas não tem a mesma eficiência pois não impede completamente a saída de gases, porém estes motores tem a vantagem de não possuir nenhuma parte móvel, ou que necessite de manutenção.

A principal vantagem do motor pulsojato, ao qual nenhum outro dispositivo compare-se, reside na sua simplicidade. Embora os princípios físicos de funcionamento sejam simples, a construção do pulsojato, especialmente os projetos sem válvula, são ainda mais simples. Este fato apenas coloca o pulsojato como um precursor inovador na área de micro propulsão. O pulsojato começou a ter o interesse renovado como possível “micro fonte” de propulsão. No entanto, uma base para o empuxo gerado não deve ser considerada apenas na sua aplicação. O pulsojato sem válvula poderia ser uma excelente fonte de micro-aquecimento.²

Investimentos passados têm sido feitos no sentido da utilização de pulsojato de tamanho convencional, em sistemas de aquecimento central. O custo é significativamente reduzido pela natureza simples da construção do pulsojato sem válvula. Além disso, para fins de aplicação como bateria onde o impulso não é a principal preocupação, a energia potencial produzida pela alta eficiência térmica do pulsojato pode ser aproveitada para fontes termoeletricas.²

2. HISTÓRICO

A partir da necessidade de se obter tração e velocidades a altitudes elevadas, deu-se o surgimento dos motores à reação. Apesar de alguns experimentos e invenções mostrarem que muito do conhecimento necessário para utilização desses motores está disponível há muito tempo, o surgimento dos motores à reação atuais aconteceu durante a Segunda Guerra Mundial.³

A Máquina de Heron, mostrada na figura 1, foi o primeiro invento que indica a utilização de um fluxo de gás com velocidade para propelar um corpo. Essa máquina consistia em dois jatos de vapor dirigidos ortogonalmente na periferia da esfera e ela era posta a girar. O vapor responsável pelo movimento era gerado por uma caldeira ligada aos jatos através da esfera.³



Figura 1 - Máquina de Heron.

Outro modelo de utilização de um fluxo de ar quente para acionar um conjunto de pás em uma chaminé, figura 2, foi proposto por Leonardo da Vinci (séc. XVI). Newton, no século seguinte, propôs a utilização da velocidade de um fluxo de vapor para acionar uma carruagem.³

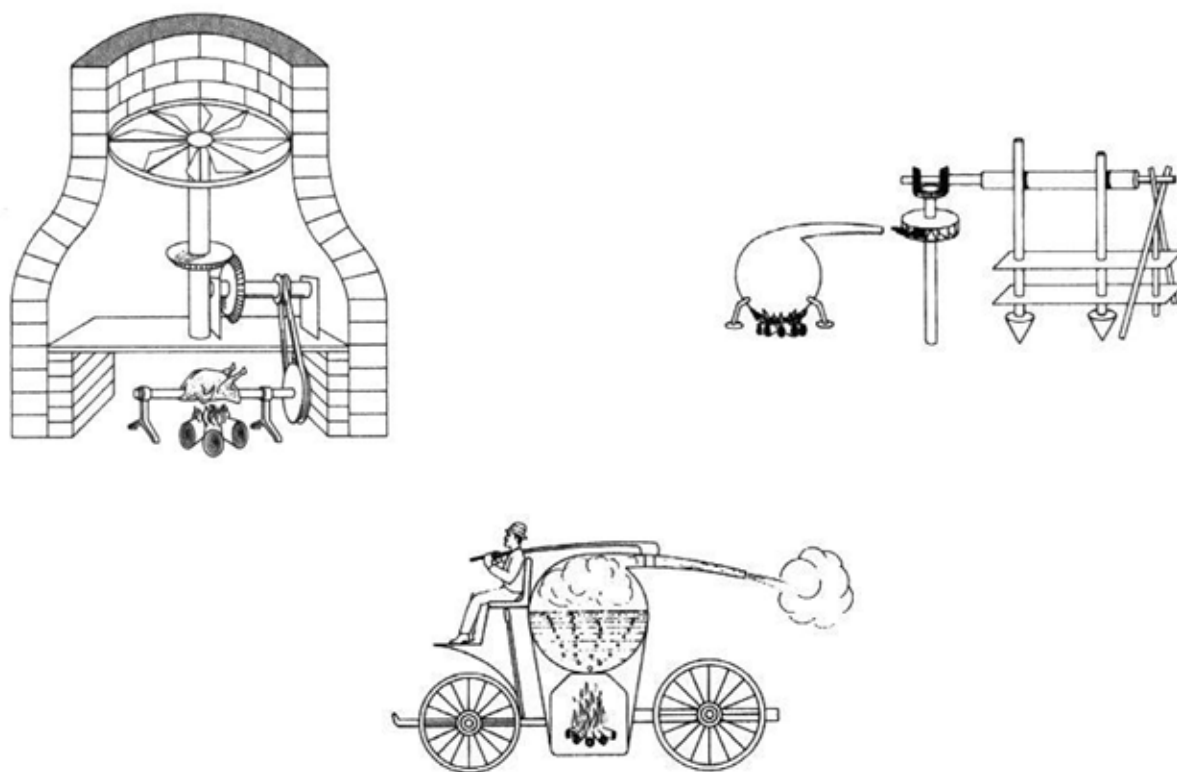


Figura 2 - Chaminé de Leonardo Da Vinci (canto superior esquerdo), carruagem de Newton (inferior) e a máquina de Barber (canto superior direito)

Frank Whittle, em 1929, obteve a primeira patente de um motor à reação para uso aeronáutico. Nesse motor, o acréscimo da pressão do gás é oriundo de um compressor que aumenta a pressão e a velocidade da mistura ar-combustível.³

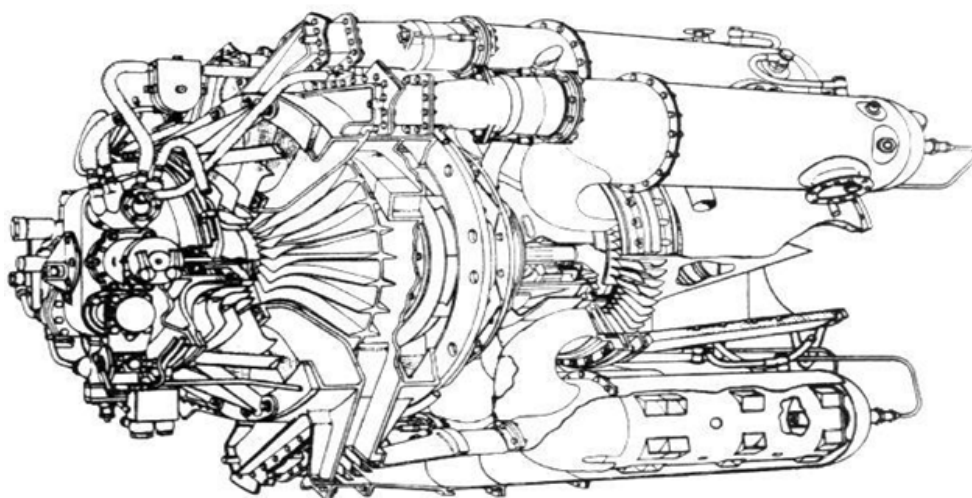


Figura 3 - Motor desenvolvido por Whittle, na Inglaterra.

A energia suficiente para acionar o compressor vem de uma turbina colocada na saída dos gases de combustão. O empuxo é gerado pela energia cinética e pela pressão dos gases de combustão.³

Hans Von Ohain, na Alemanha, desenvolveu o primeiro motor à reação a ser efetivamente utilizado para impulsionar uma aeronave em 1939, simultaneamente aos experimentos de Whittle. O surgimento dos primeiros motores do tipo turbo-hélice, em meados da década de 50, foi possível devido a uma tecnologia dos motores a jato simples estabelecida. Nesses motores, tração da aeronave é obtida através de um motor à reação utilizado para acionar uma hélice.³

Surgiram, na década de 60, os primeiros motores turbofan, um tipo híbrido entre motor à reação tipo jato e os motores turbo-hélice. Um motor à reação é utilizado para gerar tração através de gases de escape em alta velocidade e através de uma hélice carenada de menor diâmetro (fan), simultaneamente, nesses motores.³

No período entre a Segunda Guerra Mundial e os dias atuais outros tipos menos comuns de motores à reação surgiram. Desses motores, os pulsojatos serão ressaltados, tais motores foram utilizados na década de 1940 para impulsionar bombas alemãs, os estato-jatos (RAM Jet), que serviram para aumentar a velocidade de aeronaves e bombas em vôo, e os motores foguetes, que foram empregados inicialmente para propulsão de bombas voadoras alemãs no final da Segunda Guerra Mundial.²

Com o desenvolvimento e a implementação do mecanismo de motor à turbina após a Segunda Guerra, a indústria da aviação teve um grande avanço nas capacidades de vôo. Com essa nova tecnologia, a aeronave poderia voar mais alto e mais rápido. Entretanto, outro tipo diferente de potência a jato, comumente conhecido como pulsojato, teve seu desenvolvido paralelo ao motor à turbina.²

A promessa de um menor consumo específico de combustível, maior robustez às características operacionais, e, acima de tudo, um projeto mecânico significativamente mais simples que os demais motores da época, levaram ao invento do motor pulsojato por Karavodine em 1908. Entretanto, devido ao mau desempenho impulso versus tamanho e um elevado nível de ruído fez reduzir o interesse nos motores pulsojato. Devido à falta de compreensão dos princípios

fundamentais para o funcionamento do pulsojato, as melhorias a essas limitações nunca foram alcançadas. Por esses motivos, o cronograma histórico de desenvolvimento do pulsojato foi degradado, permitindo que o motor à turbina surgisse como a opção de propulsão dominante.²

Atualmente, a tecnologia pulsojato mostra-se como uma promessa de fonte alternativa viável para fins de propulsão, mas o impedimento para isso continua sendo a falta de compreensão dos seus princípios fundamentais.²

Sua geometria e combustível fazem o pulsojato operar em um evento de combustão cíclica. Conforme Zinn, por volta de 1777, houve a descoberta da chama pulsante, ou “chama sensível”. Por quase um século e meio depois dessa descoberta, surgiram vários desenhos conceituais de dispositivos de combustão pulsante. Até a virada do século XX não há relatos ou documentação que relate a existência de nenhum motor de combustão cíclica. Esnault e Peltre, dois engenheiros franceses, patentearam um desenho para um motor que levou a uma roda de turbina. Esse mecanismo é baseado no princípio de duas colunas opostas de combustão pulsantes, instalados em uma única câmara reta e tubular trabalhando em fases diferentes, figura 4.²

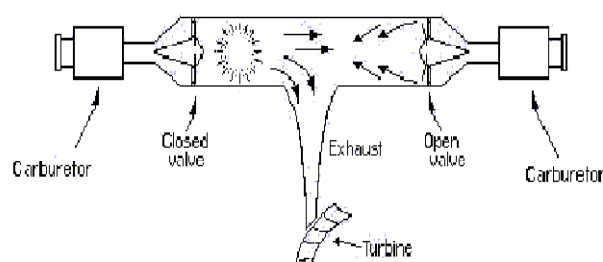


Figura 4 - Esquema do motor de combustão Esnault-Peltre.

Segundo Reynst, outro francês, Marconnet de Georges, patenteou um dispositivo que era uma variação do desenho de Esnault-Peltre.²

Marconnet utilizou uma válvula denominada por ele de válvula aerodinâmica e substituiu as válvulas de flap por esse novo modelo. Essa válvula consistia em uma simples zona de constrição com o objetivo semelhante ao da válvula mecânica, ou

seja, deixar que combustível e ar entrassem na câmara de combustão inibindo que gases de escape fugissem na direção oposta (figura 5).²

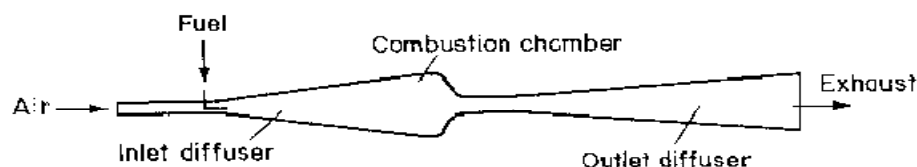


Figura 5 - Esquema da válvula de Marconnet para pulsojato.

Até 1930 nenhum sucesso com o desenvolvimento de um motor de combustão pulsante operacional tinha sido obtido, quando houve um aperfeiçoamento e patenteamento do motor pulsojato desenvolvido por Karavodine, em 1908, por um engenheiro alemão chamado Paul Schmidt. Esse engenheiro desenvolveu o tubo Schmidt, uma câmara de área constante com válvulas de flap em um lado do tubo e uma abertura na extremidade oposta, figura 6. O motor de Schmidt foi incorporado na concepção do desenvolvimento do programa alemão de mísseis V-1, ou "Buzz Bomb", projeto irmão dos foguetes V-2, durante a Segunda Guerra Mundial, figura 7. Em 1942, após inúmeros testes e aperfeiçoamentos, o motor batizado de Schmidt-Argus foi utilizado nos mísseis V-1, construídos para bombardear Londres.²

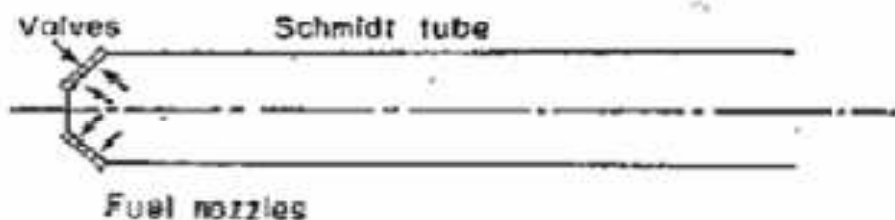


Figura 6 - Esquema do Tubo Schmidt.

Segundo Reynst, o título de primeiro pulsojato bem sucedido a utilizar capacidade de impulsão foi creditado ao "Buzz Bom", fotografia 2, que aterrorizou a Inglaterra com seus elevados níveis de ruído que podiam ser ouvidos há milhas de distância. O desenvolvimento do poder do pulsojato continuou após a guerra em muitos países, principalmente nos Estados Unidos. Vários aviões experimentais foram construídos com o pulsojato, até chegar aos aviões atualmente conhecidos como "Drones" ou UAV, que são aeronaves sem pilotos. Fotografia 3.²



Fotografia 2 - Míssil V-1 "Buzz Bomb" parado (esquerda) e em vôo (direita).

Fonte: SCHOEN, Michael Alexander (esquerda). manual_pulsajato (direita).



Fotografia 3 - Modelo de pulso jato em "Drones", modelo Russo.

Fonte: manual_pulsajato

Houve também o desenvolvimento de motores pulsojato sem válvula em vários países, entre eles estão Estados Unidos, França, Rússia, China e Alemanha, obtendo relativo sucesso nos modelos construídos, porém, não houve grande avanço nesse tipo de pulsojato.²

3. TEORIA

A teoria envolvida no funcionamento do motor pulsojato não é tão simples, na verdade os estudos feitos até hoje não foram suficientes para revelar inteiramente todos os mecanismos envolvidos no funcionamento deste motor. Enquanto vários detalhes do funcionamento deste motor ainda são assunto de discussão de engenheiros e desenvolvedores, os princípios básicos de operação são bem fáceis de entender.⁴

Pode-se dizer que as razões básicas para que o motor pulsojato funcione são duas características dos fluidos, principalmente dos gases, destes serem compressíveis e de tenderem a agir como uma “mola”.⁴

Essa elasticidade no movimento dos gases é um fator essencial para o funcionamento do pulsojato, é ela que permite a aspiração de ar novo para dentro da câmara de combustão quando os produtos da combustão anterior são expelidos pelo tubo exaustor.

O ciclo de combustão inicia-se com a admissão de ar através do difusor frontal, que é injetado ou aspirado do bico injetor. A mistura ar-combustível atravessa a válvula, aberta devido à pressão exercida pelo ar na parte frontal do motor. Após penetrar na câmara de combustão, a mistura ar-combustível entra em contato com a faísca gerada pela vela de ignição ou com as paredes já aquecidas e entra em combustão. Devido à combustão ocorre aumento da pressão na câmara, com isso a válvula se fecha e impede a entrada de ar, os gases da combustão então são expelidos pelo tubo de escape, surgindo assim a força propulsora. O motor é desligado contando-se a injeção de combustível ou bloqueando-se a entrada de ar.

3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS - TÉRMODINAMICA

O Instituto de Tecnologia da Califórnia (1946) explica que o Ciclo de Lenoir é um ciclo termodinâmico idealizado e muitas vezes utilizado para modelar um motor pulsojato. Baseia-se na operação de um motor patenteado por Jean Joseph Étienne Lenoir, em 1860. Este motor é muitas vezes visto como o primeiro motor de

combustão interna produzido comercialmente. A ausência de qualquer processo de compressão na admissão leva à menor eficiência térmica do que outros ciclos mais conhecidos, como Ciclo Otto, Brayton e o Ciclo Diesel.⁵

No ciclo mostrado a seguir (gráficos 1 e 2), um gás ideal sofre:

- **Estado 1** – Admissão de nova mistura de gás + ar.
- **Processo 1-2:** Adição de calor a volume constante (isovolumétrico); produz subitamente, gases de “queima” e grande quantidade de calor.
- **Estado 2** – Os gases a alta pressão e volume reduzido têm elevado conteúdo energético.
- **Processo 2-3:** Expansão Isentrópica (suficientemente rápida para que não ocorram trocas de calor).
- **Estado 3** – Rejeição de calor.
- **Processo 3-1:** Rejeição de calor a pressão constante (isobárico); calor é cedido e os gases queimados da explosão, são expulsos.

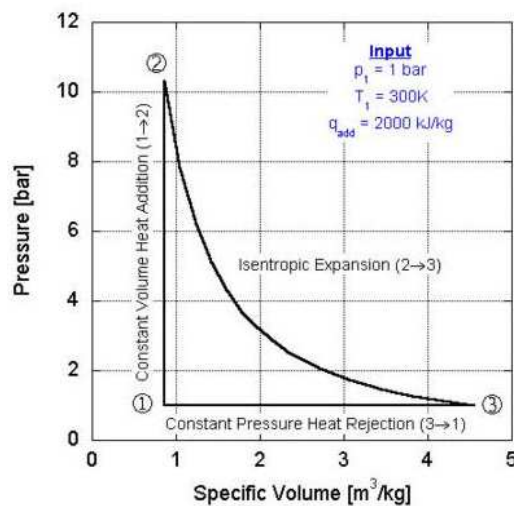


Gráfico 1 – Ciclo de Lenoir, Pressão [bar] x Volume Específico [m³/kg].

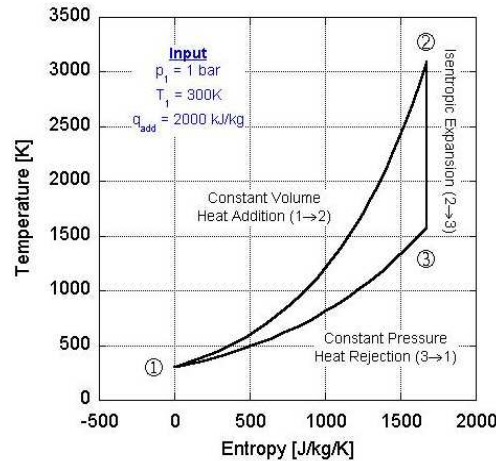


Gráfico 2 – Ciclo de Lenoir, Temperatura [K] x Entropia [J/Kg/K].

3.1.1. Adição de Calor a Volume Constante (Processo 1-2)

Para um gás ideal do ciclo de Lenoir Tradicional, o primeiro estágio (1-2) envolve a adição de calor a volume constante. Isso resulta na seguinte forma da Primeira Lei da Termodinâmica:

$${}_1Q_2 = m * c * (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

Não existe trabalho durante o processo (1-2) porque o volume é mantido constante:

$${}_1W_2 = \int_1^2 p * dA \quad (3.2)$$

E da definição de volume constante, para calores específicos de um gás ideal:

$$c_v = \frac{R}{k - 1} \quad (3.3)$$

Onde R é a constante dos gases ideais e k é a razão dos calores específicos (aproximadamente 287 J/(kg·K) e 1.4 para o ar, respectivamente). A pressão depois da adição de calor pode ser calculada pela Lei dos Gases Ideais:

$$p_2 V_2 = R * T_2 \quad (3.4)$$

3.1.2. Expansão Isentrópica (Processo 2-3)

O segundo estágio (2-3) envolve uma expansão adiabática e reversível do fluido para a sua pressão inicial. Isto pode ser determinado por um processo isentrópico, que de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica resulta em:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{k-1} \quad (3.5)$$

Onde $p_3 = p_2$ para este ciclo específico. A Primeira Lei da Termodinâmica resulta no seguinte processo de expansão:

$${}_2W_3 = m * c_v * (T_2 - T_3) \quad (3.6)$$

Pois para um processo adiabático: ${}_2Q_3 = 0$.

3.1.3. Rejeição de Calor à Pressão Constante (Processo 3-1)

No estágio final (3-1) ocorre uma rejeição de calor a pressão constante, e a volta para o estágio inicial do processo. Da Primeira Lei da Termodinâmica, temos:

$${}_3Q_1 - {}_3W_1 = U_1 - U_3 \quad (3.7)$$

E da definição de Trabalho:

$${}_3W_1 = \int_3^1 p * dV = p_1(V_1 - V_3) \quad (3.8)$$

E o calor rejeitado pode ser recuperado para este processo da seguinte forma:

$${}_3Q_1 = (U_1 + p_1V_1) - (U_3 + p_3V_3) = H_1 - H_3 \quad (3.9)$$

Como resultado, pode-se determinar o calor rejeitado da seguinte forma:

$${}_3Q_1 = m * c_p * (T_1 - T_3) \quad (3.10)$$

Da definição de calor específico a pressão constante para um gás ideal:

$$c_p = \frac{k * R}{k - 1} \quad (3.11)$$

A eficiência global do ciclo é determinada pelo trabalho total sobre a entrada de calor, que, para um Ciclo de Lenoir equivale a:

$$\eta_{th} = \frac{({}_2W_3 + {}_3W_1)}{{}_1Q_2} \quad (3.12)$$

Observe que se ganha trabalho durante o processo de expansão, mas perde-se um pouco durante o processo de rejeição de calor.

3.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS – FLUIDOS COMPRESSIVEIS

Através da utilização de escoamento permanente adiabático isentrópico com as seguintes premissas: escoamento de gás em alta velocidade; não há transformação de calor pelas paredes do tubo.

Nesse caso, cada linha de corrente deve satisfazer a 1ª Lei da Termodinâmica na seguinte forma:

$$h_1 + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1 = h_2 + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2 - q + w_{vc} \quad (3.13)$$

Fora das camadas limites:

$$h_1 + \frac{1}{2}V_1^2 = h_2 + \frac{1}{2}V_2^2 = cte \quad (3.14)$$

A constante representa a entalpia máxima que o fluido poderia atingir se levado ao repouso adiabaticamente.

Entalpia de Estagnação – h_0 (entalpia máxima do escoamento):

$$h + \frac{1}{2}V^2 = h_0 = cte \quad (3.15)$$

Isto é válido para qualquer escoamento adiabático, permanente de qualquer fluido compressível fora da camada limite.

Para gás perfeito:

$$h = C_p * T \quad (3.16)$$

$$C_p * T + \frac{1}{2}V^2 = C_p * T_0 \quad (3.17)$$

$$T_0 = T + \frac{1}{2} \frac{V^2}{C_p} \quad (3.13)$$

T_0 : temperatura de estagnação do escoamento adiabático de um gás perfeito, isto é, a temperatura que um escoamento atinge quando desacelerado adiabaticamente até o repouso.

Por outro lado:

$$V_{max} = (2 * h_0)^{\frac{1}{2}} = (2 * C_p * T_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3.19)$$

V_{max} ocorre quando $h \rightarrow 0$ e $T \rightarrow 0$.

Não é possível atingir velocidades maiores que V_{max} sem adicionar mais energia ao fluido, através de trabalho de eixo ou transferência de calor.

3.2.1. Relações com o Número de Mach

Voltando a equação (3.17)

$$C_p * T + \frac{1}{2} V^2 = C_p * T_0$$

Dividindo toda equação por $C_p * T$:

$$1 + \frac{1}{2} * \frac{V^2}{C_p * T} = \frac{T_0}{T} \quad (3.20)$$

Porem, se é gás perfeito:

$$C_p * T = \frac{K * R}{K-1} * T \text{ onde } K * R * T = a$$

Substituindo:

$$1 + \frac{K-1}{2} * \frac{V^2}{a} = \frac{T_0}{T} \quad (3.21)$$

Mas

$$\frac{V^2}{a} = M^2$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(K-1)}{2} * M^2 \quad (3.22)$$

A relação 3.22 exige que o escoamento seja adiabático, mas vale também na presença de irreversibilidade.

Se o escoamento for isentrópico então as seguintes relações são validas.

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{K}{K-1}} = \left[1 + \frac{1}{2} * (K-1) * M^2 \right]^{\frac{K}{K-1}} \quad (3.23)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{K-1}} = \left[1 + \frac{1}{2} * (K-1) * M^2 \right]^{\frac{1}{K-1}} \quad (3.24)$$

As fórmulas acima foram utilizadas para descobrir a temperatura e a pressão teóricas no interior da câmara de combustão e permitir o posterior dimensionamento.

Primeiramente deve-se calcular o número de Mach. Para tanto, adotou-se uma velocidade de funcionamento $V = 200 \text{ Km/h} = 55,56 \text{ m/s}$ e utilizando a velocidade no vácuo $c = 340 \text{ m/s}$, tem-se:

$$M = \frac{V}{c} = \frac{55,56}{340} = 0,163$$

Em seguida, fez-se o calculo da pressão e temperatura de estagnação, entrada da câmara de combustão (estado 1), utilizando as equações 3.23 e 3.24, com as seguintes considerações: $P_0 = 101,32 \text{ kPa}$; $T_0 = 25^\circ\text{C}$ e $K = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$, constante para o ar:

$$\frac{P_1}{101,32} = \left[1 + \frac{1,4 - 1}{2} * 0,163^2 \right]^{\frac{1,4}{1,4-1}}$$

$$P_1 = 103,22 \text{ kPa}$$

$$\frac{T_1}{25} = 1 + \frac{1,4 - 1}{2} * 0,163^2$$

$$T_1 = 25,13^\circ\text{C}$$

Segundo Shapiro a pressão no estado 1 é aproximadamente o dobro da pressão no estado 2. Com a pressão e temperaturas do estado 1, foram calculadas a pressão e a temperatura no fim do processo de carga da câmara de combustão (estado 2) utilizando as equações abaixo.⁶

$$P_2 = \frac{P_1}{2} \tag{3.25}$$

E

$$T_2 = T_1$$

Portanto,

$$P_2 = \frac{103,22}{2}$$

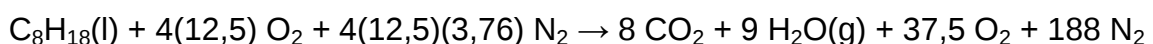
$$P_2 = 51,61 \text{ kPa}$$

$$T_2 = 25,13^\circ\text{C}$$

Nos cálculos anteriores foram consideradas apenas as propriedades do ar, não envolvendo a mistura ar-combustível em tais procedimentos.

Para determinar a pressão e a temperatura no interior da câmara após a combustão (estado 3) foi necessário escolher um combustível. Escolheu-se a gasolina, pois esse é o combustível que fornece as condições de trabalho mais severas e possui a maior temperatura de chama entre os combustíveis possíveis.

Considerou-se gasolina (C_8H_{18}) a 25°C , sendo queimada a regime permanente, com 400% de ar teórico a 25°C . A reação é:



Utilizando entalpia de formação para reagentes e produtos, encontrou-se a temperatura adiabática de chama que será a temperatura T_3 na saída da câmara de combustão:

Pela Primeira Lei: $H_R = H_P$

$$\sum_R n_\epsilon (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_\epsilon = \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_s$$

$$H_R = \sum_R n_\epsilon (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_\epsilon = (\bar{h}_f^0)_{\text{C}_8\text{H}_{18}(\text{l})} = -249910 \text{ kJ/kmol de combustivel}$$

$$H_p = \sum_P n_s \left(\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} \right)_s$$

$$H_p = 8(-393520 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + 9(-241820 + \bar{h}_{H_2O}) + 37,5(\Delta \bar{h}_{O_2}) + 188(\Delta \bar{h}_{N_2})$$

Para encontrar a temperatura dos produtos é necessário o uso do método da bisseção (método das tentativas). Admitindo-se:

$$T_p = 900 \text{ K}$$

Então

$$H_p = 8(-393520 + 28041) + 9(-241820 + 21924) + 37,5(19246) + 188(18221)$$

$$H_p = -736595 \text{ kJ/kmol de combustivel}$$

Admitindo:

$$T_p = 1000 \text{ K}$$

$$H_p = 8(-393520 + 33405) + 9(-241820 + 25978) + 37,5(22707) + 188(2146)$$

$$H_p = -62438,5 \text{ kJ/kmol de combustivel}$$

Como $H_R = H_P = -249910 \text{ kJ}$, encontra-se a temperatura adiabática de chama através de interpolação:

Temperatura (K)	Entalpia (kJ / kmol)
900	-756595
T_3	-249910
1000	62438,5

Calculando-se:

$$\frac{1000 - T_3}{1000 - 900} = \frac{62438,5 - (-249910)}{62438,5 - (-756595)}$$

$$T_3 \approx 961,86 \text{ K} = 688,86 \text{ }^\circ\text{C}$$

A pressão dos gases na câmara de combustão será:

$$\frac{T_3}{P_3} = \frac{T_2}{P_2}$$

$$\frac{961,86}{P_3} = \frac{(25,13 + 273)}{51,61}$$

$$P_3 = 166,5 \text{ kPa}$$

3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS – RESISTENCIA DOS MATERIAIS

Vasos de pressão são estruturas comumente usadas na indústria para o armazenamento de fluidos pressurizados, quando armazenando gases estes vasos de pressão ficam submetidos a tensões, provocadas pelo gás, em todas as direções. Os motores pulsojato por seu formato e por trabalharem com gases em momentos em alta pressão podem ser aproximados de vasos de pressão. Neste tópico será apresentada a teoria de resistência dos materiais usada na análise da resistência a pressão interna para vasos de pressão de paredes finas.⁷

São considerados de parede fina os vasos de pressão que possuem a relação entre raio interno r e espessura de parede t maior ou igual a 10 (dez). Quando esta relação é obedecida, os resultados de análise de paredes finas prevêm uma tensão

aproximadamente 4% menor que a tensão máxima no vaso, para relações maiores os erros nos resultados serão menores.⁸

Para vasos de pressão de paredes finas as variações na distribuição de tensão nas paredes são desprezíveis, assim a distribuição de tensão é considerada constante. Para esta análise serão usadas pressões manométricas visto que a pressão externa ao pulsojato é a pressão atmosférica.⁸

3.3.1. Vasos de Pressão Cilíndricos

Neste projeto somente serão analisados os vasos de pressão de formato cilíndricos, já que este é o formato do motor a ser construído.

Considere o vaso cilíndrico A-B da figura abaixo de espessura de parede t e raio interno r .

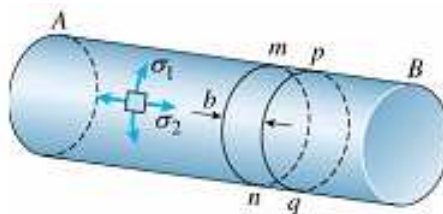


Figura 7 – Vaso de Pressão Cilíndrico.

Fonte: BUFFONI, Saleti.

O gás ou fluido nele contido, que se admite ter peso desprezível, desenvolve a pressão manométrica P_1 no interior do vaso. Um elemento com suas faces perpendiculares e paralelas ao eixo está ilustrado na parede do tanque. σ_1 e σ_2 são as tensões circunferencial e longitudinal de membrana na parede, respectivamente.

Para determinar a intensidade de cada componente em termos da geometria do vaso e da pressão interna deve-se aplicar o método das seções e as equações de equilíbrio de forças.

Considere dois cortes perpendiculares mn e pq perpendiculares ao eixo longitudinal a uma distancia b entre eles como na figura abaixo.

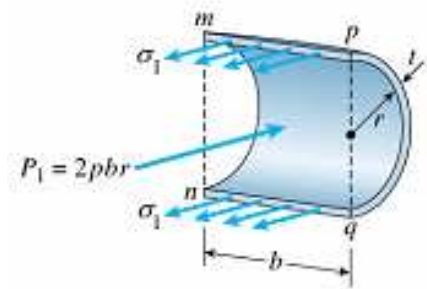


Figura 8 – Vaso de Pressão, corte $mnpq$.

Fonte: BUFFONI, Saleti.

Tem-se então que a equação de equilíbrio é:

$$\sigma_1 * (2 * b * t) - 2 * P_1 * b * r = 0 \quad (3.26)$$

Assim a tensão circunferencial se dá pela fórmula:

$$\sigma_1 = \frac{p * r}{t} \quad (3.27)$$

Considere agora o corte mn perpendicular ao eixo longitudinal como na figura abaixo

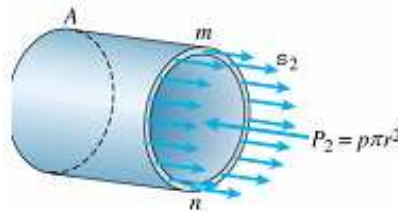


Figura 9 – Vaso de Pressão, corte mn .

Fonte: BUFFONI, Saleti.

Tem-se que a equação de equilíbrio é:

$$\sigma_2 * (2 * \pi * r * t) - p * \pi * r^2 = 0 \quad (3.28)$$

Assim a tensão longitudinal se dá pela fórmula:

$$\sigma_2 = \frac{p * r}{2 * t} \quad (3.29)$$

Conhecendo-se os valores de tensão circunferencial σ_1 e longitudinal σ_2 suportadas devido a pressão interna, percebe-se que:

$$\sigma_1 = 2 * \sigma_2 \quad (3.30)$$

Assim pode-se usar somente a fórmula de tensão circunferencial σ_1 .

Porém, para este projeto é mais interessante saber a espessura mínima da parede do vaso dado um diâmetro interno e uma pressão de trabalho. Para calcular a espessura pode-se adaptar a fórmula 3.27, substituindo a tensão circunferencial σ_1 por uma tensão admissível σ_{adm} , para:

$$t_{min} = \frac{p * r}{\sigma_{adm}} \quad (3.31)$$

Como o motor pulsojato pode possuir tubos de vários diâmetros a fórmula acima será usada na seleção de peças e materiais, a tabela abaixo apresenta valores de tensão de escoamento para vários materiais.

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas Médias de Materiais Típicos de Engenharia

Materiais		Tensão de Escoamento σ_{esc} (MPa)			Limite de Resistência (MPa)		
		Tração	Comp.	Cis.	Tração	Comp.	Cis.
Metálicos							
Ligas Forjadas	• 2014 – T6	414	414	172	469	469	290
de Alumínio	• 6061 – T6	255	255	131	290	290	186
Ligas de Ferro Fundido	• Cinza ASTM 20	-	-	-	179	669	-
	• Maleável ASTM A-197	-	-	-	276	572	-
Ligas de Cobre	• Latão Vermelho C83400	70,0	70,0	-	241	241	-
	• Bronze C86100	345	345	-	655	655	-
Liga de Magnésio	• Am1004 – T61	152	152	-	276	276	152
Ligas de Aço	• Estrutural A-36	250	250	-	400	400	-
	• Inoxidável 304	207	207	-	517	517	-
	• Ferramentas L2	703	703	-	800	800	-
Liga de Titânio	• Ti – 6Al – 4V	924	924	-	1000	1000	-

Fonte: Hibbeler, R. C. Resistência dos Materiais, 5ª edição. Adaptado

A tensão admissível usada na fórmula (3.31) é a tensão admissível e pode ser obtida pela fórmula:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{CS} \quad (3.32)$$

A escolha do coeficiente de segurança CS é uma tarefa de responsabilidade. Valores muito altos podem significar custos desnecessários e valores muito baixos podem levar a falhas com acidentes de grandes proporções. Dentre os fatores que afetam o coeficiente o principal para este caso é a perda de propriedades com o aumento de temperatura, as tensões admissíveis para materiais que trabalham a altas temperaturas são mais baixos.

O coeficiente de segurança usado para os cálculos de espessura mínima foi igual a 4, um coeficiente alto, devido ao desconhecimento da perda de propriedade, pois o motor trabalhará a alta temperatura.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DIMENSIONAMENTO

Um dos mais interessantes e mais confiáveis textos sobre projeto e teoria foi escrito por C.E. Tharratt enquanto ele fazia parte da equipe de cientistas na Chrysler Space Division nos anos 50. Intitulado “The Propulsive Duct” (O Duto Propulsor em português), este trabalho condensava muito da teoria em algumas simples fórmulas e constantes.⁴

Para o dimensionamento do motor pulsojato deste projeto foram seguidas as fórmulas de Tharratt no método apresentado por Bruce Simpson em seu livro “The Enthusiast’s Guide to Pulsejet Engines” (O Guia do Entusiasta para Motores Pulsojato).⁴

Usando seus cálculos Tharratt chegou a dizer,

“nós estamos na surpreendente posição de estarmos capazes de determinar as dimensões de um duto capaz de desenvolver um dado empuxo na parte de traz de um envelope e sem saber nada sobre sua dinâmica de gases!”.³

As fórmulas de Tharratt passaram no teste do tempo e sua compreensão dos mecanismos por traz do pulsojato, ou como ele chamava “duto propulsivo”, continuam válidas. Para pulsojatos de alta potência os detalhes fazem muita diferença, e suas fórmulas perdem efetividade, mas para pequenos pulsojatos, como o feito neste projeto, suas fórmulas servem muito bem.⁴

As fórmulas e constantes de Tharratt em seus trabalhos foram apresentadas no sistema de medidas imperial e assim serão apresentadas neste trabalho.

4.1.1. Exaustor

A fórmula a seguir foi proposta por Tharratt como o coração do projeto de um pulsojato.

$$V/L = 0.00316 * F \quad (4.1)$$

Esta fórmula foi provada em diferentes desenhos de pulsojatos como o Argus V1 e o Dynajet.

Analisando com calma esta fórmula pode-se perceber que mantendo o volume constante e diminuindo o comprimento acústico efetivo, e conseqüentemente a área transversal, o motor terá um empuxo gerado menor, o que indica uma relação entre a área transversal e o empuxo gerado.

Nota-se também que aumentando o volume do motor e mantendo seu comprimento constante, o que quer dizer um aumento na área transversal, o empuxo gerado aumentará, confirmando a relação entre a área transversal e o empuxo gerado.

Com esta constatação manipulando-se a fórmula (4.1) pode-se encontrar uma constante muito interessante.

$$F = 2.2 * A \quad (4.2)$$

Esta fórmula é muito útil, com ela é possível encontrar o diâmetro de um tubo e iniciar o dimensionamento de um pulsojato para um dado empuxo, ou estimar o empuxo de um pulsojato a partir de seu desenho. É importante lembrar que a área transversal nesta fórmula é a área média de todo o motor e não só do tubo exaustor.

Deve-se dizer que Tharratt não esperava que esses motores tivessem grandes câmaras de combustão na sua frente, então usar deste artifício para aumentar o volume do motor não causará necessariamente um empuxo maior que o gerado por um tubo reto.⁴

Conhecendo a área média transversal A pode-se calcular o diâmetro do tubo pela fórmula:

$$D = 2 * \sqrt{A/\pi} \quad (4.3)$$

Tendo um diâmetro médio D calculado deve-se escolher agora o comprimento L do motor. Deve-se lembrar que o comprimento L não influenciará no empuxo gerado, somente uma variação na área transversal A do mesmo o fará, mas isto não quer

dizer que a escolha do comprimento L não tem importância, pois este tem influencia na frequência de operação.

A única referência que Tharratt faz ao comprimento acústico L é uma sugestão que este deve ser pelo menos 8 (oito) vezes o diâmetro médio D do motor. Nas notas de Tharratt ele se refere a esta relação como L/D , “com $L/D < 7$ os problemas de desenvolvimento se tornam bem desafiadores” e para um motor com $L/D > 7$ “a combustão com combustíveis químicos são difíceis de sustentar, deixando que o motor desenvolva somente empuxo máximo”.⁴

Bruce Simpson por experiência própria, porem, indica uma relação maior de L/D , para ele um bom valor do comprimento L está próximo a 14 (quatorze) vezes o diâmetro médio D .⁴

Para efeito de comparação o Dynajet tem a relação L/D de 15 e o Argus V1 de 9,6, isto mostra outra regra experimental que Simpson apresenta, que quanto menor o tamanho do motor pulsojato, maior deve ser a relação L/D para que este tenha uma operação confiável.⁴

Assim o comprimento L mínimo pode ser calculado por:

$$L_{\min} = 14 * D \quad (4.4)$$

Quando o dimensionamento foi feito o projeto já possuía 90 (noventa) centímetros de tubo de aço inox de 2 (duas) polegadas de diâmetro, então os cálculos foram feitos de modo a conhecer o empuxo que poderia ser gerado por um pulsojato feito com aquele tubo, e se o comprimento dele atendia ao comprimento mínimo necessário.

A área transversal para um tubo de diâmetro de 2 (duas) polegadas (ou 50,8mm) é:

$$A = 3,14 \text{ pol}^2 \quad \text{ou} \quad A = 2026,83 \text{ mm}^2$$

Para esta área o empuxo gerado é:

$$F = 6,91 \text{ lbf} \quad \text{ou} \quad F = 3,13 \text{ kgf} \quad \text{ou} \quad F = 30,74 \text{ N}$$

E o comprimento mínimo para um tubo deste diâmetro é:

$$L_{min} = 28 \text{ pol} \quad \text{ou} \quad L_{min} = 711,2 \text{ mm}$$

Como quanto maior for o comprimento do exaustor mais confiável é sua operação, foi decidido usar todo o comprimento restante do tubo, o que também seria uma garantia, em caso a soldagem do material às outras partes tivesse de ser refeita, pois haveria sobra de material.

Também foi calculado se a espessura do tubo atendia a espessura mínima suficiente para resistir à pressão interna máxima calcula no utilizando a fórmula (3.31) e a tensão admissível para o aço inox 304 calculada usando os dados das Tabela 1 e a fórmula (3.32).

$$t_{min}^{ext} = 0,08 \text{ mm}$$

Como a espessura do tubo é maior que a espessura mínima, este pode ser usado na fabricação do motor construído neste projeto.

A escolha de se manter o tubo de aço inox também levou em consideração o comportamento do material a altas temperaturas. O aço inox 304 é o material mais indicado pelos trabalhos consultados, pois, mantém boas propriedades mesmo a altas temperaturas.

A partir desta escolha de material outro aspecto de fabricação passou a ser considerado, a soldagem, para facilitar a soldagem deu-se preferência ao aço inox 304 na escolha das outras peças.

4.1.2. Válvula e Placa de Válvula

Existem dois tipos tradicionais de válvula, a conhecida como válvula “margarida” ou de pétalas, por parecer com uma flor, e a válvula “V”. A válvula “V” é mais eficiente que a de pétalas, mas também é mais sofisticada e difícil de fabricar, para projetos de alta potência a válvula “V” é mais indicada, mas para pulsojatos de baixa potência a válvula de pétalas funciona muito bem e aliada a uma fabricação mais fácil é a melhor escolha para um pulsojato como o deste projeto.⁴



Fotografia 4 - Valvula de pétalas ou “margarida”.

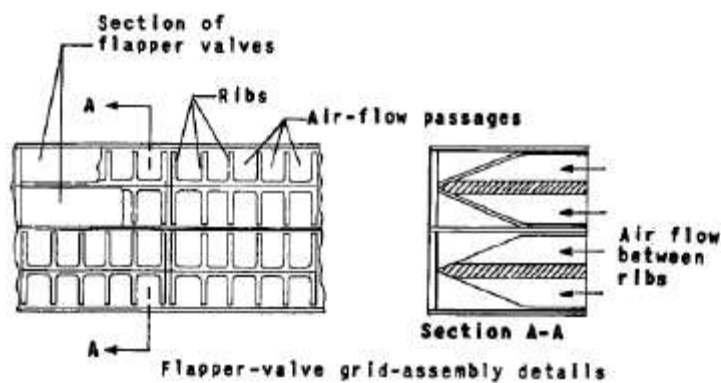


Figura 10 - Valvula V.

Tharratt em seu trabalho deixou outra fórmula chave, esta para calcular a área de válvula A_v para um motor pulsojato de um dado tamanho ou potencia.⁴

$$A_v = 0,23 * A \quad (4.5.a)$$

Ou

$$A_v = 0,1045 * F \quad (4.5.b)$$

Porém, para Tharratt a admissão de ar era feita por um furo aberto e sem perdas pela presença de válvulas, infelizmente, a presença de uma válvula no caminho vai afetar o escoamento de gases para a câmara de combustão, então é necessário considerar um fator de eficiência para o sistema, assim a nova área de válvula será.⁴

$$A_v' = A_v / e \quad (4.6)$$

Um sistema de válvula de pétalas é composto por um anel de furos que são cobertos por uma pétala correspondente da válvula. Então a área de cada furo pode ser encontrada dividindo-se a área de válvula A_V' pelo numero de furos, mas porque não, então usar apenas um furo? Outro conhecimento que Bruce Simpson mostra ter adquirido por experiência é que os furos parecem ter um tamanho limite, acima deste limite as pétalas da válvula começam a ser dobrar para dentro do furo afetando negativamente sua operação.⁴

Para válvulas feitas de aço este limite parece ser o diâmetro de $\frac{1}{2}$ (meia) polegada, assim, deve-se escolher o numero de furos de modo a respeitar este limite.

$$A_F = A_V' / N_F \quad (4.7)$$

$$D_F = \sqrt{A_F / \pi} \quad (4.8)$$

$$D_F < 0,5 \text{ pol} \quad (4.9)$$

Calculado o diâmetro dos furos e o número de furos deve-se calcular em seguida o diâmetro do círculo que conterá os centros dos furos, ou seja, o diâmetro do anel de furos D_F' . No cálculo deste diâmetro deve-se lembrar de considerar um espaço (Gap) entre os furos para permitir que a válvula cubra o furo com uma pequena folga, e para que exista um pequeno espaço entre as pétalas para que não encostem uma nas outras.

$$D_F' = (N_F * D_F + N_{gap} * Gap) / \pi \quad (4.10)$$

A área de válvula para o pulsojato projetado, usando uma eficiência η de 50% é:

$$A_V' = 1,445 \text{ pol}^2 \quad \text{ou} \quad A_V' = 932,3 \text{ mm}^2$$

O número de furos N_V escolhido foi de 10 furos e com esta quantidade a área e diâmetro dos furos são respectivamente:

$$A_F = 0,145 \text{ pol}^2 \quad \text{ou} \quad A_F = 93,2 \text{ mm}^2$$

$$D_F = 0,43 \text{ pol} \quad \text{ou} \quad D_F = 10,9 \text{ mm}$$

O espaço entre furos (gap) escolhido foi de 0,2 polegadas, com este valor o diâmetro do anel de furos será:

$$D_F' = 2 \text{ pol} \quad \text{ou} \quad D_F' = 50,8 \text{ mm}$$

Inicialmente o valor do gap era de 0,25 polegadas, este valor teve de ser mudado devido à espessura e o diâmetro do tubo da câmara de combustão comercialmente disponível ou os furos ficariam muito próximos a parede da câmara interferindo na operação da válvula.

O material mais indicado para fabricação da válvula é o aço mola, pois este material apresenta maiores capacidade de deformação elástica, porém para que a válvula fosse operada pelas pressões internas da câmara, a espessura do material deveria ser muito pequena, em torno de 0,15 mm, o que tornou a obtenção do material muito difícil. Desta forma vários materiais para válvula foram considerados e a decisão para o material ficou adiada para depois da fabricação, válvulas de vários materiais serão fabricadas e a que se apresentar a melhor opção será utilizada e testada em operação.⁴

O material escolhido para a placa de válvulas foi o aço inox 304 por ter contato direto com o interior da câmara de combustão. Quanto à espessura da placa de válvula, ficou decidido que esta seria escolhida após o dimensionamento e seleção da câmara de combustão, pois neste momento decidir-se-ia como conectar a placa de válvulas e a câmara de combustão, lembrando que esta conexão deverá ser de fácil desmontagem, para a manutenção da válvula.

4.1.3. Câmara de Combustão

Como dito anteriormente, ter uma grande câmara de combustão na frente de seu motor pulsojato não fará com que ele tenha maior potência, na verdade a câmara de combustão de um pulsojato poderia ser muito bem da mesma dimensão do tubo de exaustão, o único fator limitante a isso é o diâmetro necessário ao sistema de válvulas, e este diâmetro é geralmente maior que o do tubo exaustor.

Inicialmente o diâmetro mínimo para a câmara de combustão é dado pelo diâmetro do anel de furos D_F' mais o diâmetro de um furo D_F , que corresponde ao diâmetro do círculo que contém todos os furos

Porém, em uma câmara deste tamanho as pétalas da válvula raspariam pela parede da câmara atrapalhando seu funcionamento, então é necessário deixar um espaço entre a borda do furo e a parede da câmara, Simpson aconselha deixar uma área igual à área total de válvula em torno dos furos.

Assim a área da seção transversal da câmara de combustão A_C é dado por:

$$A_C = \frac{\pi * (D_F + D_F')^2}{4} + A_V, \quad (4.11)$$

E o diâmetro da câmara de combustão D_C é dado por:

$$D_C = \sqrt{A_C / \pi} \quad (4.12)$$

Tharratt em seus projetos não utilizava válvulas margarida e por isso seus motores não necessitavam de ter uma câmara de combustão de diâmetro maior que o exaustor, então em seus trabalhos não há nada que faça referência ao comprimento da câmara de combustão L_C .⁴

Entretanto, Schmidt, autor do projeto do Argus V1, em seus trabalhos diz: “durante a fase de admissão do ciclo de operação de um pulsojato, este, irá aspirar uma carga de ar novo igual a 15% a 20% do volume total do motor”.⁴

Então não há motivos para não projetar a câmara de combustão para que tenha 20% do volume total do motor V_T . O cálculo para o comprimento da câmara L_C se dá por:

$$V_C + V = V_T \quad (4.13.a)$$

Onde V é o volume do exaustor, logo:

$$V = 0,8 * V_T \quad \text{ou} \quad V_T = \frac{V}{0,8} \quad (4.13.b)$$

Substituindo (4.13.b) em (4.13.a), tem-se que:

$$V_c = \frac{V}{0,8} - V \quad \text{ou} \quad V_c = V/4 \quad (4.13.c)$$

Mas V_c também é:

$$V_c = A_c * L_c \quad (4.13.d)$$

Substituindo (4.13.d) em (4.13.c), tem-se finalmente que:

$$L_c = \frac{V}{4 * A_c} \quad (4.13)$$

Usando as fórmulas acima as dimensões para a câmara de combustão, área da seção transversal, diâmetro e comprimento da câmara são respectivamente:

$$A_c = 6,08 \text{ pol}^2 \quad \text{ou} \quad A_c = 3926,8 \text{ mm}^2$$

$$D_c = 2,78 \text{ pol} \quad \text{ou} \quad D_c = 70,7 \text{ mm}$$

$$L_c = 4,57 \text{ pol} \quad \text{ou} \quad L_c = 116,1 \text{ mm}$$

A espessura do tubo usado para a construção da câmara de combustão, usando as fórmulas (3.16) e (3.17), deve ser de no mínimo:

$$t_{min}^{cc} = 0,12 \text{ mm}$$

4.1.4. Sistema de Injeção e Combustível

Uma das grandes vantagens dos motores pulsojato é que estes podem ser projetados para funcionar com quase qualquer tipo de combustível. Os motores pulsojato não são limitados aos combustíveis líquidos ou gasosos, segundo Bruce Simpson pelo menos duas vezes poeira de carvão foi usada como combustível.⁴

Rumores indicam que os alemães realizaram tentativas de usar o pó de carvão como combustível quando o suprimento de combustíveis líquidos ficou escasso, próximo ao fim da Segunda Guerra Mundial, e alguns motores projetados por Reynst foram desenvolvidos especialmente para este combustível.⁴

Mesmo quando se trata de performance, o tipo de combustível utilizado não é de extrema importância. Segundo trabalhos publicados pela Universidade de Princeton em 1947, estes motores trabalham com quase todo tipo de combustível comum com variações desprezíveis de performance. A única diferença considerável entre os combustíveis são o aquecimento do corpo do motor e a rapidez de destruição da válvula.⁴

Os combustíveis mais usados são a gasolina, o GLP ou gases liquefeitos do petróleo (principalmente propano e butano) e o metanol ou álcool combustível.

A gasolina é o combustível de maior utilização nos motores pulsojato, pois apresenta grandes vantagens, entre elas, a de ser barata e de fácil obtenção, mas o que torna a gasolina um bom combustível é o fato de ela ser volátil, portanto se atomiza facilmente promovendo uma partida também mais fácil.

O uso do GLP se tornou mais freqüente devido à popularização de churrasqueiras abastecidas por propano, não comum no Brasil. Devido a estas churrasqueiras a obtenção de botijas de GLP se tornou mais acessível. A vantagem do uso do GLP é que por ser gasoso não há a necessidade de vaporizá-lo. As desvantagens são que o consumo deste combustível pelo motor é muito alto e no caso específico do Brasil o GLP fornecido é uma mistura de propano e butano. O problema é que em torno de 80% do volume é de butano, enquanto no exterior o GLP vendido para estas churrasqueiras é constituído em sua maior parte por propano. O butano contém menos energia e não produz tanta pressão como o propano tornando o uso mais difícil.

O metanol é também um bom combustível para ser utilizado e tem algumas vantagens sobre a gasolina, ele não é tão popular quanto a gasolina porque se gasta um maior volume de combustível para a mesma potência gerada e porque no exterior ele é mais caro que a gasolina.

O metanol pode ser usado com uma variação maior da mistura ar-combustível. Além de queimar de forma mais limpa o metanol também permite ao motor trabalhar a temperaturas mais baixas preservando a válvula por mais tempo. As desvantagens são que a queima do metanol produz vapor d'água, o que cria a necessidade de olear a válvula antes de guardar o motor para que ela não enferruje. O metanol também é higroscópico, ou seja, ele tende a absorver água, a absorção de água em demasia tornará a partida mais difícil.⁴

Outro fator importante a se observar no uso do metanol é a segurança, a chama produzida pela queima deste combustível é invisível, várias pessoas já se queimaram com as chamas do metanol por não ter-las visto.

A escolha do combustível não é o único fator importante a ser analisado, a forma que o combustível será fornecido ao motor também é muito importante. Basicamente existem duas formas de se fazer isso, através do sistema aspirado ou do sistema injetado.

Antes de se analisar os dois sistemas deve-se entender o conceito de vaporização. No funcionamento de qualquer motor de combustão interna abastecidos por combustíveis líquidos, não é propriamente o combustível na forma líquida que se queima, mas os gases que estes emitem que entrarão em combustão.

Assim ao abastecer um motor com combustível líquido é necessário que este seja vaporizado. A forma mais comum de fazer isto é criando-se um spray de forma que as gotas de combustível fiquem o quão menores possível, aumentando a área de contato entre elas e o ar e favorecendo sua vaporização.

Motores menores, por exemplo o Dynajet, tradicionalmente usam uma forma bem rude de carburador que usam o ar que está sendo admitido para criar um spray de combustível antes que ele chegue à câmara de combustão de forma que o ar que é admitido na câmara já é uma mistura ar-combustível.

Para que isso aconteça estes motores possuem um difusor de entrada que funciona como um venturi, o ar forçado por um bocal ganha velocidade e perde pressão, de acordo com Efeito Bernoulli. O combustível é fornecido neste difusor, o ar a baixa pressão aspira o combustível e a alta velocidade o atomiza antes deste entrar na câmara.

Pelo lado negativo a pressão negativa gerada pelo Venturi não é suficiente para aspirar o combustível de forma confiável, os motores pulsojato abastecidos desta maneira costumam ser muito sensíveis a posição do tanque de combustível, se o tanque estiver muito alto a quantidade de combustível fornecida é muito grande e acabar por afogar o motor, enquanto se o tanque estiver muito baixo a pressão negativa gerada pelo Venturi não é suficiente para aspirar o combustível. Até mesmo a variação do nível do combustível dentro do tanque pode ser suficiente para afetar a operação do motor.⁴

Uma maneira de evitar isto é fornecer o combustível através de um tanque pressurizado, desta forma o motor fica menos sensível ao nível do combustível.

Em motores maiores é de preferência que a injeção de combustível seja direta. Neste sistema o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão sob alguma forma de pressão, isso traz muito mais confiabilidade a operação e traz a possibilidade de se controlar o empuxo gerado pela quantidade de combustível fornecido.⁴

Neste tipo de sistema de injeção são utilizados alguns artifícios para vaporizar os combustíveis líquidos. O método mais comum é utilizar um bico injetor que direcione o jato de combustível para as paredes da câmara de combustão, assim, o combustível será imediatamente vaporizado pelo calor das paredes da câmara.⁴

Para este projeto foi decidido usar o GLP como combustível, evitando a necessidade de se vaporizar o combustível. A idéia inicial era usar GNV (gás natural veicular), mas o custo do sistema de injeção usando este combustível seria muito alto, mesmo para o sistema mais simples, que não funcionaria, pois, devido às altas pressões de armazenamento, quando o gás fosse liberado à pressão atmosférica ele seria congelado.

O uso de combustível gasoso quase que obriga a injeção direta, fazer a injeção através de um difusor de entrada pode causar o retorno do combustível e causar graves acidentes.

4.2. FABRICAÇÃO

4.2.1. Corpo

Há varias formas de construir o motor pulsojato, entre elas estão a construção por usinagem de um cilindro maciço nas formas do pulsojato, união das peças através de solda e a conformação de uma única chapa de metal pré-moldada na forma do motor e soldada por apenas um cordão de solda, essa união é feita da extremidade anterior até a extremidade posterior.

No presente trabalho a construção foi realizada através da união de três peças de aço inoxidável 304, material resistente a altas temperaturas sem a perda das suas propriedades mecânicas, sendo a câmara de combustão um cilindro vazado de três polegadas de diâmetro (76,2 mm), uma segunda peça na forma de cone para fazer a ligação da câmara de combustão com o tubo de escape dos gases, tendo esse tubo de duas polegadas de diâmetro (50,8 mm). Além desses cilindros e cone, foi utilizada uma chapa, também de aço inoxidável, para fazer um flange na extremidade do motor e permitir a fixação da placa de válvula posteriormente.

A união das peças foi feita com o processo de soldagem TIG, apenas variando os parâmetros de regulagem da fonte para cada parte do pulsojato a ser soldada. As correntes usadas para realização das soldas foram 60A corrente de base e 70A corrente de pico e as tensões foram 0,2V tensão de pico e 0,3V tensão de base.



Fotografia 5 - Câmara de combustão e tubo de exaustão dos gases.



Fotografia 6 - Processo de soldagem do tubo de exaustão dos gases.

4.2.2. Flange e Placa de Válvulas

Há várias formas de fazer a fixação da placa de válvulas no corpo do pulsojato, sendo a confecção de uma rosca interna no corpo e uma rosca externa na placa de válvulas a forma mais comumente encontrada nos pulsojatos comerciais. Entretanto, fez-se a opção de fixar a placa de válvulas ao corpo através flanges em ambas as peças.

Primeiramente foi feita a solda de uma chapa de aço inoxidável com dimensões maiores do que as da câmara de combustão na extremidade da mesma. Em seguida, houve a usinagem dessa chapa para fazer uma abertura de diâmetro igual ao da câmara de combustão, o que permitirá o fluxo de ar para dentro do motor.

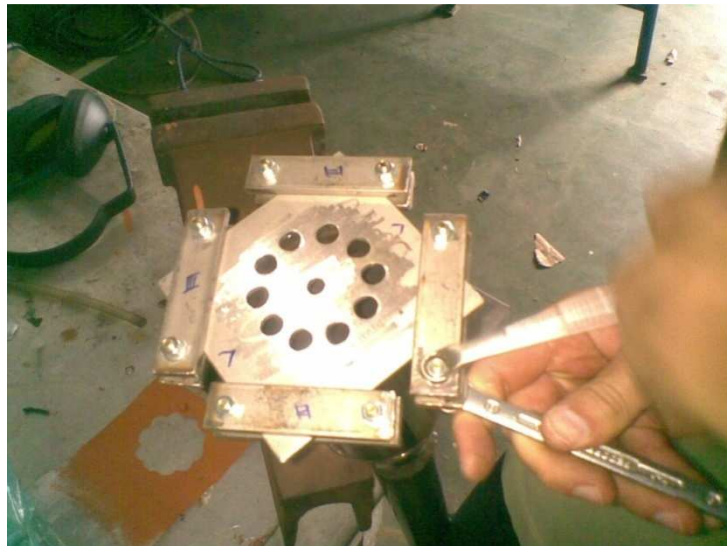
Com o flange feito, uma segunda chapa de aço foi colocada encostada no corpo do pulsojato e delimitou-se a área que a válvula deve cobrir. Após esse procedimento e com as formulas descritas na seção 4.1.2, fez-se o desenho dos furos que servem para passagem do ar comprimido.

Com uma furadeira de bancada, utilizando uma broca de aço rápido de 10 mm de diâmetro e uma morsa para fixação da chapa de aço, foram feitos dez furos que

posteriormente serão vedados com a válvula e mais um furo central para fixação da válvula na placa de válvulas.

A princípio a fixação da placa de válvulas no flange seria feita parafusando uma peça na outra. Entretanto, como os furos no flange não foram feitos antes da solda, não foi possível fazê-los após a soldagem do flange na câmara de combustão devida à têmpera realizada no mesmo, aumentando sua resistência e impedindo que os furos fossem feitos em uma furadeira com brocas de aço rápido.

Portanto, a união da placa de válvulas com o flange foi realizada utilizando-se duas tiras de aço inoxidável em cada vértice do flange, parafusadas uma na outra.



Fotografia 7 - Detalhe da fixação da placa de válvulas ao corpo do pulsojato.



Fotografia 8 – Placa de Válvulas

4.2.3. Válvula

Como citado anteriormente, a válvula pétala foi escolhida para esse projeto por ter construção mais simplificada e atender às necessidades do motor pulsojato de pequena escala. O procedimento utilizado foi retirado do livro “The Enthusiast’s Guide to Pulsejet Engines”, de Bruce Simpsom.⁴

O ideal é que a válvula tenha espessura de aproximadamente 0,1524 mm, mas cortar uma peça tão fina dessa mola pode ser problemático. O uso de tesouras é quase impossível para realizar o corte dessa folha de aço, visto que a válvula pétala possui muitas fendas finas e deve ser na forma de um círculo.⁴

Mesmo que se tenha cuidado e sorte suficientes para produzir válvulas de pétalas com tais ferramentas, a válvula resultante certamente possuirá áreas onde o metal foi dobrado ou apresentará rebarbas que propiciariam a rápida formação de trincas ou falhas prematuras. Portanto, a forma mais apropriada de se obter o formato complexo de uma válvula de pétalas é a utilização do ataque eletroquímico.

Pintando os dois lados do material a ser utilizado e riscando o formato da válvula onde foi pintado, torna-se possível gravar o metal exposto para que a válvula quase se desprenda da chapa onde foi gravada.

Há duas formas de fazer com que a válvula seja destacada da chapa de aço: ataque ácido e ataque eletroquímico. O ataque ácido não foi escolhido, pois há dificuldades em trabalhar com ácidos e esse tipo de ataque possui o efeito de expor rapidamente as arestas em corte. Isso significa que o ácido promove a corrosão do metal exposto muito rápido e então começa a atacar o metal que está sob a pintura. Como resultado disso, a válvula obtida provavelmente será mais fina do que o desejado e possuirá bordas irregulares propensas a queimar ou se partir.

Por comparação com o ataque ácido, o método de ataque eletroquímico requer nada mais do que uma bateria, pedaços de fio, um recipiente e um pouco de solução de sal de cozinha em água. Logo, esse método foi escolhido para a construção da válvula de pétalas.

Abaixo seguem os passos para se obter a válvula de pétalas utilizando esse método:

4.2.3.1. Preparação

O metal a ser gravado para a fabricação da válvula deve estar absolutamente limpo, sem vestígios de ferrugem ou graxa para que não se pinte em lugares errados.

Também é importante que o metal seja ligeiramente áspero para que a tinta possa aderir corretamente. Um polímero perfeito não propiciará à tinta boa fixação e ela poderá se soltar em grandes flocos.

Para obtenção dos melhores resultados, deve-se esfregar o material da válvula de pétalas com uma esponja de lã e sabão. Isso irá retirar todos os resquícios de graxa e alguns pontos de ferrugem. Deve-se enxaguar com água quente, tomando cuidado de segurar o metal pelas bordas para não deixar óleo das mãos no metal.

Após tais procedimentos, pode-se fazer um ataque ácido com pequena quantidade de ácido sulfúrico diluído. Isso é feito por imersão do metal em solução muito diluída (solução de bateria pode ser diluída por quatro partes de água). Ao colocar o metal na solução, pequenas bolhas deverão ser formadas. Retirá-lo em intervalos regulares e quando ele adquirir uma cor acinzentada enxaguá-lo em água quente novamente.

Esse ataque ácido proporcionará uma superfície melhor para aderência da tinta. Entretanto, se não houver ácido sulfúrico disponível, pode-se lixar os dois lados do metal com lixa 1200 levemente molhada. Isso irá promover à superfície uma rugosidade similar à adquirida com o ataque ácido e ajudará na adesão da tinta.

4.2.3.2. Pintura

O tipo de pintura e da forma de aplicação também será um fator crítico para a operação do ataque eletroquímico.

É recomendado não usar spray de baixa qualidade, pois a tinta pode esmaltar e não se fixar corretamente ao metal, mesmo que se tenha uma superfície áspera.

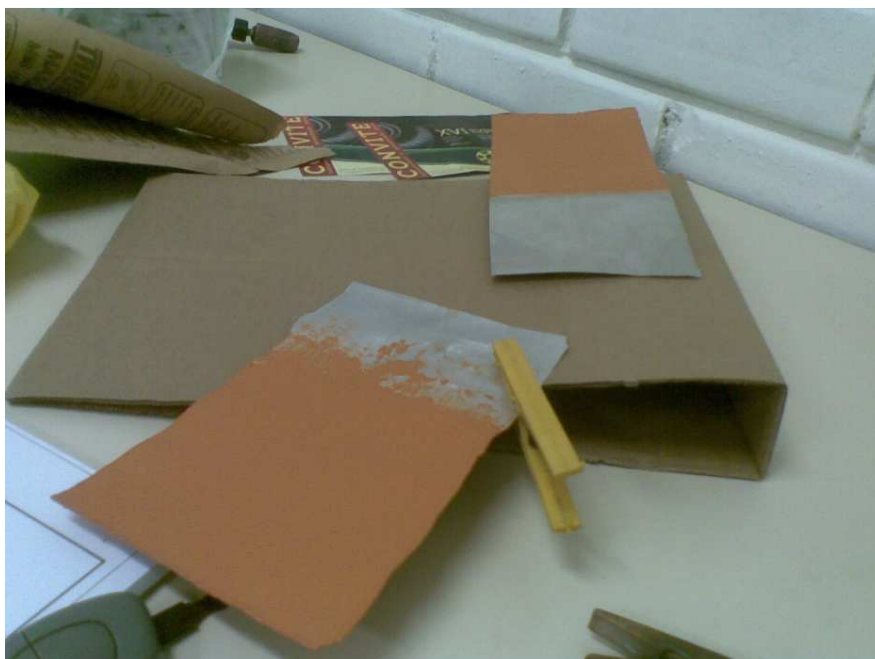
A tinta ideal a ser utilizada é a automotiva. Essas tintas são desenvolvidas para serem aplicadas diretamente no metal sem tratamento e podem ser obtidas em lojas de peças automotivas. Se possível, deve-se usar tinta branca, isso facilita o trabalho de se obter uma cobertura do que usando a cor cinza. Por praticidade, a tinta escolhida foi uma tinta esmalte, conhecida como zarcão de cor laranja, própria para a proteção contra corrosão em metais.

É necessário ter certeza de se obter um revestimento uniforme e espesso de tinta sobre o metal. Torna-se mais fácil a aplicação de tinta quando o metal encontra-se em posição horizontal sobre uma superfície plana. Isso evita que a tinta acumule em alguma parte do metal. Naturalmente, o outro lado do metal só poderá ser pintado quando o primeiro estiver seco. Após a execução desses passos, deve-se repetir o processo em toda a peça.

Não se deve aplicar apenas uma camada de tinta. Mesmo que todo metal pareça estar coberto, provavelmente existirão alguns furos muito pequenos que farão com que a válvula de pétalas apresente furos semelhantes. Uma segunda camada de tinta assegura que coisas desse tipo não acontecerão.

Outra razão para fazer a pintura em, pelo menos, duas camadas é que próximo do fim do processo de ataque eletroquímico é apenas a tinta que mantém o metal junto. Pintura insuficiente significa que a válvula começará a se romper prematuramente e isso pode causar o desprendimento da tinta a partir da superfície que não se deseja fazer o ataque eletroquímico.

É ideal que se deixe a tinta secar por uma noite. Mesmo que a pintura seja realizada com tinta de secagem rápida, uma camada de tinta muito fina tende a ficar ligeiramente plástica por algumas horas e isso pode causar irregularidades na superfície.



Fotografia 9 – Pintura das Folhas de Metal para Fabricação da Válvula.

4.2.3.3. Traçado

Com a peça de metal que fornecerá a válvula de pétalas coberta por uma sólida camada de tinta, é necessário marcar as linhas que darão o formato da válvula.

Pode-se desenhar e marcar o modelo da válvula de pétalas diretamente na peça de metal preparada, mas é recomendado que se faça um modelo para que as linhas possam ser traçadas corretamente e não estrague a peça preparada anteriormente.

Após o término da marcação, o brilho do aço sob a pintura deve ser visível onde as linhas foram traçadas. Todas as linhas devem ser precisas para que não haja uma “ponte” de metal que complicara a remoção da válvula a partir da folha de metal preparada.

NOTA: Apenas um lado da peça pode ser marcado para que não haja linhas não coincidentes entre os lados da peça, não permitindo que o ataque eletroquímico seja bem sucedido e haja a obtenção da válvula.



Fotografia 10 - Contorno da válvula na chapa de aço para fazer o ataque eletroquímico.

4.2.3.4. Gravura

Para esse procedimento, é necessário um recipiente grande o suficiente para submergir o material da válvula completamente enquanto o processo se realiza.

Deve-se preparar uma solução de sal de cozinha e água. Aproximadamente uma colher de sopa de sal por litro de água é o suficiente para o processo, a concentração da solução não é crítica. Precisa-se da quantidade de solução suficiente para encher o recipiente até o nível desejado, ou seja, cobrir toda a peça de metal.

Para montar a pilha de corrosão, faz-se necessário uma peça de aço inoxidável ou aço carbono comum para que esse atue como catodo da solução. Novamente, recomenda-se que a área do catodo seja a mesma da peça que sofrerá corrosão, embora isso não seja fundamental.

Próximo passo, é a obtenção de uma bateria 6-12V DC. Ela pode ser uma bateria de carro ou moto convencional, ou então, uma fonte de alimentação de tensão variável. Optou-se por utilizar uma bateria 12V DC automotiva disponível no Laboratório de Motores de Combustão.

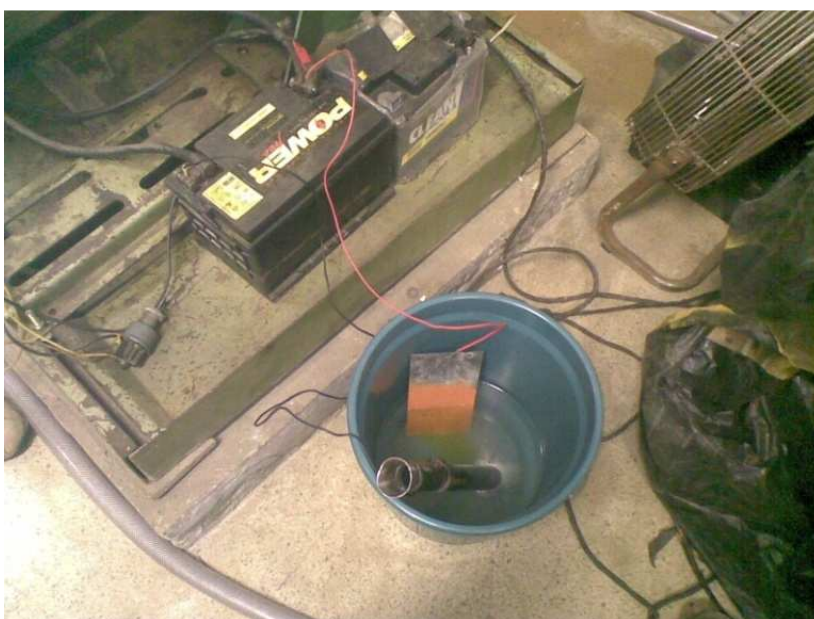
Deve-se conectar a placa no terminal negativo da bateria ou fonte de alimentação e colocá-la em um dos lados do recipiente imersa na solução de sal. No outro lado do

recipiente, coloca-se o metal preparado para ser a válvula de pétalas, garantindo que a face marcada com o modelo da válvula seja o anodo.

Deve-se ter o cuidado de certificar que as duas peças não se tocarão, mesmo se houver movimento de alguma delas. Uma forma eficiente de garantir que não haja o contato é colocar uma esponja entre elas. A esponja irá absorver a solução de sal e permitir o fluxo de corrente.

Conecta-se o material da válvula no terminal positivo da bateria ou fonte de alimentação. Deve-se incluir um resistor (oito ohms são suficientes) nesse terminal para limitar o fluxo da corrente no caso da utilização de um recipiente pequeno. Uma vez que tudo esteja corretamente conectado, surgirão bolhas na placa do catodo.

Nesta fase, a solução de sal continua clara. Esse processo tem tempo de ocorrência entre dez minutos e uma hora. Uma vez começado o processo, uma lama verde ou marrom se formará no topo da solução. Isso é o ferro removido das linhas marcadas. O processo ocorrerá mais rápido e os resultados serão melhores se a chapa da válvula for mexida esporadicamente. Esse movimento desaloja o óxido formado nas linhas marcadas e permite que a solução de sal alcance o metal nu e continue o ataque.



Fotografia 11 - Válvula sofrendo o ataque eletroquímico.

4.2.3.5. Procedimento Pós-Ataque

Uma vez que este estágio esteja completo, desconectam-se os fios da bateria e, cuidadosamente, pressiona-se a válvula de pétalas para fora da placa de metal. Provavelmente, existem algumas áreas onde o ataque não se completará totalmente, mas o metal nesses pontos estará bem fino e se destacará facilmente. É normal que as bordas apresentem pequenas irregularidades. Lava-se a superfície pintada com diluente adequado para esse tipo de tinta.

Para evitar rachaduras prematuras das válvulas utiliza-se uma lima para corrigir as bordas irregulares e torná-las lisas.

Teoricamente, pode-se reduzir o risco de rachaduras colocando a válvula em um forno a temperatura de 93,33°C (200°F) por uma hora ou mais. Esse processo é feito para retirar o hidrogênio que entrou na estrutura de metal da válvula durante o ataque. Hidrogênio na estrutura molecular causa “fragilização por hidrogênio”, o que faz com que o aço fique mais propenso às rachaduras. Não se fez necessário o tratamento térmico visto que a confecção das válvulas é rápida e o funcionamento do motor seria feito por períodos de tempo muito curtos para justificar tal procedimento na válvula.

Várias válvulas de diferentes materiais foram feitas visando a obtenção de um modelo final que apresentasse menores irregularidades e melhor flexibilidade. Foram utilizados aços e alumínio de diferentes espessuras, porém, o aço mola não foi utilizado devido à dificuldade de encontrá-lo no mercado com a espessura apropriada.

Quando confeccionada com materiais de maior espessura, a válvula não apresentou a flexibilidade necessária para abrir com a passagem de ar comprimido e sofria apenas deformação plástica. Portanto, optou-se por fabricar a válvula com latas de refrigerante de alumínio e aço.

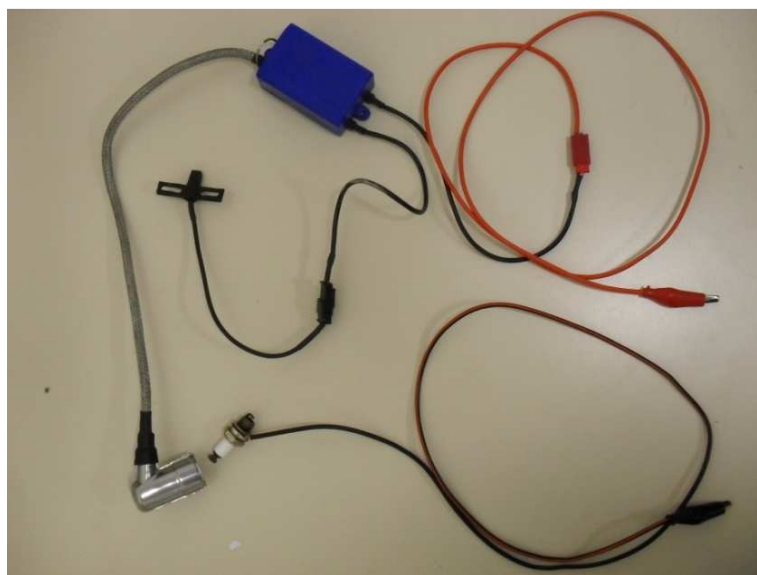
A válvula de aço apresentou uma elasticidade um pouco menor do que a válvula de alumínio, porém, mais apropriada ao uso no pulsojato, pois proporcionará melhor vedação quando houver a combustão na câmara e o aumento de pressão no seu interior.

4.2.4. Ignição

O sistema de ignição é utilizado para acionar a vela e gerar centelha em alta frequência e, conseqüentemente, fazer a combustão da mistura ar-combustível que entra no motor.

Existem vários sistemas de ignição e serão apresentados três tipos que foram propostos para o acionamento do pulsojato.

O primeiro tipo de ignição considerado foi um sistema de ignição utilizado em aeromodelos movidos por motores a gasolina. Esse sistema consiste em um módulo formado por um circuito e uma bobina internos ligados, em umas das extremidades, a uma bateria de 6V e a um sensor que determina a frequência da centelha gerada e a outra extremidade do módulo é ligada ao pólo positivo da vela. O pólo negativo da vela será, nos três casos, o contato da mesma com o corpo do pulsojato e esse será ligado à bateria. A frequência da vela é obtida pelo movimento rotativo de um ímã ligado à extremidade de um motor elétrico e cada vez que o ímã passa pelo sensor a bobina é ativada gerando uma corrente elétrica que aciona a vela. Esse sistema não foi escolhido porque o módulo responsável pela geração da corrente elétrica na funcionou durante o teste e não se sabe se já apresentava algum problema, visto que é um equipamento seminovo.



Fotografia 12 - Sistema de ignição utilizado em aeromodelos com motores a gasolina.

A segunda forma de ignição consistiu na construção do circuito elétrico para acionar a vela. Para esse circuito foram utilizados os seguintes materiais: um protoboard, um diodo, quatro capacitores, dois transistores, cinco resistores, um circuito integrado, uma bobina de ignição e uma fonte de 12V. O circuito foi montado conforme esquema abaixo, proposto por Bruce Simpson no livro “The Enthusiast’s Guide to Pulse Jet Engines”.⁴

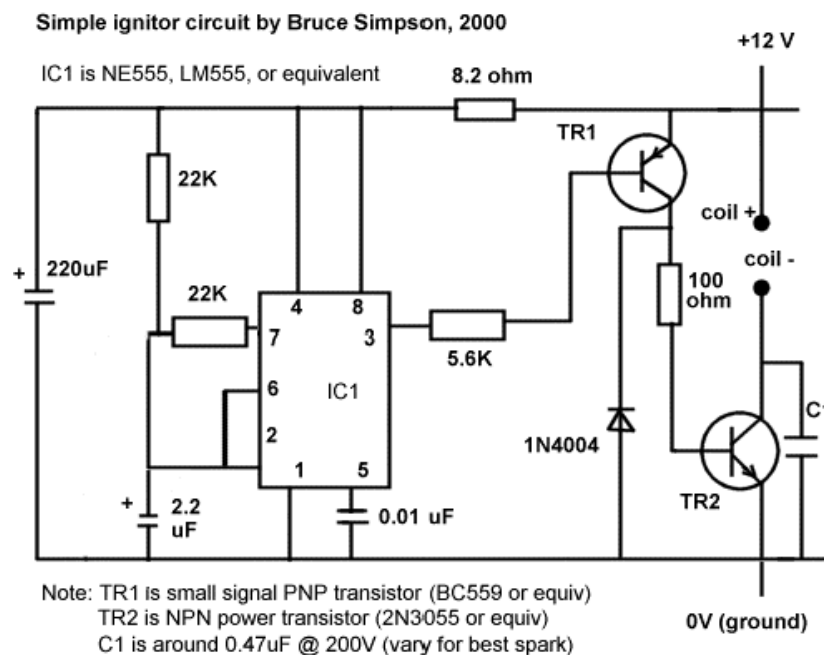
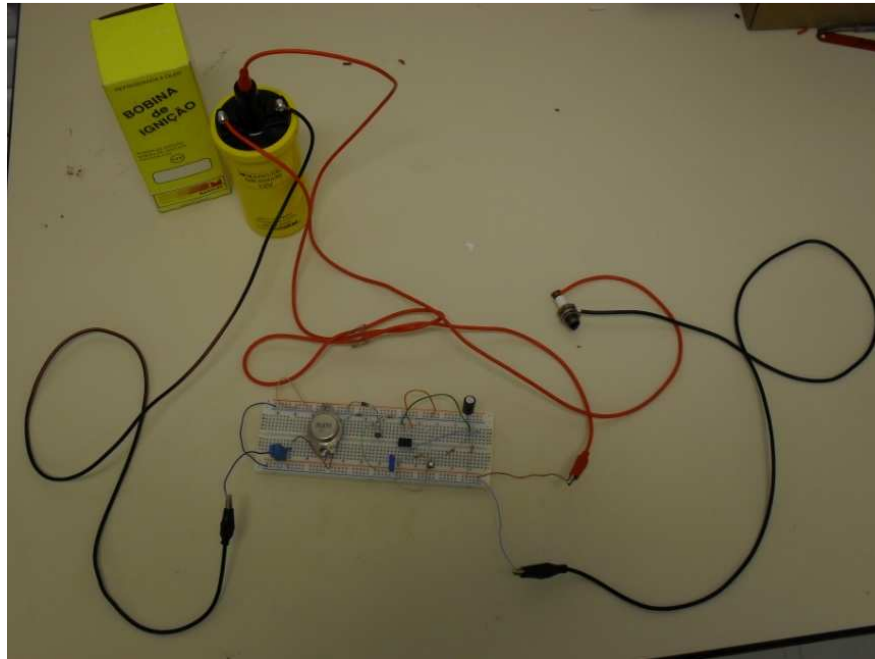


Figura 11 - Diagrama do Circuito Elétrico para Sistema de Ignição.

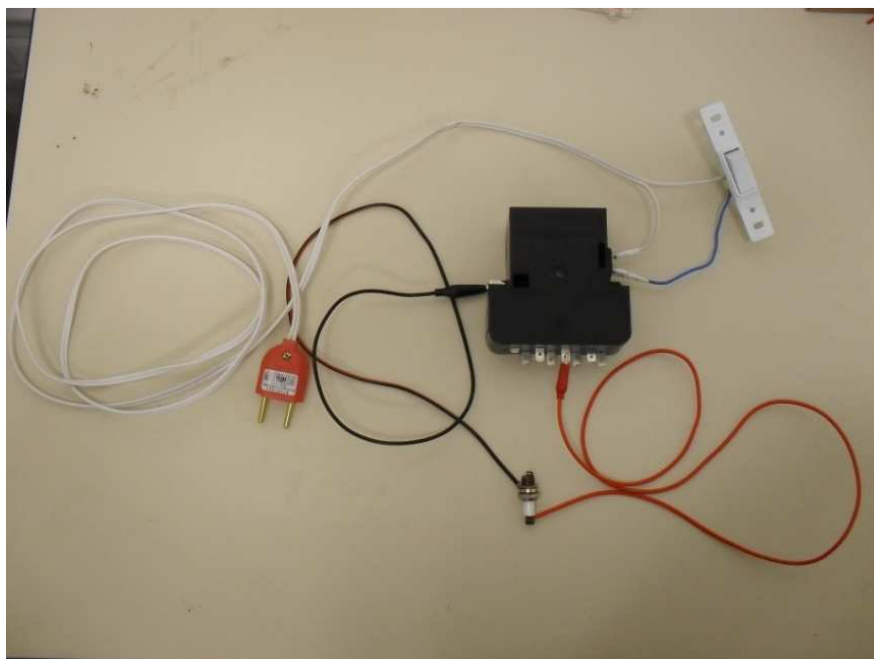
Fonte: The Enthusiast's Guide to Pulse Jet Engines.

A função desse circuito é fornecer “picos” de tensão à bobina, alimentando-a com frequência entre 5 a 8 Hz. Entretanto, esse circuito estava funcionando apenas para não deixar haver perda de tensão e alimentou a bobina constantemente. O circuito foi refeito muitas vezes e vários testes foram feitos para tentar solucionar o problema, inclusive professores da engenharia elétrica foram consultados, e constatou-se que o circuito integrado não estava atuando fornecendo a frequência desejada e esse sistema foi descartado.⁴



Fotografia 13 - Circuito elétrico para ignição da vela.

Como os métodos anteriores não foram eficazes, optou-se pela utilização de um acendedor automático de fogão doméstico. Esse tipo de sistema fornece frequência de funcionamento superior aos 8 Hz que seriam fornecidos pelo sistema anterior e é suficiente para se aproximar da frequência de funcionamento da válvula de pétalas. Apesar de ter-se considerado a frequência de operação do pulsojato durante o projeto, trabalhos publicados demonstram que a alta frequência de operação da válvula não é um fator determinante para a escolha da frequência da vela. Como exemplo, sistema de ignição com frequência de aproximadamente 1 Hz é indicado por Bruce Simpsons, além de métodos mais rústicos como a inserção de um pedaço de carvão no interior da câmara de combustão ou mesmo a utilização de um maçarico.



Fotografia 14 - Sistema para gerar centelha em fogões domésticos.

4.2.5. Injeção

Por estar no estado gasoso, o combustível pode ser inserido diretamente na câmara de combustão. Para tanto, foi feito um furo de diâmetro 12 mm na câmara de combustão e soldada, com o processo TIG usando corrente de 44A e tensão de 10,5V, uma união macho de aço inox para fazer a ligação do pulsojato com o recipiente de gás.

Para recipiente de gás foi usado um botija de gás de 20 litros (13 Kg) de GLP, a preferência do uso da botija maior foi devido à alta vazão de gás necessária ao funcionamento do motor.

Para a ligação entre o recipiente de gás e o motor foi adaptado um conjunto de maçarico para botija de gás. A parte do maçarico foi removida do conjunto aproveitando-se somente a mangueira e a válvula. O conjunto de maçarico possui uma válvula de agulha com conexão para a botija de gás, a válvula servirá para o controle de fluxo de combustível.

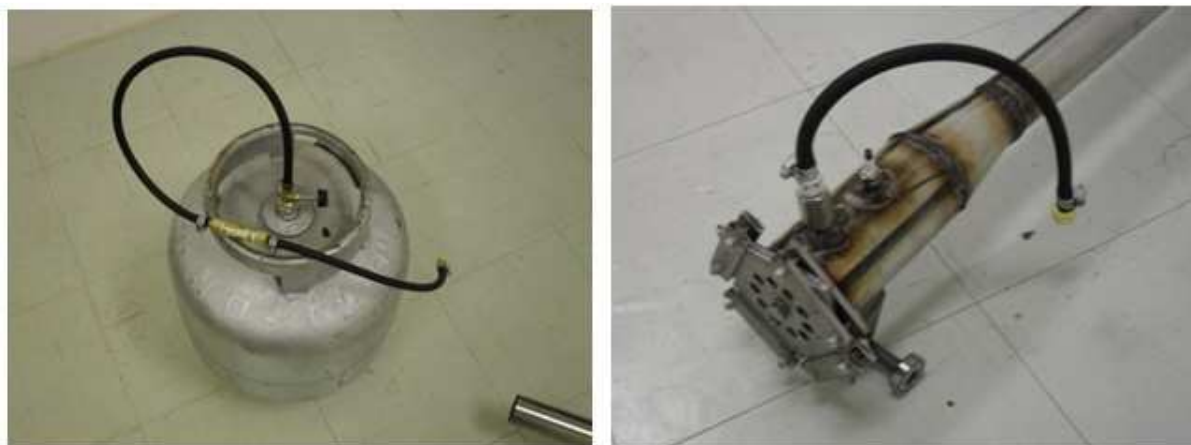


Fotografia 15 – Válvula de Agulha.

A mangueira do conjunto foi cortada ao meio e um conjunto de ligações com uma válvula de retenção usada em solda com gás acetileno foi inserida entre as duas partes. A válvula foi usada como medida de prevenção de acidentes, para evitar que a combustão dos gases pudesse retornar pela mangueira até o recipiente. A pressão do recipiente é suficiente para impedir que isso aconteça, mais existem casos de quando o fluxo é cortado a queda de pressão permite que a combustão atinja o gás ainda na mangueira. Esta válvula só permite a passagem do gás em uma direção e a uma pressão mínima.



Fotografia 16 – Válvula de Retenção.



Fotografia 17 - Sistema de injeção de gás.

Após o primeiro teste uma série de adaptações foram feitas para tentar funcionar o motor com gasolina. Uma lata de refrigerante feita de aço com o fundo e a parte superior removidos foi colada na placa de válvulas para servir de difusor de entrada. Um equipo de soro foi adaptado para ser usado como recipiente e dosador de combustível, o equipo possui um sistema que regula a quantidade de líquido que passa por ele. Um pequeno furo foi feito na lata para fixar o bico do equipo de soro.



Fotografia 18 - Sistema de injeção de gasolina com difusor improvisado.

4.2.6. Bancada

A bancada de teste foi projetada para que o empuxo gerado pelo motor pulsojato construído fosse medido. Para tanto, foi idealizado que o motor ficasse livre para se movimentar no eixo horizontal, mas restrito nas outras direções. A medição do empuxo será feita por uma mola, de modo que o deslocamento da mola será convertido em força segundo a Lei de Hook.

$$F_{el} = K * x \quad (4.14)$$

Com o objetivo de se evitar a necessidade de calibração e descobrimento do coeficiente de elasticidade da mola, um dinamômetro tubular, ou mais comumente chamado balança de mão, pode ser utilizado, a medição por este meio pode não ser precisa mas daria uma boa referência do empuxo gerado para comparação com o empuxo projetado.

Para permitir a movimentação do motor um sistema de rodas sobre trilhos será montado. Dois apoios transpassados por um eixo serão soldados a câmara de combustão e o mesmo será feito com somente um apoio próximo a extremidade traseira do motor. Pequenos rolamentos serão montados ao eixo servindo como rodas e trilhos de cortina aparafusados a uma mesa serão adaptados como trilhos, estes também terão a função de restringir o movimento lateral e vertical que o pulsojato possa vir a ter.

A bancada para teste de empuxo só será montada após o primeiro teste de operação, se este retornar um resultado positivo, ou seja, o motor entrar em operação, então o dinamômetro tubular será adquirido, ou se o custo deste equipamento for elevado a medição será feita com uma mola comum devidamente calibrada.



Fotografia 19 – Rolamento montado ao Motor.

4.3. TESTE

Após toda a fabricação e obtenção dos materiais necessários foi realizado um teste de operação. O teste tinha o objetivo de verificar se o motor entraria em funcionamento e quais os parâmetros necessários para que ele desse a partida, como a riqueza da mistura ar-combustível e a distância da mangueira de ar comprimido.

Para realização do primeiro teste o motor pulsojato foi montado bem preso a uma morça de 6 Kg, peso superior à capacidade de empuxo de projeto. O motor foi montado no lado de fora, as portas do laboratório e uma extensão foi trazida para fornecer energia elétrica ao sistema de ignição. Foi usado um compressor de ar presente no laboratório para fornecimento de ar comprimido.



Fotografia 20 – Montagem para o Primeiro Teste.

O teste foi montado do lado de fora por motivos de segurança, pois não deve trabalhar com gases combustíveis dentro de ambientes fechados. O teste também foi realizado em um horário em que não havia carros e pessoas transitando próximo ao laboratório. Os extintores de incêndio do laboratório estavam a disposição de pessoas que assistiram ao teste de distancia segura.

O procedimento usado para a realização seguiu esta ordem:

- 1) Acionamento da saída de ar comprimido;
- 2) Acionamento do sistema de ignição;
- 3) Abertura do fluxo de GLP.

Várias tentativas foram realizadas variando-se a mistura de ar-combustível, pela abertura da válvula de agulha e pela distancia da saída de ar comprimido.

Os mesmos testes foram feitos usando um sistema alternativo de ignição, velas de aniversário que soltam fagulhas iseridas na câmara de combustão substituíram o sistema original.

Um segundo teste foi feito usando a gasolina como combustível. Os mesmos procedimentos adotados na tentativa com o gás GLP foram usados neste teste. Nele a saída de ar comprimido foi posicionada com mais cuidado, pois o ar comprimido deveria atomizar a gasolina líquida que pingava do bico do equipo de soro.

Várias tentativas também foram feitas variando-se a quantidade de gasolina fornecida. O sistema de ignição alternativo foi usado novamente com o intuito de conseguir que o pulsojato entrasse em funcionamento.

5. RESULTADOS

O sistema de ignição testado desmontado do motor apresentou bom funcionamento, não foi possível medir a frequência de operação da vela, mas visivelmente ela superava a frequência de outros sistemas indicados na literatura.

O sistema de injeção foi testado para se verificar se a pressão do recipiente era suficiente para permitir a abertura da válvula de retenção. O teste mostrou que mesmo com pequenos fluxos de combustível, válvula pouco aberta, a pressão era suficiente.

Os resultados obtidos no primeiro teste de operação não foram positivos. Em poucas tentativas o gás entrou em combustão foi usado o sistema de ignição alternativo com as velas de aniversário, mesmo assim o gás simplesmente entrou em processo de queima sem gerar uma pressão positiva dentro da câmara suficiente para que o motor iniciasse a operação.

O segundo teste de operação, usando a gasolina como combustível , o motor não entrou em operação em nenhuma das tentativas. Nenhum dos dois sistemas de ignição utilizado foi capaz de inflamar a gasolina.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes realizados apontam que alguns fatores foram responsáveis pela obtenção de resultados negativos. Tais fatores são a mistura ar-combustível, a vela e a válvula.

Quando foi utilizado gás como combustível, a falta de ignição pode ser resultado de uma mistura muito rica ou muito pobre de oxigênio. Não atingindo a mistura ideal, mesmo quando o gás inflamou, não foi gerada pressão suficiente para empurrar a válvula para a posição fechada e para a expulsão dos gases pelo exaustor, não dando início ao ciclo de operação do motor.

Outro provável motivo do não funcionamento vem do fato de o GLP ser constituído em maior parte por butano que, como indicado por Bruce Simpson, gera menos pressão que o propano, em um motor de difícil partida tal fato pode ter contribuído em grande parte para a obtenção de um resultado negativo.

Com a utilização da gasolina a dificuldade de obter a mistura ideal também pode ser a razão para tal resultado. É provável que o combustível não tenha sido vaporizado corretamente e, mesmo que o ar comprimido tenha atomizado a gasolina e levado-a até a válvula, quando há o contato entre válvula e combustível, a gasolina é condensada e escorre pela válvula entrando na câmara de combustão na forma líquida. Mesmo que parte da gasolina tenha chegado vaporizada ao sistema de ignição, ela não foi suficiente para entrar em combustão.

O uso da ignição alternativa apresentou melhores resultados do que a ignição projetada. O motivo para isso foi que a vela utilizada tem dimensões inferiores à que deveria ser usada, pois ela não penetrou o suficiente na câmara de combustão diminuindo a quantidade de combustível em contato com a centelha. No caso da ignição alternativa, a vela foi colocada no interior da câmara de combustão e as faíscas geradas tinham maior contato com o combustível que adentrava a câmara.

Desde a concepção da válvula esperava-se que ela pudesse apresentar problemas durante o funcionamento, visto que não foi construída com o material mais apropriado, aço mola. Entretanto, não é possível se o material utilizado na construção da válvula afetou seu funcionamento. Se afetou, foi devido à falta de

flexibilidade das pétalas. Nesse caso, a mistura ar-combustível pode ter atingido proporções ideais e gerado a pressão suficiente para fechar a válvula, mas devido a essa falta de flexibilidade, a válvula construída não operou corretamente.

Através dos resultados obtidos, pode-se verificar que, apesar de ser um motor de simples construção, o motor pulsojato apresenta detalhes construtivos que podem impedir seu funcionamento se não forem bem dimensionados e construídos ou mesmo se os processos para fazê-lo funcionar não forem totalmente dominados por seus operadores.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Solução dos problemas apresentados nas Considerações Finais e realização dos testes propostos.
- Comparação do empuxo gerado por um motor pulsojato com o empuxo obtido experimentalmente.
- Teste de performance de um motor pulsojato para diferentes modelos de válvula e válvulas de diferentes materiais.
- Montagem de uma bancada de testes com instrumentos de medição de pressão e temperatura e realizar uma comparação entre os valores teóricos calculados neste projeto com os valores reais.

7. REFERENCIAS

1. HEKIRI , Haider. **Parametric Cycle Analysis For Pulse Detonation Engines**. 2005. 64f. Dissertação (Mestrado de Ciencias em Engenharia Aeroespacial) - Under the direction of Dr. Frank Lu. The University of Texas at Arlington, Arlington. Disponível em: <http://arc.uta.edu/publications/td_files/HaiderHekiri.pdf>. Acesso em 28 jun. 2010.
2. SCHOEN, Michael Alexander. **Experimental Investigations in 15 Centimeter Class Pulsejet Engines**. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado de Ciencias em Engenharia Aeroespacial) - Under the direction of Dr. William L. Roberts. North Carolina State University, Raleigh, NC, 2005. Disponível em: <<http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-08082005-095911/unrestricted/etd.pdf>>. Acesso em 28 jun. 2010.
3. FELIX, Anderson B.; ROCON, Leonardo Q. **Modelo Matemático do Processo Termodinâmico de um Motor Pulso Jato**. 2008. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica), UFES – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.
4. SIMPSON, Bruce. **The Enthusiast's Guide to PULSEJET ENGINES**. 2005. Disponível em: <<http://www.aardvark.co.nz/pjet/>>. Acesso em: 28 jun. 2010.
5. CECCON, Guilherme B. **Projeto e Desenvolvimento de um Motor Pulso Jato**. 2009. 11f. Relatório de iniciação científica, Engenharias, CNPq, UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.
6. SHAPIRO, Ascher H.; SHAPIRO, Ralph Ed. **The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow**. Florida. John Wiley & Sons. 1982.
7. BUFFONI, Salete Souza de Oliveira. **Vasos de Pressão**. Volta Redonda. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, UFF – Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <<http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula15.pdf>>. Acesso em 28 jun. 2010.
8. HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. Trad. Joaquim P. Nunes. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

9. FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2001
10. _____; _____. _____. 6. ed. 2006.
11. MIRAGLIA, José. **Conhecendo o PULSO JATO**. Disponível em: <<http://www.foguete.org/silverjet/artigo.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2010.
12. _____; **manual_pulsajato**. 2004. Disponível em: <<http://www.foguete.org/silverjet/manual.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2010.
13. MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Trad. Francesco Scofano Neto. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
14. OGORELEG, Bruno. **Blast Compression Valveless Pulsejet Engine**. Disponível em: <<http://www.pulse-jets.com/download/pulsejet-drawing/bcvpe.pdf>>. Acesso em 28 jun. 2010.
15. _____; **Valveless Pulsejet Engines 1.5**: a historical review of valveless pulsejet engines. Croácia. 2005. Disponível em: <http://www.pulse-jets.com/download/inside_pj,%20bruno%20ogorelec.pdf>. Acesso em 28 jun. 2010.
16. WESTBERG, Frederick. **Inside the pulsejet engine**. 2000. Disponível em: <http://www.pulse-jets.com/download/inside_pj,%20westberg.pdf>. Acesso em 28 jun. 2010.
17. WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 6ª edição americana. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.