



Fundação Universidade Federal do ABC

Pró reitoria de pesquisa

Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP 09210-580

Bloco L, 3ºAndar, Fone (11) 3356-7617

iniciacao@ufabc.edu.br

Relatório Final de  
Iniciação Científica referente ao  
Edital: 2019.1

PERFORMANCE DE PLACA INJETORA UNLIKE PENTAD APLICADA EM MICRO MOTORES  
FOGUETES BIPROPELENTES

**Título do projeto:**

**Palavras-chave do projeto:** Propulsão de Foguetes, Injetores.

**Área do conhecimento do projeto:** Propulsão Aeroespacial

**Bolsista:** Sim. Bolsa PIC

São Bernardo do Campo

30 de Setembro de 2020

## Sumário

1 Resumo	1
2 Introdução	1
3 Fundamentação teórica	3
3.1 Unlike Impingement Doublets, Triplets, Quadlet e Pentad	5
3.2 Design e atomização dos injetores	6
3.3 Injetor Unlike Pentad	7
4 Metodologia	9
5 Resultados	9
6 Conclusão	11
Referências	12

## 1 Resumo

Em motores foguetes líquidos a atomização de fluidos está diretamente relacionada com o uso de um correto injetor, pois uma boa atomização resulta em melhorias de desempenho e eficiência do motor. Comumente, utilizam-se injetores de impacto, pois apresentam rápida e eficiente mistura dos propelentes escolhidos, desde que seja respeitada uma combinação apropriada entre geometria da placa injetora e condições de trabalho.

Portanto, para que tal combinação seja alcançada, validações experimentais são altamente requeridas para a formulação de uma placa injetora de design eficiente. Sendo assim, o presente trabalho consiste no estudo e projeto de um protótipo de uma placa injetora do tipo Unlike-Impinging Pentad para o uso em micro motores foguetes bipropelentes de baixo empuxo, de 5 a 50N, no qual testes poderão ser realizados para investigações de desempenho e validação da geometria proposta.

Para os testes, projetou-se um conjunto de três placas denominadas P1, P2 e P3 com o intuito de testar, em um mesmo ângulo de impacto, diferentes combinações de áreas dos orifícios injetores e diferentes valores de queda de pressão nos injetores. O projeto conta também com a criação de um cabeçote de apoio, em que se acoplam as placas injetoras para os testes. Os cálculos para o dimensionamento destas peças foram realizados tomando como partida definições realizadas com o estudo de injetores e dados em literaturas.

## 2 Introdução

Durante anos, estudos sistemáticos para a criação de novas tecnologias de aperfeiçoamento de foguetes, trouxeram novas condições que permitiram grandes missões espaciais, desde a possibilidade de colocar satélites em órbita como também grandes missões que levaram o homem ao espaço. Grandes incentivos foram dados aos estudos de motores foguetes, principalmente os líquidos, responsáveis por entregar a energia necessária para tirar do chão tais foguetes que pesam toneladas. O desafio de gerar enormes quantidades de potência destes motores, com a garantia de excelente funcionamento e estabilidade, exigiu muita dedicação de pesquisadores da área. Um exemplo desse fato são os motores Redstone e Navaho, da década de 50, que quando comparados a sucessores como F-1 utilizado no Saturn V ou até SSME (Space Shuttle Main Engine), observa-se um grande salto de tecnologia e engenharia [HUZEL, 1967].

Motores foguete líquidos utilizam propelentes líquidos como fonte energética. Estes motores podem ser projetados como monopropelentes, utilizando apenas um propelente líquido, ou só o combustível, como também podem ser bipropelente, alimentados com dois componentes líquidos, um combustível e um oxidante apropriado. Estes propelentes são injetados dentro da câmara de combustão por dispositivos chamados injetores. Tais dispositivos são de grande importância para motores líquidos pelo fato de controlarem a quantidade em massa injetada, como também proporcionar uma adequada mistura, no caso de motores bipropelentes, entre o combustível e o oxidante [SUTTON, 1992]. Uma má distribuição de propelentes dentro da câmara de combustão pode gerar problemas de instabilidade de combustão, ocasionando perda de desempenho destes motores [HUZEL, 1992].

Motores bipropelentes são projetados para que recebam os propelentes a uma taxa fixa de massa de oxidante para uma massa de combustível e que ambos se misturem dentro da câmara de combustão de forma eficiente, diferentemente dos monopropelentes, que não precisam de mistura de propelentes, entretanto há a necessidade de regular a quantidade em massa injetada. Deste modo, existem vários tipos de injetores com funções de mistura diferentes, como os exemplificados na Figura 1, que são: a) unlike-impinging, b) like-impinging, c) shower-head nozzle e d) swirl nozzle injector.

O injetor tipo shower-head nozzle (c), tem como função injetar tanto combustível como oxidante sem que estes se colidam, deste modo, ambos os propelentes entram em jatos paralelos na câmara de combustão e uma nuvem de vapor de cada líquido propelente se cria dentro da câmara de combustão, formando a mistura.

Embora as categorias unlike-impinging (a) e like-impinging (b) injetem os dois jatos de forma que haja colisão entre os jatos para que ocorra uma mistura mais rápida, ambos apresentam formas diferentes de injeção. Para o unlike-impinging combustível e oxidantes são aplicados com certo ângulo, de forma que seus jatos colidam e se misturem. O like-impinging usa o mesmo método, porém a colisão é entre combustível-combustível e oxidante-oxidante [HUZEL,1967].

O quarto caso de injetor, o tipo swirl nozzle injector, utiliza uma técnica de injeção diferente, direcionando os propelentes para o lado da câmara de combustão. Esta técnica proporciona uma rotação rápida dos vapores ao redor da parede curva da câmara, assim os propelentes se misturam de forma mais eficiente [HILL,1992].

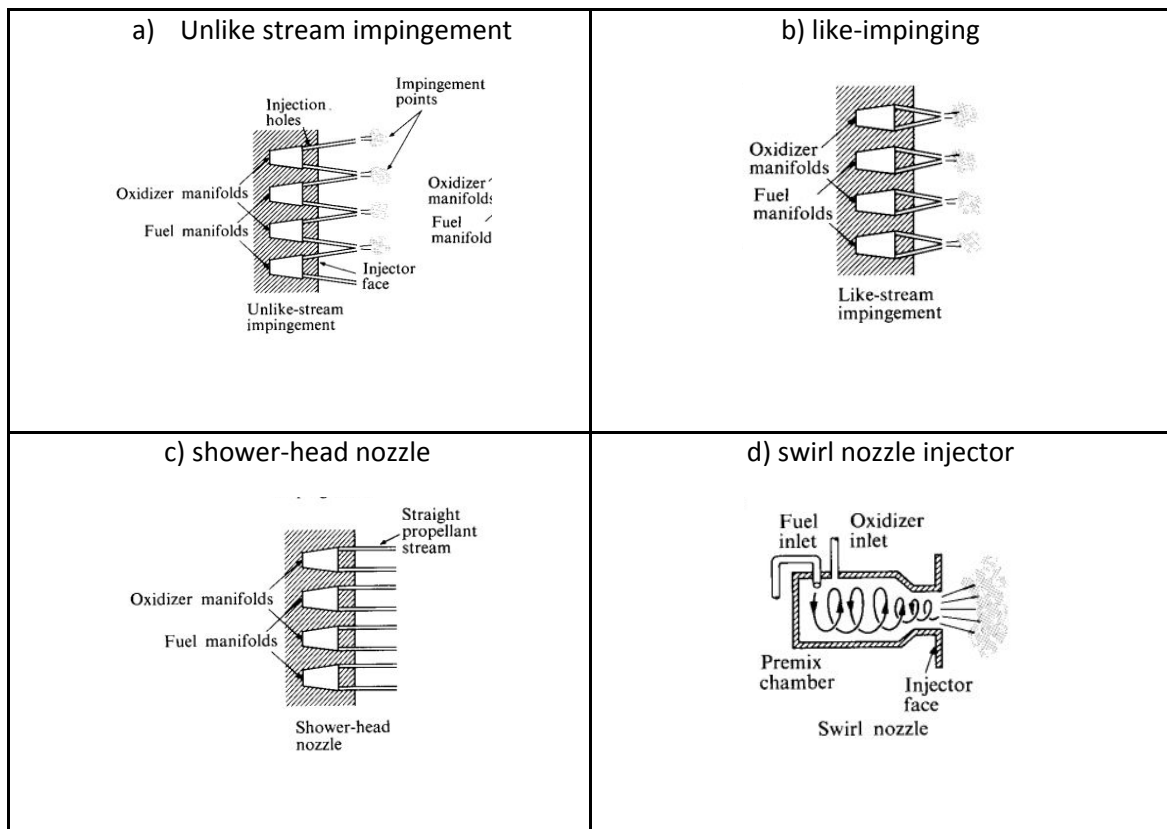


Figura 1 - Tipos de injetores de propelentes para motores foguete líquidos (HILL 1992).

Assim, diante da evidência de que injetores são componentes fundamentais em motores-foguete, conclui-se que estudos e análises experimentais de seu funcionamento proporcionam a capacitação e conhecimento aplicado na área de engenharia aeroespacial. Portanto, com o intuito de compreender os fenômenos envolvidos em injetores, entender o funcionamento e avaliar os efeitos de atomização de líquidos, o presente trabalho tem como principal objetivo projetar, construir e testar protótipo de placa injetora de bipropelentes do tipo Unlike-Pentad.

### 3 Fundamentação teórica

Os injetores são um dos principais dispositivos para um excelente funcionamento de um motor foguete, cuja finalidade é despejar os propelentes líquidos atomizados dentro da câmara de combustão, tanto em motores mono/bipropelentes líquidos como híbridos, para que ocorra a combustão. Estes dispositivos são dimensionados para fornecer a quantidade de vazão mássica dos propelentes na quantidade correta, especificado pela razão O/F (oxidante e combustível), que é um parâmetro importante de projeto de motor [SUTTON, 2016].

A injeção dos propelentes tem como objetivo atomizá-los, garantindo a combustão rápida e eficiente. A atomização é o processo de formação de minúsculas gotículas do propelente para fácil, rápida e homogênea resposta de reação de combustão [NURICK, 1976]. Para o caso de motores bipropelentes, os injetores têm também a função de mistura de oxidante e combustível. A atomização neste caso ocorre do impacto dos jatos de líquidos provenientes da saída dos injetores, que se quebram em pequenas gotículas. Esta quebra do jato em pequenas gotículas é gerado por diminutas perturbações, sendo estas, flutuações de pressão, velocidade, temperatura e consequentemente flutuações em propriedades dos fluidos, como viscosidade e tensão superficial [ASHGRIZ, 2011].

Apesar das flutuações de velocidade e pressão que ocorrem e que são características de escoamentos turbulentos, que são complexos por serem aleatoriamente instáveis, o estudo do processo de atomização por injetores pode ser realizado e simplificado pelo uso de parâmetros adimensionais da mecânica dos fluidos. No processo de atomização as forças de interesse são as forças inerciais, viscosas e de superfícies. Os números de Reynolds, de Weber e de Ohnesorge relacionam essas forças e são apresentados nas Equações 1, 2 e 3, respectivamente [SIRIGNANO, 2010].

O número de Reynolds relaciona as forças inerciais com a forças viscosas presentes um escoamento permanente de um fluido em um superfície, expresso pela Equação 1. Devido a viscosidade dos propelentes injetados e a dimensão pequena dos injetores, é favorável a ocorrência de uma escoamento turbulento, o que auxilia na otimização do fluido. Sendo  $l$  a largura característica do escoamento, comumente relacionado ao diâmetro interno por onde ocorre o escoamento.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1)$$

O número de Weber, presente na Equação 2, por sua vez relaciona as forças inerciais com as forças de tensão superficial do fluido. Este é um indicativo da existência de ondas capilares na superfície de um líquido. A atomização de

propelentes ocorre pela quebra da folha de líquido gerada pelo impacto dos jatos, que transforma-se em gotículas de líquidos.

$$W_e = \frac{pV^2L}{\sigma} \quad (2)$$

A relação entre estes dois parâmetros, expressa a relação entre as forças inerciais e superficiais, Equação 3, denominada pelo número de Ohnesorge. Sendo  $\sigma$  a tensão superficial do fluido.

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{p\sigma l}} \quad (3)$$

Injetores são constituídos de orifícios de diâmetro pequenos por onde o propelente é descarregado. Uma vez que dentro da câmara de combustão sua pressão é alta, há a necessidade de que a pressão de injeção na placa injetora seja maior. Como referência, SUTTON [SUTTON 2016] recomenda como uma boa iniciativa, uma pressão de injeção de 20% maior que a pressão da câmara de combustão. Para fim de cálculos de injeção dos propelentes, tomando um escoamento teórico permanente do fluido, a equação de Bernoulli com correção de perda de carga por viscosidade descreve a velocidade de descarga, bem como a área do orifício, expressos pelas Equações 4 e 5 respectivamente [FAROKHI, 2014].

$$V_{descarga} = Cd \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

$$A_{descarga} = \frac{\dot{m}}{Cd \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P}} \quad (5)$$

Sendo  $Cd$  o coeficiente de descarga, um parâmetro de engenharia essencialmente empírico, o que relaciona a vazão mássica empírica com a teórica ( $\dot{m}/\dot{m}_{teórico}$ ), corrigindo as perdas dentro do injetor. A existência deste parâmetro está relacionada com a viscosidade do fluido descarregado em escoamento turbulento, bem como a geometria e a rugosidade da superfície interna do orifício que alteram o campo de velocidade dentro do orifício [ATYAM, 2017].

Com a entrega de propelentes pela placa injetora, pode-se ocorrer um efeito a certas condições, em que a área de vazão do jato líquido é menor que a área do orifício de descarga. Fenômeno tal conhecido como “Vena Contracta” [SCHMIDT, 1995]. Ao parâmetro de relação entre estas áreas é dado o nome de  $Cc$ , coeficiente de contração ( $A_{vazão}/A_{orifício}$ ). Deste modo, a diferença de área implica diferença na velocidade de escoamento, relacionado pelo  $Cv$ , coeficiente de velocidade ( $V_{vazão}/V_{orifício}$ ). O fenômeno de Vena Contracta é indesejável em injetores, o que reduz a vazão dos fluidos bem como gera instabilidades ao motor e perdas energéticas no escoamento [HUANG, 1992]. Para alguns casos específicos deste efeito de contração, a pressão na entrada do orifício do injetor pode estar menor que a pressão vapor dos propelentes, ocasionando cavitação<sup>1</sup>. Com o intuito de reduzir este caso que aumentar

<sup>1</sup> Efeito marcante no escoamento de fluidos, devido a formação de bolhas, indesejáveis, responsáveis pelo desgaste nas superfícies de contato com o escoamento do fluido [SCHMIDT, 1995]

o  $C_d$ , se faz necessário a mudança de design na entrada do injetor, como ilustra a Figura 2. Rebaixando a entrada ou até arredondando-a, aumenta a vazão a fim de aproximá-la a teórica.

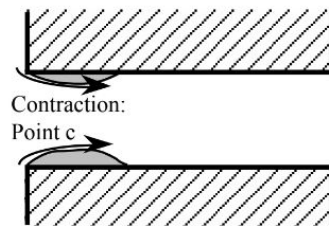


Figura 2 - Formação de Vena Contracta, em decorrência do campo de velocidade e geometria de entrada do injetor [SCHMIDT, 1995].

### 3.1 Unlike Impingement Doublets, Triplets, Quadlet e Pentads

O uso de injetores de colisão de jatos é altamente utilizado para a mistura rápida e eficiente de propelentes [HUANG, 1992]. Tanto o oxidante, quanto o combustível, exemplificados na Figura 3, são injetados de forma angulada para que ocorra a colisão dos jatos. Há diferentes configurações para injetores de impacto, variando apenas a quantidade de jatos e a ordem de impacto. Injetores Unlike Doublets trabalham com impacto de um jato de combustível e um de oxidante. Similar a este, Unlike Quadlet usa o impacto entre dois jatos de combustível mais o impacto entre dois jatos de oxidante. Diferente deste, Unlike triplet utiliza a configuração de dois jatos de oxidante para um jato central de combustível. Usualmente estas três configurações são mais utilizadas em motores foguetes [NURICK, 1976].

A configuração Unlike Pentad faz uso de quatro jatos de oxidante para um central de combustível. Este último não tão usual, é ainda alvo de grandes estudos devido sua complexidade em prever os resultados dos impactos dos jatos. Entretanto há diferentes estudos que afirmam condições para gerar alta performance em mistura. Inúmeras formas de montar um injetor de impacto são possíveis, entretanto com o aumento do número de jatos de oxidante para um de combustível, menor é a eficiência na atomização dos propelentes, podendo resultar em instabilidades para o motor. Devido a isso suas aplicações são reduzidas [HUANG, 1992].

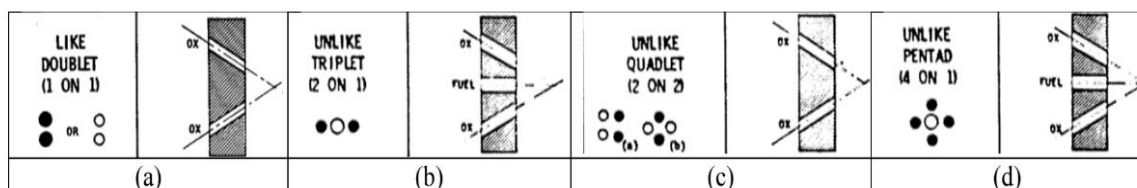


Figura 3 - Configurações de injetores de impacto. (a) Like Doublet com impacto de combustível com combustível, o mesmo para oxidante. (b) Unlike Triplet com impacto de dois jatos de oxidante para um central de combustível. (c) Unlike Quadlet em duas configurações, impactos paralelos e cruzados. (d) Unlike Pentads com 90° graus entre os oxidantes. [NURICK, 1976]

### 3.2 Design e atomização dos injetores

A forma mais simples de uso dos injetores de impacto é a configuração Unlike Doublet. Com o impacto dos jatos cria uma folha líquida, que desta forma, por conta de instabilidades ocasionadas por distúrbios, esta folha vibra e quebra-se, formando pequenas gotículas que se dispersão, como mostra Figura 4. As vibrações, efeitos característicos em função das oscilações de momento no fluido bem como a tensão superficial, podem ser observadas a partir de um valor crítico do número de Weber [ASHGRIZ, 2011].

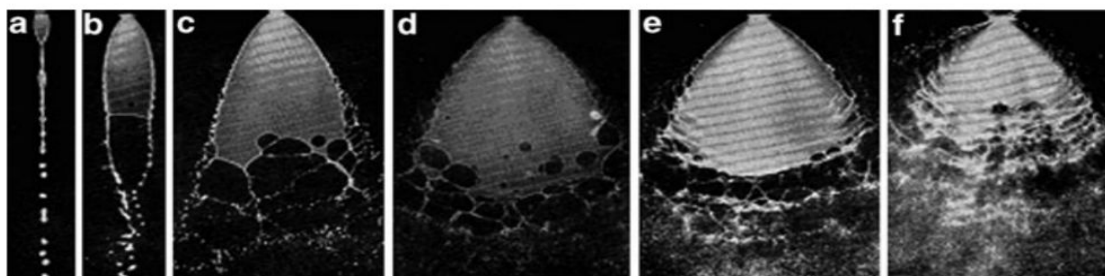


Figura 4 - Formação da folha líquida a partir do impacto de dois jatos de fluidos. Da figura a adiante ocorre o aumento do *número de Weber* bem como de *Reynolds*, resultando na formação de ondas na folha líquida e consequentemente sua quebra a liberação de gotículas [ASHGRIZ, 2011].

Com alto valor de  $Reynolds^2$  a atomização e, consequentemente, a mistura dos propelentes se torna ainda mais eficiente. Com o aumento da queda de pressão na injeção dos propelentes dentro da câmara de combustão, mais rápida é a formação de gotículas, devido ao fato do aumento da velocidade de descarga. Para o design de um injetor de impacto, do tipo Unlike, se faz uso do cálculo do momento de injeção. Com referência à linha normal da placa injetora, conforme esquema mostrado na Figura 5, o momento de impacto na direção X-Y é expresso pelas Equações 6 e 7 [FAROKHI, 2014]. Estas equações, características de um Unlike Doublets, expressam os momentos de dois jatos antes e depois impacto, nas coordenadas X e Y. Para mensuração de outros tipos de injetores, como Unlike Triplet, Quadlet e Pentad, há a necessidade da adição dos momentos dos demais jatos.

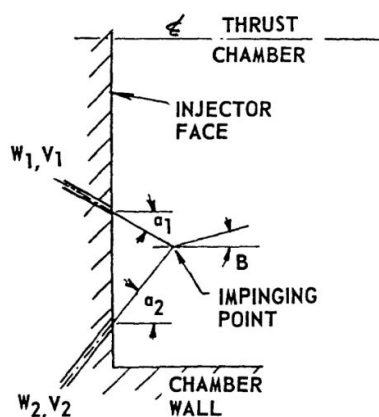


Figura 5 - Esquema de injeção por impacto em motores foguete líquidos. Representação da placa injetora e os ângulos de impacto [HUANG, 1992].

<sup>2</sup> Acima de 2300 é considerado escoamento turbulento para tubos. Entretanto, podendo ser postergado, dependendo do projeto [WHITE, 2011],



$$\dot{m}_c v_c \cos \theta_c + \dot{m}_o v_o \cos \theta_o = (\dot{m}_c + \dot{m}_o) v_r \cos \Omega \quad (6)$$

$$\dot{m}_c v_c \sin \theta_c + \dot{m}_o v_o \sin \theta_o = (\dot{m}_c + \dot{m}_o) v_r \sin \Omega \quad (7)$$

Sendo  $\theta_c$  e  $\theta_o$  os ângulos de injeção com referência aos jatos de combustível e oxidante, respectivamente, em relação a linha normal a placa. Do lado direito das equações tem-se  $\Omega$  e  $v_r$ , que representam o ângulo e a velocidade resultante do impacto, respectivamente. Diferentes combinações de ângulos de injeção resultam em misturas de propelentes mais eficientes, causando melhoria na otimização e diminuição do tamanho das gotículas formadas. O ângulo  $\Omega$  pode ser calculado pela Equação 12 [FAROKHI, 2014].

$$\operatorname{tg} \Omega = \frac{\dot{m}_c v_c \sin \theta_c + \dot{m}_o v_o \sin \theta_o}{\dot{m}_c v_c \cos \theta_c + \dot{m}_o v_o \cos \theta_o} \quad (8)$$

Relatórios de experimentos e estudos anteriores avaliando diferentes condições de trabalho para injetores são importantes para comparação de parâmetros bem como guia para o design de um injetor. Experimentos expressos no relatório da NASA [NURICK, 1976] apresentam valores típicos para diferentes condições, os quais são mencionados nos itens 1 a 3:

1. *Devido à complexidade do impacto dos jatos, pode-se observar o efeito de Backsplash, que ocorre principalmente devido aos ângulos dos jatos e à distância  $d$  em milímetros de impacto, a partir da placa injetora. Este efeito varia de acordo com os propelentes utilizados bem como o design da placa injetora, porém, como guia, utilizam-se os valores  $d$  entre 2,5 a 3,5( $d_c + d_o$ ). Sendo  $d_c$  e  $d_o$  os diâmetros de orifícios dos injetores de combustível e oxidante respectivamente.*
2. *Para os modelos Unlike Impingement Doublets, recomenda-se uma razão entre valores de diâmetro para oxidante e combustível de aproximadamente 1,22.*
3. *A variação de ângulos de injeção para combustíveis e oxidantes afetam no resultado da eficiência da mistura dos propelentes, portanto valores de  $\theta_c + \theta_o = 60^\circ$  são recomendados para se obter máxima eficiência de injetores Unlike Doublet. Entretanto esse parâmetro é um bom ponto inicial para design de Triplets e Pentads.*

### 3.3 Injetor Unlike Pentad

Diversos estudos realizados na literatura abordam diferentes combinações de ângulos de impacto e diferentes valores de áreas dos orifícios injetores para oxidantes e combustíveis a fim de encontrar quais combinações resultam no melhor aproveitamento do injetor, oferecendo melhor atomização e uniformidade de distribuição dos fluidos. Devido à complexidade dos estudos da atomização de fluidos, muitas abordagens são feitas de forma empírica, resultando em equações que descrevem os resultados em testes práticos. Para o design de injetores Unlike Pentad, entretanto, encontram-se poucas descrições de seu funcionamento devido a poucos dados que caracterizam a formação do spray e devido à sua complexidade [ATYAM, 2017].

Huang [HUANG, 1992] define que o design de injetores com vários jatos de impacto, como Pentads e Quadlets, podem ter altos níveis de eficiência em mistura de propelentes, o que significa alta atomização e dispersão de gotículas. Entretanto, a configuração Pentad apresenta baixa uniformidade em spray, como apresentado na Figura 6.

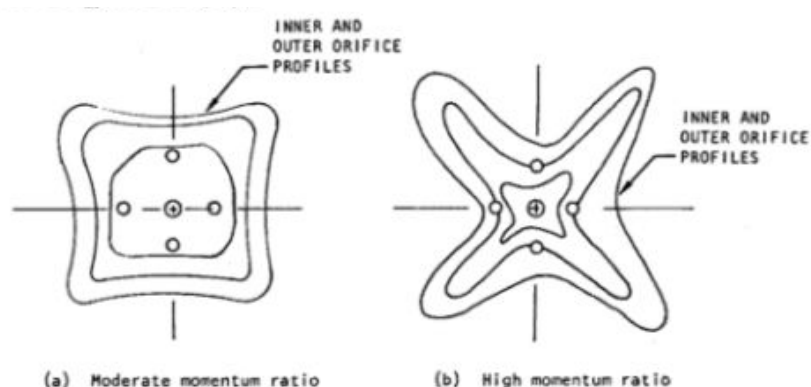


Figura 6 - Distribuição do spray do injetor de impacto Pentad. a) Padrão de dispersão do spray em injetores com moderada razão de momento de jato e b) com alto razão de momento de jato [NURICK, 1976].

Estudos empíricos com injetores são frequentemente realizados para encontrar as diferentes combinações que geram os melhores resultados em eficiência de mistura e atomização do spray. A relação entre momento de jatos entre oxidante e combustível é um ótimo parâmetro, expresso pela Equação 9. As variáveis  $M$ ,  $b$  são atribuídas com tomadas de dados experimentais. Estudos desenvolvidos por ELVERUM [ELVERUM, 1956], NURICK [NURICK, 1976] e BELAL [BELAL, 2010] apresentam valores guias para as variáveis experimentais, os quais estão presentes na Tabela 1. Estes estudos ocorreram com o design de  $90^\circ$  entre cada injetor periférico e  $60^\circ$  de ângulo de impacto.

$$\left(\frac{d_c}{d_p}\right)^2 = M \left[ \left(\frac{\rho_p}{\rho_c}\right) \cdot \left(\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_p}\right)^2 \right]^b \quad (9)$$

Sendo os subscritos  $c$  e  $p$  indicando a parte central e periférica do injetor respectivamente.

Tabela 1: Valores de variáveis para melhor otimização de injetores Pentad.

Autores	$M$	$b$
ELVERUM	8,98	0,8
NURICK	9,40	0,7
BELAL	9,35	0,8

## 4 Metodologia

Para o design do injetor Unlike Pentad, utilizando-os para testes de desempenho de atomização de fluidos a frio, adotou-se para os cálculos do projeto motores com empuxo de 5 a 50N, pois são categorias consideradas de pequeno empuxo. Para esta faixa de valores de trabalho, baixos são os valores de vazão mássica de propelentes e queda de pressão nos injetores. De forma que, observando estas condições de trabalho, estipulou-se baixos valores a serem empregados no testes, de  $\Delta P$ , 0.2, 0.4, 0.6 e 0.8 MPa conforme dados das literaturas revisadas.

Assim, utilizando a Equação 5 e aplicando as condições de trabalho acima conceituadas, encontrou-se valores relativos de diâmetros dos injetores, na ordem de décimos de milímetros. Dentro da gama de diâmetros encontrada, escolheram-se três menores valores de 0.2, 0.3, 0.5mm para estudo, ainda dentro de uma zona limite de construção com uso de máquinas CNC.

Para os testes de desempenho de atomização variando os diâmetros periféricos, projetou-se três placas injetoras, P1, P2 e P2. Cada um apresentando o injetor central de diâmetro fixo em 0.2 mm, e os diâmetros periféricos variando em 0.2, 0.3 e 0.5mm respectivamente. Desta forma, resultam em uma razão  $d_{\text{periférico}}/d_{\text{central}}$  de valores 1, 1.5 e 2.5. Para o design das placas, estabeleceu-se o uso de critérios de projeto. A listar:

1. *A distância de impacto  $d$ , de valor  $3.5(d_c + d_p)$ . Sendo  $d_c$  e  $d_p$  os diâmetro central de periférico respectivamente. Este guia escolhido com base nos recursos mecânicos para construção da peça, facilitando a sua construção.*
2. *O ângulo de impacto definido como inalterável para todas as placas. Sendo o valor de  $60^\circ$  ( $\theta_c = \theta_o = 30^\circ$ ) escolhido com base nos dados de desempenho para injetores Unlike Triplet [NURICK, 1976].*

## 5 Resultados

Para os projetos de placa injetora e cabeçote de apoio, assegurou-se o superdimensionamento das peças, ao mesmo tempo seguindo os guias anteriormente definidos. De modo que resistirá aos testes de forma segurança. O projeto do cabeçote, conta com a utilização da vedação, no acoplamento placas-cabeçote, dispondo dois anéis de vedação. Tomados como base as considerações de PARKER [PARKER, 2007], optou-se a usar duas cavidades de alocação dos anéis de vedação. Um de maior diâmetro que o outro, a fim de inibir qualquer possibilidades de vazamento de fluido na região do acoplamento, durante testes a frio.

Para a fixação do acoplamento, dispõe-se de oito furos presentes tanto nas placas injetoras bem como o cabeçote. Assim, faz-se uso de parafusos e porcas para prender o acoplamento. A fixação projetada, apresenta-se superdimensionada, utilizando oito furos para parafusos de 4 mm de diâmetro. Garantindo uma fixação selada entre as peças, suportando das forças estruturais devido a pressão em regime de trabalho e a segurança em testes a frio. O design final das placas, exemplificado pela Figura 7.

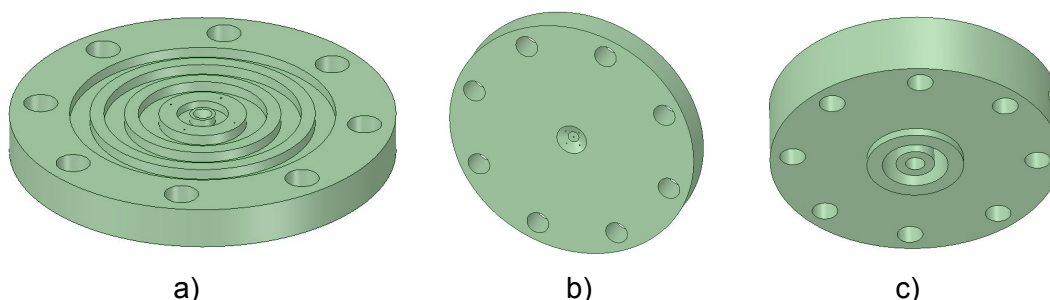
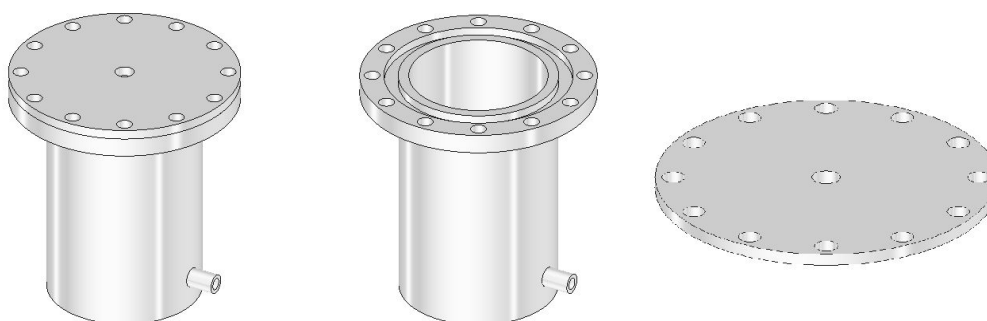


Figura 7 - Resultado do design das placas tipo Unlike Pentad e cabeçote. a) Formato da placa em vista superior com as cavidades para alocação dos anéis de vedação. b) Vista inferior da placa injetora. c) Vista inferior do cabeçote para encaixe das placas injetoras.

O primeiro teste serve-se da determinação do coeficiente de descarga dos injetores, na ordem de placa P1, P2 e P3. O coeficiente de descarga será utilizado para calibragem do injetor. Variando para cada placa injetora, o  $\Delta P$  em 0.2, 0.4, 0.6 e 0.8 MPa a pressão de injeção do fluido de teste, tanto para os orifícios periféricos como o central. Com as correções de coeficiente de descarga gerado no primeiro teste, pode-se dar início ao passo seguinte. O segundo teste objetiva-se da análise por meio de imagens a eficiência de atomização dos fluidos. Seguindo a sequência do primeiro teste, aplicar-se-á os mesmos valores de queda de pressão para cada placa injetora. Porém neste teste, apenas será variado a pressão para os injetores do oxidante (periféricos). Desta forma, com a variação de pressão, ocorrerá a variação do fluxo de massa expelido. Assim, comparando dados de fluxo de massa e sua eficiência em atomização por imagem, será correlacionado por meio da Equação 9, um valor ótimo de momento de impacto,  $M$ .

A análise por imagem será realizada colorindo os fluidos utilizados tanto para oxidante como combustível. De forma que, comparando a tonalidade final de mistura da cor do spray com a de uma amostra de controle será identificado a eficiência de atomização.

Para o tanque de reserva de fluido de testes, que estocará água, foi projetado para armazenar 3L de fluido, utilizando uma geometria superdimensionada para suportar uma pressão máxima de 0.9MPa. Sua parte superior, como apresentada na Figura 8, mostra uma flange de fixação entre tanque e placa superior, a qual se encontra também as cavidades para alocação de um anel de vedação, com desenho guiado por PARKER [PARKER, 2007]. A fixação se dá por parafusos de 8 mm, que estarão dispostos em 12 furos.



a)

b)

c)

Figura 8 - Tanque de estocagem e pressurização. a) Visão completa do tanque e tampa. b) Vista apenas do tanque. Deixando a mostra o sugo de encaixe para vedação. c) Tampa superior de selagem.

A pressurização do tanque é feita por um compressor elétrico, em que instrumentação hidráulica e pneumática será utilizada para coleta de medidas de dados necessárias. O diagrama hidráulico e pneumático, apresentado na Figura 9, mostra como ocorrerá a entrega de ar ao tanque já alimentado de fluido. Com as válvulas 1 e 2, indicando respectivamente injetores periféricos e central, inicialmente fechadas, será pressurizado até o valor desejado de pressão. Para a injeção, abrisse as válvulas, de forma que, a água flua pelos dutos e chegue à placa injetora.

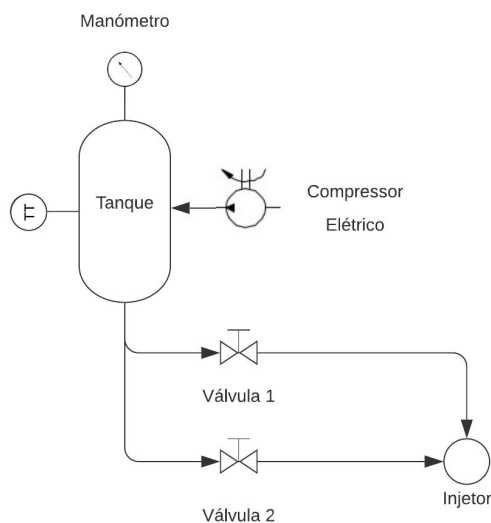


Figura 9 - Diagrama pneumático e hidráulico, com as instrumentações necessárias e esquemática entrega dos fluidos.

## 6 Conclusão

Observou-se que o uso de injetores Pentad está diretamente ligado ao uso de motores com grande razão O/F, uma vez que há maior número de injetores para combustível do que para oxidantes. No que tange ao corpo de dispersão do spray, observa-se a ocorrência de mudanças de formato e abertura, devido a variações do número de Reynolds associado e de momento de impacto. Tamanho de gotas e homogeneidade da nuvem de spray são complexas o suficiente para serem estudadas de forma teórica, necessitando uma investigação de forma empírica.

O uso de injetores Pentad em micro motores foguetes, mostrou que quanto menor o diâmetro dos injetores, diferentes instabilidades são criadas, afetando a performance do dispositivo em estudo. Estas inconstâncias, que estão diretamente relacionadas ao efeito do uso de diminuto diâmetro do orifício capilar do injetor, em que o escoamento apresenta elevados efeitos viscosos dissipativos e oscilatórios, causam instabilidades de impacto de jatos, de formação de gotículas e não homogeneidade do corpo de spray. No que tange ao uso de injetores Pentad para micro motores foguetes em regime de trabalho, ocorre maior instabilidade de combustão, devido à queima irregular da mistura bipropelentes.

## Referências

- NURICK, W. H.; GILL, G. S. Liquid rocket engine injectors. NASA SP-8089, 1976.
- ATYAM, Deepak M.; SOJKA, Paul E. Characterization of Direct Metal Laser Sintered Impinging Injectors: Like-Douplet, Unlike Triplet, Unlike Quadlet, Unlike Pentad. In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2017. p. 4602.
- RYAN, H. M. et al. Atomization characteristics of impinging liquid jets. Journal of propulsion and power, v. 11, n. 1, p. 135-145, 1995.
- WHITE, Frank M.; CORFIELD, Isla. Viscous fluid flow. New York: McGraw-Hill, 2006.
- HUANG, David H.; HUZEL, Dieter K. Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
- FAROKHI, Saeed. Aircraft propulsion. John Wiley & Sons, 2014.
- SIRIGNANO, William A. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge university press, 2010.
- SUTTON, George P.; BIBLARZ, Oscar. Rocket propulsion elements. John Wiley & Sons, 2016.
- SCHMIDT, David P. et al. Detection of cavitation in fuel injector nozzles. In: 8th ISTP Conference, San Francisco. 1995.
- ASHGRIZ, Nasser (Ed.). Handbook of atomization and sprays: theory and applications. Springer Science & Business Media, 2011.
- ELVERUM JR, G. W.; MOREY, T. F. Criteria for optimum mixture-ratio distribution using several types of impinging-stream injector elements. 1959.
- Belal, Hatem. Numerical Simulation of Spray Combustion. 10.13140/RG.2.2.15035.82723. (2010).
- PARKER, Parker O-RING HANDBOOK, O. R. D. 5700, 2007. PH Corporation (Ed.). Cleveland, OH. Disponível em: <[https://www.parker.com/literature/Praedifa/Catalogs/Catalog\\_O-Ring-Handbook\\_PTD5705-EN.pdf](https://www.parker.com/literature/Praedifa/Catalogs/Catalog_O-Ring-Handbook_PTD5705-EN.pdf)>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.