



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VICTOR VELOSO ASSUNÇÃO

**DESENVOLVIMENTO PRELIMINAR DE UM PROPULSOR AEROESPACIAL A
MONOPROPELENTE H₂O₂**

Recife

2023

VICTOR VELOSO ASSUNÇÃO

**DESENVOLVIMENTO PRELIMINAR DE UM PROPULSOR AEROESPACIAL A
MONOPROPELENTE H₂O₂**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Bráulio Silva Barros.

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Assunção, Victor Veloso.

Desenvolvimento preliminar de um propulsor aeroespacial a
monopropelente H₂O₂ / Victor Veloso Assunção. - Recife, 2023.
50 p. : il., tab.

Orientador(a): Bráulio Silva Barros

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. propulsor. 2. monopropelente. 3. Python. 4. impressão 3D. 5.
aeroespacial. I. Barros, Bráulio Silva. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

VICTOR VELOSO ASSUNÇÃO

**DESENVOLVIMENTO PRELIMINAR DE UM PROPULSOR AEROESPACIAL A
MONOPROPELENTE H₂O₂**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 27/09/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bráulio Silva Barros (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Cláudia e a meu pai, Fernando, pelo amor e apoio constante e fundamental para que eu conseguisse realizar o curso, bem como pela valorização da criatividade e da busca pelo conhecimento. À minha irmã, Larissa, pelo amor e companheirismo de sempre. A minha família, amigos e amigas por todo o apoio e alegria que trazem. Aos meus amigos e amigas do grupo SupraMMat, incluindo o Prof. Bráulio, pela amizade e pelos ensinamentos. Aos amigos e amigas que participaram comigo no início do projeto Asa Branca, pelos divertidos dias de trabalho e conversas aeroespaciais. Aos professores do curso de Engenharia Mecânica que se dedicam a trazer os conhecimentos da engenharia no mais alto nível, sendo isso fundamental para a formação de profissionais que levam a sério a responsabilidade que carregam com o trabalho da engenharia. Aos funcionários que se dedicam em fazer a universidade funcionar. À UFPE por se manter como uma universidade de referência na formação acadêmica.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento conceitual e termodinâmico de um propulsor aeroespacial a monopropelente peróxido de hidrogênio. O dispositivo foi fabricado utilizando-se de impressão 3D em plástico PLA, bem como de componentes comerciais, tais como válvulas e anéis de vedação. As equações que regem a termodinâmica de bocal convergente-divergente foram implementadas em código Python a fim de realizar o dimensionamento do bocal e o estudo dos parâmetros do propulsor. O presente projeto traz um conceito construtivo de propulsor que permite a implementação de uma malha de controle fechada, objetivando-se com isso controlar a pressão dos gases antes da sua liberação pelo bocal. Tal melhoria de projeto visa promover um aumento na capacidade de controle da força de propulsão gerada através do controle da pressão. O propulsor foi testado experimentalmente de maneira qualitativa, apenas para verificar o funcionamento geral do conceito, onde concluiu-se que existe a necessidade de adicionar uma válvula entre o reator e o sistema de injeção de monopropelente, bem como existe a necessidade de um suporte para o catalisador.

Palavras-chave: propulsor; monopropelente; Python; impressão 3D; aeroespacial.

ABSTRACT

This work presents the conceptual and thermodynamic development of an aerospace hydrogen peroxide monopropellant thruster. The device was manufactured using 3D printing with PLA plastic, as well as commercial components such as valves and sealing rings. The equations governing the thermodynamic of convergent-divergent nozzles were implemented in Python code in order to design the nozzle and study the thruster parameters. This work brings a thruster construction concept that makes it possible the implementation of a closed loop control system, aiming at the control of the gases before it is ejected from the nozzle. Such improvement promotes an increased capability of controlling the thrust force by the control of the pressure. The thruster was experimentally tested in a qualitative manner, just to make sure the general concept works, where it was concluded that it is necessary to have a valve between the reactor and the monopropellant injection system, as well as it is necessary to develop a support for the catalyst.

Keywords: thruster; monopropellant; Python; 3D printing; aerospace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Conceito construtivo bastante difundido de propulsor a monopropelente, exemplo 1.	12
Figura 2 –	Conceito construtivo bastante difundido de propulsor a monopropelente, exemplo 2.	12
Figura 3 –	Conceito construtivo bastante difundido entre os propulsores a gás frio.	13
Figura 4 –	Regiões de interesse na análise de um bocal convergente-divergente.	17
Figura 5 –	Malha fechada de controle.	20
Figura 6 –	Elementos de uma malha fechada de controle.	21
Figura 7 –	Função de transferência de um controlador proporcional, integral e derivativo.	22
Figura 8 –	Parâmetros de uma engrenagem de dentes retos.	23
Figura 9 –	Parâmetros de uma engrenagem de dentes retos.	24
Figura 10 –	Projeto conceitual do propulsor completo.	25
Figura 11 –	Sistema reservatório de gás do propulsor.	26
Figura 12 –	Sistema reservatório de gás do propulsor com vista em corte.	26
Figura 13 –	Impressora 3D Ender 3 V2 Neo.	28
Figura 14 –	Par de engrenagens do acionamento da válvula de exaustão.	29
Figura 15 –	Parâmetros construtivos da engrenagem maior no SolidWorks.	29
Figura 16 –	Parâmetros construtivos da engrenagem menor no SolidWorks.	29
Figura 17 –	Sistema reservatório de gás fabricado via impressão 3D.	33
Figura 18 –	Sistema preparado para teste de pressão.	34
Figura 19 –	Acionamento da válvula de exaustão.	34
Figura 20 –	Acoplador para injeção de peróxido.	35
Figura 21 –	Reator e catalisador.	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Razão de expansão em função da pressão do reservatório.	36
Gráfico 2 – Diâmetro da garganta em função da pressão do reservatório.	37
Gráfico 3 – Diâmetro da saída em função da pressão do reservatório.	37
Gráfico 4 – Velocidade de escape em função da pressão do reservatório.	38
Gráfico 5 – Fluxo mássico em função da pressão do reservatório.	38
Gráfico 6 – Pressão do reservatório em função do tempo.	39
Gráfico 7 – Velocidade de escape e fluxo mássico em função do tempo.	40
Gráfico 8 – Força propulsiva de empuxo em função do tempo.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CATALISADOR PARA O PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO	15
2.2	TERMODINÂMICA DE BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE DE EXPANSÃO DE GÁS	16
2.3	CONTROLE DA PRESSÃO NO RESERVATÓRIO	19
2.4	DIMENSIONAMENTO DE ENGRENAGENS DE DENTES RETOS	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DO PROPULSOR	25
3.1.1	Fabricação via Impressão 3D	27
3.1.2	Dimensionamento de Engrenagens de Dentes Retos para o Sistema de Exaustão de Gás	28
3.2	PROJETO TERMODINÂMICO DO PROPULSOR	30
3.2.1	Estudo Termodinâmico e Dimensionamento do Bocal	30
3.2.2	Modelagem da Curva de Decaimento da Pressão no Reservatório	31
4	RESULTADOS	33
4.1	DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DO PROPULSOR	33
4.2	PROJETO TERMODINÂMICO DO PROPULSOR	36
4.2.1	Estudo Termodinâmico e Dimensionamento do Bocal	36
4.2.2	Modelagem da Curva de Decaimento da Pressão no Reservatório	39
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	44
	APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DO MODELO MATEMÁTICO	45

APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DA ROTINA DE DIMENSIONAMENTO DO BOCAL	46
APÊNDICE D – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DA ROTINA DE ESTUDO DO BOCAL	47
APÊNDICE E – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DA ROTINA DE ESTUDO DA OPERAÇÃO DO PROPULSOR	49

1 INTRODUÇÃO

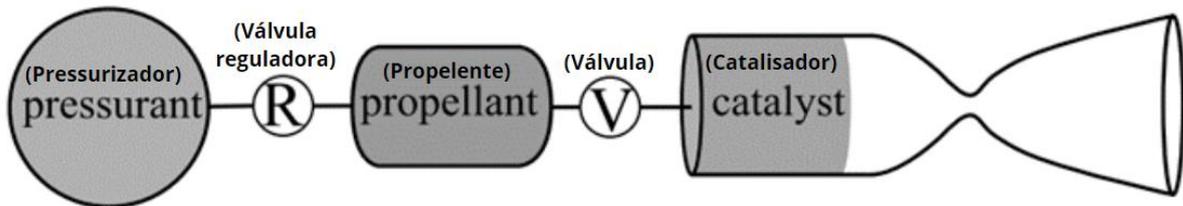
Com o crescente interesse no uso de pequenos satélites de baixo custo (conhecidos como CubeSats) para diversos fins, tais como observação terrestre, sensoriamento remoto, comunicações, pesquisas científicas etc., surgiu a necessidade de sistemas de propulsão para tais satélites. A necessidade de propulsores nos satélites se justifica pelo fato de eles precisarem realizar manobras de reposicionamento de órbita e de volta à Terra ao final da missão. Pelo fato desses dispositivos apresentarem pequeno porte (geralmente menor que 10 kg), os sistemas propulsivos devem ter baixo peso e custo, bem como pequenas dimensões (Pascoa et al., 2018; Tummala e Dutta, 2017; Krejci e Lozano, 2018).

Nesse sentido, propulsores a monopropelente são uma interessante alternativa para atender tais demandas. Atualmente, o monopropelente mais usado em propulsores comerciais é a Hidrazina (N_2H_4), que, apesar de apresentar alto impulso específico e performance, possui um elevado risco de segurança devido a sua alta toxicidade, trazendo conseqüentemente um elevado custo operacional e de segurança. Logo, é necessária uma solução mais adequada para suprir a demanda por propulsores para os CubeSats. O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) surge como uma alternativa interessante, uma vez que, embora tenha menor impulso específico que a Hidrazina, tem as vantagens de apresentar baixa toxicidade, maior segurança e menor custo operacional. Além disso, os produtos resultantes da sua decomposição são apenas vapor de água e gás oxigênio, sendo assim considerado um combustível “verde”. A utilização do H_2O_2 em propulsores depende do desenvolvimento de catalisadores que apresentem boa performance catalítica, bem como resistência mecânica e química durante muitos ciclos de operação (Torre et al., 2009; Meira e Vieira, 2016; Pereira, 2014).

Além do catalisador, é necessário o desenvolvimento mecânico do propulsor, que deve ser leve, apresentar pequenas dimensões, alta robustez e a maior simplicidade possível mesmo atendendo a diversos requisitos. Geralmente, quando se fala em propulsores a monopropelente, existem diversas obras da literatura que apresentam o modelo de um reator diretamente conectado ao bocal de exaustão, tais como os conceitos expostos por Krejci e Lozano (2018) e por Santi et al. (2019), apresentados nas Figuras 1 e 2. Cassese et. al (2023) também utiliza o mesmo

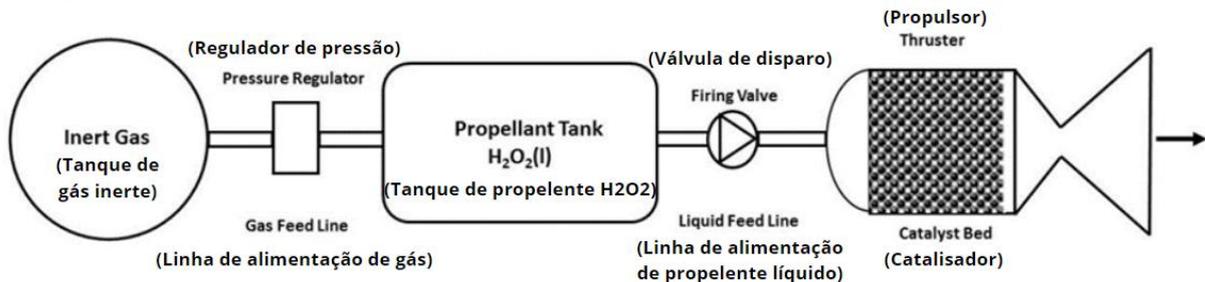
conceito dos autores anteriores, isto é, não existe válvula entre a região do catalisador e o bocal.

Figura 1 – Conceito construtivo bastante difundido de propulsor a monopropelente, exemplo 1.



Fonte: Modificado de Krejci e Lozano (2018, p. 3).

Figura 2 – Conceito construtivo bastante difundido de propulsor a monopropelente, exemplo 2.



Fonte: Modificado de Santi et al. (2019, p. 2).

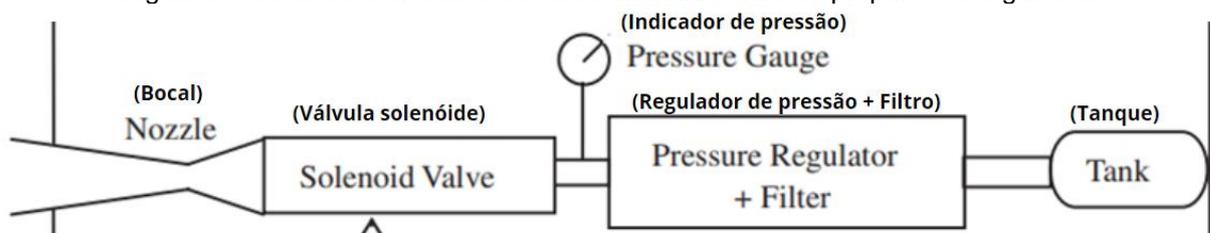
Avaliando esse modelo, entende-se o porquê de ele ser bastante difundido: porque ele é intuitivo e simples. Além disso, como nos propulsores a monopropelente, o gás que será lançado pelo bocal ainda não foi produzido até o momento de uso, de certa maneira é intuitivo pensar que não é necessária uma válvula para armazenar os gases antes de ele ser lançado. Entretanto, tal abordagem construtiva leva a um problema na precisão no empuxo do propulsor, isto é, no controle do empuxo gerado, uma vez que a pressão no reservatório (região após o catalisador, mas antes do bocal) não é facilmente controlável, uma vez que os gases são expulsos na medida em que vão sendo gerados no catalisador. Dessa forma, a fim de controlar o empuxo gerado no propulsor, esse conceito depende de uma refinada modelagem teórica e/ou experimental que relacione o empuxo gerado com a quantidade de monopropelente injetada no reator. Esse modelo deve ser condizente com a realidade ao longo de todo o ciclo de vida do propulsor (uma vez que a performance do catalisador tende a cair ao longo dos ciclos de operação).

Nesse sentido, cria-se o requisito de conhecer muito bem como a performance do catalisador decai no tempo a fim de se ter um modelo confiável ao longo da vida

útil do propulsor. Então, mesmo que a modelagem seja experimental, caso exista uma variação da realidade em relação ao modelo proposto, vai haver variação no empuxo gerado com o pretendido, reduzindo a robustez e precisão do sistema. Nesse sentido, o principal problema da configuração mostrada na Figura 1 e Figura 2 é que tal modelo não permite a implementação de um sistema de controle em malha fechada, uma vez que não existe o controle sobre a saída do gás, apenas o controle da injeção de monopropelente. Conseqüentemente, quando não existe uma válvula na saída dos gases, fica muito difícil o controle preciso do empuxo.

Um outro tipo de sistema é o propulsor a “gás frio” (*cold gas*), que consiste no armazenamento de um gás inerte pressurizado e sua gradual liberação ao longo do ciclo de vida do satélite. O termo “gás” aqui usado se refere a um elemento em estado gasoso qualquer, nesse caso um gás inerte. Esse tipo de propulsor deve necessariamente possuir uma válvula na saída dos gases, elemento essencial nesse tipo de propulsor, porque o elemento a ser lançado pelo bocal já está no estado gasoso desde o início da missão. Percebe-se que esse modelo de propulsor é bastante difundido comercialmente e permite a implementação de uma malha de controle fechada (com retroalimentação). Diversas referências apresentam tal conceito, a exemplo do trabalho de Luigini e Romano (2009), na Figura 3.

Figura 3 – Conceito construtivo bastante difundido entre os propulsores a gás frio.



Fonte: Modificado de Luigini e Romano (2009, p. 618).

Assim, percebe-se que quando se trata de propulsão a monopropelente, geralmente o sistema não possui válvula de controle de saída dos gases como o sistema a gás frio tem. Tendo isso em vista, no presente trabalho foi construído um propulsor a monopropelente que contém uma válvula pneumática controlando a saída dos gases. Essa configuração mecânica permite a implementação de uma malha de controle fechada. Controlando a saída dos gases, é possível controlar a pressão dos gases e, conseqüentemente, o empuxo a ser gerado. A retroalimentação da malha de controle pode então ser feita por meio da medição da pressão no reservatório. Tendo isso em vista, pretendia-se instalar tal sensor de pressão no reservatório, mas não foi

possível para o presente projeto em decorrência da dificuldade técnica de se inserir um dispositivo no reservatório e ainda conseguir evitar o escape dos gases em tal região.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo o projeto termodinâmico, o desenvolvimento conceitual, a fabricação e o teste qualitativo de um propulsor a monopropelente peróxido de hidrogênio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projeto conceitual do propulsor com características construtivas que permitam a implementação de uma malha de controle fechada;
- Fabricação de componentes via impressão 3D em plástico PLA e montagem com elementos comerciais (válvulas, ORings etc.);
- Desenvolvimento de rotina de cálculo em Python de modelo termodinâmico de bocais convergente-divergente para realizar o dimensionamento do bocal e o estudo do comportamento dos parâmetros termodinâmicos durante a operação do propulsor;
- Implementação de modelo matemático do decaimento da pressão no reservatório no tempo, durante a operação do propulsor, a fim de determinar a curva de empuxo gerada e outros parâmetros termodinâmicos (temperatura, fluxo mássico etc.);
- Apresentação bibliográfica do embasamento matemático do sistema de controle da pressão no reservatório do propulsor (função de transferência em malha fechada);
- Estudo experimental qualitativo do propulsor com pressurizador manual;
- Estudo experimental qualitativo do propulsor com o peróxido de hidrogênio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um propulsor aeroespacial consiste em um dispositivo capaz de gerar força de propulsão a fim de promover o movimento de translação ao veículo ao qual ele está acoplado. A configuração mecânica de um propulsor depende bastante do conceito construtivo adotado, do tipo de propulsor, bem como dos requisitos específicos de cada veículo que o propulsor atende. A primeira seção trata da revisão bibliográfica do catalisador para o peróxido de hidrogênio; a segunda traz o referencial acerca da termodinâmica de bocal convergente-divergente de expansão de gás; a terceira seção diz respeito aos fundamentos de controle necessários ao desenvolvimento de um sistema de controle de pressão em malha fechada; a quarta traz o dimensionamento de engrenagens de dentes retos.

2.1 CATALISADOR PARA O PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO

O desenvolvimento do catalisador para o peróxido de hidrogênio a ser utilizado neste trabalho teve início com o projeto de iniciação científica do autor deste trabalho, Barros e Assunção (2021), onde foi realizada uma extensa revisão bibliográfica acerca do estado da arte dos catalisadores para o peróxido de hidrogênio. A linha de pesquisa que se decidiu seguir foi baseada no desenvolvimento de óxidos do tipo espinélio, com fase ativa composta pelos elementos cobalto e manganês. A razão pela escolha do espinélio consistiu no fato de tal estrutura permitir a exposição de elementos com diferentes valências, promovendo reações do tipo redox. Como a decomposição do peróxido de hidrogênio é uma reação do tipo redox, é interessante um catalisador que exponha tais elementos de diferentes valências, razão pela qual se optou pelo manganês e pelo cobalto como elementos para a fase ativa a serem usados na forma de óxido espinélio.

Nesse sentido, foram realizadas múltiplas atividades experimentais de síntese e de avaliação da performance catalítica do espinélio de fórmula CoMn_2O_4 , que exibiu performance catalítica satisfatória na decomposição do peróxido de hidrogênio. A metodologia de síntese usada foi a reação de autocombustão, que consiste na mistura dos nitratos dos metais de interesse (nitrato de manganês e nitrato de cobalto) com um combustível (ureia). Os reagentes são misturados em água e a mistura recebe

calor via resistência elétrica até a combustão, gerando como resultado o catalisador em forma de pó. O desenvolvimento subsequente do tema culminou no trabalho de Bispo et al. (2023), onde concluiu-se que a fórmula do espinélio que apresentou melhor performance catalítica foi a Co_2MnO_4 . Este último material foi sintetizado e usado como catalisador do peróxido de hidrogênio para a realização do presente trabalho.

2.2 TERMODINÂMICA DE BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE DE EXPANSÃO DE GÁS

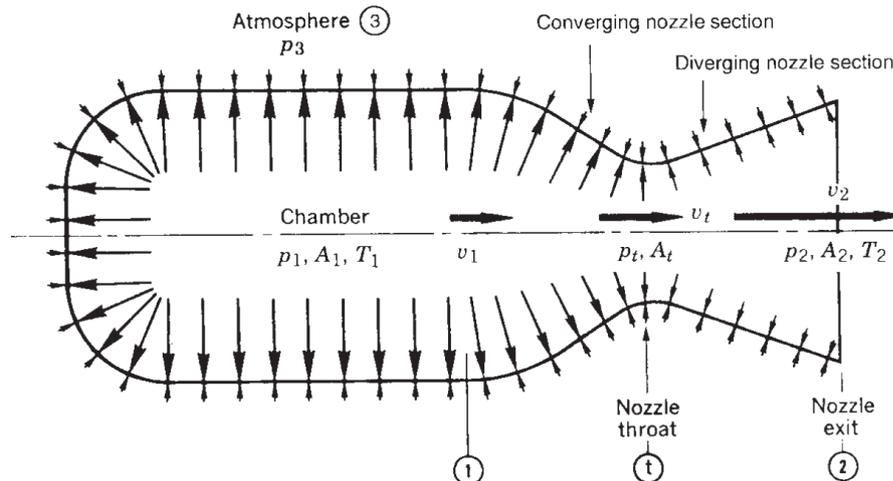
A função do bocal em um propulsor consiste em acelerar a massa de gás à maior velocidade possível, a fim de conseguir a maior variação de momento linear. O dimensionamento geométrico do bocal de um propulsor e de seus parâmetros de performance é realizado utilizando-se de uma série de equações derivadas da modelagem da expansão isentrópica de um gás via bocal convergente-divergente. A teoria considera as hipóteses a seguir (Sutton e Biblarz, 2016).

- O fluido (gás) apresenta composição homogênea;
- Todas as moléculas do fluido são consideradas no estado gasoso, sendo desconsiderada quaisquer fases líquidas ou sólidas.
- O fluido obedece à lei dos gases ideais;
- Não existe transferência de calor de ou para o fluido (fluxo adiabático);
- Perdas por atrito são desconsideradas;
- Efeitos de camada limite são desconsiderados;
- Não existem ondas de choque ou discontinuidades no fluxo;
- Considera-se um fluxo em regime estacionário sem transientes;
- Considera-se que a velocidade das partículas de fluido sejam paralelas ao eixo axial do bocal;
- A temperatura, pressão, velocidade e densidade são consideradas uniformes ao longo de cada seção normal ao eixo axial do bocal;
- O fluxo de gás ao longo do bocal sofre uma expansão isentrópica.

Apesar de ser uma lista relativamente extensa de hipóteses, os erros provocados pelo desvio de tais idealizações não são significativos no que tange o

dimensionamento preliminar do bocal. De acordo com a Figura 4, os parâmetros termodinâmicos nas posições de interesse do bocal são indicados por “1” (tanque de armazenamento de gás); “t” (garganta do bocal, área de menor seção transversal); “2” (saída do bocal) e “3” (atmosfera do local) (Sutton e Biblarz, 2016).

Figura 4 – Regiões de interesse na análise de um bocal convergente-divergente.



Fonte: Sutton e Biblarz (2016, p. 32).

Nesse sentido, a eq. 1 refere-se à lei dos gases ideais, onde p_x , V_x , $R_{gás}$ e T_x são, respectivamente, a pressão, o volume específico, a constante do gás e a temperatura em uma seção transversal x normal ao eixo axial do bocal. A velocidade do som é dada pela eq. 2. Por sua vez, o número de Mach é a razão entre a velocidade do gás e a velocidade do som no local x em questão. Uma propriedade termodinâmica que está presente em diversas equações é o coeficiente de calores específicos k , que é a razão entre o calor específico à pressão e a volume constante, apresentando valor praticamente constante ao longo do fluxo no bocal.

Diversas equações que serão apresentadas a seguir foram originadas da hipótese de que o fluxo no bocal é isentrópico. Dessa forma, a relação entre pressão, temperatura e volume específico obedece à eq. 3, onde x e y são duas seções quaisquer. O fluxo mássico (eq. 4), por sua vez, é constante, tendo em vista o princípio da continuidade, onde A é a área de seção transversal, v é a velocidade e V o volume específico em qualquer área de seção (Sutton e Biblarz, 2016).

$$p_x V_x = R_{gás} T_x \quad (1)$$

$$a_x = \sqrt{k R_{gás} T_x} \quad (2)$$

$$\frac{T_x}{T_y} = \left(\frac{p_x}{p_y}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{V_y}{V_x}\right)^{k-1} \quad (3)$$

$$\dot{m}_x = \dot{m}_y = \frac{A v}{V} = A_t p_1 k \frac{\sqrt{\left[2/(k+1)\right]^{(k+1)/(k-1)}}}{\sqrt{k R_{gás} T_1}} \quad (4)$$

As propriedades termodinâmicas em estagnação são referentes à condição em que o fluido é desacelerado de forma isentrópica, sendo indicadas por “0”. Como na região de entrada do bocal, a velocidade pode ser considerada próxima a zero, as propriedades do fluido podem ser consideradas em condição de estagnação. Isto é, as propriedades no reservatório e na região de entrada do bocal podem ser tomadas como sendo os valores de estagnação, uma vez que o fluido nessas regiões tem baixa velocidade. Dessa forma, a pressão e a temperatura de estagnação durante uma expansão isentrópica adiabática permanecem constante, sendo dadas pelas equações 5 e 6, respectivamente (Sutton e Biblarz, 2016).

$$p_0 = p_x \left[1 + \frac{1}{2}(k-1)M_x^2\right]^{k/k-1} \quad (5)$$

$$T_0 = T_x \left[1 + \frac{1}{2}(k-1)M_x^2\right] \quad (6)$$

Um importante parâmetro para o dimensionamento é a “razão de expansão” de áreas (ϵ), dada pelo quociente da área de seção na saída do bocal pela área de seção na garganta (eq. 7), onde considera-se número de Mach unitário na garganta do bocal. Entretanto, para efeito de cálculo de dimensionamento, a variante inversa dessa razão que utiliza apenas as pressões p_1 e p_2 de variáveis de entrada é mais interessante (eq. 8). Isto é, no dimensionamento geométrico do bocal, é mais interessante trabalhar com as variáveis de pressão interna e externa como parâmetros de entrada do que usar a velocidade Mach M_2 (Sutton e Biblarz, 2016).

$$\epsilon = \frac{A_2}{A_t} = \frac{M_t}{M_2} \left[\frac{1 + [(k-1)/2]M_2^2}{1 + [(k-1)/2]M_t^2} \right]^{k+1/k-1} \quad (7)$$

$$\frac{A_t}{A_2} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{1/(k-1)} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/k} \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}\right]} \quad (8)$$

Um bocal convergente-divergente é usado com o objetivo de acelerar as partículas do fluido à máxima velocidade v_2 possível no projeto em questão. Dessa forma, a força de empuxo é dada pela eq. 9, onde \dot{m} é o fluxo mássico que apresenta velocidade v_2 na saída do bocal. Sendo as pressões de saída e atmosférica iguais, despreza-se o segundo termo. Para realizar o dimensionamento, pode-se atribuir à força de empuxo um valor nominal almejado, a fim de determinar a vazão mássica nominal. Por sua vez, a velocidade na saída do bocal é dada pela eq. 10 (Sutton e Biblarz, 2016).

$$F_{empuxo} = \dot{m}v_2 + (p_2 - p_3)A_2 \quad (9)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_{gás} T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]} \quad (10)$$

A eq. 11 permite o cálculo da área de garganta a partir de parâmetros já conhecidos até então. Outro parâmetro importante ao bocal é o ângulo de saída, isto é, o ângulo que a superfície de saída faz com o eixo axial do bocal, sendo geralmente utilizado o valor de 15° para bocais cônicos. Finalmente, o impulso específico, um parâmetro útil para comparar a performance de propulsores pode ser determinado pela eq. 12 (Sutton e Biblarz, 2016).

$$A_t = \frac{\dot{m}}{p_1} \sqrt{\frac{R_{gás} T_1}{k \left[\frac{2}{(k+1)} \right]^{k+1/k-1}}} \quad (11)$$

$$I = \frac{F_{empuxo}}{\dot{m}g_0} \quad (12)$$

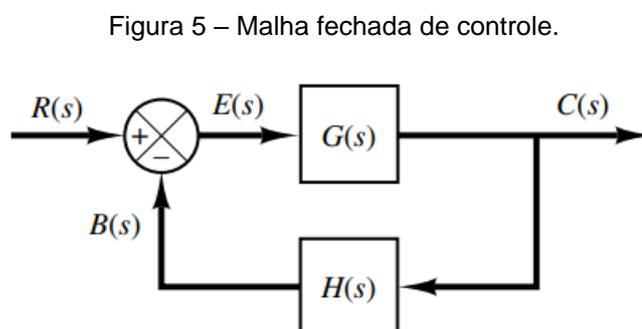
2.3 CONTROLE DA PRESSÃO NO RESERVATÓRIO

O problema que se objetiva resolver é como controlar a pressão inicial no tanque a partir da atuação na injeção de peróxido. Isto é, uma vez definida a pressão inicial que se deseja atingir, deve-se avaliar os métodos que podem ser usados a fim de atingi-la por meio do controle da injeção de peróxido no reator. Existem duas possibilidades principais: um controle determinístico baseado em modelo matemático e/ou experimental do reator ou um sistema de controle de malha fechada.

O principal motivo de se ter uma malha fechada de controle da pressão é tornar o propulsor robusto às variações de parâmetros que afetam a pressão. Nesse sentido, busca-se com isso eliminar a necessidade de elaborar um modelo matemático e/ou experimental para prever a pressão gerada no tanque a partir de uma quantidade determinada de peróxido injetada no reator. Na atual configuração mecânica do propulsor, o controle da injeção de peróxido no reator funciona como o atuador na malha de controle. Uma vez que tal injeção de peróxido no reator sempre provoca um aumento de pressão, a malha de controle deve ser feita de forma a não permitir ultrapassar o valor de pressão almejado. Para definir a equação diferencial que modela a relação entre a quantidade de peróxido injetada e a pressão resultante no reservatório, pode-se realizar testes experimentais.

O objetivo de se utilizar a configuração mecânica de propulsor apresentada neste trabalho é permitir a implementação de uma malha de controle fechada, promovendo robustez ao sistema. Isto é, será apresentada a modelagem teórico-matemática de um sistema de controle em malha fechada que usa a injeção de monopropelente no reator como parâmetro de entrada da malha a fim de atingir um valor específico de pressão no reservatório.

De acordo com Ogata (2010), e tomando a Figura 5 como referência, o primeiro passo para modelar a malha de controle do sistema é definir a equação diferencial que rege o sistema. O próximo passo é aplicar a transformada de Laplace na equação para se definir a função $G(s)$, dada pelo quociente do sinal de saída $C(s)$ pelo sinal de entrada $E(s)$ na função $G(s)$.



Fonte: Ogata (2010, p. 19).

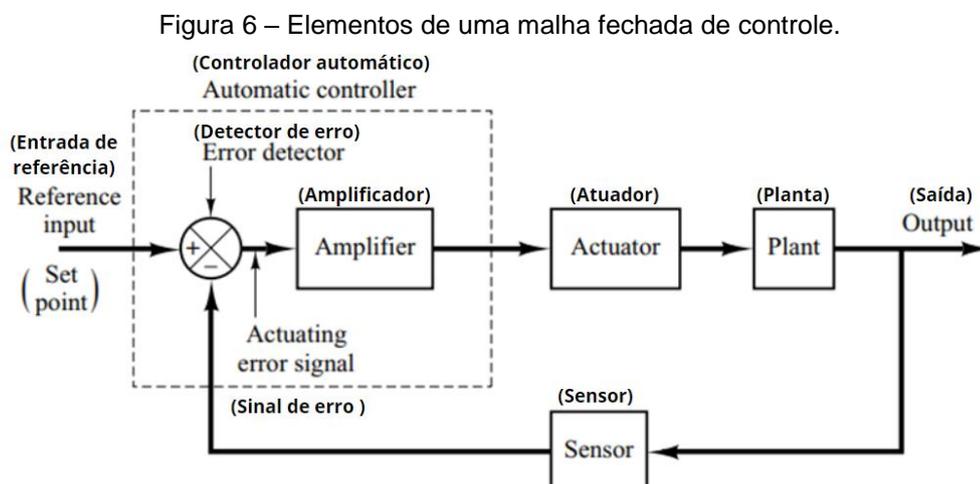
Quando o sinal de saída do sistema, $C(s)$, é alimentado novamente ao sistema para comparação com o sinal de entrada, $R(s)$, é necessário converter a forma do

signal de saída para que esteja na mesma forma do signal de entrada. A conversão do signal é realizada pela função de transferência $H(s)$, de forma que o signal de entrada $R(s)$ e o signal de retroalimentação $B(s)$ sejam do mesmo tipo. Assim, $B(s) = C(s)H(s)$ e o signal de controle $E(s)$ que vai atuar na entrada do sistema é a diferença entre o signal de entrada $R(s)$ e o signal $B(s)$. Ainda de acordo com Ogata (2020), a função que relaciona a saída $C(s)$ com a entrada $R(s)$ é chamada de função de transferência em malha fechada, sendo dada pela eq. 13.

$$C(s) = \frac{G(s)R(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (13)$$

Um sistema automático compara o valor real da saída da “planta” (a planta é o sistema que se deseja controlar, que no caso deste trabalho é o reservatório de gás) com o valor do signal de entrada (o valor desejado de pressão, nesse caso). Após comparar os valores, determina-se a diferença que vai gerar o signal de atuação no sistema $E(s)$, objetivando-se reduzir a um valor próximo de zero o erro do sistema.

A correlação dos elementos da Figura 6 (que especifica os elementos físicos de um sistema em malha fechada) com os elementos do propulsor ocorre da seguinte maneira: o atuador é o subsistema de injeção de peróxido de hidrogênio; a planta é o reservatório no qual se deseja uma pressão específica; o sensor se refere ao sensor de pressão; e os elementos detector de erro (ponto de soma de sinais) e o amplificador são componentes eletrônicos do computador de bordo em questão. O signal de saída é a pressão real do sistema e o signal de referência de entrada (*set point*) é o signal que especifica a pressão desejada no reservatório.

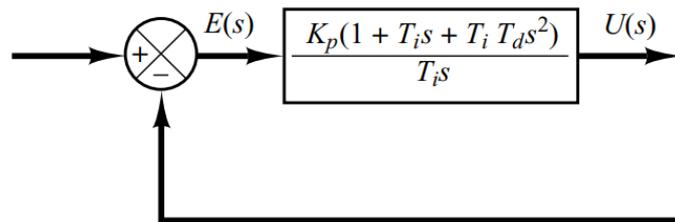


Fonte: Modificado de Ogata (2010, p. 21).

Ainda de acordo com Ogata (2020), nomeando o sinal de saída do controlador (*Automatic controller*) como $u(t)$ e o sinal atuante de erro (*Actuating error signal*) como $e(t)$, a chamada “ação de controle” consiste na maneira na qual o controlador produz o sinal de controle $u(t)$, que vai alimentar o atuador. As formas de ação de controle mais usadas são o controlador *on-off* (duas posições); ação de controle proporcional; ação de controle integral; ação de controle proporcional e derivativa; e a ação de controle proporcional, integral e derivativa.

Como no presente projeto o atuador é um servo motor no qual se pode trabalhar com velocidade variável, é possível implementar a forma mais completa de ação de controle, a última mencionada acima. A equação de um controlador de ação proporcional, integral e derivativa, bem como sua função de transferência são dadas pelas equações 14 e 15 a seguir, sendo essa função implementada entre o sinal de erro e o sinal de controle, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Função de transferência de um controlador proporcional, integral e derivativo.



Fonte: Ogata (2010, p. 25).

Fisicamente, a função de transferência apresentada na Figura 7 é parte do software de controle, instalado no computador de bordo do sistema. A fim de determinar tais constantes, deve-se usar métodos de projeto de controle, tal como o método do lugar das raízes (*Root-Locus*) (Ogata, 2020).

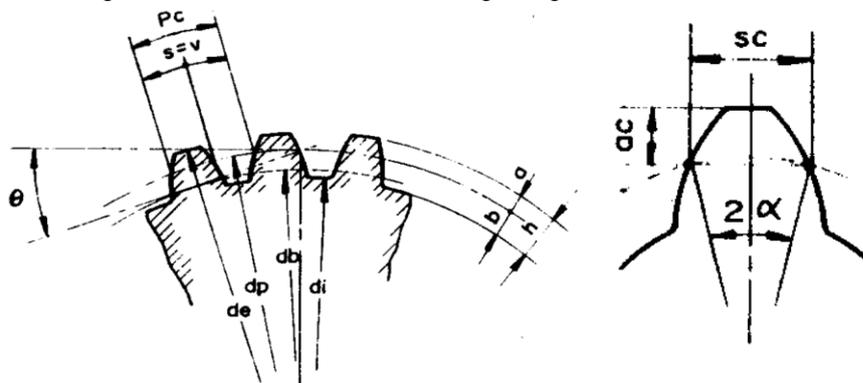
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (15)$$

2.4 DIMENSIONAMENTO DE ENGRENAGENS DE DENTES RETOS

No projeto, faz-se necessário o dimensionamento um par de engrenagens de dentes retos, a ser usado no sistema de exaustão de gás. Para dimensionar as engrenagens, utiliza-se a sequência de cálculos a seguir, detalhados por Medinger (2020), que tomou como base a obra de Provenza (1991). A Figura 8 a seguir ilustra os principais parâmetros geométricos de uma engrenagem.

Figura 8 – Parâmetros de uma engrenagem de dentes retos.



Fonte: Provenza (1991, p. 164).

Inicialmente define-se o diâmetro primitivo e o número de dentes. Mesmo que esses valores mudem posteriormente, deve-se escolher um valor inicial para começar os cálculos. Após isso, determina-se o módulo m com a eq. 16. O diâmetro externo D_E , o diâmetro base D_B e o diâmetro interno são definidos, respectivamente, pelas equações 17, 18 e 19, respectivamente, onde θ é o ângulo de pressão, que será tomado como 20° . O ângulo do dente α , por sua vez, é definido pela eq. 20.

$$D_p = mZ \quad (16)$$

$$D_E = m(Z + 2) \quad (17)$$

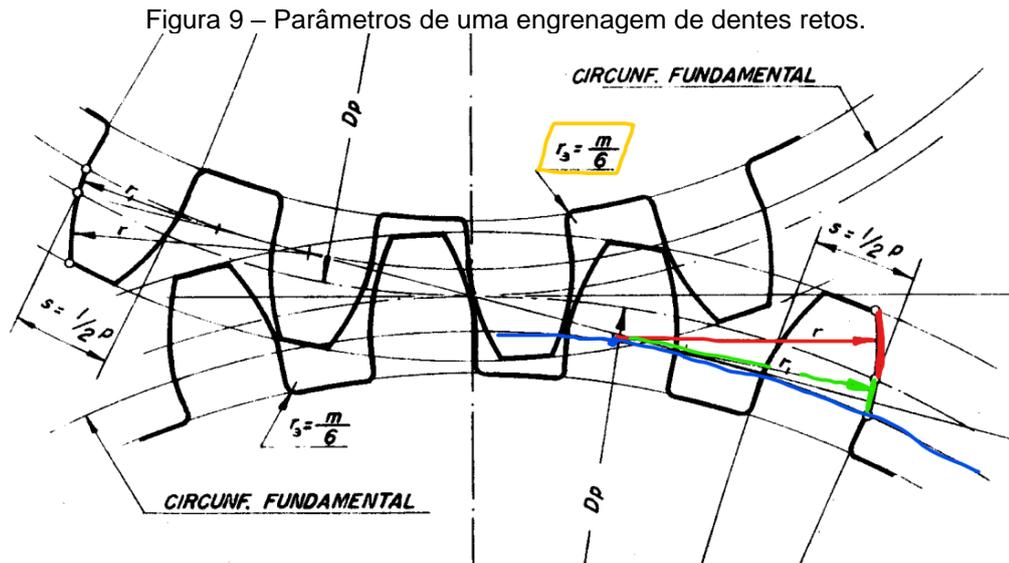
$$D_B = D_p \cos \theta \quad (18)$$

$$D_i = m(Z - 2.334) \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{90}{Z} \quad (20)$$

Ainda tomando base as referências Medinger (2020) e Provenza (1991), o próximo passo é determinar os parâmetros r e r_1 (evidenciados em vermelho e verde,

respectivamente, na Figura 9), que são dados pelas equações 21 e 22, sendo os fatores f e f' provenientes de tabela tendo como base o número de dentes Z . Percebe-se que os raios r e r_1 possuem centro contidos na linha do diâmetro base. Por sua vez, o raio do filete de adoçamento r_3 é dado pelo módulo dividido por 6 (evidenciado em amarelo na Figura 9).



Fonte: Provenza (1991, p. 190).

Finalmente, é necessário usar a eq. 23 (os índices 1 e 2 se referem às duas engrenagens de um par) para relacionar o diâmetro primitivo com o número de dentes e o passo da engrenagem, medida essencial a fim de promover o engrenamento entre duas engrenagens. Além disso, a eq. 24, que pode ser deduzida da eq. 23, é importante no dimensionamento do par de engrenagens (Shigley, 2015, p. 671).

$$r = fm \quad (21)$$

$$r_1 = f'm \quad (22)$$

$$D_{P1} = \frac{Z_1}{\text{Passo}} \therefore D_{P2} = \frac{Z_2}{\text{Passo}} \quad (23)$$

$$\frac{N_1}{D_{P1}} = \frac{N_2}{D_{P2}} \quad (24)$$

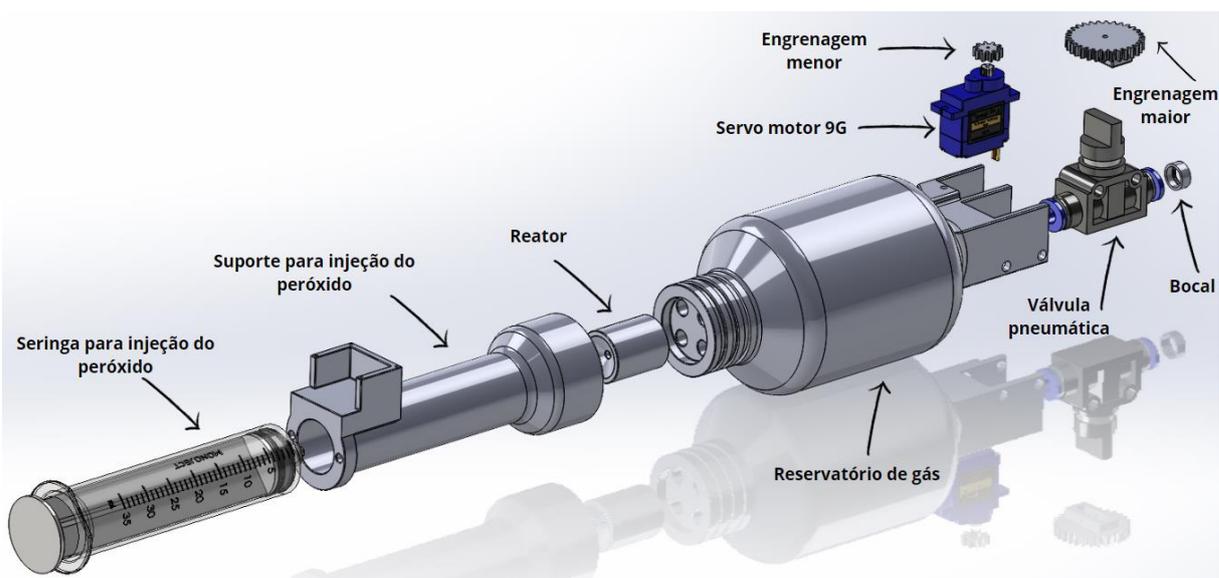
3 METODOLOGIA

Nesta seção, será demonstrada a aplicação da teoria termodinâmica exposta na revisão bibliográfica no atual projeto de propulsor desenvolvido neste trabalho.

3.1 DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DO PROPULSOR

O projeto conceitual do propulsor aqui apresentado (Figura 10) teve início a partir de uma série de possibilidades avaliadas de maneira abstrata e iterativa. Isto é, uma série de opções de construção foram pensadas e diversos rascunhos iniciais foram feitos. O que se apresentou de forma mais lógica e simples construtivamente foi escolhido para ser desenvolvido.

Figura 10 – Projeto conceitual do propulsor completo.



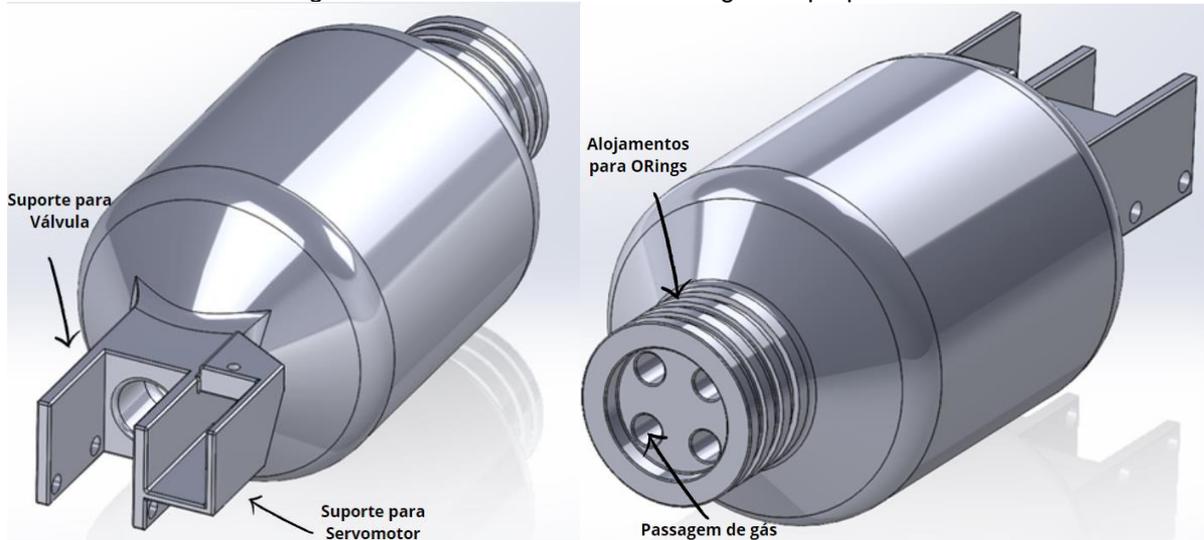
Fonte: Autor.

Tal conceito consiste em um sistema de injeção de monopropelente (seringa e suporte para injeção), um reator (onde será armazenado o catalisador) e um reservatório de gás para armazenar os gases até sua liberação pelo bocal. Uma válvula pneumática libera ou restringe a saída de gás do reservatório. O par de engrenagens junto ao servo motor tem como função realizar o acionamento da válvula pneumática. Vale ressaltar que a seringa é inserida de maneira permanente no suporte, ficando móvel apenas o pistão com o êmbolo. O reator (onde fica o

catalisador), por sua vez, também é inserido no suporte para injeção do peróxido. A válvula pneumática comercial (de diâmetro nominal para acoplamento no valor de 6 mm) e o servo motor (modelo comercial “Tower Pro Micro Servo 9G SG90”) são acoplados na saída do reservatório de gás, em estrutura feita sob medida.

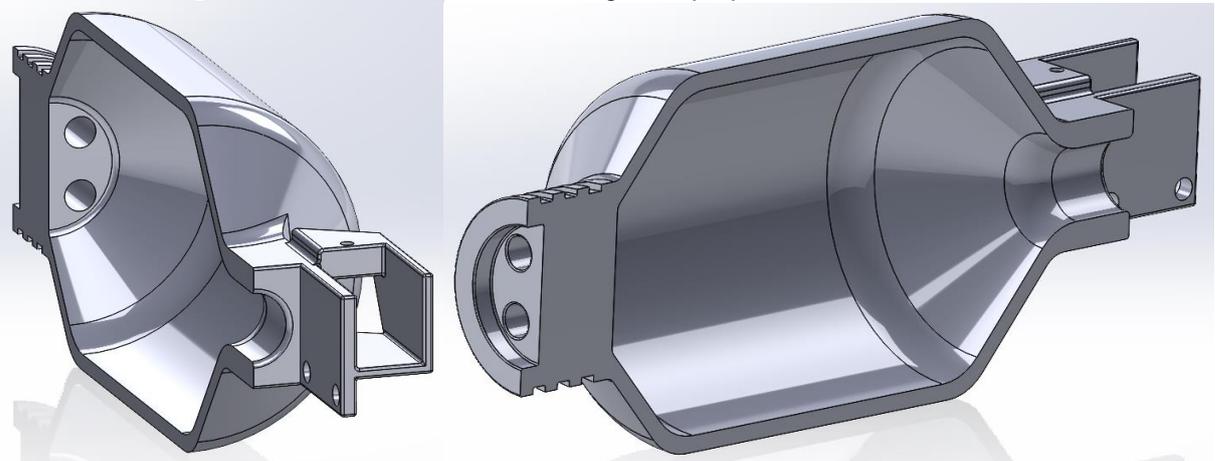
O reservatório de gás armazena os gases vapor de água e oxigênio gerados na decomposição do peróxido. As Figuras 11 e 12 apresentam o modelo do reservatório. Pelo fato de o peróxido usado não ter alta concentração, pode existir um volume de água em estado líquido retido no sistema. Nesse sentido, deve-se ainda pensar em uma forma drenar esse fluido. No entanto, esse problema é minimizado caso seja usado peróxido de hidrogênio em maiores concentrações.

Figura 11 – Sistema reservatório de gás do propulsor.



Fonte: Autor.

Figura 12 – Sistema reservatório de gás do propulsor com vista em corte.



Fonte: Autor.

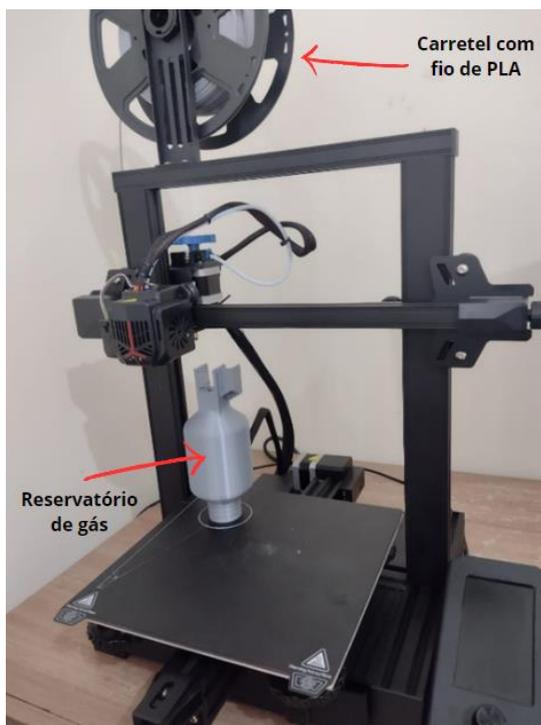
A configuração do dispositivo ainda sofreu variações ao longo do processo de desenvolvimento, de forma que diversas mudanças tiveram de ser feitas para tornar o projeto mais robusto. Vale ressaltar que o projeto aqui apresentado está em fase conceitual. Não existe a pretensão de que o modelo aqui apresentado já esteja próximo ao design a ser implementado em um projeto de satélite comercial. O que se apresenta é um protótipo feito para se avaliar o funcionamento geral do conceito, isto é, dos principais sistemas envolvidos. Para trabalhos futuros, recomenda-se o uso de elementos comerciais miniaturizados, tais como válvulas pneumáticas controladas por solenoides, bem como bombas miniaturizadas para realizar a injeção do combustível.

3.1.1 Fabricação via Impressão 3D

A modelagem computacional dos componentes mecânicos foi realizada com o uso da ferramenta CAD SolidWorks, sendo utilizada para tal uma licença na modalidade estudantil. A fabricação mecânica dos componentes do propulsor, com exceção dos componentes comerciais (válvulas, servo motores, anéis de vedação etc.) foi realizada por meio de impressão 3D com uma impressora de modelo *Ender 3 V2 Neo* adquirida pelo autor (Figura 11). O material usado nas impressões foi o plástico PLA do tipo *Easyfill*, da marca *3DFila*. A impressão foi realizada utilizando o software de fatiamento *UltiMaker Cura*. O princípio básico do software é ler um arquivo de desenho em CAD (sendo o “. STL” um típico tipo de arquivo usado) e convertê-lo em um arquivo do tipo “.gcode” (que a impressora utiliza).

Esse processo de conversão é o chamado fatiamento. É possível alterar diversas configurações, sendo as principais usadas a percentagem de preenchimento de plástico, a velocidade de impressão e a qualidade da impressão. A resolução usada nas impressões deste trabalho foi aplicada no valor de 0.12 mm, correspondente à máxima qualidade disponível de impressão. Além disso, utilizou-se 100% de preenchimento em todas as impressões.

Figura 13 – Impressora 3D Ender 3 V2 Neo.

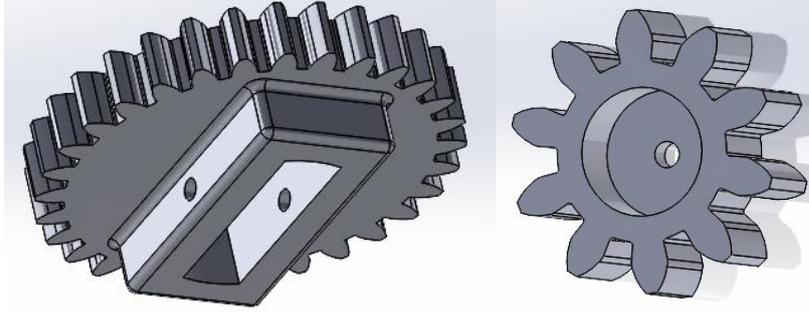


Fonte: Autor.

3.1.2 Dimensionamento de Engrenagens de Dentes Retos para o Sistema de Exaustão de Gás

O modelo de engrenagem foi parametrizado no SolidWorks utilizando o recurso de equações, onde se pode inserir uma série de equações a fim de parametrizar o projeto. Nesse sentido, para desenhar uma nova engrenagem, basta especificar o diâmetro primitivo, o número de dentes e os fatores tabelados f e f' . Um exemplo dessa função do SolidWorks está exposto nas Figuras 15 e 16, onde percebe-se que o usuário só precisa inserir as variáveis “DIAMETRO_PRIMITIVO”, o “Z” (número de dentes), o parâmetro “F” e o “F_LINHA”. Todos os parâmetros restantes são automaticamente definidos pelas equações e o modelo da engrenagem está pronto para impressão. Para o acionamento da válvula de exaustão de gás, projetou-se um par de engrenagens conforme a metodologia apresentada. Tais engrenagens estão apresentadas na Figura 14, sendo os parâmetros construtivos apresentados nas Figuras 15 e 16.

Figura 14 – Par de engrenagens do acionamento da válvula de exaustão.



Fonte: Autor.

Figura 15 – Parâmetros construtivos da engrenagem maior no SolidWorks.

Name	Value / Equation	Evaluates to
Global Variables		
"ANGULO_DE_PRESSAO"	= 20	20
"DIAMETRO_PRIMITIVO"	= 27	27
"Z"	= 30	30
"MODULO"	= "DIAMETRO_PRIMITIVO" / "Z"	0.9
"DIAMETRO_EXTERNO"	= "MODULO" * ("Z" + 2)	28.8
"DIAMETRO_BASE"	= "DIAMETRO_PRIMITIVO" * cos ("ANGULO_DE_PRESSAO")	25.3717
"DIAMETRO_INTERNO"	= "MODULO" * ("Z" - 2.334)	24.8994
"ALFA"	= 90 / "Z"	3
"F"	= 4.06	4.06
"F_LINHA"	= 2.76	2.76
"RAIO_R"	= "F" * "MODULO"	3.654mm
"RAIO_R1"	= "F_LINHA" * "MODULO"	2.484mm
"RAIO_INTERNO"	= "MODULO" / 6	0.15mm

Fonte: Autor.

Figura 16 – Parâmetros construtivos da engrenagem menor no SolidWorks.

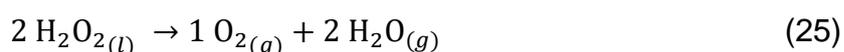
Name	Value / Equation	Evaluates to
Global Variables		
"ANGULO_DE_PRESSAO"	= 20	20
"DIAMETRO_PRIMITIVO"	= 9mm	9mm
"Z"	= 10	10
"MODULO"	= "DIAMETRO_PRIMITIVO" / "Z"	0.9
"DIAMETRO_EXTERNO"	= "MODULO" * ("Z" + 2)	10.8
"DIAMETRO_BASE"	= "DIAMETRO_PRIMITIVO" * cos ("ANGULO_DE_PRESSAO")	8.45723
"DIAMETRO_INTERNO"	= "MODULO" * ("Z" - 2.334)	6.8994
"ALFA"	= 90 / "Z"	9
"F"	= 2.28	2.28
"F_LINHA"	= 0.69	0.69
"RAIO_R"	= "F" * "MODULO"	2.052mm
"RAIO_R1"	= "F_LINHA" * "MODULO"	0.621mm
"RAIO_INTERNO"	= "MODULO" / 6	0.15mm

Fonte: Autor.

3.2 PROJETO TERMODINÂMICO DO PROPULSOR

3.2.1 Estudo Termodinâmico e Dimensionamento do Bocal

As equações de bocal convergente-divergente foram implementadas em código Python. Em um primeiro momento, buscou-se avaliar a dependência entre os parâmetros. Inicialmente, foram definidos os parâmetros que permanecem constante (ou que não possuem variações significativas), sendo eles a constante do gás, a razão de calores específicos, a pressão externa e a temperatura do reservatório. Sabendo a massa molar, a constante do gás e a razão de calores específicos dos produtos oxigênio e vapor de água, obtidos de Cengel e Ghajar (2015, p. 908), determinou-se tais parâmetros para a mistura final dos produtos a partir de cálculo de média ponderada, tomando como base as proporções molares da reação de decomposição do peróxido, eq. 25.



Vale ressaltar que foi considerado que o peróxido de hidrogênio está em concentração de 100%, o que não condiz com a realidade, visto que o peróxido a ser usado neste trabalho apresenta concentração de 35% em volume. A simplificação teve de ser feita porque o modelo termodinâmico de bocal aqui apresentado desconsidera as fases líquidas ou sólidas. As equações que modelam o comportamento do bocal foram implementadas em código Python a fim de estudar a relação entre os parâmetros termodinâmicos e estão expostas no Apêndice D.

O dimensionamento do bocal convergente-divergente foi realizado a partir da sequência de equações apresentadas na revisão bibliográfica. O código do dimensionamento (apresentado no Apêndice C) foi verificado com um exemplo numérico do livro de Sutton e Biblarz (2016). Os parâmetros de entrada do dimensionamento estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada do dimensionamento do bocal.

Parâmetros de Entrada	Valor
Força Empuxo Nominal	10 N
Pressão Interna Nominal	0.3 MPa
Temperatura Interna Nominal	300 K
Pressão Externa	101325 Pa
Razão de Calores Específicos	1.351
Constante do Gás	394.26 J/kg*K

Fonte: Autor.

O bocal será dimensionado para operar no valor de pressão interna de 0.3 MPa, entregando 10 N de empuxo nessa pressão. Por sua vez, considerou-se temperatura ambiente, 300 K, para efeito de simplificação do cálculo preliminar. Na realidade, os gases gerados pela reação estão em temperatura maior, mas como não se sabe qual o valor, foi realizada tal simplificação. O valor de empuxo nominal foi escolhido tendo em vista valores próximos aos trabalhos referenciados na introdução. Vale ressaltar que a preocupação não deve ser com os valores específicos utilizados, mas sim no desenvolvimento da rotina de cálculo. Uma vez feita a rotina, os valores a serem utilizados podem variar conforme aplicação. E, tendo em vista que o propulsor aqui demonstrado está em fase de desenvolvimento conceitual, não é necessário muito rigor na escolha inicial desses parâmetros.

3.2.2 Modelagem da Curva de Decaimento da Pressão no Reservatório

O conjunto de equações apresentadas na seção anterior modelam o comportamento termodinâmico da expansão de um gás em bocal considerando um regime estacionário. Entretanto, na realidade construtiva do propulsor aqui desenvolvido, não é possível manter a pressão interna em valor constante. Nesse sentido, é necessário utilizar as mesmas equações apresentadas na seção anterior com um objetivo diferente: calcular as curvas no tempo dos parâmetros de saída (força de propulsão, propriedades termodinâmicas do gás etc.) utilizando a curva de decaimento de pressão no tempo do reservatório como parâmetro de entrada. Isto é, considerando intervalos de tempo pequenos os suficientes nos quais a pressão pode ser considerada constante, é possível realizar tais cálculos com erro desprezível, sendo possível dessa forma utilizar as equações para estado estacionário nesses pequenos intervalos dt . Uma vez que a força de empuxo está diretamente relacionada à pressão da câmara, faz-se necessário modelar a curva de decaimento da pressão durante um ciclo de operação do propulsor (desde o instante em que a válvula de escape é aberta até quando ela é fechada).

Recapitulando, em um primeiro momento, conforme mostrado na seção de dimensionamento do bocal, define-se valores nominais para a pressão da câmara e para a força de empuxo (força de propulsão) a fim de definir a geometria do bocal, que irá operar de forma ótima para tal valor de pressão. Uma vez dimensionado o bocal, as mesmas equações são utilizadas novamente, mas a pressão e a força de empuxo

apresentam-se não mais como valores fixos de entrada, mas como parâmetros variáveis de entrada e de saída, respectivamente.

Existem duas possíveis abordagens para elaborar a curva de decaimento de pressão do propulsor. A primeira é a elaboração de uma série de testes experimentais para medir a pressão no reservatório a partir de diversos valores de pressão iniciais. A segunda consiste no cálculo teórico com base na lei dos gases ideais e no fluxo mássico de escape em cada instante. É interessante usar ambas as metodologias, mas para uma fase preliminar de projeto, é interessante iniciar pelo método analítico, conforme demonstração a seguir. Esse método foi implementado em código Python (Apêndice E) para a realização dos cálculos iterativos e plotagem dos resultados.

Desprezando-se variações de temperatura, a partir da lei dos gases ideais e do fluxo mássico em cada instante, em um instante inicial, o número de mols de gás no reservatório ($n_{gás}'$) é dada pela eq. 26 (onde p_1' e v são, respectivamente, a pressão e o volume do reservatório).

$$p_1'v = n_{gás}'R_{uni}T_1 \quad (26)$$

Aplicando-se a sequência de equações que modelam o fluxo no bocal, apresentadas na introdução, determina-se a vazão mássica no instante inicial \dot{m}' . A perda de massa dm após um pequeno intervalo dt é dada pela eq. 27. O valor restante de massa no tanque no instante posterior ao dt é dada pela eq. 28, que pode ser escrita em termos de número molar conforme a eq. 29.

$$dm = \dot{m}'dt \quad (27)$$

$$m_{gás}'' = m_{gás}' - \dot{m}'dt \quad (28)$$

$$MM_{gás} n_{gás}'' = MM_{gás} n_{gás}' - \dot{m}'dt \therefore n_{gás}'' = n_{gás}' - \frac{\dot{m}'dt}{MM_{gás}} \quad (29)$$

Finalmente, pode-se determinar a pressão no instante posterior (p_1'') usando novamente a lei dos gases ideias, mas com o novo valor de número molar sendo $n_{gás}''$, conforme eq. 30. Reinicia-se o cálculo para mais uma iteração no tempo dt , repetindo-se o cálculo até o instante no qual a válvula é fechada. Com o decaimento de pressão conhecido, basta aplicar as equações termodinâmicas do bocal para cada iteração a fim de definir a curva de empuxo no tempo.

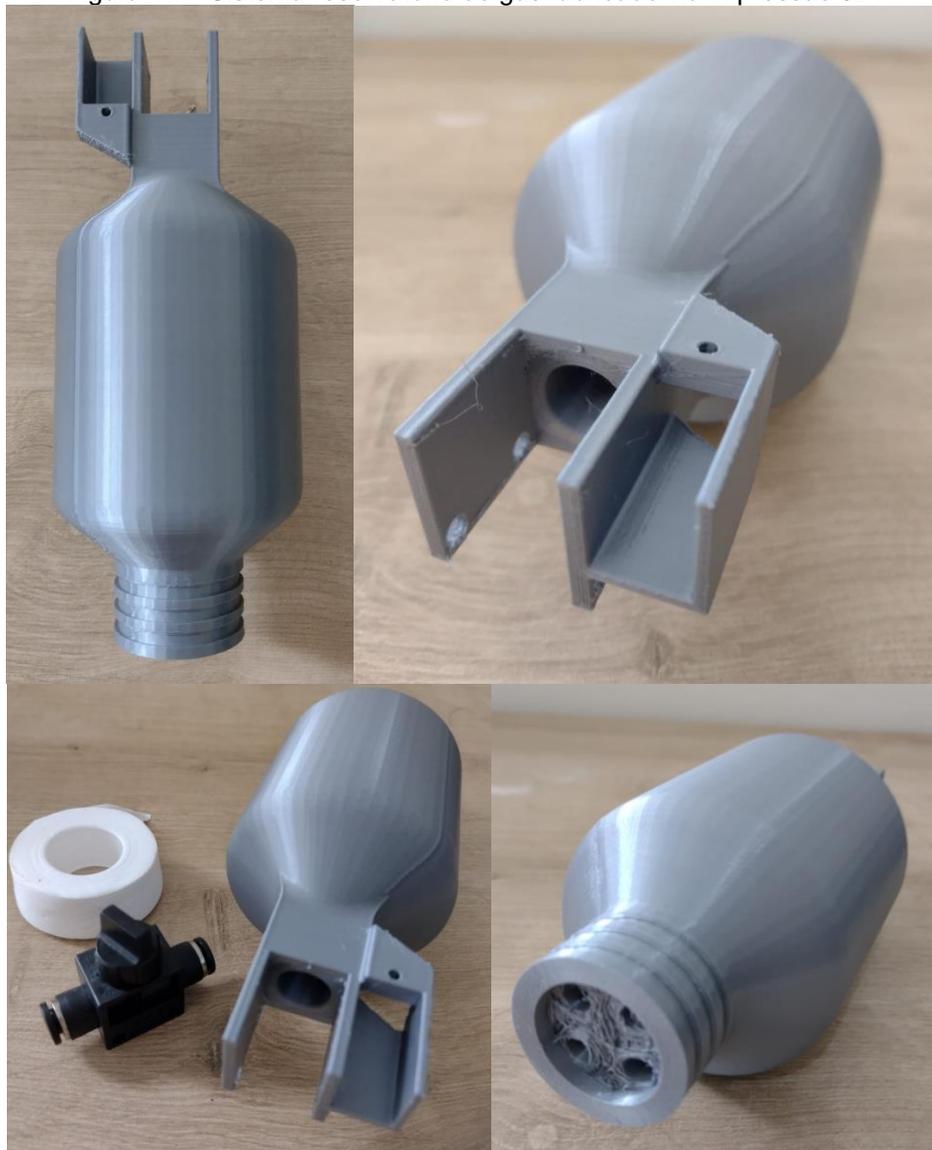
$$p_1'' = \frac{n_{gás}'' R_{uni} T_1}{V_1} \quad (30)$$

4 RESULTADOS

4.1 DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DO PROPULSOR

O reservatório de gás foi fabricado via impressão 3D, obtendo-se o resultado da Figura 17. Vale ressaltar que, uma vez que o dispositivo apresentado está em fase de desenvolvimento conceitual, não é necessária a especificação de cotas ou medidas do dispositivo. O objetivo da fase conceitual é avaliar a viabilidade do conceito antes de avançar para fases posteriores de projeto, tais como a etapa de projeto detalhado, na qual todo o detalhamento técnico do dispositivo se faz necessário.

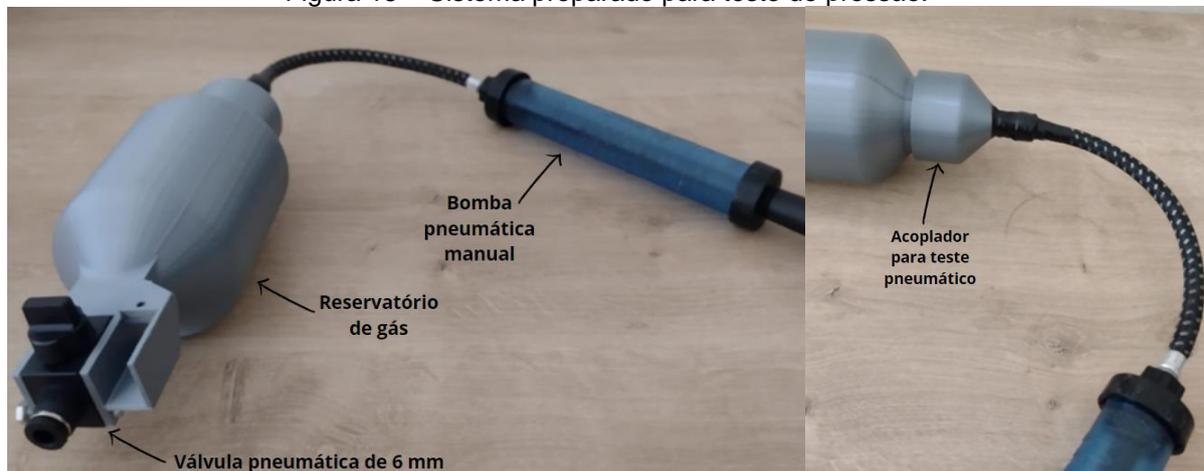
Figura 17 – Sistema reservatório de gás fabricado via impressão 3D.



Fonte: Autor.

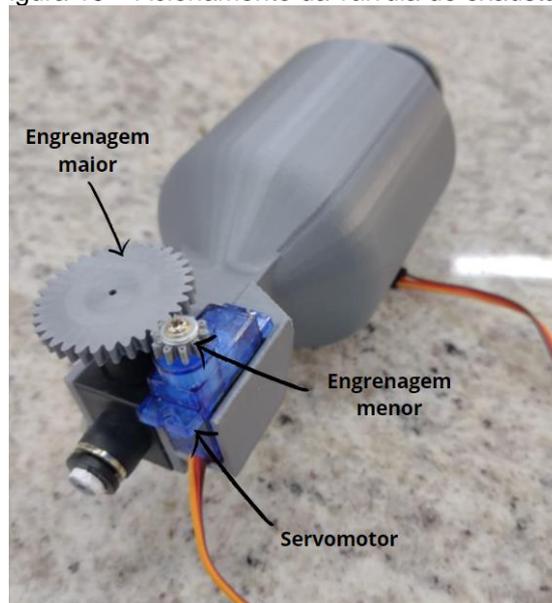
A outra extremidade contém o acoplamento para a válvula pneumática feito sob medida, bem como o alojamento para o motor de passo para acioná-la, ao lado. Foi realizado um teste qualitativo para avaliar a estanqueidade do sistema. O teste consistiu no acoplamento de uma pequena bomba manual de ar a uma peça feita sob medida para acoplar ao terminal da bomba, conforme a Figura 18. Foi realizada uma injeção gradual de ar atmosférico no reservatório através da bomba manual. Concluiu-se que o sistema suporta a pressão por alguns minutos. Para o acionamento da válvula de saída por um servo motor (Figura 19), foi dimensionado um par de engrenagens conforme a metodologia apresentada na seção 3.1.2.

Figura 18 – Sistema preparado para teste de pressão.



Fonte: Autor.

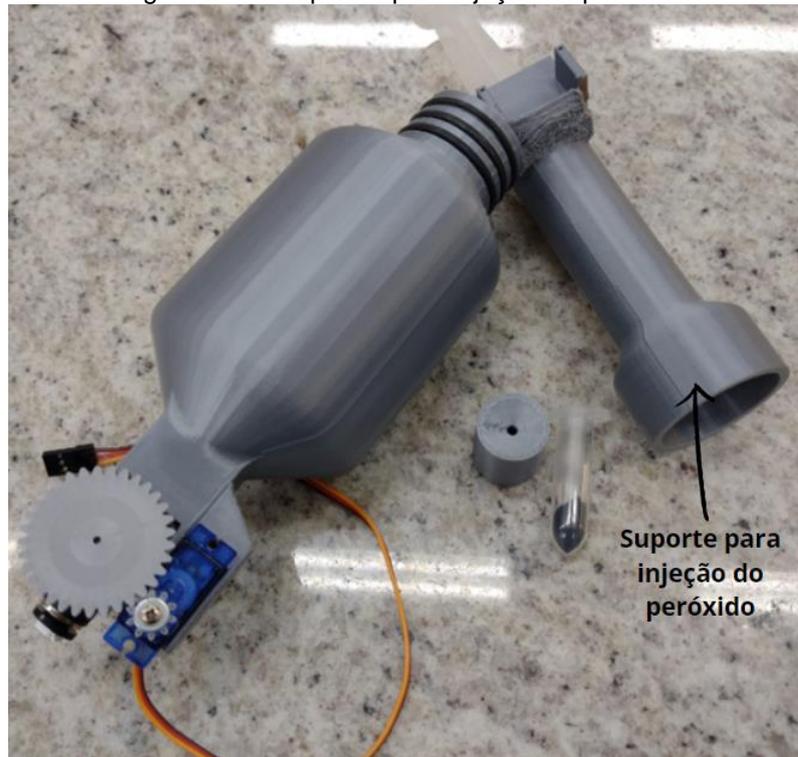
Figura 19 – Acionamento da válvula de exaustão.



Fonte: Autor.

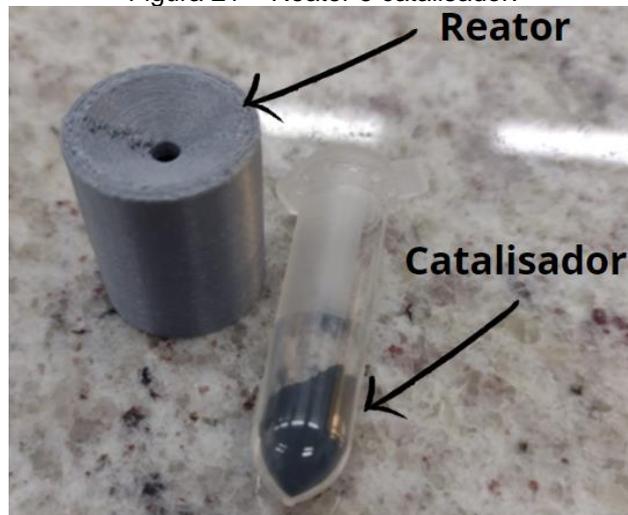
Em relação ao sistema de injeção de peróxido, foi dimensionado um suporte para a injeção do peróxido (Figura 20) com o objetivo de conectar uma seringa (contendo o peróxido) ao reservatório de gás. Por sua vez, o reator (Figura 21) fica inserido no interior do suporte, logo após a seringa. Ele tem o formato de “funil” nos dois lados, com o objetivo de manter o pó no interior do recipiente, mas ainda permitir a passagem dos gases de exaustão.

Figura 20 – Acoplador para injeção de peróxido.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Reator e catalisador.



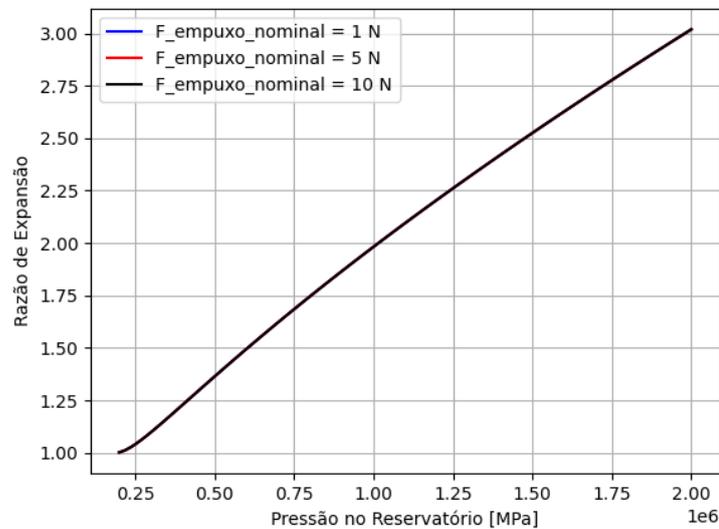
Fonte: Autor.

4.2 PROJETO TERMODINÂMICO DO PROPULSOR

4.2.1 Estudo Termodinâmico e Dimensionamento do Bocal

O objetivo dessa seção é realizar o estudo da relação entre os parâmetros termodinâmicos do bocal. As forças nominais escolhidas foram baseadas em valores próximos da literatura, mas no presente momento tem apenas propósito ilustrativo para demonstrar a relação entre os parâmetros. Prosseguindo com a análise, o Gráfico 1 (gerado pelo script Python do Apêndice D) revela que a razão de expansão independe da força de empuxo nominal ao qual o bocal será dimensionado, sendo uma dependência linear da pressão interna do reservatório. No gráfico apresentado, todas as linhas para as diferentes forças de empuxo nominal estão coincidindo em uma única linha. Dessa forma, a razão de áreas é definida em função da pressão do reservatório, o que era esperado tendo em vista a equação 8.

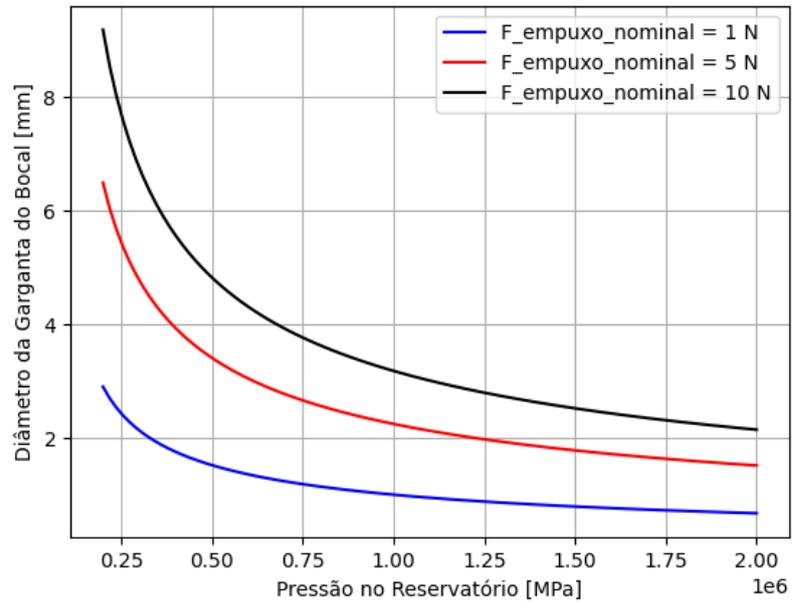
Gráfico 1 – Razão de expansão em função da pressão do reservatório.



Fonte: Autor.

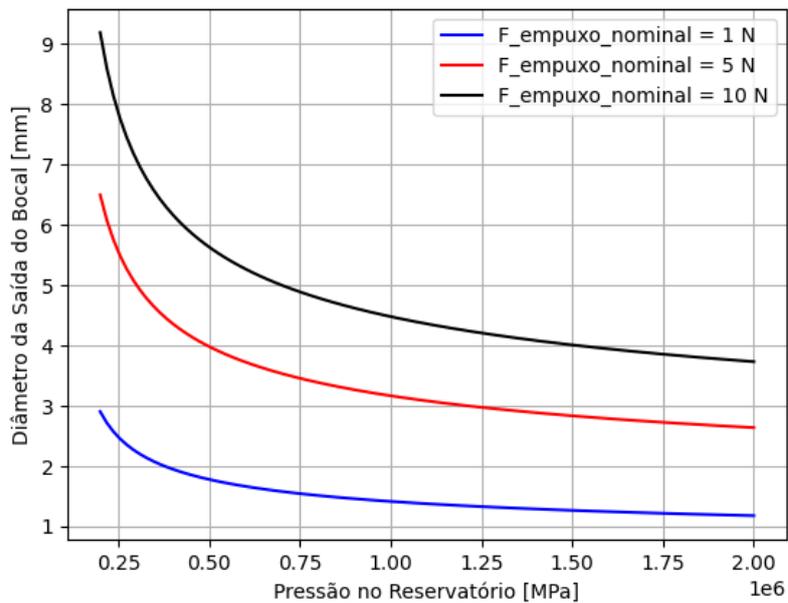
Entretanto, apesar de tal razão permanecer constante para diferentes valores de força de empuxo nominal, os valores de fato da área de garganta e da área de saída se modificam conforme os Gráficos 2 e 3. Logo, quanto maior a pressão, menor os diâmetros de garganta e de saída, o que faz sentido tendo em vista que diâmetros menores promovem uma maior dificuldade para a saída do gás, aumentando a pressão interna do reservatório. Todavia, os diâmetros aumentam conforme o empuxo nominal aumenta.

Gráfico 2 – Diâmetro da garganta em função da pressão do reservatório.



Fonte: Autor.

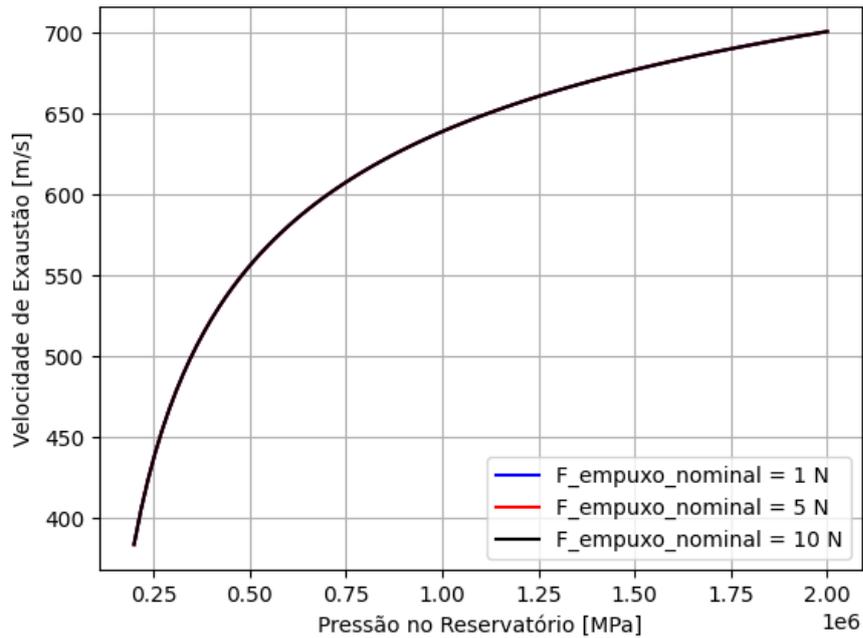
Gráfico 3 – Diâmetro da saída em função da pressão do reservatório.



Fonte: Autor.

Por sua vez, a velocidade de exaustão cresce de forma logarítmica (conforme a pressão aumenta) da mesma forma que o fluxo mássico decai de forma logarítmica (Gráficos 4 e 5, respectivamente). Isso é explicado pelo fato de que está se restringindo a força de empuxo a um valor nominal fixo.

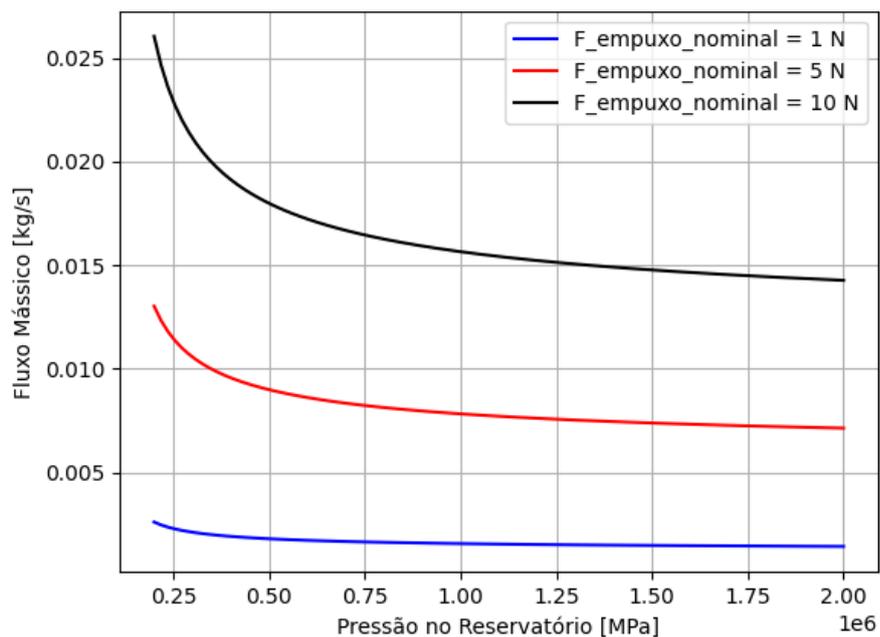
Gráfico 4 – Velocidade de escape em função da pressão do reservatório.



Fonte: Autor.

Dessa forma, para manter o empuxo constante, como a velocidade está aumentando conforme a pressão interna aumenta, o fluxo mássico deve reduzir na mesma proporção a fim de manter o valor de empuxo nominal constante, em decorrência da restrição de empuxo estabelecida. E para que haja tal redução do fluxo mássico, a área de saída e de garganta sofrem a redução necessária a fim de manter a força de empuxo constante, conforme visto acima (Gráficos 2 e 3).

Gráfico 5 – Fluxo mássico em função da pressão do reservatório.



Fonte: Autor.

Finalmente, o dimensionamento do bocal convergente-divergente foi realizado conforme metodologia apresentada, resultando nos valores da Tabela 2.

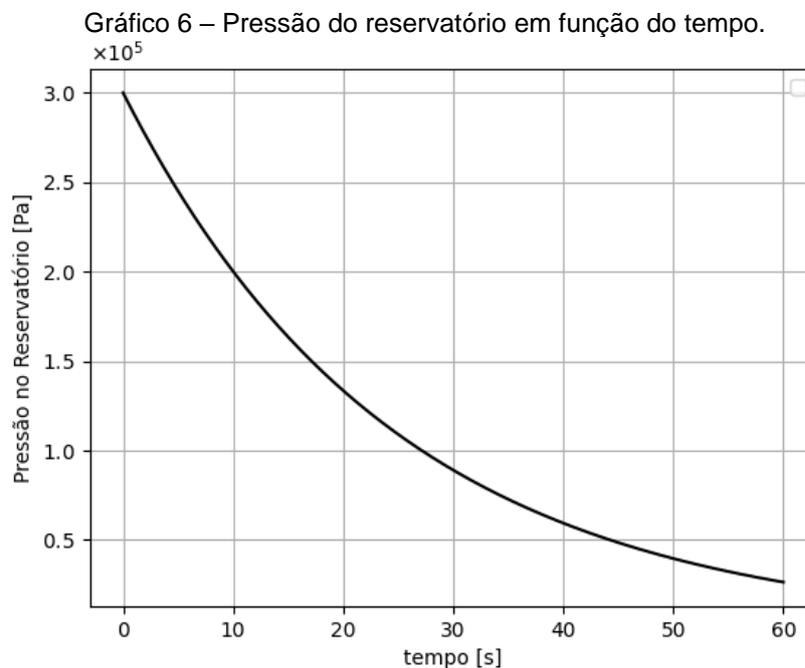
Tabela 2 – Parâmetros de saída do dimensionamento do bocal.

Parâmetros de Saída	Valor
Razão de Áreas	0.9106
Velocidade de Saída	473.016 [m/s]
Fluxo Mássico	0.0211 [kg/s]
Diâmetro da Garganta	6.755 [mm]
Diâmetro de Saída	7.078 [mm]

Fonte: Autor.

4.2.2 Modelagem da Curva de Decaimento da Pressão no Reservatório

O decaimento da pressão ao longo do intervalo de tempo de um ciclo operação (do instante em que a válvula é aberta até o momento de ela ser fechada) para o propulsor aqui dimensionado é dado no Gráfico 6.

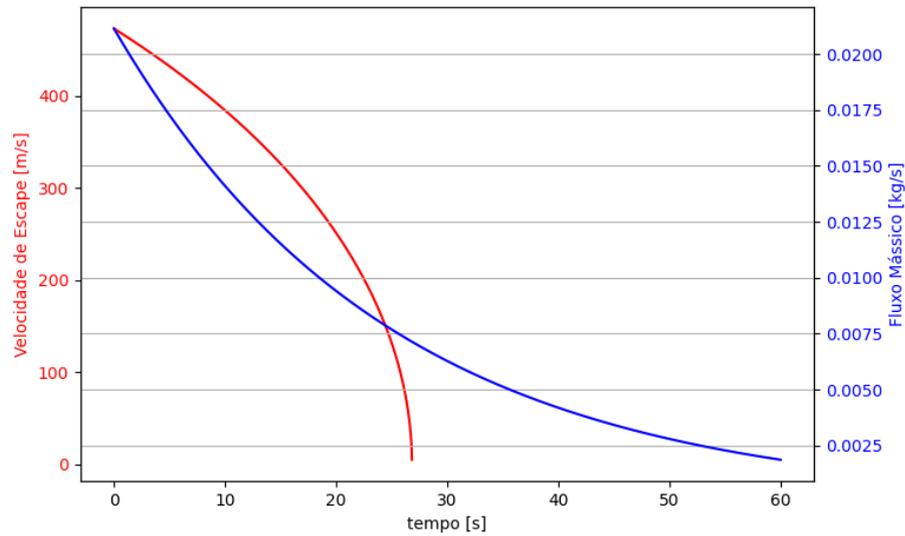


Fonte: Autor.

O Gráfico 7 apresenta a velocidade de escape dos gases e o fluxo mássico ao longo do tempo, onde percebe-se que a velocidade decai de maneira menos acentuada que o fluxo mássico. No final, tal comportamento tende a gerar um

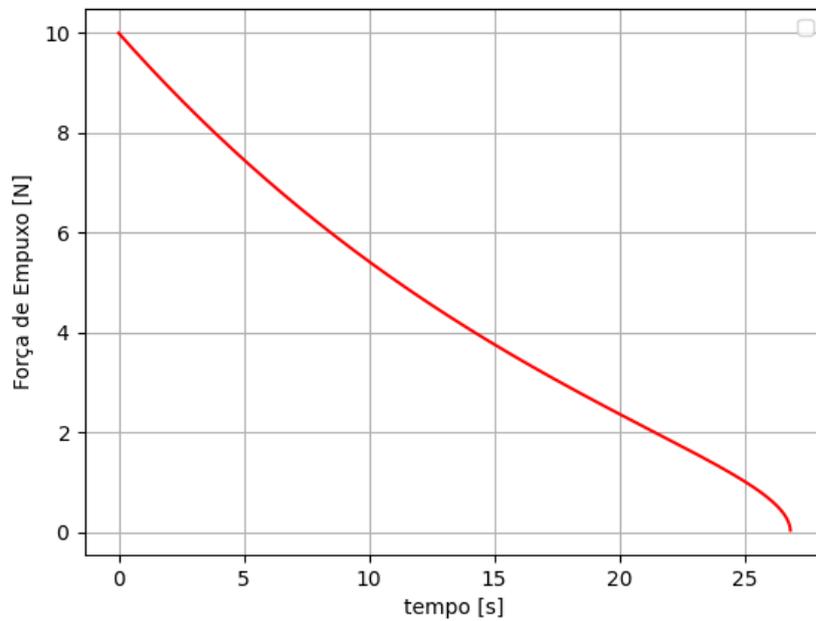
decaimento quase linear da força de empuxo (produto da velocidade pelo fluxo mássico), conforme o Gráfico 8.

Gráfico 7 – Velocidade de escape e fluxo mássico em função do tempo.



Fonte: Autor.

Gráfico 8 – Força propulsiva de empuxo em função do tempo.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento em fase conceitual de um propulsor a monopropelente, onde objetivou-se trazer um conceito construtivo que permitisse a implementação de uma malha de controle fechada a fim de controlar a pressão e, conseqüentemente, a força de empuxo do propulsor. Nesse sentido, o projeto trouxe um dispositivo com uma válvula pneumática na saída do reservatório de gás, a fim de permitir o controle da pressão antes da liberação do gás. A rotina de cálculo em software Python do modelo termodinâmico de bocais convergente-divergente foi realizada, objetivando-se com isso o dimensionamento do bocal e o estudo do comportamento dos parâmetros termodinâmicos durante a operação do propulsor. Além disso, foi realizada a implementação do modelo matemático do decaimento da pressão no reservatório no tempo, a fim de se ter uma rotina para calcular o empuxo gerado ao longo do tempo a partir de uma curva de pressão como entrada no cálculo.

Em relação à forma construtiva do propulsor, uma série de possíveis opções de design foram avaliadas, sendo escolhida para se fazer o protótipo da opção mais lógica e simples para avaliar os princípios básicos de funcionamento. O dispositivo foi manufaturado via impressão 3D, bem como pelo uso de elementos comerciais, tais como válvulas e ORings. Realizou-se um teste qualitativo do propulsor com o peróxido de hidrogênio, onde ficou claro a necessidade de uma válvula para separar o fluido monopropelente do reator. Além disso, ficou clara a necessidade do desenvolvimento de um suporte para o catalisador, para que o monopropelente possa escoar através do suporte, sofrer a decomposição e continuar o caminho do escoamento sem afetar mecanicamente o catalisador. Como indicação para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de elementos comerciais tais como válvulas solenoides e bombas hidráulicas em miniatura. O motivo para isso é trazer maior confiabilidade ao dispositivo.

REFERÊNCIAS

- SUTTON, George P; BIBLARZ, Oscar. **Rocket Propulsion Elements**. 2016.
- BARROS, B. S.; ASSUNÇÃO, V.V. Síntese e Caracterização de catalisadores óxidos para geração de vapor a partir da decomposição de H_2O_2 . Relatório (Iniciação Científica). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. 2021.
- BISPO, T.S.S.C.; ASSUNÇÃO, V.V.; OLIVEIRA, L.R. *et al.* Synthesis and stoichiometric optimization of cobalt-manganese oxide nanocatalysts for decomposition of the green monopropellant H_2O_2 . **Ceramics International**, v. 49, n. 16, p. 26635–26641, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027288422301458X>.
- OGATA, Katsuhiko. **Modern control engineering**. 5 ed. Boston: Prentice-Hall, 2010.
- PASCOA, Jose C.; TEIXEIRA, Odelma; FILIPE, Gustavo. A Review of Propulsion Systems for CubeSats. *In: Volume 1: Advances in Aerospace Technology*. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2018, Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings/IMECE2018/52002/Pittsburgh,%20Pennsylvania,%20USA/275330>.
- TORRE, L.; PASINI, A.; ROMEO, L. *et al.* Performance of a Monopropellant Thruster Prototype Using Advanced Hydrogen Peroxide Catalytic Beds. **Journal of Propulsion and Power**, v. 25, n. 6, p. 1291–1299, 2009. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.44354>.
- MEIRA, Rafael Matias; VIEIRA, Ricardo. Desenvolvimento de catalisadores a base de cobalto e manganês para a decomposição do monopropelente peróxido de hidrogênio. Relatório (Iniciação Científica). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2016.
- PEREIRA, Luís Gustavo Ferroni. **Desenvolvimento de materiais catalíticos à base de óxidos mistos para a decomposição do monopropelente peróxido de hidrogênio**. 2014. Dissertação (Mestrado em Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-24072014-152509/>.
- TUMMALA, Akshay Reddy; DUTTA, Atri. An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends. **Aerospace**, v. 4, n. 4, p. 58, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/4/4/58>.
- KREJCI, David; LOZANO, Paulo. Space Propulsion Technology for Small Spacecraft. **Proceedings of the IEEE**, v. 106, n. 3, p. 362–378, 2018. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8252908/>.
- SANTI, Marco; DORGNACH, Igor; BARATO, Francesco *et al.* Design and Testing of a 3D Printed 10 N Hydrogen Peroxide Monopropellant Thruster. *In: AIAA*

Propulsion and Energy 2019 Forum. Indianapolis: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-4277>>.

CASSESE, S.; GALLO, G.; MUNGIGUERRA, S. et al. Preliminary design and study of 5N HTP monopropellant thruster for small satellites. **Acta Astronautica**. Nápoles, Itália, 2023.

MISHRA, Ansh Atul; MOHITE, Akshat. A Detailed Study and Analysis of Cold Gas Propulsion System. v. 7, n. 10, 2020.

LUGINI, Claudio; ROMANO, Marcello. A ballistic-pendulum test stand to characterize small cold-gas thruster nozzles. **Acta Astronautica**, v. 64, n. 5–6, p. 615–625, 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576508003603>>.

MEDINGER, Andreu. SolidWorks | Aula completa – como calcular e modelar uma engrenagem cilíndrica de dentes retos. YouTube, 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gE6l3MINrtg>>.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. Fifth edition. New York: McGraw Hill Education, 2015.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith; SHIGLEY, Joseph Edward. **Shigley's mechanical engineering design**. 10 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

PROVENZA, Francesco. Desenhista de máquinas. [s.l.], 1991.

Modelo CAD Micro Servo Motor SG90. Grabcad, 2020. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/micro-servo-motor-sg90-1>>.

SINGGIH, Modelo CAD Pneumatic Ball Valve – Hose 6 mm, 2019. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/pneumatic-ball-valve-hose-6-mm-1>>.

Modelo CAD Piston Syringe- 35cc, 2019. Disponível em: <<https://grabcad.com/library/piston-syringe-35cc-1>>.

APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

```

1 #####
2 # PARÂMETROS CONSTANTES
3 p2 = 101325 # Pressão na saída do bocal [Pa]
4 T1 = 300 # Temperatura no reservatório [K]
5 k_o2 = 1.395 # razão de calores específicos do oxigênio
6 k_h2o = 1.329 # razão de calores específicos da água
7 Rgas_o2 = 259.8 # J/kg*K
8 Rgas_h2o = 461.5 # J/kg*K
9 Volume_tanque = 0.00015 # m^3
10 #####
11 # MÉDIA PONDERADA PARA DETERMINAR RAZÃO DE CALORES
12 # ESPECÍFICOS E CONSTANTE DO GÁS DA MISTURA DOS PRODUTOS DA REAÇÃO
13 Runiversal = 8314.3 # J/kg*mol*K
14 massa_molecular = 28.96*(1000) # kg/mol (ar)
15 k = (k_o2+(2*k_h2o))/3
16 Rgas = (Rgas_o2+(2*Rgas_h2o))/3 # J/kg*K
17 print("k =",k)
18 print("Rgas =",Rgas)
19 #####
20 # PARÂMETROS VARIÁVEIS NO DIMENSIONAMENTO
21 F_nominal = 10 # Força de empuxo [N]
22 p1_nominal = 0.3*(10**6) # Pressão no reservatório [Pa]
23 #####

```

APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DO MODELO MATEMÁTICO

```

1 #####
2 # RAZÃO DE ÁREAS DO BOCAL
3 def calc_RazaoAreas(k, p1, p2):
4     RazaoAreas = (((k+1)/2)**(1/(k-1))) * ((p2/p1)**(1/k)) * \
5         | (( (k+1)/(k-1)) * (1-((p2/p1)**((k-1)/k)) )) **0.5)
6     return RazaoAreas
7 #####
8 # VELOCIDADE DOS GASES NA SAÍDA DO BOCAL
9 def calc_v2(k, Rgas, p1, p2, T1):
10    v2 = ( ((2*k)/(k-1)) * (Rgas*T1) * (1-((p2/p1)**((k-1)/k))) ) **0.5
11    return v2
12 #####
13 # FLUXO MÁSSICO
14 def calc_mflow(At, p1_nominal, k, Rgas, T1):
15    mflow = At*p1_nominal*k*( (( 2/(k+1) )**((k+1)/(k-1)) ) **0.5) \
16    | | | | | / ((k*Rgas*T1)**0.5) )
17    return mflow
18 #####
19 # ÁREA DE SEÇÃO DA GARGANTA
20 def calc_At(k, mflow, p1, Rgas, T1):
21    At = (mflow/p1)*(( (Rgas*T1)/(k*( ( 2/(k+1) )**((k+1)/(k-1)) )) ) **0.5)
22    return At
23 #####
24 # ÁREA DE SEÇÃO DA SAÍDA
25 def calc_A2(At, RazaoAreas):
26    A2 = At/RazaoAreas
27    return A2
28 #####

```

APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DA ROTINA DE DIMENSIONAMENTO DO BOCAL

```

1  import numpy as np
2  from MODELO_MATEMATICO import calc_RazaoAreas, calc_v2, calc_At, calc_A2
3  from ENTRADA import p2, T1, k, Rgas, F_nominal, p1_nominal
4  #####
5  # FUNÇÃO PARA DIMENSIONAR O PROPULSOR
6  def dimensionar(F, p1):
7      RazaoAreas = calc_RazaoAreas(k, p1, p2)
8      v2 = calc_v2(k, Rgas, p1, p2, T1)
9      mflow = F/v2
10     At = calc_At(k, mflow, p1, Rgas, T1)
11     A2 = calc_A2(At, RazaoAreas)
12     Dt = ((4*At)/np.pi)**0.5
13     D2 = ((4*A2)/np.pi)**0.5
14     resultado = {
15         'RazaoAreas':RazaoAreas,
16         'v2':v2,
17         'mflow':mflow,
18         'At': At,
19         'A2': A2,
20         'Dt': Dt,
21         'D2': D2,
22         'print': [
23             "RazaoAreas = "+str(round(RazaoAreas,4)),
24             "v2 = "+str(round(v2,3))+"[m/s]",
25             "mflow = "+str(round(mflow,4))+"[kg/s]",
26             "At = "+str(round(At,10))+"[m^2]",
27             "A2 = "+str(round(A2,10))+"[m^2]",
28             "Dt = "+str(round(Dt*(10**3),3))+"[mm]",
29             "D2 = "+str(round(D2*(10**3),3))+"[mm]"
30         ]
31     }
32     return resultado
33     print(dimensionar(F_nominal, p1_nominal))
34     #####

```

APÊNDICE D – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DA ROTINA DE ESTUDO DO BOCAL

```

1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  from MODELO_MATEMATICO import calc_RazaoAreas, calc_v2, calc_At, calc_A2
4  from ENTRADA import p2, T1, k, Rgas
5  #####
6  ### PLOT DOS PARÂMETROS EM FUNÇÃO DO RANGE DE PRESSÕES INTERNA
7  tam_vetor = 100
8  p1_inicial = int(0.2*(10**6)) # Pressão inicial no reservatório [Pa]
9  p1_final = int(2*(10**6)) # Pressão final no reservatório [Pa]
10 step = (p1_final-p1_inicial)/(tam_vetor-1)
11 p1_vetor = [i for i in range(p1_inicial, p1_final, step)]
12 #####
13 # INICIALIZANDO OS VETORES
14 Vetor_RazaoExpansao = []
15 Vetor_v2 = []
16 Vetor_mflow = []
17 Vetor_At = []
18 Vetor_A2 = []
19 Vetor_Dt = []
20 Vetor_D2 = []
21 #####
22 # INICIALIZANDO AS LISTAS PARA ARMAZENAR OS VETORES
23 Lista_F_nominal = [1,5,10] # Força nominal [N]
24 Lista_RazaoExpansao = []
25 Lista_v2 = []
26 Lista_mflow = []
27 Lista_At = []
28 Lista_A2 = []
29 Lista_Dt = []
30 Lista_D2 = []

```

```

31 #####
32 # REALIZAR OS CÁLCULOS PARA CADA FORÇA NOMINAL DA LISTA
33 for forca in Lista_F_nominal:
34     for p1 in p1_vetor:
35         #####
36         RazaoAreas = calc_RazaoAreas(k, p1, p2)
37         RazaoExpansao = 1/RazaoAreas
38         v2 = calc_v2(k, Rgas, p1, p2, T1)
39         mflow = forca/v2
40         At = calc_At(k, mflow, p1, Rgas, T1)
41         A2 = calc_A2(At, RazaoAreas)
42         Dt = ((4*At)/np.pi)**0.5
43         D2 = ((4*A2)/np.pi)**0.5
44         Vetor_RazaoExpansao.append(RazaoExpansao)
45         Vetor_v2.append(v2)
46         Vetor_mflow.append(mflow)
47         Vetor_At.append(At)
48         Vetor_A2.append(A2)
49         Vetor_Dt.append(Dt*1000)
50         Vetor_D2.append(D2*1000)
51         #####
52         # ARMAZENAR OS VETORES EM UMA LISTA
53         Lista_RazaoExpansao.append(Vetor_RazaoExpansao)
54         Lista_v2.append(Vetor_v2)
55         Lista_mflow.append(Vetor_mflow)
56         Lista_At.append(Vetor_At)
57         Lista_A2.append(Vetor_A2)
58         Lista_Dt.append(Vetor_Dt)
59         Lista_D2.append(Vetor_D2)

```

```

60 #####
61 # LIMPAR OS VETORES PARA ARMAZENAR OS CÁLCULOS DA PRÓXIMA ITERAÇÃO
62 Vetor_RazaoExpansao = []
63 Vetor_v2 = []
64 Vetor_mflow = []
65 Vetor_Dt = []
66 Vetor_D2 = []
67 Vetor_At = []
68 Vetor_A2 = []
69 #####
70 # PLOT DA RAZÃO DE EXPANSÃO VERSUS PRESSÃO NO RESERVATÓRIO
71 plt.plot(p1_vetor, Lista_RazaoExpansao[0], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[0]} N', linestyle='-', color='blue')
72 plt.plot(p1_vetor, Lista_RazaoExpansao[1], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[1]} N', linestyle='-', color='red')
73 plt.plot(p1_vetor, Lista_RazaoExpansao[2], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[2]} N', linestyle='-', color='black')
74 plt.xlabel('Pressão no Reservatório [MPa]')
75 plt.ylabel('Razão de Expansão')
76 # plt.title('Razão de Expansão versus Pressão no Reservatório')
77 plt.legend()
78 plt.grid(True)
79 plt.show()
80 #####
81 # PLOT DA VELOCIDADE DE EXAUSTÃO VERSUS PRESSÃO NO RESERVATÓRIO
82 plt.plot(p1_vetor, Lista_v2[0], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[0]} N', linestyle='-', color='blue')
83 plt.plot(p1_vetor, Lista_v2[1], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[1]} N', linestyle='-', color='red')
84 plt.plot(p1_vetor, Lista_v2[2], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[2]} N', linestyle='-', color='black')
85 plt.xlabel('Pressão no Reservatório [MPa]')
86 plt.ylabel('Velocidade de Exaustão [m/s]')
87 # plt.title('Velocidade de Exaustão versus Pressão no Reservatório')
88 plt.legend()
89 plt.grid(True)
90 plt.show()

```

```

91 #####
92 # PLOT DO FLUXO MÁSSICO VERSUS PRESSÃO NO RESERVATÓRIO
93 plt.plot(p1_vetor, Lista_mflow[0], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[0]} N', linestyle='-', color='blue')
94 plt.plot(p1_vetor, Lista_mflow[1], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[1]} N', linestyle='-', color='red')
95 plt.plot(p1_vetor, Lista_mflow[2], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[2]} N', linestyle='-', color='black')
96 plt.xlabel('Pressão no Reservatório [MPa]')
97 plt.ylabel('Fluxo Mássico [kg/s]')
98 # plt.title('Fluxo Mássico versus Pressão no Reservatório')
99 plt.legend()
100 plt.grid(True)
101 plt.show()
102 #####
103 # PLOT DO DIÂMETRO DA GARGANTA E DO DIÂMETRO DE SAÍDA DO BOCAL VERSUS PRESSÃO NO RESERVATÓRIO
104 plt.plot(p1_vetor, Lista_Dt[0], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[0]} N', linestyle='-', color='blue')
105 plt.plot(p1_vetor, Lista_Dt[1], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[1]} N', linestyle='-', color='red')
106 plt.plot(p1_vetor, Lista_Dt[2], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[2]} N', linestyle='-', color='black')
107 plt.xlabel('Pressão no Reservatório [MPa]')
108 plt.ylabel('Diâmetro da Garganta do Bocal [mm]')
109 # plt.title('Diâmetro da Garganta do Bocal versus Pressão no Reservatório')
110 plt.legend()
111 plt.grid(True)
112 plt.show()
113 #####
114 # PLOT DO DIÂMETRO DA SAÍDA DO BOCAL VERSUS PRESSÃO NO RESERVATÓRIO
115 plt.plot(p1_vetor, Lista_D2[0], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[0]} N', linestyle='-', color='blue')
116 plt.plot(p1_vetor, Lista_D2[1], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[1]} N', linestyle='-', color='red')
117 plt.plot(p1_vetor, Lista_D2[2], Label=f'F_empuxo_nominal = {Lista_F_nominal[2]} N', linestyle='-', color='black')
118 plt.xlabel('Pressão no Reservatório [MPa]')
119 plt.ylabel('Diâmetro da Saída do Bocal [mm]')
120 # plt.title('Diâmetro da Saída do Bocal versus Pressão no Reservatório')
121 plt.legend()
122 plt.grid(True)
123 plt.show()
124 #####

```

APÊNDICE E – IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON DA ROTINA DE ESTUDO DA OPERAÇÃO DO PROPULSOR

```

1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  from matplotlib.ticker import ScalarFormatter
4  from MODELO_MATEMATICO import calc_v2
5  from ENTRADA import p2, T1, k, Rgas, F_nominal, p1_nominal, Volume_tanque, Runiversal, massa_molecular
6  from DIMENSIONAR import dimensionar
7  #####
8  resultado = dimensionar(F_nominal, p1_nominal)
9  At = resultado['At']
10 #####
11 ### MODELAGEM DA CURVA DE DECAIMENTO DE PRESSÃO A PARTIR DE UM VALOR INICIAL ATÉ UM VALOR FINAL DE PRESSÃO
12 tempo_inicial = 0.0 #segundos
13 tempo_final = 60.0 #segundos
14 num_steps = 10000
15 tempo_vetor = np.linspace(tempo_inicial, tempo_final, num_steps)
16 dt = (tempo_final-tempo_inicial)/num_steps
17 #####
18 # INICIAR OS VETORES
19 Vetor_p1 = np.empty(len(tempo_vetor), dtype=float)
20 Vetor_forca = np.empty(len(tempo_vetor), dtype=float)
21 Vetor_v2 = np.empty(len(tempo_vetor), dtype=float)
22 Vetor_mflow = np.empty(len(tempo_vetor), dtype=float)
23 Vetor_n_mols = np.empty(len(tempo_vetor), dtype=float)
24 Vetor_massa = np.empty(len(tempo_vetor), dtype=float)
25 #####
26 # INSTANTE INICIAL
27 Vetor_p1[0] = p1_nominal
28 Vetor_n_mols[0] = (p1_nominal*Volume_tanque)/(Runiversal*T1)
29 Vetor_v2[0] = calc_v2(k, Rgas, p1_nominal, p2, T1)
30 Vetor_mflow[0] = At*p1_nominal*k*( (( 2/(k+1))**((k+1)/(k-1) ) )**0.5) / ((k*Rgas*T1)**0.5) )
31 Vetor_forca[0] = (Vetor_mflow[0])*(Vetor_v2[0])
32 Vetor_massa[0] = massa_molecular*Vetor_n_mols[0]
33 #####
34 # CÁLCULO ITERATIVO
35 for i in range(0, len(tempo_vetor)-1):
36     Vetor_n_mols[i+1] = Vetor_n_mols[i] - ((Vetor_mflow[i])/massa_molecular)*dt
37     Vetor_p1[i+1] = ((Runiversal*T1)/Volume_tanque)*Vetor_n_mols[i+1]
38     Vetor_v2[i+1] = calc_v2(k, Rgas, Vetor_p1[i+1], p2, T1)
39     Vetor_mflow[i+1] = At*(Vetor_p1[i+1])*k*( (( 2/(k+1))**((k+1)/(k-1) ) )**0.5) / ((k*Rgas*T1)**0.5) )
40     Vetor_forca[i+1] = (Vetor_mflow[i+1])*(Vetor_v2[i+1])
41     Vetor_massa[i+1] = massa_molecular*(Vetor_n_mols[i+1])
42 #####
43 # PLOT DA PRESSÃO NO RESERVATÓRIO
44 fig, ax = plt.subplots()
45 ax.plot(tempo_vetor, Vetor_p1, linestyle='-', color='black')
46 formatter = ScalarFormatter(useMathText=True)
47 formatter.set_powerlimits((-2, 3))
48 ax.yaxis.set_major_formatter(formatter)
49 plt.xlabel('tempo [s]')
50 plt.ylabel('Pressão no Reservatório [Pa]')
51 plt.title('')
52 plt.legend()
53 plt.grid(True)
54 plt.show()

```

```

55 #####
56 # PLOT DA VELOCIDADE E DO FLUXO MÁSSICO NO MESMO GRÁFICO
57 fig, ax1 = plt.subplots()
58 ax1.plot(tempo_vetor, Vetor_v2, color='red')
59 ax1.set_xlabel('tempo [s]')
60 ax1.set_ylabel('Velocidade de Escape [m/s]', color='red')
61 ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='red')
62 ax2 = ax1.twinx()
63 ax2.plot(tempo_vetor, Vetor_mflow, color='blue')
64 ax2.set_ylabel('Fluxo Mássico [kg/s]', color='blue')
65 ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='blue')
66 plt.grid(True)
67 plt.show()
68 plt.show()
69 #####
70 # PLOT DA FORÇA DE EMPUXO
71 fig, ax = plt.subplots()
72 ax.plot(tempo_vetor, Vetor_forca, linestyle='-', color='red')
73 formatter = ScalarFormatter(useMathText=True)
74 formatter.set_powerlimits((-2, 3))
75 ax.yaxis.set_major_formatter(formatter)
76 plt.xlabel('tempo [s]')
77 plt.ylabel('Força de Empuxo [N]')
78 plt.title('')
79 plt.legend()
80 plt.grid(True)
81 plt.show()

```

```

82 #####
83 # PLOT DA VELOCIDADE DE ESCAPE DOS GASES
84 fig, ax = plt.subplots()
85 ax.plot(tempo_vetor, Vetor_v2, linestyle='-', color='red')
86 formatter = ScalarFormatter(useMathText=True)
87 formatter.set_powerlimits((-2, 3))
88 ax.yaxis.set_major_formatter(formatter)
89 plt.xlabel('tempo [s]')
90 plt.ylabel('Velocidade de Escape [m/s]')
91 plt.title('')
92 plt.legend()
93 plt.grid(True)
94 plt.show()
95 #####
96 # PLOT DO FLUXO MÁSSICO
97 plt.plot(tempo_vetor, Vetor_mflow, linestyle='-', color='blue')
98 plt.xlabel('tempo [s]')
99 plt.ylabel('Vazão Mássica [kg/s]')
100 plt.title('')
101 plt.legend()
102 plt.grid(True)
103 plt.show()
104 #####

```