



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

DESENVOLVIMENTO DA VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO PARA MOTOR DE FOGUETE HÍBRIDO

Autor: Kleiton Nunes Silva
Orientador: Prof. Olexiy Shynkarenko, PhD

Brasília, DF
2019



Kleiton Nunes Silva

DESENVOLVIMENTO DA VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO PARA MOTOR DE FOGUETE HÍBRIDO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Olexiy Shynkarenko, PhD

Brasília, DF

2019

Kleitton Nunes Silva

DESENVOLVIMENTO DA VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO PARA MOTOR DE FOGUETE HÍBRIDO/ Kleitton Nunes Silva. – Brasília, DF, 2019-62 p. : 45 il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Olexiy Shynkarenko, PhD

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2019.

1. Válvula de controle. 2. Propulsão híbrida. 3. Controle de vazão. I. Prof. Olexiy Shynkarenko, PhD. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. DESENVOLVIMENTO DA VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO PARA MOTOR DE FOGUETE HÍBRIDO

CDU 02:141:005.6

Kleiton Nunes Silva

DESENVOLVIMENTO DA VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO PARA MOTOR DE FOGUETE HÍBRIDO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 05 de dezembro de 2019:

Prof. Olexiy Shynkarenko, PhD
Orientador

Prof. Jungpyo Lee, PhD
Convidado 1

Prof. Domenico Simone, PhD
Convidado 2

Brasília, DF
2019

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram em minha jornada, principalmente aos meus pais, que estiveram sempre ao meu lado e sempre investiram em mim. Sou extremamente grato a eles por tudo que me proporcionaram. Além dos meus pais, este trabalho é dedicado a minha família e aos meus amigos, que também estão sempre ao meu lado e são responsáveis por uma vida mais feliz.

Resumo

A capacidade de controlar a vazão mássica de oxidante em um motor de foguete híbrido é peça chave para o funcionamento confiável do motor, uma vez que o empuxo gerado é função da vazão mássica de propelentes. Assim, o desenvolvimento de uma válvula de controle de vazão é um passo necessário para o desenvolvimento de motores de foguete híbrido com aplicação de voo. Havendo a necessidade desta tecnologia e observando-se que ela não se encontra disponível no Brasil, decidiu-se desenvolver uma válvula de controle de vazão utilizando componentes encontrados no mercado. A válvula de controle projetada consiste em uma válvula esfera atuada por um servo motor, uma solução simples e robusta. Neste trabalho foi feito o levantamento dos requisitos, a pesquisa de possíveis soluções no mercado, os testes de caracterização dos componentes e os testes de validação da válvula de controle. O projeto mecânico da válvula foi feito pelo Prof. Olexiy Shynkarenko. A válvula de controle apresentou bons resultados e encontra-se atualmente em processo de patenteação.

Palavras-chaves: Válvula de controle, Propulsão híbrida, Controle de vazão.

Abstract

The ability to control the oxidant mass flow rate in a hybrid rocket motor is key to reliable engine operation, since the generated thrust is a function of the propellant mass flow rate. Thus, the development of a flow control valve is a necessary step for the development of hybrid rocket engines with flight application. Given the need for this technology and observing that it is not available in Brazil, it was decided to develop a flow control valve using components found in the market. The designed control valve consists of a ball valve actuated by a servo motor, a simple and robust solution. In this work it was made the definition of requirements, the research of possible solutions in the market, the characterization tests of the components and the validation tests of the control valve. The mechanical design of the valve was made by Prof. Olexiy Shynkarenko. The control valve has shown good results and is currently in the process of patenting.

Key-words: Control valve, Hybrid propulsion, Flow control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Controle preciso do empuxo. (BARTELS, 2019)	16
Figura 2 – Esquemático de um motor foguete líquido com sistema de pressurização por gás pressurizado (SUTTON; BIBLARZ, 2001).	18
Figura 3 – Diagrama de um motor foguete híbrido (DESAIN, 2011).	19
Figura 4 – Motor de foguete híbrido desenvolvido pelo CPL (ANDRIANOV et al., 2015).	20
Figura 5 – Teste estático do motor Firestorm, realizado na bancada de testes do CPL.	20
Figura 6 – Principais partes de uma válvula de controle (BEATER, 2007).	21
Figura 7 – Válvula esfera (DUDADIESEL, 2019) 1. Porca 2. Arruela 3. Haste 4. Alavanca 5. Preme gaxeta 6. Gaxeta 7. Junta 8. Tampa 9. Anel de vedação 10. Sede 11. Esfera 12. Corpo	22
Figura 8 – Válvula borboleta (VALTORC, 2019).	23
Figura 9 – Válvula macho (TECO, 2019).	24
Figura 10 – Esquemático de uma válvula globo (WILLIAMSVALVE, 2019).	25
Figura 11 – Válvula gaveta (WILLIAMSVALVE, 2019).	25
Figura 12 – Válvulas de diafragma – Tipo A e Tipo KB (DRVALVE, 2019).	26
Figura 13 – Gráfico comparativo entre o C_v de diferentes válvulas (NASA, 1973).	27
Figura 14 – Curvas características (ASHRAE, 2012).	28
Figura 15 – Curvas características de diferentes tipos de válvulas (ASHRAE, 2012).	29
Figura 16 – Esquerda – Cilindro de pistão de simples ação. Direita – Cilindro de pistão de dupla ação (SILVA, 2002).	30
Figura 17 – Funcionamento de um atuador pneumático de dupla ação, mecanismo cremalheira e pinhão (cima) e mecanismo jugo escocês (baixo) (ITORK, 2019).	31
Figura 18 – Curvas de torque oferecido pelos atuadores e requisitado pelas válvulas (ITORK, 2019).	31
Figura 19 – Interior de um atuador elétrico, com diversos dispositivos de segurança e controle (LONGTSUEN, 2019).	32
Figura 20 – Válvula com atuador solenoide (WICVALVE, 2019).	33
Figura 21 – Pressão de vapor do óxido nitroso em função da temperatura.	34
Figura 22 – Densidade da fase líquida de óxido nitroso em função da temperatura.	35
Figura 23 – Calculadora de C_v da Swagelok. (Disponível em: https://www.swagelok.com/en/Resource)	38
Figura 24 – Válvula esfera escolhida (SWAGELOK, 2019).	38
Figura 25 – Servo motor escolhido inicialmente. (HITEC, 2018).	39
Figura 26 – Relação de engrenagens fornecida pela ServoCity. (SERVOCITY, 2019)	39

Figura 27 – Design preliminar da válvula	40
Figura 28 – Versão atual da válvula de controle. (SHYNKARENKO, 2019)	41
Figura 29 – Sistema de alimentação de oxidante do CPL.	43
Figura 30 – Aferição do torque por meio do torquímetro e da temperatura por meio do termopar.	44
Figura 31 – Célula de carga usada no teste.	44
Figura 32 – Transferidor usado no teste.	45
Figura 33 – Servo motor com carga de 3 kg.	46
Figura 34 – Bancada de testes do servo motor.	47
Figura 35 – Válvula de controle no sistema de alimentação.	47
Figura 36 – Teste a frio com óxido nitroso.	48
Figura 37 – Teste a quente do motor de foguete híbrido.	48
Figura 38 – Gráfico do torque em função da temperatura.	50
Figura 39 – Curva característica de vazão.	52
Figura 40 – Servo motor não conseguiu erguer a carga de 5 kg.	53
Figura 41 – Curva característica de vazão, válvula posicionada com o servo motor.	55
Figura 42 – Comparação das curvas características de vazão.	55
Figura 43 – Vazão mássica de óxido nitroso em função do ângulo de abertura.	56
Figura 44 – Valores de pressão durante o teste estático.	57
Figura 45 – Variação do ângulo de abertura ao longo do teste.	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Requisitos da válvula de controle	37
Tabela 2 – Comparação de diferentes tipos de válvula de um mesmo tamanho nominal (1/2")	37
Tabela 3 – Especificações técnicas do servo motor D950TW com relação de engrenagens 3.8:1 (SERVOCITY, 2019)(HITEC, 2019)	40
Tabela 4 – Torque de operação da válvula em função da pressão.	49
Tabela 5 – Valores do torque em função da temperatura	50
Tabela 6 – Cálculo do Cv a partir da equação 2.3	51
Tabela 7 – Vazão de água através da válvula em função do ângulo de abertura. . .	52
Tabela 8 – Tempo gasto ao percorrer 60°	54
Tabela 9 – Vazão de água pelo ângulo de abertura, resultado com servo motor. . .	54

Lista de abreviaturas e siglas

CAD	Computer Aided Design
COTS	Commercial off-the-shelf
CPL	Chemical Propulsion Laboratory
DC	Direct Current
FKM	Fluorocarbon
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIST	National Institute of Standards and Technology
PTFE	Polytetrafluoroethylene
SARA	Satélite de Reentrada Atmosférica
TRL	Technology Readiness Level

Lista de símbolos

C_v	Coeficiente de vazão
ΔP	Diferença de pressão
F	Empuxo
g_0	Aceleração da gravidade
G_f	Gravidade específica ou densidade relativa
I_{sp}	Impulso específico
\dot{m}	Vazão mássica de propelente
q	Vazão volumétrica
v_e	Velocidade de exaustão
\dot{w}	Taxa de peso de propelente

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Propulsão de foguetes	16
2.1.1	Propulsão líquida	17
2.1.2	Propulsão híbrida	18
2.1.2.1	Propulsão híbrida na Universidade de Brasília	19
2.2	Válvulas de controle	21
2.2.1	Tipos de válvulas	22
2.2.1.1	Válvula esfera	22
2.2.1.2	Válvula borboleta	23
2.2.1.3	Válvula macho	24
2.2.1.4	Válvula globo	24
2.2.1.5	Válvula gaveta	25
2.2.1.6	Válvula diafragma	26
2.2.2	Características de vazão	26
2.2.3	Tipos de atuadores	29
2.2.3.1	Pneumáticos e hidráulicos	30
2.2.3.2	Elétricos	32
3	DESENVOLVIMENTO	34
3.1	Definição dos requisitos e critérios para o design da válvula	34
3.2	Pesquisa de possíveis soluções no mercado (COTS)	37
3.3	Projeto da válvula de controle	40
3.4	Metodologia experimental	41
3.4.1	Testes com a válvula esfera	42
3.4.1.1	Torque da válvula pressurizada com óxido nítrico	42
3.4.1.2	Torque em função da temperatura	43
3.4.1.3	Caracterização do Cv	44
3.4.1.4	Curva característica de vazão	45
3.4.2	Testes com o servo motor	45
3.4.2.1	Carga máxima	45
3.4.2.2	Velocidade de resposta com diferentes níveis de carga	45
3.4.3	Testes com a solução integrada	46

3.4.3.1	Curva característica de vazão	46
3.4.3.2	Teste de injeção de oxidante a frio	46
3.4.3.3	Teste de injeção de oxidante a quente	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Torque da válvula pressurizada com óxido nitroso	49
4.2	Torque em função da temperatura	50
4.3	Caracterização do Cv	51
4.4	Curva característica de vazão	51
4.5	Carga máxima	52
4.6	Velocidade de resposta com diferentes níveis de carga	53
4.7	Curva característica de vazão	54
4.8	Teste de injeção de oxidante a frio	55
4.9	Teste de injeção de oxidante a quente	56
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60

1 Introdução

O uso de uma válvula de controle digital de vazão é peça chave tecnológica para operação confiável do motor de foguete híbrido, pois permite a modulação do empuxo do sistema propulsivo, além de permitir múltiplos acionamentos do motor. Não foi encontrada no mercado brasileiro solução tecnológica que atenda a essa aplicação. Existem soluções que podem ser compradas de fora do Brasil, porém o altíssimo custo e a burocracia envolvida inviabilizam essa opção. Assim, decidiu-se desenvolver uma válvula de controle digital de vazão utilizando componentes encontrados no mercado.

O controle preciso da vazão dos propelentes e da modulação do empuxo é um dos problemas mais fundamentais nos motores de foguete líquidos e híbridos. Este controle, alimentado por um sistema de feedback, permite que o motor de foguete opere como planejado e cumpra os requisitos da missão. O domínio desta tecnologia é uma característica comum nos países que possuem uma indústria aeroespacial desenvolvida, além da grande presença de profissionais especializados e da disponibilidade de equipamentos com certificação para aplicações aeroespaciais.

Contudo, no nível acadêmico é possível projetar e construir um sistema simplificado com componentes COTS (Commercial off-the-shelf) para utilização em bancada de ensaio de motores em escala de laboratório, possibilitando a redução dos custos de desenvolvimento. Tal sistema pode atingir um nível de TRL (Technology Readiness Level) acima de 5 e atende às atividades de pesquisa em universidades, porém, até o momento não existe no Brasil.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma válvula de controle de vazão para motores foguete híbrido. Até o presente momento, esta tecnologia não está disponível no mercado brasileiro, assim, espera-se que essa tecnologia atenda aos projetos nacionais de motor de foguete e que possa ser utilizada no programa espacial brasileiro.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Definição dos requisitos e critérios para o design da válvula;

- Pesquisa de possíveis soluções no mercado (COTS);
- Projeto preliminar da válvula;
- Testes de caracterização e validação da válvula;

Inicialmente estava previsto neste trabalho o desenvolvimento do projeto mecânico da válvula de controle, porém este foi realizado pelo Prof. Olexiy Shynkarenko.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Propulsão de foguetes

Propulsão diz respeito a dar movimento, impulsionar, imprimir velocidade. Os motores foguetes geram propulsão por meio da Terceira Lei de Newton, o princípio físico da ação e reação. A ejeção de gases quentes a altas velocidades gera uma força de reação conhecida como empuxo. Para ejetar gases a altas velocidades, o motor foguete, através da combustão, usa a energia química dos propelentes para aumentar a pressão e a temperatura na câmara de combustão. Na sequência, os gases resultantes são acelerados pela tubeira, transformando energia de pressão em energia cinética (SUTTON; BIBLARZ, 2001).

A força de empuxo em um motor foguete pode ser definida de maneira simplificada pelo produto da vazão mássica de propelente \dot{m} a velocidade de exaustão dos gases v_e , como observado na equação (2.1). Assim, nota-se que o controle da vazão mássica de propelentes é muito importante no desempenho de um propulsor, o que evidencia a grande necessidade de se dominar a tecnologia de uma válvula de controle, de maneira que o desenvolvimento de uma tecnologia dessas é fundamental para o avanço da indústria aeroespacial como um todo. Em motores de foguete líquido por exemplo, o controle preciso da razão de oxidante e combustível é necessário visto que o fornecimento de uma mistura incorreta pode acarretar danos catastróficos ao motor, como explosões ou temperaturas elevadas na câmara de combustão. Uma situação que exige controle preciso do empuxo pode ser observada na figura 1, quando a SpaceX pousou dois foguetes em solo após o lançamento de um satélite.



Figura 1 – Controle preciso do empuxo. (BARTELS, 2019)

$$F = \dot{m}v_e \quad (2.1)$$

Um dos parâmetros mais utilizados para avaliar o desempenho do motor foguete é o Impulso Específico, definido como o empuxo gerado F por unidade de taxa de peso de propelente \dot{w} , como observado na equação (2.2):

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{w}} = \frac{F}{\dot{m}g_0} \quad (2.2)$$

Na propulsão de foguetes, os propelentes - combustível e oxidante - estão armazenados a bordo do veículo, diferente da propulsão de aeronaves, em que o ar atmosférico é utilizado como oxidante. Os sistemas propulsivos podem ser classificados de diversas maneiras, sendo a principal delas de acordo com a fase dos propelentes: propulsão líquida, sólida e híbrida.

2.1.1 Propulsão líquida

Na propulsão líquida, os propelentes estão na fase líquida, armazenados em tanques. São injetados na câmara de combustão, onde reagem formando gases quentes que são ejetados pela tubeira. Existem os propulsores monopropelentes, onde um único líquido propelente é injetado na câmara de combustão se decompondo em contato com um catalisador e formando gases quentes, e existem os propulsores bipropelentes, em que oxidante e combustível são injetados na câmara de combustão e queimam gerando gases quentes. Os motores foguete líquido necessitam de um sistema de alimentação, responsável por transportar os propelentes dos tanques para a câmara de combustão. Esse sistema de alimentação é composto por tubos, válvulas, além de um sistema de pressurização dos propelentes, que pode ser por turbobombas ou por gás pressurizado. A necessidade de um sistema de alimentação para o oxidante e para o combustível torna a tecnologia de propulsão líquida bastante complexa e com custo de fabricação elevado.

Apesar da complexidade, os motores líquidos possuem a vantagem de controlar o empuxo durante seu funcionamento, isto é, possuem a capacidade de controlar a vazão mássica de propelentes. Além disso, os motores foguete líquido possuem o maior impulso específico entre motores foguete. Por exemplo, o motor RS-25, que funciona com oxigênio líquido e hidrogênio líquido, possui um impulso específico ao nível do mar de 366 s ([AEROJETROCKETDYNE, 2019](#)). A figura 2 mostra um esquemático de um motor foguete líquido.

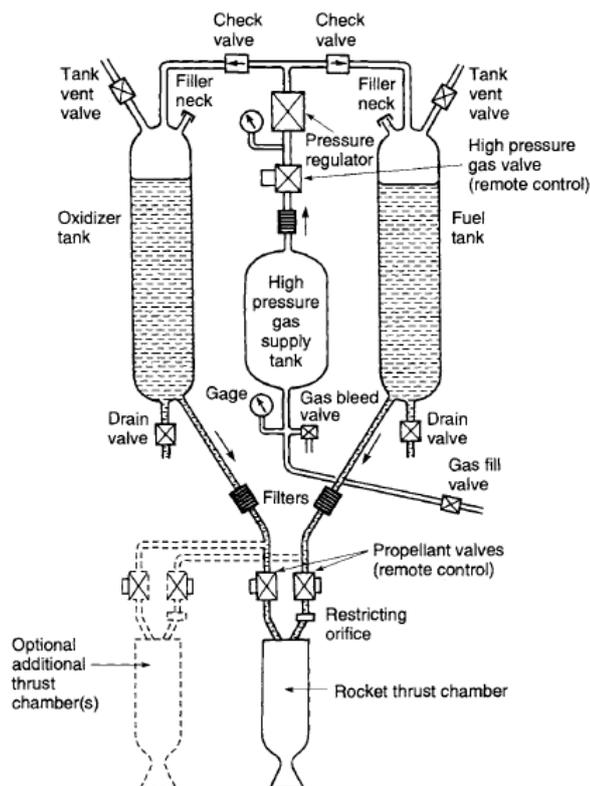


Figura 2 – Esquemático de um motor foguete líquido com sistema de pressurização por gás pressurizado (SUTTON; BIBLARZ, 2001).

2.1.2 Propulsão híbrida

A propulsão híbrida é uma mistura da propulsão líquida e sólida, onde combustível e oxidante estão em fases diferentes. Na configuração mais comum, tem-se o combustível na fase sólida contido na câmara de combustão e o oxidante na fase líquida contido em um tanque. Os propulsores híbridos são mais seguros que motores sólidos por possuir oxidante e combustível separados e em diferentes fases, além do fato de que falhas no grão não geram resultados catastróficos. Por possuir apenas um propelente na fase líquida, o sistema de alimentação necessário é mais simples que em motores líquidos, diminuindo os custos de fabricação dos motores híbridos. Outra vantagem é o uso de propelentes verdes – baixa toxicidade e baixa periculosidade – resultando em produtos menos poluentes que outros sistemas. Os propulsores híbridos apresentam impulso específico menor que os líquidos bipropelentes e semelhante aos sólidos, como por exemplo o par óxido nítrico (N_2O) e parafina que possui impulso específico de aproximadamente 240 s. A figura 3 mostra um esquemático de um motor híbrido.

No caso dos motores de foguete híbrido, a quantidade de combustível é fixa na câmara de combustão, porém, é possível realizar o controle da vazão mássica de oxidante. Assim, o domínio da tecnologia de uma válvula de controle possibilita o controle direto do módulo do empuxo gerado, além da capacidade de desligar e religar o motor múltiplas

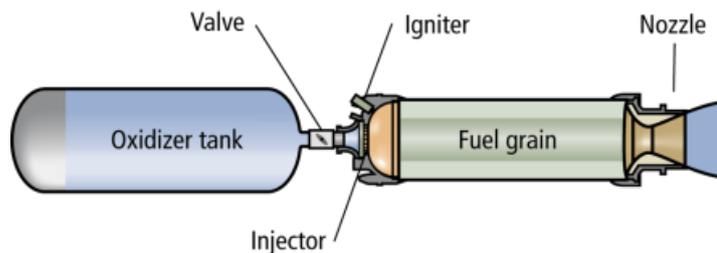


Figura 3 – Diagrama de um motor foguete híbrido (DESAIN, 2011).

vezes. Outra vantagem da válvula de controle é nos estudos experimentais de bancada de motor de foguete híbrido, pois a válvula é capaz de fornecer diferentes capacidades de vazão para diferentes projetos de propulsores.

2.1.2.1 Propulsão híbrida na Universidade de Brasília

A tecnologia de propulsão híbrida é desenvolvida há cerca de 20 anos na Universidade de Brasília. Um dos principais projetos é o motor de foguete híbrido desenvolvido pela equipe do Laboratório de Propulsão Química para integrar a plataforma SARA, projeto do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). A plataforma SARA (Satélite de Reentrada Atmosférica) é uma plataforma para experimentos em micro gravidade projetada para operar em uma órbita baixa de 300 km durante um período máximo de 10 dias. O satélite, após concluídos os experimentos, deve reentrar na atmosfera com ajuda de um propulsor de reentrada.

A equipe do Laboratório de Propulsão Química (Chemical Propulsion Laboratory – CPL) da UnB desenvolveu um modelo de engenharia de motor de foguete híbrido para reentrada da plataforma SARA, motor que se encontra atualmente em fase de testes para que futuramente seja construído um modelo para voo. Para viabilizar um modelo de voo, é necessário que o motor tenha a capacidade de controlar sua vazão mássica de oxidante – e conseqüentemente seu empuxo – e que o motor possa ser desligado e religado múltiplas vezes. Para isto, o CPL está desenvolvendo uma válvula de controle de fluxo (objeto de estudo deste trabalho) e um igniter tipo tocha que proporciona múltiplas ignições. O motor foguete híbrido desenvolvido pelo CPL pode ser observado na figura 4.

O motor foguete híbrido desenvolvido utiliza óxido nítrico como oxidante e parafina como combustível, tem empuxo nominal de 1 kN, tempo de queima de até 20 s, pressão na câmara de combustão de 30 bar e vazão mássica de oxidante de 0,38 kg/s. O CPL possui uma bancada de testes com sistema de alimentação de oxidante com válvulas de atuação pneumáticas e válvulas eletrônicas de baixa vazão, além de célula de carga para medição do empuxo, sensores de pressão e de temperatura. A válvula aqui desenvolvida irá integrar a bancada de testes e futuramente o sistema de alimentação do motor foguete híbrido de voo.

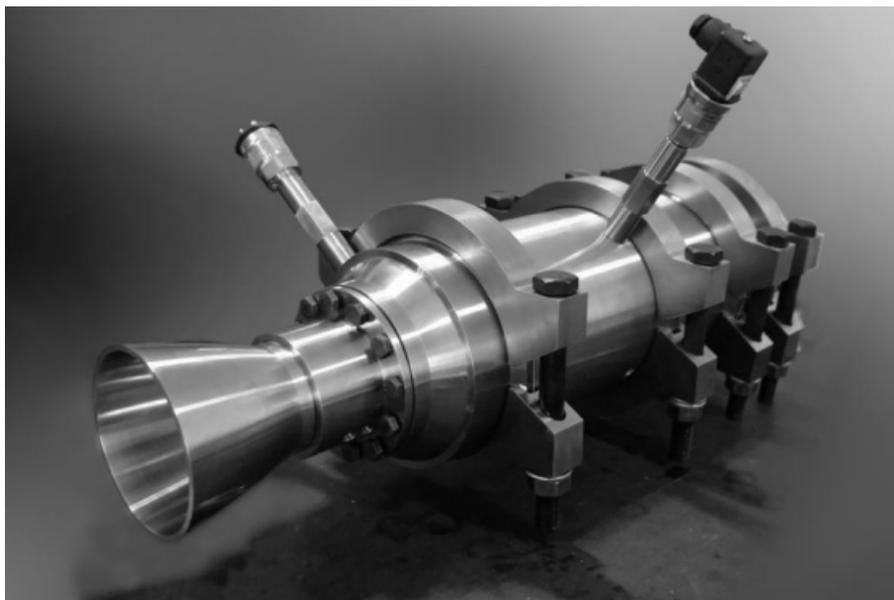


Figura 4 – Motor de foguete híbrido desenvolvido pelo CPL (ANDRIANOV et al., 2015).

Além do motor foguete híbrido desenvolvido pela equipe do CPL, outro motor foguete híbrido de destaque desenvolvido na UnB foi o Firestorm, motor desenvolvido pela equipe de propulsão da Capital Rocket Team, time criado para participar de competições universitárias de foguetes e composto por alunos do campus da Faculdade do Gama - FGA. Na figura 5 é possível observar um teste estático do motor Firestorm.



Figura 5 – Teste estático do motor Firestorm, realizado na bancada de testes do CPL.

O motor utiliza também o par propelente óxido nítrico e parafina, tem empuxo nominal de 1,5 kN - atingindo 1 kN nos testes estáticos, tempo de queima de 6 s, pressão na câmara de combustão de 30 bar, vazão mássica de oxidante de 0,6 kg/s. A tecnologia desenvolvida neste trabalho visa também atender ao time de foguetes da Universidade de Brasília.

2.2 Válvulas de controle

As válvulas de controle são componentes chave em muitas aplicações, como na indústria de petróleo e gás, agricultura, energia, aeroespacial, entre outras. A origem do controle de fluidos vem da antiguidade, visto que os romanos desenvolviam sistemas de canais para captar água e desenvolviam também dispositivos de controle. Porém, o grande desenvolvimento das válvulas ocorreu com a Revolução Industrial, com o surgimento das máquinas a vapor e de outras máquinas (FABIO; FASSITELLI, 1990). Apesar de ter grande importância no meio industrial, as válvulas de controle podem ser encontradas também em aplicações mais simples, por exemplo, a torneira de uma residência é uma válvula de controle. Assim, é fácil notar que existem diversos tipos de válvulas para diversas aplicações.

Uma válvula de controle é um dispositivo que controla a vazão de um fluido ao variar o tamanho do seu orifício de passagem. Na figura 6 pode-se observar o desenho de uma válvula de controle automatizada, composta pelo corpo da válvula e atuador.

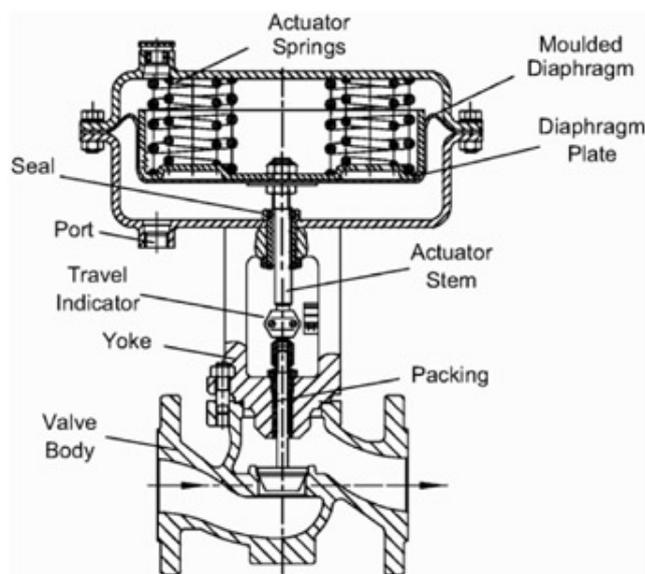


Figura 6 – Principais partes de uma válvula de controle (BEATER, 2007).

O corpo da válvula é a parte por onde passa o fluido e que contém o orifício que varia sua abertura. O corpo da válvula pode ser feito diversos materiais, como latão, ferro fundido, aço, ou até plástico, em aplicações de baixa pressão como em uma instalação hidráulica residencial. O encaixe da válvula na tubulação pode ser feito por conexões rosqueadas, flanges ou conexões para solda. Existem diversos tipos de mecanismos para controlar a passagem do fluido, como a compressão de um disco contra uma abertura, a rotação de uma esfera vazada dentro da válvula, uma cunha que desliza e restringe a passagem do fluido, entre outros, que dá origem aos diversos tipos de válvulas existentes.

O atuador, em resposta a um sinal, movimenta a válvula para a posição desejada,

utilizando uma fonte de energia externa. Isto é, o atuador é o componente responsável pela força motriz. O atuador funciona transformando energia elétrica ou energia de pressão em movimento. Em conjunto com o atuador existe o posicionador, que é o elemento responsável por enviar o sinal de controle para o atuador, além de garantir que a válvula esteja na posição correta através de um sensor de posição – geralmente um potenciômetro. A escolha correta do conjunto válvula-atuador para uma dada aplicação é a chave para o sucesso da automação de um processo.

2.2.1 Tipos de válvulas

Como evidenciado anteriormente, a ampla gama de aplicações e conseqüentemente os variados mecanismos de controle de fluido levaram à invenção de diversos tipos de válvulas. As válvulas podem ser rotacionais (como as válvulas esfera, borboleta e macho) ou lineares (como as válvulas globo, gaveta e de diafragma), de acordo com o movimento do obturador. As válvulas rotacionais necessitam de apenas um quarto de volta (90°) para saírem da posição totalmente aberta para a posição totalmente fechada, já as válvulas em que o obturador se move linearmente precisam de múltiplas voltas para serem abertas ou fechadas.

2.2.1.1 Válvula esfera

A válvula esfera utiliza uma esfera com uma passagem em seu centro para controlar a vazão do fluido. Quando o orifício da esfera está alinhado com a tubulação, a passagem do fluido é permitida. Quando o orifício da esfera está perpendicular à direção do escoamento, a passagem do fluido é interrompida. A figura 7 mostra o desenho de uma válvula esfera.

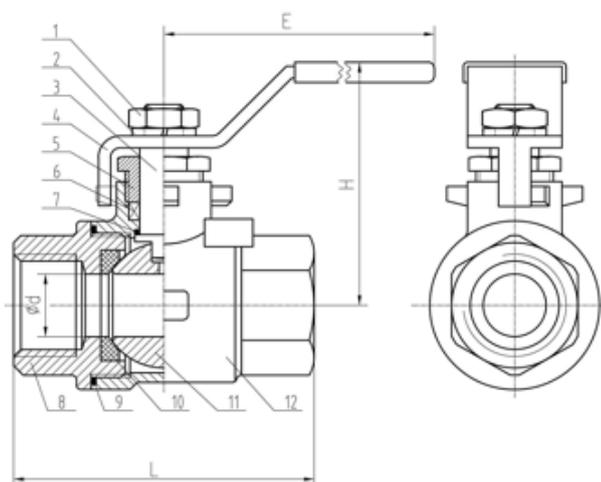


Figura 7 – Válvula esfera (DUDADIESEL, 2019) 1. Porca 2. Arruela 3. Haste 4. Alavanca 5. Preme gaxeta 6. Gaxeta 7. Junta 8. Tampa 9. Anel de vedação 10. Sede 11. Esfera 12. Corpo

A válvula esfera é principalmente utilizada para o controle on/off, também tendo a capacidade de controlar a vazão quando em posições intermediárias. A esfera pode ter passagem reduzida ou passagem plena (do mesmo diâmetro da tubulação), característica que explica o seu alto coeficiente de vazão e baixa perda de carga. A válvula esfera é uma das válvulas mais usadas no mundo, tendo uma grande variedade de configurações, encontra-se disponível em tamanhos de 1/8" a 6", tem capacidade de suportar altas pressões e temperaturas, possui rápida abertura e fechamento, boa estanqueidade e é compatível com diversos tipos de fluidos dependendo do material da válvula e das vedações.

2.2.1.2 Válvula borboleta

A válvula borboleta dispõe de um disco que ao ser rotacionado permite ou bloqueia a passagem do fluido. Similar à válvula esfera, basta um quarto de volta para abrir ou fechar completamente a válvula. Por possuir o mesmo diâmetro da tubulação, apresenta um alto coeficiente de vazão, porém como o disco está sempre presente no escoamento, possui perda de carga maior comparada a uma válvula esfera. O desenho de uma válvula borboleta pode ser observada na figura 8.

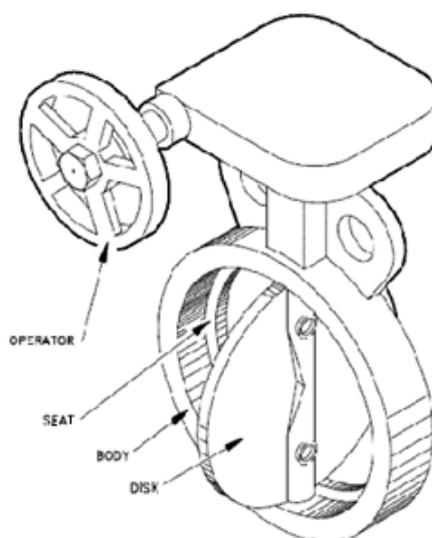


Figura 8 – Válvula borboleta (VALTORC, 2019).

Válvulas borboletas se destacam por ser muito compactas, pois possuem uma pequena distância face-à-face. Geralmente são conectadas à tubulação através de flanges. Podem possuir elemento de vedação de elastômero, teflon, ou ainda vedação metal-metal. São geralmente fabricadas em tamanhos maiores que 1" e suportam baixas pressões – até 20 bar.

2.2.1.3 Válvula macho

A válvula macho tem design semelhante a uma válvula esfera, porém seu obturador é um plug cilíndrico ou cônico. O obturador mantém contato total com a vedação em todas as posições, evitando a presença do fluido nos componentes internos da válvula, isto é, não possui espaço morto na válvula. O desenho de uma válvula macho pode ser observado na figura 9.

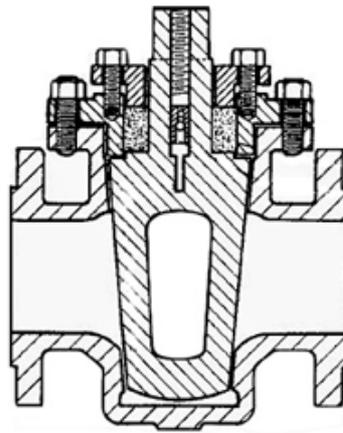


Figura 9 – Válvula macho (TECO, 2019).

Suas conexões mais comuns são flangeadas, também podendo ser encontradas versões rosqueadas ou para solda. Possui torque maior que válvulas esferas. Possuem pressão nominal baixa, exceto algumas versões especiais que trabalham até 160 bar.

2.2.1.4 Válvula globo

O funcionamento da válvula globo se dá pelo movimento de um disco, tapando um orifício para bloquear a vazão do fluido. O movimento do disco e o fechamento do orifício acontecem no sentido perpendicular ao fluxo, de maneira que se tem uma mudança de direção no escoamento, razão pela qual a válvula globo apresenta uma grande perda de carga e um baixo coeficiente de vazão. Na figura 10 pode ser observado um esquemático de uma válvula globo.

Pode-se observar também que o tempo de abertura ou fechamento da válvula é alto pois são necessárias várias voltas pra abrir ou fechar completamente a válvula. As válvulas globo são as mais recomendadas para controle de vazão, principalmente as válvulas agulhas, que são um tipo de válvula globo, com o obturador mais alongado, de maneira a obter um ajuste fino da vazão.

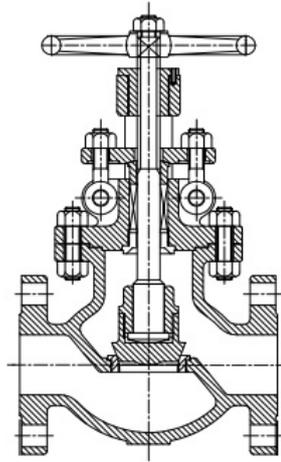


Figura 10 – Esquemático de uma válvula globo (WILLIAMSVALVE, 2019).

2.2.1.5 Válvula gaveta

A válvula gaveta possui uma cunha que desliza perpendicularmente à direção do fluido modificando a área de passagem. Ela é mais indicada para o controle on/off, não sendo recomendável o uso para o controle da vazão, pois pode apresentar cavitação e altos níveis de vibração e ruído. O desenho de uma válvula gaveta pode ser observada na figura 11.

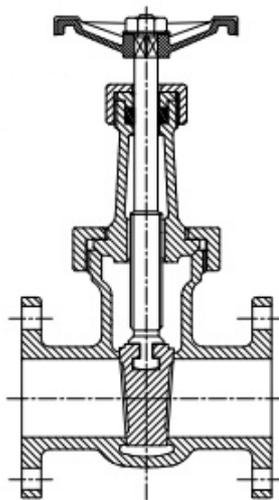


Figura 11 – Válvula gaveta (WILLIAMSVALVE, 2019).

Geralmente são utilizadas em processos onde não são necessárias operações frequentes de abertura e fechamento, pois é uma válvula de acionamento lento visto que são necessárias múltiplas voltas para sua total abertura ou fechamento. Quando na posição totalmente aberta, oferece baixíssima resistência ao escoamento. Pode possuir haste ascendente, onde a haste se movimenta juntamente com o obturador, indicando a posi-

ção em que se encontra a válvula. É possível encontrar válvulas gaveta com pressão de operação de até 100 bar.

2.2.1.6 Válvula diafragma

Na válvula de diafragma, o mecanismo de obstrução do escoamento é uma membrana flexível que é pressionada por um pistão, permitindo ou bloqueando a passagem do fluido. Com este mecanismo, as partes responsáveis pelo movimento do pistão não entram em contato com o fluido. Os materiais mais utilizados na fabricação do diafragma são a borracha natural, borracha sintética e vários plásticos. Existem dois tipos básicos de válvula de diafragma, a de passagem angular (tipo A) e a de passagem reta (tipo KB). Na figura 12 pode-se observar os dois tipos de válvula de diafragma.

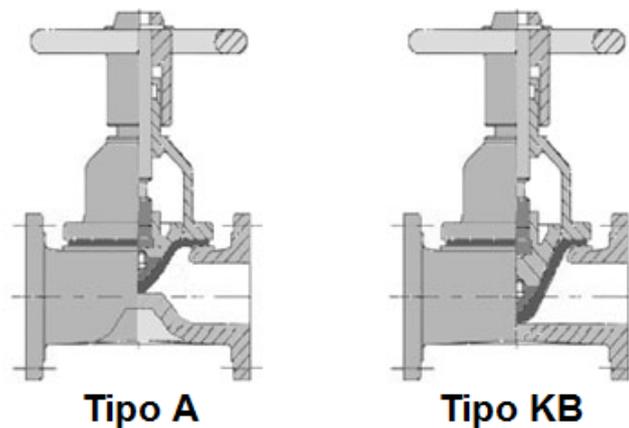


Figura 12 – Válvulas de diafragma – Tipo A e Tipo KB (DRVALVE, 2019).

Na válvula tipo A, o canal por onde passa o fluido possui uma elevação contra a qual o diafragma é pressionado. Nessa configuração o diafragma se desgasta menos, porém há uma mudança de direção do escoamento, o que provoca perda de carga. Na válvula tipo KB, o canal por onde passa o fluido passa é reto, de maneira que o diafragma precisa se deformar mais para interromper o escoamento. Assim, a passagem oferece menos resistência ao fluido, mas o diafragma possui uma vida útil menor. Devido ao material do diafragma, a válvula possui limites estreitos de temperatura e pressão.

2.2.2 Características de vazão

Dimensionar uma válvula consiste em selecionar um diâmetro de válvula com o coeficiente de vazão (C_v) apropriado para a vazão requerida pelo processo. O C_v é um coeficiente adotado mundialmente com o objetivo de padronizar a expressão da capacidade de vazão de válvulas de controle. O coeficiente de vazão é um coeficiente experimental

inerente a cada válvula, geralmente fornecido pelo fabricante, que engloba a área do orifício da válvula, o coeficiente de contração e o coeficiente de perda de carga (BAUMANN, 2008).

O coeficiente de vazão é definido como “vazão de água à 20°C, que flui em uma válvula totalmente aberta, expressa em galão por minuto, quando submetida à um diferencial de pressão de 1 psi”. O C_v é calculado baseado nas unidades imperiais, assim, foi desenvolvido também o K_v , que é o coeficiente de vazão baseado nas unidades métricas. Assim, o K_v é definido como “Vazão de água à 20°C, que passa em uma válvula aberta, expressa em m³/h, quando submetida a um diferencial de pressão de 1 kgf/cm²” (SAMPAIO, 2019).

$$C_v = \frac{q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}}} \quad (2.3)$$

A equação 3 apresenta o cálculo do coeficiente de vazão, onde q é a vazão volumétrica, ΔP é a diferença de pressão na entrada e na saída da válvula, e G_f é a densidade específica do fluido (razão entre a densidade do fluido e a densidade da água).

A monografia “Liquid Rocket Valve Assemblies” da NASA apresenta um gráfico comparativo em relação ao C_v entre diferentes tipos de válvulas. O gráfico, que pode ser observado na figura 13, apresenta o coeficiente de vazão versus o tamanho nominal da válvula para as válvulas esfera, gaveta, borboleta, globo (angulada) e globo.

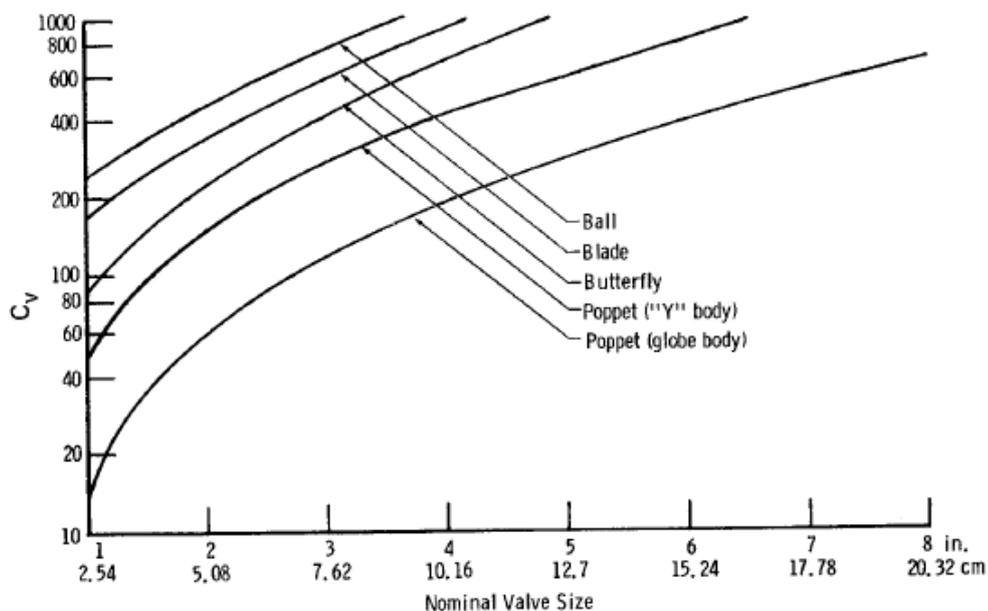


Figura 13 – Gráfico comparativo entre o C_v de diferentes válvulas (NASA, 1973).

É possível observar que entre as válvulas de mesmo tamanho nominal, a válvula esfera possui o maior coeficiente de vazão, devido ao fato do seu orifício de passagem ser

do mesmo tamanho da tubulação, sem afetar o escoamento. Em seguida tem-se a válvula gaveta, que, quando totalmente aberta, também não oferece resistência ao fluido. Em sequência tem-se a válvula borboleta, que, possui passagem do mesmo tamanho da tubulação, porém o obturador está sempre presente no escoamento, implicando em perdas de carga. Por último tem-se as válvulas globo, que oferecem maior resistência ao escoamento, observando que a válvula globo em formato Y reduz consideravelmente as perdas de carga.

Outra propriedade importante de uma válvula de controle é a sua curva característica de vazão. A curva característica de vazão é o gráfico que contempla a vazão resultante versus abertura da válvula, geralmente expressos como percentuais do valor máximo. Tem-se a curva característica inerente, em que a diferença de pressão na válvula é mantida constante, isto é, a curva avalia apenas os efeitos da válvula, sem incluir os efeitos da tubulação. Tem-se também a curva característica instalada, em que a válvula é avaliada em condições de operação, isto é, a válvula está instalada na tubulação e a queda de pressão através da válvula pode variar (WIKILIVROS, 2017). A curva característica de uma válvula pode ser classificada em três tipos: linear, igual percentagem e rápida abertura, como pode ser observado na figura 14.

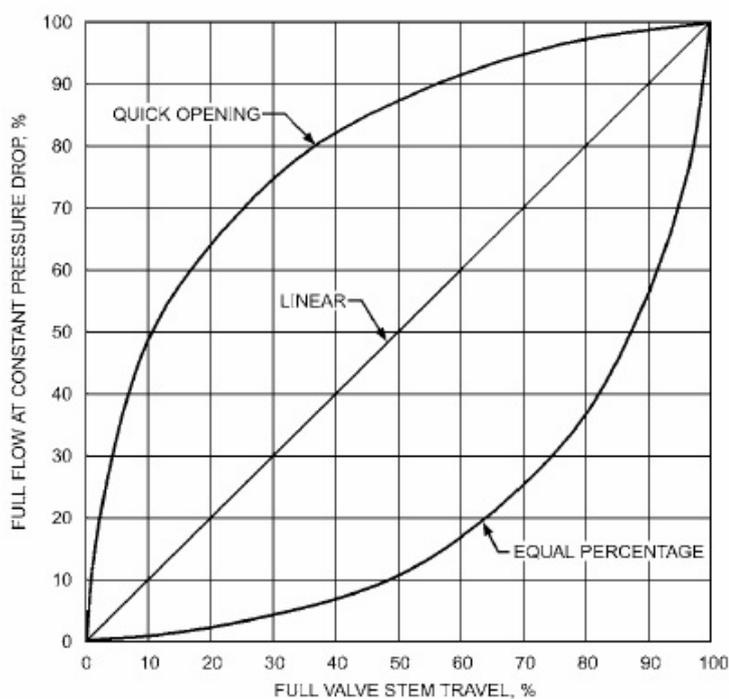


Figura 14 – Curvas características (ASHRAE, 2012).

Na curva linear, tem-se incrementos na vazão diretamente proporcionais a abertura da válvula. Na curva de abertura rápida, com pouca abertura da válvula tem-se um grande incremento na vazão. Na curva de igual percentagem, tem-se um incremento na

vazão proporcional à vazão, isto é, pequenos incrementos em baixas vazões e grandes incrementos em grandes vazões.

A figura 15 mostra uma comparação da curva característica inerente de diferentes tipos de válvula. É possível observar que a curva característica da válvula esfera se aproxima mais de uma curva de igual percentagem, seguida pela válvula borboleta. O comportamento das válvula macho e globo se aproximam de uma curva característica linear. É importante salientar que a curva característica inerente difere da curva característica instalada. De acordo com (ASHRAE, 2012), uma válvula que apresenta curva característica inerente de igual percentagem, quando instalada, tende a apresentar uma curva característica próxima a linear.

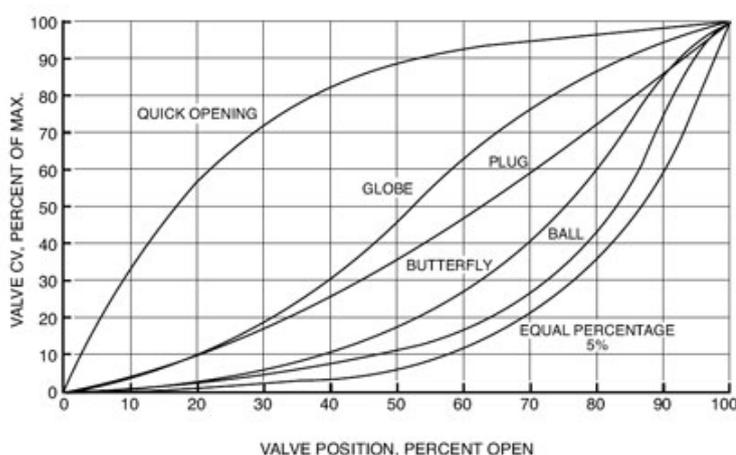


Figura 15 – Curvas características de diferentes tipos de válvulas (ASHRAE, 2012).

2.2.3 Tipos de atuadores

O uso de atuadores permite a automação de processos, de maneira que as válvulas de controle sejam acionadas remotamente a partir de um sinal de comando. Segundo (SMAR, 2001), os atuadores substituem a operação manual de válvulas em:

- Locais de difícil acesso ou que oferecem alto risco ao operador;
- Situações que exigem elevado torque;
- Casos onde é necessário um rápido posicionamento;
- Trabalhos que exigem alta frequência de acionamento das válvulas.

Os atuadores geram movimento por meio da energia de pressão de um fluido ou da energia elétrica. Assim, os principais atuadores são pneumáticos, hidráulicos ou elétricos.

2.2.3.1 Pneumáticos e hidráulicos

Os atuadores pneumáticos geralmente utilizam um cilindro com pistão ou diafragma, que ao ser pressurizado por um gás (geralmente ar comprimido) movimenta o obturador da válvula. Os dois principais tipos de atuadores pneumáticos são os de simples ação e o de dupla ação. Em um atuador de pistão de simples ação, também conhecido como atuador de retorno por mola, a entrada de ar de um lado do pistão é responsável pelo movimento de atuação e uma mola é responsável por retornar o pistão pra sua posição original. Em um atuador de pistão de dupla ação há a entrada de ar nos dois lados do pistão, de maneira que o retorno do pistão a sua posição original também é feito por ar comprimido. Um esquemático simplificado desse funcionamento pode ser observado na figura 16.

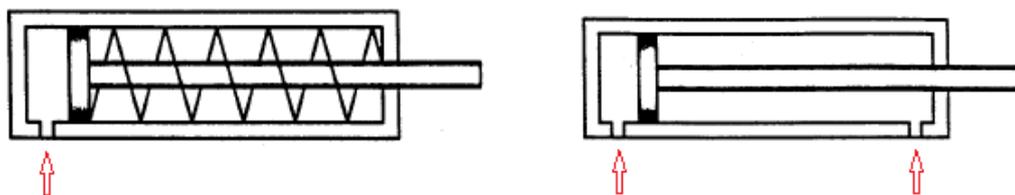


Figura 16 – Esquerda – Cilindro de pistão de simples ação. Direita – Cilindro de pistão de dupla ação (SILVA, 2002).

Os atuadores pneumáticos podem ser lineares ou rotativos, de acordo com a válvula atuada. Quando o atuador é rotativo, um mecanismo transforma o movimento linear em rotativo. Os mecanismos mais comuns para essa transformação de movimento são o sistema cremalheira e pinhão (rack and pinion) e o sistema jugo escocês (scotch yoke), como pode ser observado na figura 17.

O mecanismo cremalheira e pinhão oferece um torque constante durante o acionamento da válvula, já o mecanismo jugo escocês oferece um torque variável que se adequa melhor ao torque necessário para atuar as válvulas esfera e borboleta, de maneira que esse mecanismo se mostra mais eficiente. A figura 18 apresenta um comparativo entre o torque fornecido pelo sistema cremalheira e pinhão (rack and pinion) e o sistema jugo escocês (soctch yoke), além de apresentar o torque necessário para atuar uma válvula esfera e uma válvula borboleta.

Entre as vantagens dos atuadores pneumáticos, pode-se destacar a sua simplicidade, de maneira que é relativamente fácil instalar e usar. Apresentam também baixo peso e baixo preço, além de ter componentes duráveis e requerem baixa manutenção. Apesar de não ser tão precisos como atuadores elétricos, produzem uma certa acurácia e repetibilidade. As desvantagens dos atuadores pneumáticos incluem sua baixa eficiência

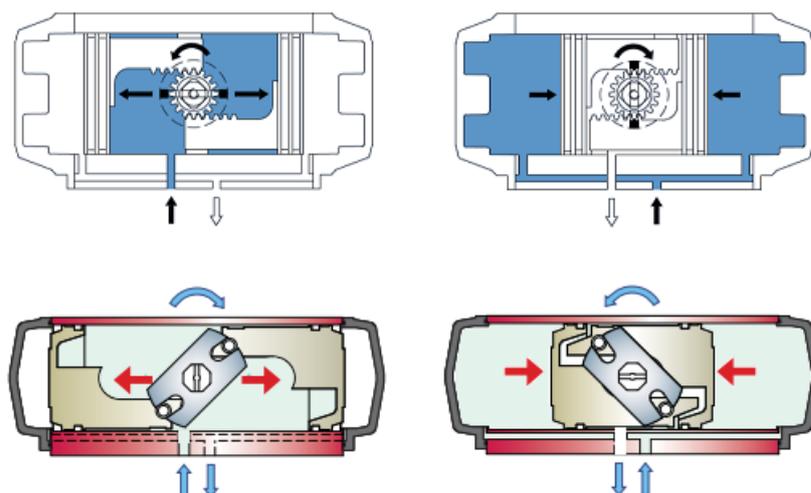


Figura 17 – Funcionamento de um atuador pneumático de dupla ação, mecanismo cremalheira e pinhão (cima) e mecanismo jugo escocês (baixo) (ITORK, 2019).

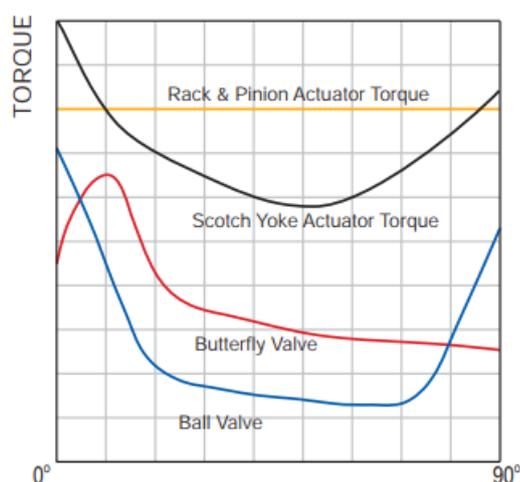


Figura 18 – Curvas de torque oferecido pelos atuadores e requisitado pelas válvulas (ITORK, 2019).

comparada com outros atuadores. Essa baixa eficiência é resultado de perdas de pressão e da compressibilidade do ar. Além disso, o uso de um atuador pneumático implica na necessidade de um reservatório de gás pressurizado ou um compressor de ar.

Os atuadores hidráulicos funcionam de maneira similar aos atuadores pneumáticos, porém utilizam um líquido (geralmente óleo) no lugar de um gás. Ao utilizar um fluido incompressível, apresenta maior precisão e repetibilidade comparado a um atuador pneumático. A grande vantagem de um atuador hidráulico é a sua capacidade de gerar altíssimas forças, gerando forças 25 vezes maiores que um atuador pneumático de mesmo tamanho, além de trabalhar com pressões de até 4000 psi (GONZALEZ, 2015).

Uma desvantagem dos atuadores hidráulicos é que podem apresentar vazamentos

de fluidos que podem trazer prejuízos ao ambiente, ao contrário dos vazamentos dos atuadores pneumáticos. Além disso, os atuadores hidráulicos necessitam de muitos outros componentes pra funcionar, como motores, bombas, reservatórios, válvulas, trocadores de calor, equipamentos de redução de ruído, de maneira que o sistema é grande e difícil de ser instalado.

2.2.3.2 Elétricos

Os atuadores elétricos são basicamente motores elétricos com um conjunto de redução que fornece o torque necessário para a atuação de uma válvula. Os atuadores mais modernos dispõem também de diversos sistemas de segurança e controle, como mecanismos de limitação de curso, mecanismos de limitação de torque, indicadores mecânico e eletrônico de posição, conectores elétricos, resistores para evitar condensação no interior do equipamento, volante para acionamento manual da válvula, e algumas vezes até um controlador integrado diretamente no atuador. O interior de um atuador elétrico pode ser observado na figura 19.

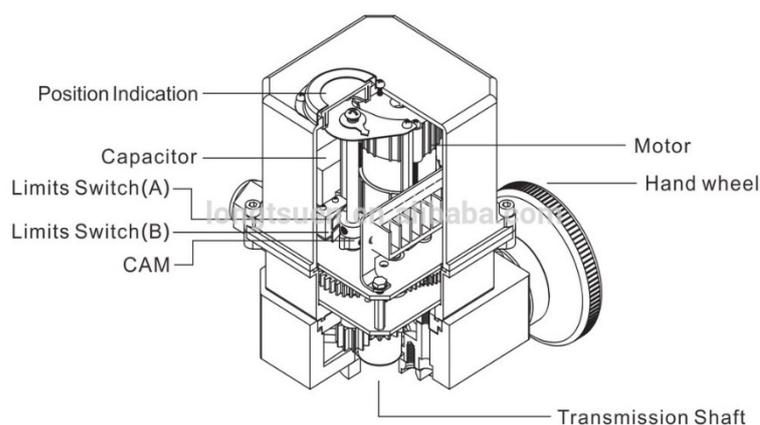


Figura 19 – Interior de um atuador elétrico, com diversos dispositivos de segurança e controle (LONGTSUEN, 2019).

Os atuadores elétricos têm diversas vantagens em comparação aos atuadores pneumáticos e hidráulicos. Primeiramente, apresentam alta precisão no posicionamento da válvula, operam suavemente e com alta repetibilidade. Podem ser ajustados para diferentes aplicações e são menos ruidosos em relação aos atuadores pneumáticos e hidráulicos. Não apresentam vazamentos, diminuindo os danos ao ambiente. Além disso são robustos e possuem longa durabilidade. A respeito das suas desvantagens, os atuadores elétricos são geralmente mais caros que atuadores pneumáticos e hidráulicos, e podem sobreaquecer danificando seus componentes. Não podem ser utilizados em atmosferas explosivas devido ao risco de emitir faíscas. Dependendo da potência do motor, os atuadores elétricos podem ser grandes e pesados. Um outro tipo de atuador elétrico é o atuador solenoide. Neste tipo de atuador, uma bobina energizada atrai magneticamente um pistão que permite ou

bloqueia o escoamento do fluido. Geralmente são utilizados em válvulas piloto (válvulas que controlam atuadores pneumáticos) e em válvulas de diafragma. Uma válvula com atuador solenoide pode ser observada na figura 20.

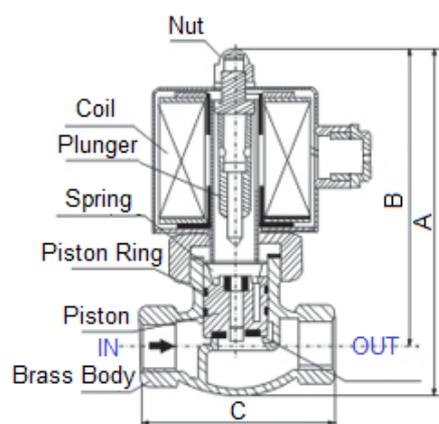


Figura 20 – Válvula com atuador solenoide (WICVALVE, 2019).

3 Desenvolvimento

3.1 Definição dos requisitos e critérios para o design da válvula

A finalidade da válvula de controle em estudo é o controle da vazão mássica de oxidante do motor de foguete híbrido. O principal oxidante utilizado na propulsão híbrida é o óxido nitroso pelo fato de ser auto pressurizante e de apresentar uma alta pressão de vapor, eliminando a necessidade de um sistema de pressurização. O óxido nitroso se apresenta em uma mistura líquido-vapor, com pressão de aproximadamente 57 bar a temperatura ambiente de 25 °C (NIST, 2019). Os gráficos das figuras 21 e 22 foram gerados a partir da base de dados NIST e apresentam as curvas de pressão versus temperatura e densidade versus temperatura para a fase líquida do óxido nitroso. Durante o escoamento do óxido nitroso pelo sistema de alimentação, baixas temperaturas são observadas. Quando há vazamento na linha, é possível notar a formação de cristais de gelo na tubulação, indicando que a temperatura está a baixo de 0 °C no local. Dessa maneira, observa-se que a válvula de controle deve estar apta a suportar altas pressões e baixas temperaturas. Admitindo uma margem de segurança, decidiu-se impor o critério de que a válvula deve suportar pressões de pelo menos 150 bar e temperaturas mínimas de até -20 °C.

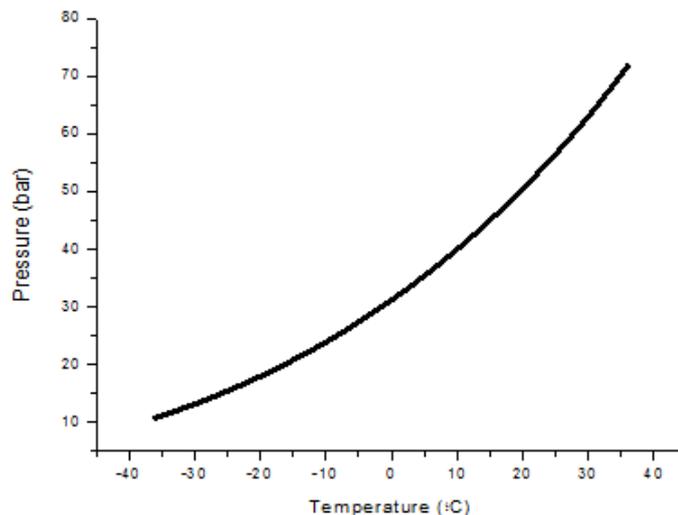


Figura 21 – Pressão de vapor do óxido nitroso em função da temperatura.

A válvula também deve estar apta a trabalhar com outros fluidos, como oxigênio gasoso, nitrogênio gasoso, água, ar comprimido e dióxido de carbono. A válvula deve ser capaz de trabalhar com oxigênio gasoso visando atender uma gama maior de projetos de motor de foguete híbrido, visto que alguns propulsores utilizam oxigênio gasoso como oxidante. A capacidade de trabalhar com nitrogênio gasoso é necessária devido ao processo

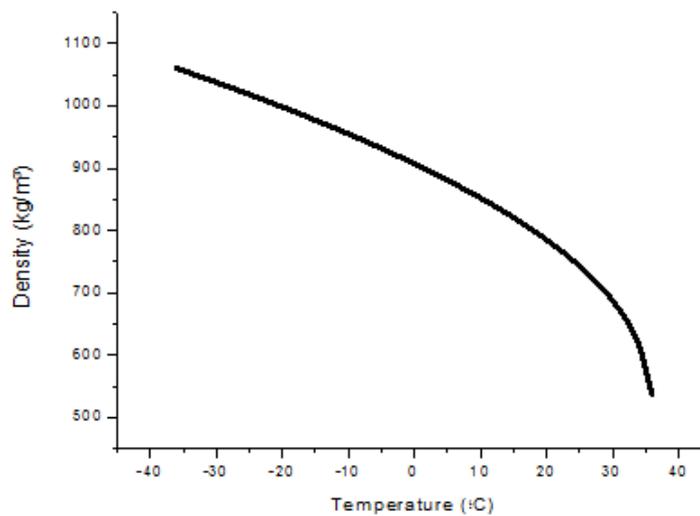


Figura 22 – Densidade da fase líquida de óxido nitroso em função da temperatura.

de purga, que acontece para extinguir a chama após a conclusão do ensaio a quente na bancada de testes. A necessidade de que a válvula possa trabalhar com água, ar comprimido e dióxido de carbono existe devido a possibilidade de uso desses fluidos na fase de testes de validação do projeto. A definição de que a válvula deve suportar até 150 bar de pressão e até -20 °C de temperatura atende as especificações de pressão e temperatura dos fluidos citados.

Os principais motores de foguete híbridos desenvolvidos na Universidade de Brasília possuem vazão mássica de óxido nitroso na faixa de 0,4 a 0,6 kg/s. Visando a possibilidade do desenvolvimento de motores mais potentes no futuro que exijam maiores vazões mássicas, pode-se definir que a válvula aqui desenvolvida tenha a capacidade de vazão mássica de 1 kg/s. Sabe-se que o óxido nitroso apresenta um escoamento em duas fases (líquido e vapor), de maneira que sua modelagem é bastante complexa. A fim de simplificar o cálculo do coeficiente de vazão, assumiu-se que o escoamento do óxido nitroso se dá na fase líquida.

Para definir o C_v necessário à válvula utilizou-se a calculadora disponibilizada online pela Swagelok, empresa fabricante de válvulas. Assim, foi assumido que o escoamento seria de óxido nitroso na fase líquida a uma temperatura de 24 °C, densidade de 750 kg/m³, vazão volumétrica de 1,333 l/s e uma diferença de pressão de 25 bar (pressão no tanque de oxidante de 55 bar e pressão na câmara de combustão de 30 bar). O valor de C_v obtido foi de 0,961, como pode ser observado na figura 23. A fim de se ter uma margem de segurança, definiu-se que a válvula deve ter um coeficiente de vazão com valor mínimo de 2.

Com a finalidade de reduzir o peso e a complexidade do sistema de atuação da válvula, escolheu-se por um atuador elétrico, por não precisar de reservatórios externos de

Calculation type
 CV Flow

Medium Type
 Liquid Gas

Inlet pressure (P1)
 55 bar

Outlet pressure (P2)
 30 bar

Flow rate (Q)
 1.333 l/s

Temperature
 24 °Celsius

Specific gravity
 0.75

CV Value: 0.961

RECALCULATE

Figura 23 – Calculadora de C_v da Swagelok. (Disponível em: <https://www.swagelok.com/en/Resources/CVCalculator>)

gás comprimido ou fluido hidráulico, necessitando apenas de uma fonte de energia elétrica. Além disso, é possível encontrar atuadores elétricos de baixo peso, pequenas dimensões e com potência aplicável para a atuação da válvula, como servo motores.

O tempo de resposta da válvula de controle é um parâmetro importante, pois caso o tempo entre o envio do sinal e a abertura da válvula seja muito grande, o desempenho do motor pode ser afetado. Analisando a situação do motor de foguete híbrido a ser utilizado na plataforma SARA, integrado com o ignitor tipo tocha, e em uma situação em que ocorre a ignição mas o oxidante é injetado lentamente na câmara de combustão, tem-se o desperdício de propelentes, pois haverá combustão na câmara mas com pouco empuxo gerado, além da possibilidade da parafina derretida ser expelida pelo motor sem ter sofrido combustão. Nessa situação, haverá um impulso tardio na plataforma espacial, de maneira que a missão pode ser colocada em risco devido a reentrada em um momento diferente do planejado. Assim, planeja-se que a válvula de controle tenha uma resposta rápida ao sinal de abertura, com um tempo de abertura menor que 2 segundos.

Por se tratar de um modelo de voo, é importante que a válvula tenha uma configuração ótima de peso e volume, devido ao alto custo por quilograma de lançamentos ao espaço e devido às restrições volumétricas da plataforma espacial. É necessário também que a válvula tenha uma alta confiabilidade e durabilidade. No momento não é possível quantificar esses requisitos, porém o desenvolvimento da válvula é baseado nesses princípios. A tabela 1 resume a definição dos requisitos necessários à válvula de controle.

Tabela 1 – Requisitos da válvula de controle

Pressão de trabalho	>150 bar
Temperatura de trabalho	>-20 °C
Fluidos de trabalho	N_2O , O_2 , N_2 , H_2O , CO_2
Coefficiente de vazão	>2
Tipo de atuador	Elétrico
Tempo de abertura	<2 s

3.2 Pesquisa de possíveis soluções no mercado (COTS)

Definidos os critérios necessários à válvula de controle, foram realizadas pesquisas na internet por válvulas que atendessem aos requisitos. Procurou-se pelos principais tipos de válvulas encontradas no mercado, isto é, as válvulas já discutidas neste trabalho (esfera, borboleta, macho, globo, gaveta e diafragma), de maneira a compará-las e escolher a que melhor atende aos requisitos definidos. A pesquisa se restringiu a fornecedores nacionais ou fornecedores estrangeiros com representantes no Brasil.

Foram pesquisadas válvulas de mesmo diâmetro nominal de 1/2 polegada e foi montada a tabela 2 comparando os valores de coeficiente de vazão, peso, volume aproximado, torque necessário, pressão máxima de trabalho e faixa de temperatura. O volume foi estimado baseado nas dimensões encontradas no catálogo da fabricante. Não foi possível encontrar uma válvula borboleta de tamanho nominal de 1/2 polegada, pois são fabricadas em tamanhos geralmente superiores a 1 polegada. Os catálogos das respectivas válvulas¹ podem ser acessados nos links disponíveis no rodapé.

Tabela 2 – Comparação de diferentes tipos de válvula de um mesmo tamanho nominal (1/2")

Válvula	C_v	Peso [kg]	Vol. 10^5 [mm^3]	Torque [N.m]	Pressão [bar]	Temp. [°C]
Esfera [1]	12	0,7	1,4	6,6	151	-28 a 232
Borboleta	-	-	-	-	-	-
Macho [2]	16	4,2	14,5	55	150	-30 a 230
Globo [3]	5	2,2	5,5	-	40	-10 a 180
Gaveta [4]	10	2,1	5,8	-	138	-12 a 177
Diafragma [5]	4	0,3	0,6	-	10	-10 a 100

Dadas as válvulas encontradas, observa-se que as válvulas globo e diafragma possuem pressões de trabalho muito a baixo da pressão necessária, não sendo adequadas para a aplicação definida neste trabalho. É possível notar que a válvula gaveta não atende o

¹ [1]<https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-01-146.pdf>, [2]<http://www.az-armaturen.com.br/wp-content/uploads/2015/11/1.5-TIPO-HDS-HDS-GL.pdf>, [3]<https://www.gemu-group.com/gemu-cdn/dokumente/2/db532p.pdf>, [4]http://www.acessoindustrial.com.br/downloads/catalogo_acessoREV_20_05_08_baixa.pdf (p 19), [5]<https://www.gemu-group.com/gemu-cdn/dokumente/2/db653654g.pdf>

requisito de temperatura mínima especificado, podendo não funcionar corretamente como válvula de controle de oxidante. Assim, as válvulas que atendem aos requisitos definidos são as válvulas esfera e macho. Porém, pode-se notar que a válvula macho é bastante pesada e ocupa um volume muito grande comparada as outras válvulas, além de necessitar de um torque elevado para sua operação, exigindo um atuador bastante potente.

Assim, a válvula esfera foi a escolhida para integrar este projeto de válvula de controle de oxidante por atender aos requisitos definidos e apresentar baixos peso, torque de operação e volume comparada as outras válvulas. Além disso, possui a vantagem de ser uma válvula de um quarto de volta, de maneira que é necessário um deslocamento de apenas 90° para sua operação completa, o que facilita também sua atuação. A válvula escolhida pode ser observada na figura 24.



Figura 24 – Válvula esfera escolhida (SWAGELOK, 2019).

A válvula escolhida é uma válvula esfera tripartida fabricada em aço inoxidável 316 com conexões roscadas de 1/2” NPT fêmea, esfera de aço inoxidável com orifício de 13,1 mm de diâmetro, sedes de politetrafluoretileno reforçado (PTFE), vedações em fluorocarbono (FKM), gaxetas tipo V para melhor performance e rolamentos da haste de alta resistência ao desgaste que promovem uma atuação suave. A alavanca será removida para o acoplamento do atuador.

Para a escolha do atuador elétrico, teve-se a preferência por servo motores, devido ao design compacto e leve e a capacidade de posicionamento preciso. Foi pesquisado um servo motor que fornecesse o torque necessário de 67 kgf.cm (6,6 N.m) para a atuação da válvula esfera escolhida, e inicialmente foi encontrado o servo motor HS-1005SGT da marca Hitec (figura 25), que é capaz de fornecer um torque de até 110 kgf.cm (10,8 N.m)

a 14,8 V. Este servo motor foi utilizado no design preliminar da válvula de controle.



Figura 25 – Servo motor escolhido inicialmente. (HITEC, 2018).

Após um período maior de pesquisas foi encontrado o servo motor D950TW, também da marca Hitec, que fornece um torque máximo de 35 kgf.cm (3,4 N.m) a 7,4 V, mas ao ser utilizado com o conjunto de engrenagens SPG400A 3,8:1 (figura 26) fornece um torque máximo de 133 kgf.cm (13 N.m) (SERVOCITY, 2019). Esta configuração do servo possui um potenciômetro externo solidário ao eixo de rotação da engrenagem, que possibilita que o valor real da posição seja registrado. Assim, o servo D950TW com a relação de engrenagens foi escolhido para compor a válvula de controle. As especificações do servo podem ser observadas na tabela 3.

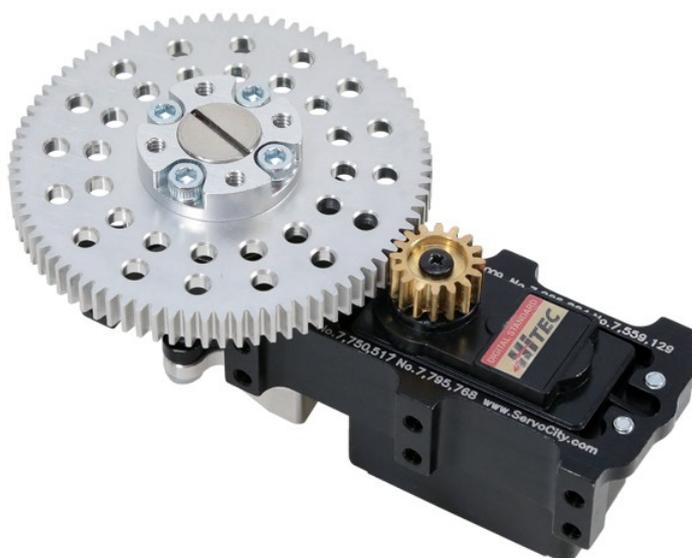


Figura 26 – Relação de engrenagens fornecida pela ServoCity. (SERVOCITY, 2019)

Tabela 3 – Especificações técnicas do servo motor D950TW com relação de engrenagens 3.8:1 (SERVOCITY, 2019)(HITEC, 2019)

Tensão de operação (Volts DC)	4,8 a 7,4
Velocidade (segundos/60°)	0,874 a 0,532
Torque máximo (kgf.cm)	80 a 133
Corrente drenada em repouso (mA)	30
Corrente drenada sem carga (mA)	50
Corrente drenada em stall (mA)	6200
Largura de banda morta (us)	1
Peso (g)	190
Tipo de circuito	Programável digital 32bit
Tipo de motor	Bucha de metal sem núcleo
Material das engrenagens	Titânio
Tipo de rolamentos	Rolamento de esferas duplas
Eixo de saída	H25T
Material da estrutura	Plástico e Alumínio
Resistência a água/poeira	Respingos

3.3 Projeto da válvula de controle

Foi feito um projeto preliminar da válvula de controle baseado no servo motor HS-1005SGT, o servo escolhido inicialmente. O projeto consistia em um suporte para fixar o servo motor entre os parafusos de fixação da válvula esfera. O suporte seria fabricado em aço e teria rasgos para redução do seu peso. Havia também um conector entre o servo motor e a válvula esfera, responsável por transmitir o torque gerado pelo eixo de saída do servo motor para o eixo de rotação da esfera. Como o primeiro modelo de servo motor não possui um acesso ao potenciômetro para obtenção da posição real, o projeto previa também um sistema de engrenagens para transmissão do movimento do eixo de rotação servo-válvula para um potenciômetro acoplado à válvula esfera. Esquemáticos do design preliminar podem ser observados na figura 27.

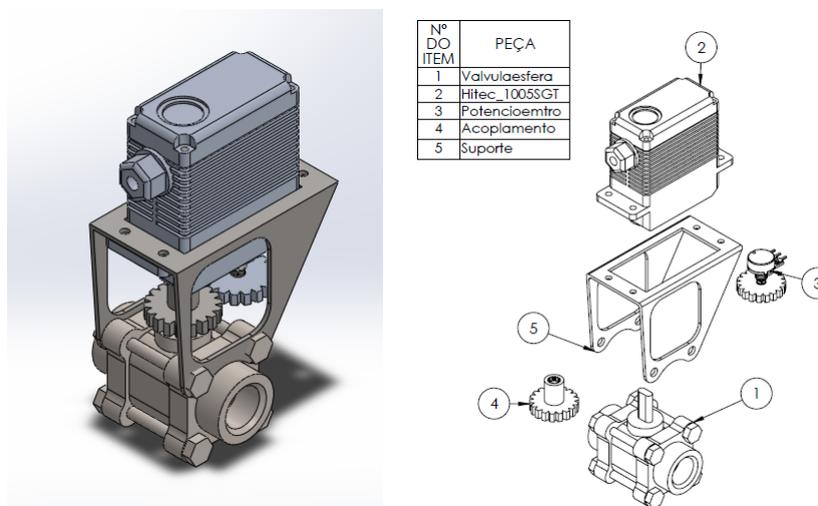


Figura 27 – Design preliminar da válvula

A versão atual da válvula de controle (figura 28) foi projetada pelo prof. Olexiy Shynkarenko. Baseada no servo D950TW com a relação de engrenagens, ela possui um invólucro isolado hermeticamente para garantir seu correto funcionamento em ambientes diversos e possui também uma nova interface entre o servo motor e a válvula esfera. O design foi otimizado para obter-se encaixes precisos dos componentes na estrutura, além de possuir diversos elementos de fixação. O uso de um conector elétrico facilita a montagem da estrutura, evitando a passagem de fios do interior para o exterior do conjunto. Seu invólucro é feito a partir da usinagem de aço inoxidável. A válvula de controle encontra-se atualmente sob processo de patenteação, de maneira que não é possível exibir seu projeto detalhado.

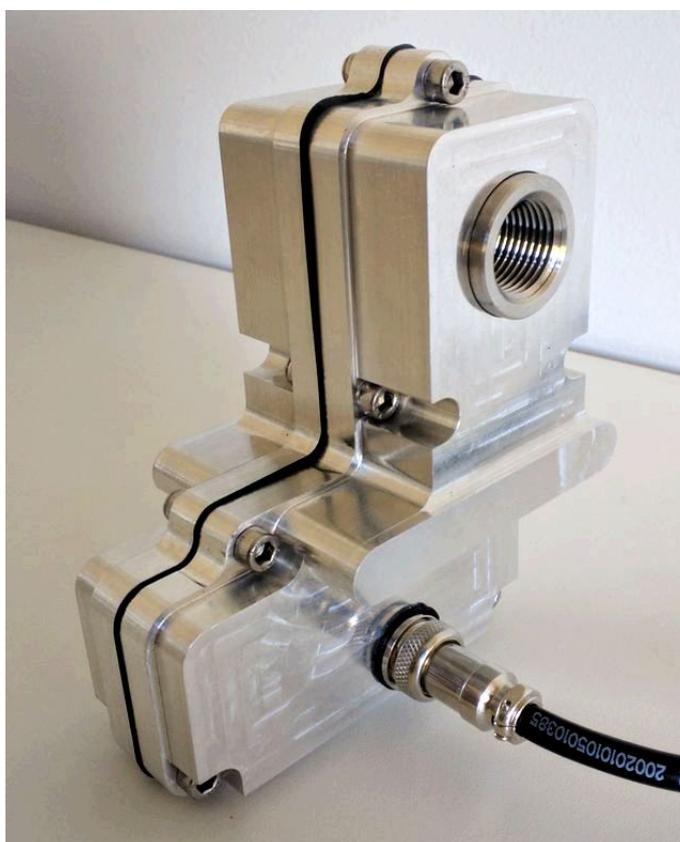


Figura 28 – Versão atual da válvula de controle. (SHYNKARENKO, 2019)

3.4 Metodologia experimental

Em um primeiro momento foram feitos testes de caracterização da válvula esfera e do servo motor e posteriormente foram feitos os testes de validação da solução integrada. Foram feitos testes com a válvula esfera para conhecer suas características de vazão e de torque, a fim de verificar se correspondem aos valores indicados pelo fabricante, além de garantir que a válvula atenda aos requisitos de vazão e ao torque fornecido pelo servo motor. Foram feitos testes com o servo motor para verificar seu tempo de resposta em

diferentes níveis de carga e seu torque máximo fornecido, observando se os valores correspondem aos indicados pelo fabricante e se atendem os requisitos estipulados neste trabalho.

Conhecendo as características da válvula esfera e do servo motor, a válvula de controle foi montada e foram feitos os testes de validação do projeto. Concomitantemente ao desenvolvimento da válvula de controle, outros projetos foram desenvolvidos no CPL utilizando-a, como por exemplo a implementação de um programa de controle PID para a válvula e o estudo da eficiência da parafina em motor de foguete híbrido (DOMINGOS, 2019), onde houve a possibilidade de aproveitar os dados de testes destes outros projetos.

Os testes realizados foram:

Testes com a válvula esfera

- Torque da válvula pressurizada com óxido nitroso;
- Torque em função da temperatura;
- Caracterização do Cv;
- Curva característica de vazão;

Testes com o servo motor

- Carga máxima ;
- Velocidade de resposta com diferentes níveis de carga;

Testes da solução integrada

- Curva característica de vazão;
- Teste de injeção de oxidante a frio;
- Teste de injeção de oxidante a quente;

3.4.1 Testes com a válvula esfera

3.4.1.1 Torque da válvula pressurizada com óxido nitroso

Inicialmente planejou-se medir o torque de acionamento da válvula em diferentes pressões, porém devido a indisponibilidade de um regulador de pressão para o óxido nitroso, decidiu-se por caracterizar apenas o torque de acionamento na pressão de trabalho da válvula, isto é, a pressão de vapor do óxido nitroso. Assim, foi possível aferir o torque de acionamento da válvula nas condições reais de trabalho. Para esse teste, a válvula esfera foi conectada ao sistema de alimentação de oxidante disponível no CPL. Este sistema dispõe de diversos equipamentos, entre eles, transdutores de pressão utilizados para aferir a pressão manométrica na linha. Foram realizados testes em três cenários diferentes. No primeiro, como referência, aferiu-se o torque de operação da válvula sem pressão alguma.

No segundo, a válvula foi submetida a um diferencial de pressão, isto é, havia a presença de óxido nitroso antes da válvula e após a válvula havia apenas a pressão atmosférica. O terceiro cenário foi com a pressão do óxido nitroso de ambos os lados da válvula. Assim, os procedimentos do teste foram: pressurização da linha com óxido nitroso; registro da pressão na linha pelo sistema de aquisição de dados e; abertura da válvula através do torquímetro, onde pode-se observar o valor de torque alcançado durante o acionamento da válvula.

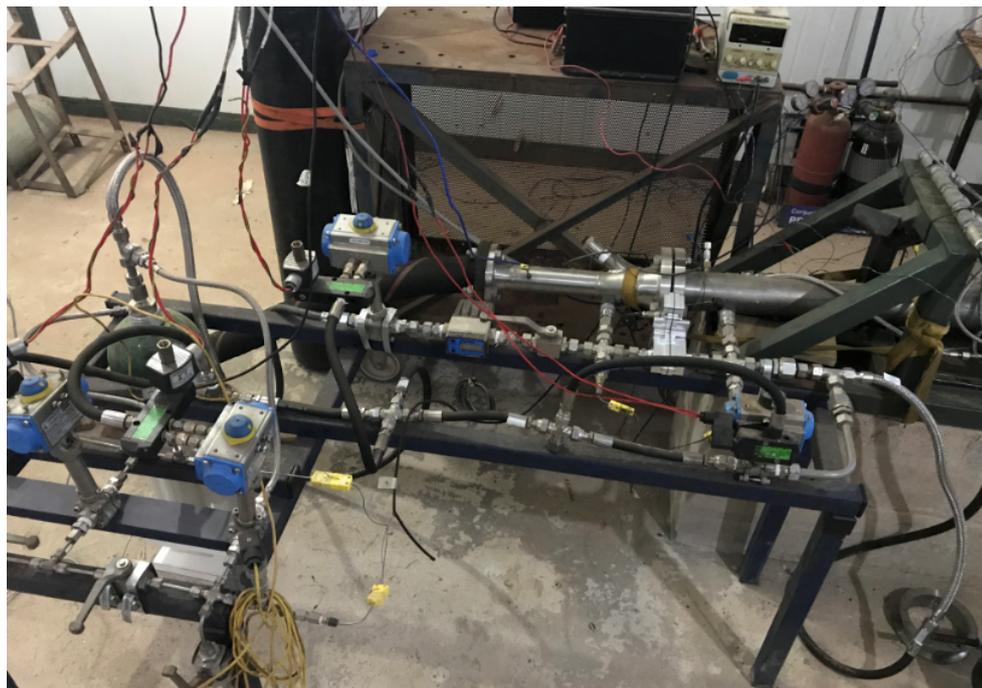


Figura 29 – Sistema de alimentação de oxidante do CPL.

3.4.1.2 Torque em função da temperatura

Este teste foi feito para observar a influência da temperatura no valor do torque necessário para operar a válvula, isto é, foi levantada uma curva torque versus temperatura. Para a realização deste teste, a válvula esfera foi aquecida em água fervente e em seguida fixada na bancada de testes. Então, foi aferida a temperatura na superfície interna da válvula por meio de um termopar. Em seguida, foi aferido o torque de abertura da válvula com um torquímetro de relógio. Com o resfriamento da válvula, os procedimentos foram repetidos para se obter o torque em diferentes temperaturas. Assim, foi possível obter o torque necessário para operar a válvula nas seguintes temperaturas: 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C e 80°C. O torquímetro utilizado é da marca TorkFort, tem capacidade máxima de 20 N.m e resolução de 0,25 N.m (TORKFORT, 2019). Outro teste que estava previsto inicialmente seria o teste da influência da temperatura no valor do torque com a válvula pressurizada com óxido nitroso, porém devido ao risco de decomposição explosiva do óxido nitroso aquecido (AIRLIQUIDE, 2019), esse teste foi descartado.

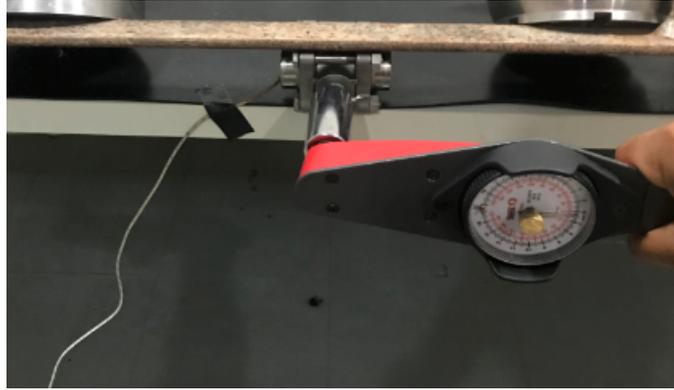


Figura 30 – Aferição do torque por meio do torquímetro e da temperatura por meio do termopar.

3.4.1.3 Caracterização do C_v

O teste foi feito para medir o Coeficiente de Vazão C_v da válvula e verificar se o mesmo corresponde ao informado pela fabricante. O Coeficiente de Vazão é calculado pela equação (2.3) a partir dos valores de vazão volumétrica, diferencial de pressão e densidade relativa. O teste foi realizado no sistema de alimentação de oxidante do CPL, porém com água da rede de abastecimento. Desta maneira, foi necessário medir a pressão na linha e a vazão de água através da válvula esfera. A pressão foi medida pelos transdutores de pressão conectados na linha e a vazão foi medida através da massa de água coletada em um balde durante 10 segundos de escoamento. Para medir a massa de água que escoou pela válvula foi utilizada a célula de carga disponível no laboratório, como pode ser observado na figura 31.



Figura 31 – Célula de carga usada no teste.

3.4.1.4 Curva característica de vazão

Este teste foi feito para obter-se a curva característica de vazão da válvula esfera, isto é, o gráfico de vazão relativa por abertura da válvula. Este teste foi realizado de maneira similar ao teste anterior, medindo a vazão de água da rede de abastecimento passando pela válvula, porém variando-se o ângulo de abertura da válvula. Foi utilizada uma válvula esfera anterior à válvula esfera de testes, com a função de permitir e bloquear o fluxo, ficando a válvula esfera de testes estática na angulação desejada. A angulação de abertura da válvula era ajustada visualmente utilizando-se um transferidor (figura 32) para posicionar a haste da válvula, assim havendo possíveis erros associados. Não é possível observar escoamento com ângulos de abertura abaixo de 20° , assim os ângulos testados foram de 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° e 90° . A vazão novamente foi calculada através da massa de água escoada num intervalo de tempo de 10 segundos.

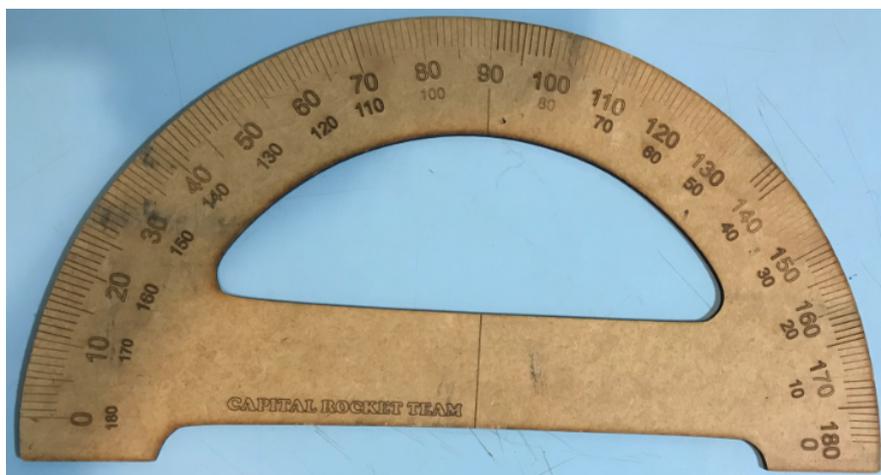


Figura 32 – Transferidor usado no teste.

3.4.2 Testes com o servo motor

3.4.2.1 Carga máxima

Este teste foi feito para caracterizar o maior torque fornecido pelo servo motor. As cargas foram adicionadas no braço de alavanca com 10 cm de distância ao centro de rotação (figura 33), variando da posição de -45° a 45° com a horizontal, de maneira que o torque máximo se dava na posição de 0° quando a força peso era perpendicular ao braço de alavanca. O servo foi alimentado por uma fonte de 7 V de tensão durante os testes.

3.4.2.2 Velocidade de resposta com diferentes níveis de carga

Este teste foi feito para verificar o tempo resposta do servo, verificando se o mesmo corresponde aos valores esperados. O teste foi feito em um deslocamento de 60° por ser o padrão informado pelo fabricante. Assim, o servo foi fixado em uma base com um

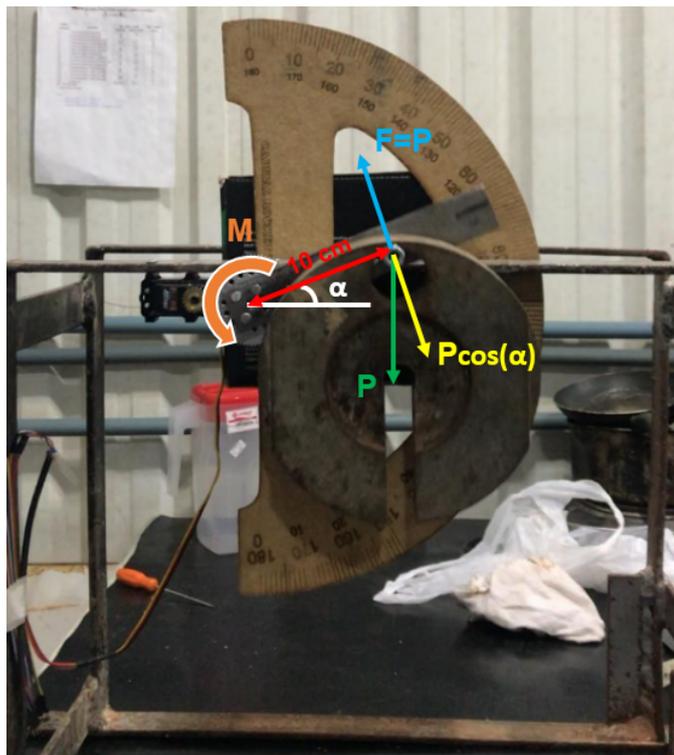


Figura 33 – Servo motor com carga de 3 kg.

transferidor ao fundo (figura 34), foi feito o deslocamento de -30° até 30° em relação a horizontal, e o tempo foi medido por filmagem em câmera lenta. Foi desenvolvido um braço de alavanca para fixar as cargas a uma distância de 10 cm do centro de rotação, de maneira que sabendo a massa fixada e a distância do centro de rotação pode-se obter o torque fornecido pelo servo motor. O teste foi feito com diferentes níveis de carga: sem carga, 1.25 kg, 2 kg e 3 kg. Para cada carga foi necessário ajustar os parâmetros do servo motor, sendo necessária uma calibração da posição antes de cada teste.

3.4.3 Testes com a solução integrada

3.4.3.1 Curva característica de vazão

Foi repetido o teste de levantamento da curva característica de vazão, desta vez com o posicionamento preciso da válvula pelo servo motor, eliminando o erro associado ao posicionamento manual presente no primeiro teste. Desta maneira foi possível observar o funcionamento da solução integrada (figura 35), verificando se houve falhas na montagem da válvula de controle e se os parâmetros de calibração foram corretos.

3.4.3.2 Teste de injeção de oxidante a frio

Neste teste foi feito o levantamento da vazão pelo ângulo de abertura da válvula, como na curva característica de vazão, mas dessa vez com a vazão mássica de óxido



Figura 34 – Bancada de testes do servo motor.



Figura 35 – Válvula de controle no sistema de alimentação.

nitroso. A vazão mássica de oxidante foi medida pela diferença entre a massa final e a massa inicial de teste, considerando o tempo de operação da válvula. A figura 36 mostra um momento do vídeo do teste.

3.4.3.3 Teste de injeção de oxidante a quente

A válvula foi utilizada em um teste a quente de motor de foguete híbrido (figura 37), controlando a pressão na câmara de combustão por meio de um controlador PID.



Figura 36 – Teste a frio com óxido nitroso.

Neste teste foram colhidos dados como pressão na linha, pressão na câmara de combustão, vazão mássica de oxidante e ângulo de abertura da válvula de controle.



Figura 37 – Teste a quente do motor de foguete híbrido.

4 Resultados e discussões

4.1 Torque da válvula pressurizada com óxido nitroso

Os resultados deste teste podem ser observados na tabela 4. Devido às condições de temperatura ambiente no momento do teste não foi possível obter pressões maiores com o óxido nitroso.

Tabela 4 – Torque de operação da válvula em função da pressão.

	Pressão [bar]	Torque inicial [N.m]	Torque médio [N.m]
Pressão ambiente	0	1,75	1,25
Diferencial de pressão	34,4	2	1,25
Pressurizada em ambos os lados	38,8	2	1,25

Neste teste foi possível observar que na primeira tentativa de abertura da válvula esfera obteve-se os maiores valores de torque. Nas tentativas seguintes, o valor do torque se estabilizava em um valor menor. Este fenômeno ocorre porque as sedes da válvula, feitas de material plástico (PTFE), tendem a copiar as irregularidades da superfície da esfera com o tempo, de maneira que existe uma aderência entre as superfícies (COSTA, 2009). Assim, quando a válvula passa um período sem ser operada, o torque de acionamento será maior do que o torque necessário quando a válvula é operada regularmente.

Não foi observada influência da pressão do fluido no torque de operação da válvula, visto que para os diferentes valores de pressão testados o resultado de torque foi o mesmo, 1,25 N.m. Esperava-se um resultado diferente, em que o torque necessário para operar a válvula esfera fosse maior quanto maior fosse a pressão do fluido. Uma maior pressão no fluido gera uma força maior da esfera contra as sedes, aumentando o atrito entre as superfícies e conseqüentemente aumentando o torque de operação da válvula. Acredita-se que o comportamento esperado não aconteceu pois a faixa de pressão aplicada nos testes foi baixa. Assim, acredita-se que em pressões maiores pode-se observar melhor esta relação crescente entre torque e pressão.

De acordo com o catálogo da fabricante, o torque de operação da válvula em sua capacidade máxima de pressão (151 bar) é de 6,6 N.m. Os valores encontrados no teste são muito menores que o informado pela fabricante, fato que pode ser explicado pela baixa pressão nos testes, mas também por um possível fator de segurança empregado pela fabricante. Este teste foi importante para quantificar o verdadeiro torque necessário para atuar a válvula esfera, levantando a possibilidade de se otimizar o dimensionamento

do atuador futuramente.

4.2 Torque em função da temperatura

A tabela 5 apresenta os valores de torque obtidos para diferentes temperaturas. A partir destes dados foi criado um gráfico que esboça o comportamento do torque com a temperatura (figura 38).

Tabela 5 – Valores do torque em função da temperatura

Temperatura (°C)	Torque (N.m)		
	1º teste	2º teste	3º teste
30	1,25	1,25	1,25
40	1,25	1,25	1,25
50	1,25	1,5	1,25
60	1,5	1,5	1,5
70	1,75	1,75	1,75
80	2,25	2	2

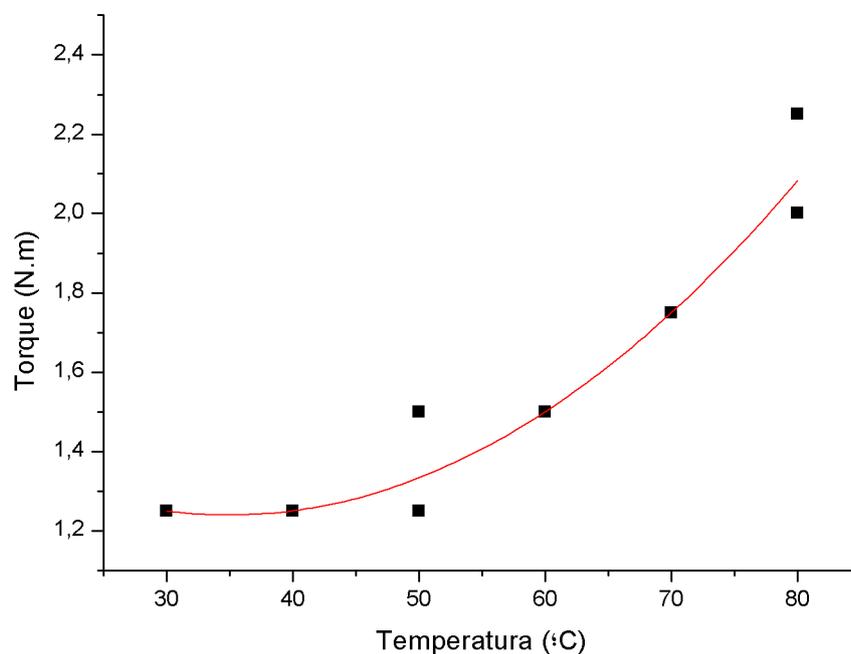


Figura 38 – Gráfico do torque em função da temperatura.

A resolução do torquímetro e a temperatura máxima alcançada não permitiram um estudo mais aprofundado desta relação, porém percebe-se um comportamento proporcional entre a temperatura e o torque de operação da válvula. O valor de torque a

temperatura ambiente é de 1,25 N.m, valor mínimo de torque encontrado durante os testes.

4.3 Caracterização do Cv

Durante o teste foram medidos os valores de vazão volumétrica e diferencial de pressão na válvula, sabendo-se que a densidade relativa era aproximadamente 1 devido ao uso de água a temperatura ambiente. Com esses valores foi possível calcular o Kv e consequentemente o Cv da válvula, como mostrado na tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo do Cv a partir da equação 2.3

	1º teste	2º teste	3º teste
Pressão [bar]	0,067	0,068	0,068
Vazão medida [l/s]	0,178	0,177	0,173
Vazão (Vm*3,6) [m ³ /h]	0,641	0,637	0,623
Kv	2,476	2,446	2,388
Cv (Kv*1,16)	2,872	2,835	2,771

Assim, é possível afirmar que o valor médio do coeficiente de vazão da válvula é de aproximadamente 2,8. Este coeficiente de vazão calculado é diferente do fornecido pela fabricante. De acordo com a fabricante o valor do coeficiente de vazão da válvula esfera é 12, como pode ser observado na tabela 2. Acredita-se que essa diferença aconteça devido a diferentes configurações de teste, visto que não foi possível acessar os padrões de teste utilizados pela fabricante. Porém, ainda sim o coeficiente de vazão se mostra dentro dos requisitos do projeto, de maneira que a válvula esfera escolhida pode compor satisfatoriamente a válvula de controle em desenvolvimento. É importante salientar que no caso de uma válvula com o coeficiente de vazão muito acima do necessário, o ajuste fino da vazão se torna mais difícil, fazendo com que a válvula tenha que operar com ângulos de abertura muito pequenos.

4.4 Curva característica de vazão

A tabela 7 apresenta a vazão volumétrica de água através da válvula esfera em função do ângulo de abertura. A figura 39 mostra a curva característica de vazão da válvula esfera com seu posicionamento feito manualmente.

A partir desses resultados pode-se observar que para ângulos pequenos de abertura (<20°) não há escoamento, e para ângulos grandes de abertura (>50°) há pouca variação na vazão (menos de 10%), sendo a região entre 20° e 50° a mais importante para o controle preciso da vazão. Essa característica se aproxima mais de uma válvula de rápida abertura.

Tabela 7 – Vazão de água através da válvula em função do ângulo de abertura.

Ângulo de abertura [°]	Vazão média [ml/s]
10	0
20	2,5
30	61,6
40	129,3
50	156,2
60	166,5
70	170,7
80	175,0
90	173,8

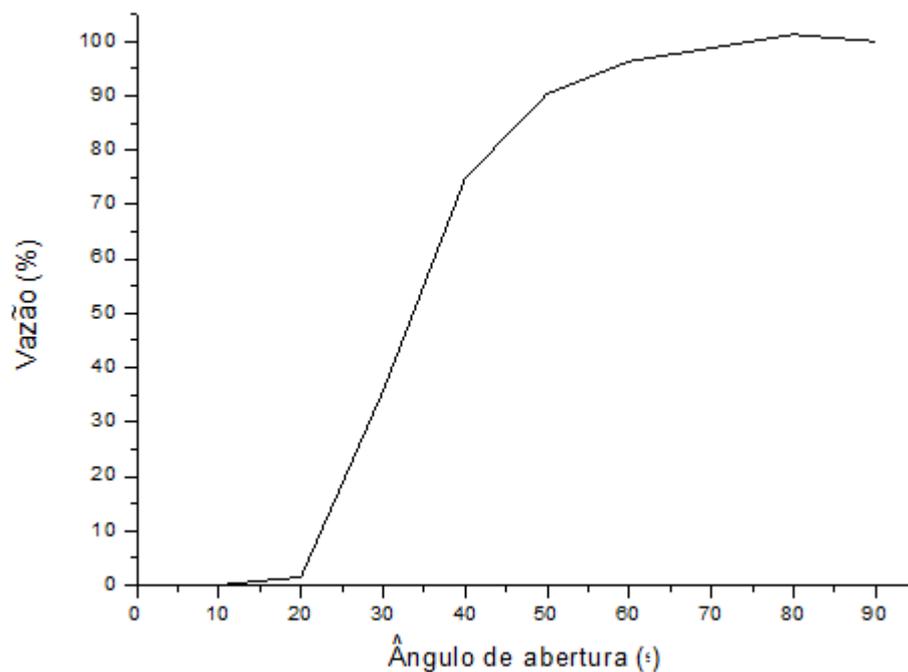


Figura 39 – Curva característica de vazão.

É possível observar que a vazão para a abertura de 90° apresenta valor um pouco menor que a vazão para abertura de 80°, porém como os valores são muito próximos, pode-se considerar que são os mesmos valores de vazão e esse comportamento pode ser fruto dos erros experimentais envolvidos no teste.

4.5 Carga máxima

Inicialmente o braço de alavanca estava na posição -45° sem carga, ao adicionar-se o peso de 5 kg o braço de alavanca se manteve na posição, demonstrando a capacidade de sustentar um torque estático de aproximadamente 4,9 N.m. Porém, ao se emitir o sinal de comando para o servo erguer a carga para a posição de 45°, o mesmo não conseguiu

erguê-la e perdeu força, de maneira que o braço de alavanca foi para a posição -90° (figura 40).



Figura 40 – Servo motor não conseguiu erguer a carga de 5 kg.

Assim, nota-se que o servo motor tem capacidades de torque estático e dinâmico diferentes, porém não detalhadas pelo fabricante. Visto que o servo não pôde fornecer um torque dinâmico de 4,9 N.m, o teste prosseguiu com uma carga de 3 kg (torque de aproximadamente 2,9 N.m). Desta vez o servo conseguiu erguê-la satisfatoriamente. Para preservar o servo e evitar danos no seu circuito elétrico, decidiu-se por não testar com a carga de 4 kg, sabendo que ao erguer a carga de 3 kg o servo atende aos requisitos de torque da válvula.

Com esse teste foi possível verificar que o torque máximo de 13 N.m informado pela fabricante não corresponde ao torque dinâmico máximo fornecido pelo servo, informação importante para o projeto da válvula de controle. Porém, foi possível observar que o torque dinâmico de 2,9 N.m fornecido pelo servo é suficiente para operar a válvula esfera, que requer um torque de aproximadamente 1,25 N.m.

4.6 Velocidade de resposta com diferentes níveis de carga

A tabela 8 mostra o tempo gasto para o servo posicionar o braço de alavanca da posição -30° a posição 30° em diferentes situações de carga.

Observa-se que o tempo resposta é relativamente alto para um servo motor, mas isso se dá pelo uso da relação de engrenagens, visto que a engrenagem menor precisa de um deslocamento maior para que a engrenagem maior tenha o deslocamento determinado,

Tabela 8 – Tempo gasto ao percorrer 60°

Carga [kg]	Tempo médio [s]
Sem carga	1,29
1,25	1,28
2	1,27
3	1,24

o que aumenta o tempo resposta do servo. Mesmo com um tempo resposta relativamente alto o servo atende aos requisitos do projeto, que estipula um tempo resposta de até 2 segundos.

Observa-se também que não há variação significativa do tempo de resposta nas diferentes condições de teste, o que se mostra um resultado diferente do esperado, visto que com uma carga maior espera-se uma velocidade menor e conseqüentemente um tempo de resposta maior. Porém, é possível que haja uma configuração de velocidade constante programada previamente no servo motor, pois a fabricante especifica que entre as funções programáveis do servo há uma função que controla a velocidade (HITEC, 2019).

4.7 Curva característica de vazão

A tabela 9 mostra os resultados do teste realizado com o servo motor controlando o ângulo de abertura da válvula esfera. A partir desses dados foi possível verificar novamente a curva característica de vazão, mostrada na figura 41. A figura 42 mostra a comparação da curva característica de vazão obtida manualmente e a obtida com o servo motor.

Tabela 9 – Vazão de água pelo ângulo de abertura, resultado com servo motor.

Ângulo de abertura [°]	Vazão média [ml/s]
10	0
20	2,3
30	22,6
40	94,5
50	138,1
60	138,9
70	142,8
80	144,6
90	162,3

Pode-se afirmar que esta nova curva característica de vazão é mais confiável pois foi obtida pelo posicionamento preciso do servo motor, reduzindo os erros associados ao posicionamento feito com o uso do transferidor. Apesar de apresentar valores de vazão

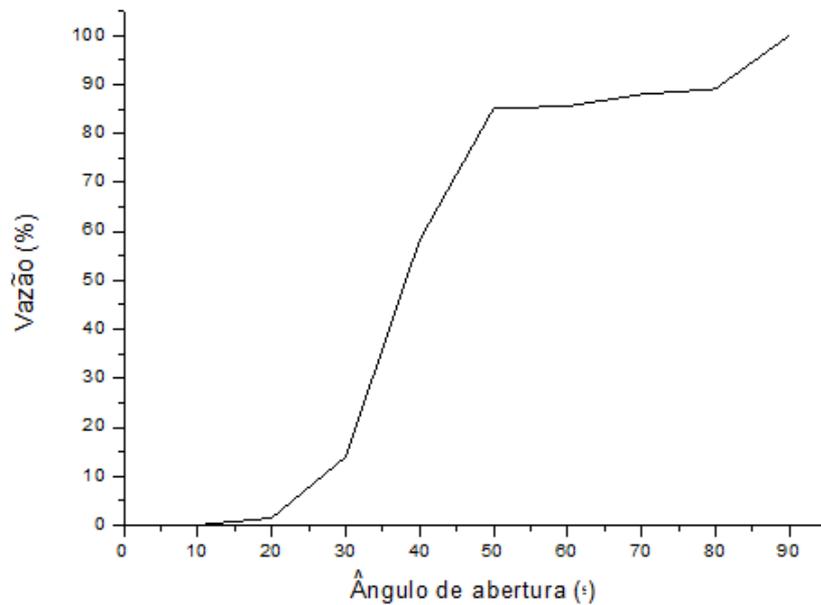


Figura 41 – Curva característica de vazão, válvula posicionada com o servo motor.

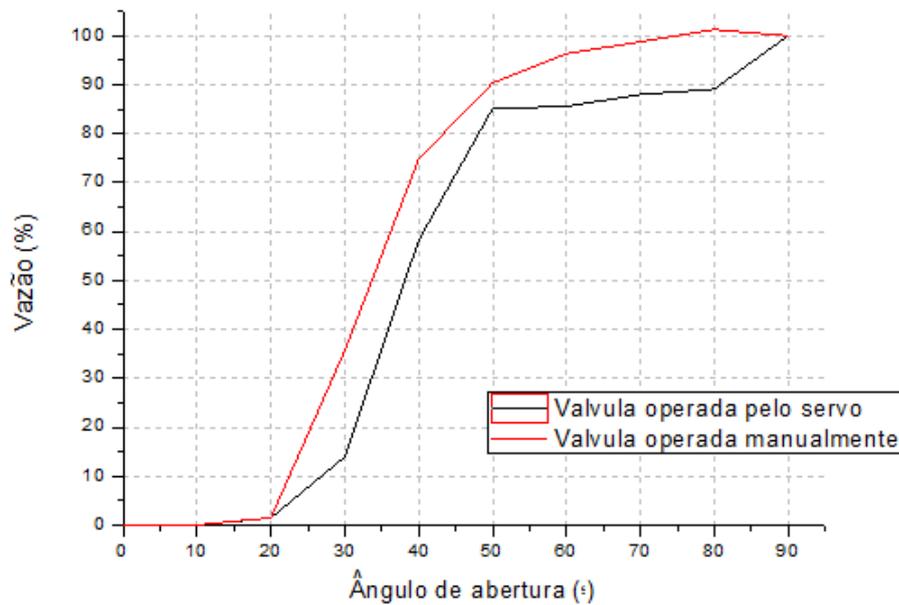


Figura 42 – Comparação das curvas características de vazão.

menores que a curva anterior, a nova curva característica de vazão apresenta um mesmo comportamento de curva de rápida abertura.

4.8 Teste de injeção de oxidante a frio

A figura 43 mostra o gráfico da vazão mássica de óxido nítrico em função do ângulo de abertura, dados obtidos em uma série de testes para validar a válvula de controle e implementar um controlador em tempo real da vazão de oxidante.

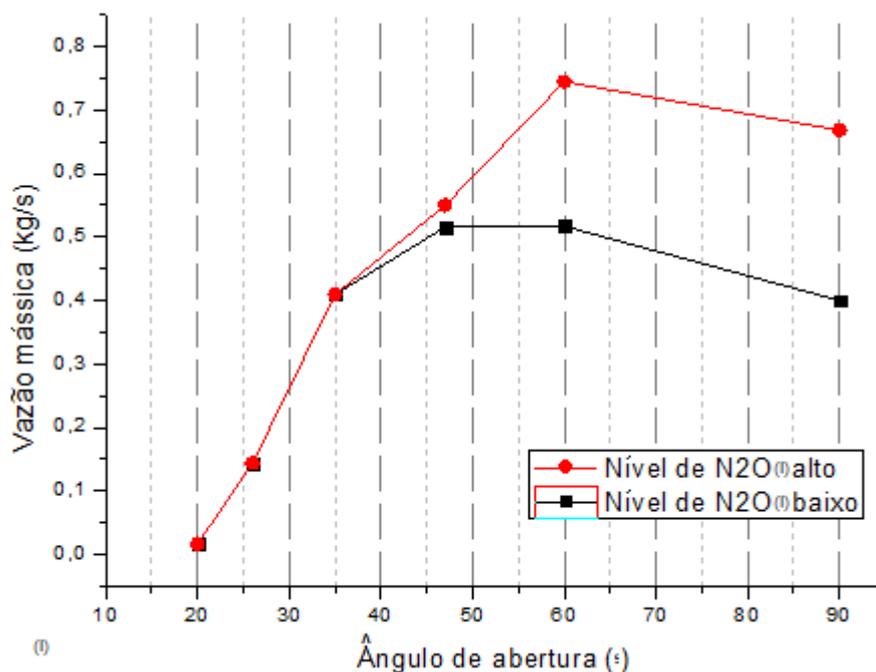


Figura 43 – Vazão mássica de óxido nitroso em função do ângulo de abertura.

Durante estes testes percebeu-se que pra um mesmo ângulo de abertura da válvula é possível obter-se diferentes vazões mássicas de óxido nitroso, dependendo do nível de líquido no tanque de N_2O . Assim, em uma situação em que o tanque encontra-se cheio de N_2O líquido tem-se uma vazão maior do que em um tanque com menor fase líquida, mas com a mesma pressão de vapor. Esse comportamento demonstra a complexidade da modelagem do escoamento de óxido nitroso, que além de depender da pressão no tanque e o ângulo de abertura da válvula, também depende do nível de líquido no tanque.

Nesta série de testes foi demonstrado o sucesso do design mecânico da válvula de controle, isto é, a capacidade do servo motor operar a válvula esfera pressurizada, confirmando os resultados obtidos nos testes anteriores.

4.9 Teste de injeção de oxidante a quente

O emprego da válvula de controle nos testes a quente de um motor de foguete híbrido foi a validação definitiva do projeto. Estes testes também tiveram a finalidade de validar a rotina de controle implementada para a válvula de controle. Neste teste específico a válvula de controle ajustava seu ângulo de abertura em tempo real para manter a pressão na câmara de combustão constante, contornando o efeito blowdown, como pode ser observado nas figuras 44 e 45.

Na figura 44 é possível observar os valores de pressão antes da válvula, depois da válvula e na câmara de combustão. Nota-se que apesar da pressão a montante da válvula

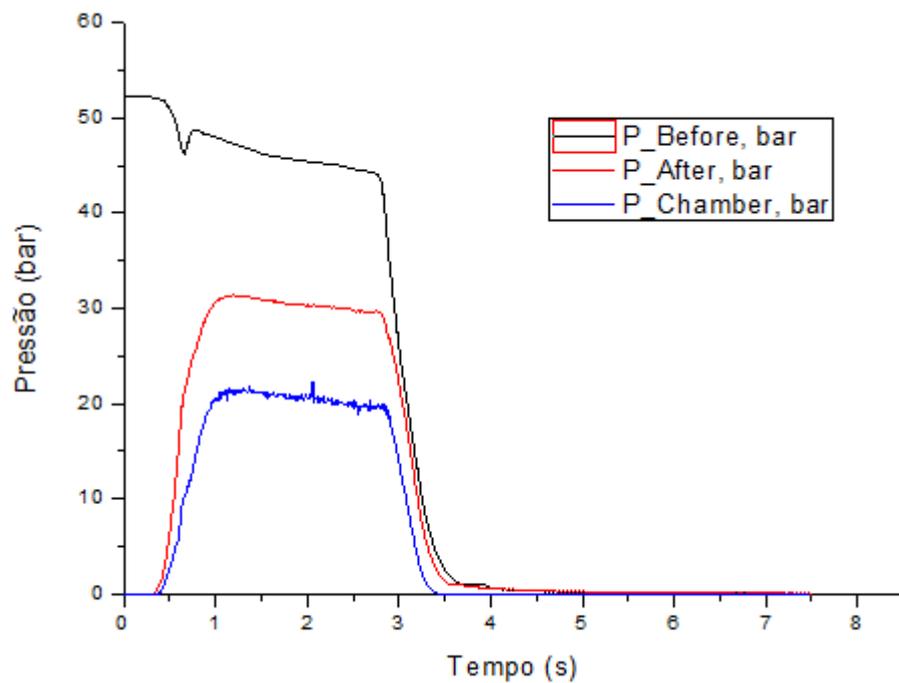


Figura 44 – Valores de pressão durante o teste estático.

estar diminuindo a medida que o tanque de óxido nitroso se esvazia (comportamento blow-down), a pressão a jusante da válvula continua aproximadamente constante, característica também observada na câmara de combustão, após a queda de pressão dos injetores.

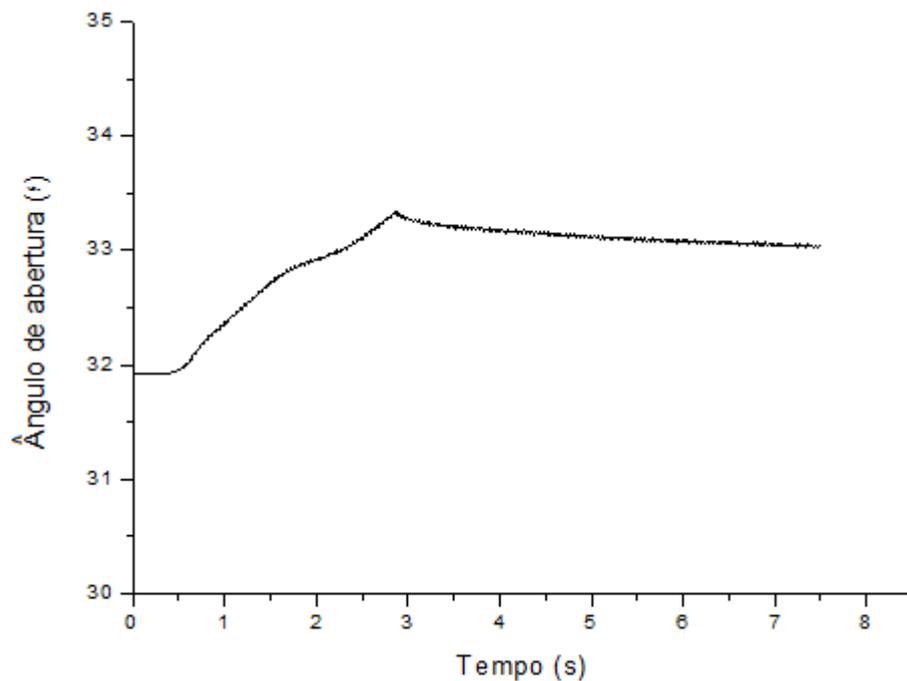


Figura 45 – Variação do ângulo de abertura ao longo do teste.

A figura 45 mostra a variação do ângulo de abertura da válvula ao longo do teste,

onde pode-se notar a abertura gradual da válvula para compensar a diminuição da pressão durante os 2,5 segundos de operação do motor de foguete híbrido. A vazão mássica média de oxidante obtida foi de 0,404 kg/s

Com esse teste foi possível validar a válvula de controle em sua aplicação final, que é o controle de vazão em um motor de foguete híbrido. Mais uma vez ela funcionou de forma satisfatória, com o servo motor operando a válvula esfera sem dificuldades e apresentando tempo resposta aceitável.

5 Conclusão

O desenvolvimento de uma válvula de controle de vazão de oxidante é peça chave para a operação confiável do motor de foguete híbrido e etapa necessária para sua aplicação em missões espaciais. As soluções utilizadas na indústria aeroespacial não encontram-se disponíveis no Brasil e a sua importação pode ser custosa e burocrática. Decidiu-se assim desenvolver uma válvula de controle de vazão com componentes encontrados no mercado.

Foi realizado um estudo de diversos tipos de válvulas e diversos tipos de atuadores para se entender melhor suas características de funcionamento e compreender suas aplicações e suas vantagens e desvantagens. Com esse conhecimento adquirido foi possível selecionar os componentes para a construção da válvula de controle. Observando a finalidade da válvula de controle pôde-se definir os seus requisitos necessários e, com os requisitos definidos, a válvula esfera e o servo motor se mostraram o melhor conjunto válvula-atuador encontrado no mercado.

Com o projeto mecânico pronto e seus componentes disponíveis foram realizados os testes de caracterização e de validação da válvula de controle. Os testes demonstraram que a válvula esfera requer cerca de 1,25 N.m de torque pra ser operada e o servo motor foi capaz de fornecer aproximadamente 2,9 N.m com tempo de resposta de aproximadamente 1,3 segundos, de maneira que o servo motor atende satisfatoriamente aos requisitos de torque da válvula esfera, capacidade demonstrada nos testes de validação a frio e a quente, onde foi possível observar valores de vazão mássica de óxido nitroso de até 0,745 kg/s. Estes testes também validaram o projeto mecânico e demonstraram a importância da válvula de controle no funcionamento de um motor de foguete híbrido. A válvula de controle encontra-se atualmente em processo de patenteação e existem outros projetos no CPL que visam aprimorar ainda mais o seu uso, como o controlador PID já citado.

Pode-se dizer que o objetivo do projeto foi alcançado, visto que a válvula de controle possui características técnicas similares às soluções disponíveis no mercado aeroespacial internacional, porém teve um custo de produção significativamente menor por ter sido desenvolvida com componentes encontrados no mercado.

Referências

- AEROJETROCKETDYNE. Rs-25 engine. 2019. Disponível em: <<https://www.rocket.com/rs-25-engine>>. Citado na página 17.
- AIRLIQUIDE. Ficha de informações de segurança de produtos químicos - Óxido nitroso. 2019. Disponível em: <https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry_br/files/sds/2019/05/07/23003_oxido_nitroso_liquido_refrigerado10024-97-2.pdf>. Citado na página 43.
- ANDRIANOV, A. et al. Concept and design of the hybrid test-motor for development of a propulsive decelerator of sara reentry capsule. In: *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Orlando, FL: AIAA, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.
- ASHRAE. *Heating, Ventilating, and Air-Conditioning: Systems and Equipment (SI Edition)*. [S.l.]: American Society of Heating and Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 7, 28 e 29.
- BARTELS, M. The amazing triple rocket landing of spacex's falcon heavy launch of arabsat-6a. 2019. Disponível em: <<https://www.space.com/spacex-falcon-heavy-arabsat-6a-launch-landings-photos.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 16.
- BAUMANN, H. D. *Control valve primer: a user's guide*. [S.l.]: ISA, 2008. Citado na página 27.
- BEATER, P. *Pneumatic drives: System Design, Modelling and Control*. [S.l.]: Springer, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 21.
- COSTA, M. L. de O. Estudo do torque de acionamento e vida útil de um projeto de válvulas industriais. In: *Programa de pós-graduação em engenharia de produção*. Porto Alegre, RS: UFRG, 2009. Citado na página 49.
- DESAIN, J. D. Green propulsion: trends and perspectives. 2011. Disponível em: <<http://www.aerospace.org/crosslinkmag/summer2011/green-propulsion-trends-and-perspectives/>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.
- DOMINGOS, C. H. F. L. Estudo sobre o aumento da eficiência de combustão de um motor foguete híbrido utilizando parafina como combustível. In: *Monografia de graduação*. Brasília, DF: UnB, 2019. Citado na página 42.
- DRVALVE. Diaphragm valve. 2019. Disponível em: <http://dr-valves.com/eng/bbs/content.php?co_id=pro9>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 26.
- DUDADIESEL. 2-piece industrial strength ball valve. 2019. Disponível em: <https://www.dudadiesel.com/choose_item.php?id=2PCBV1-F037>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 22.
- FABIO, E.; FASSITELLI, L. *Roma: tubi e valvole*. [S.l.]: Milan: Petrolieri d'Italia, 1990. Citado na página 21.

GONZALEZ, C. What's the difference between pneumatic, hydraulic, and electrical actuators? 2015. Disponível em: <<http://www.machinedesign.com/linear-motion/what-s-difference-between-pneumatic-hydraulic-and-electrical-actuators>>. Citado na página 31.

HITEC. Hs-1005sgt industrial grade, giant scale servo. 2018. Disponível em: <<http://hitecrd.com/products/servos/giant-servos/digital-giant-servos/hs-1005sgt-industrial-grade-giant-scale-servo/product>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 39.

HITEC. D950tw 32-bit, ultra torque, titanium gear servo. 2019. Disponível em: <<https://hitecrd.com/products/servos/ultra-premium-digital-servos/d-950tw/product>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 40 e 54.

ITORK. Pneumatic actuator. 2019. Disponível em: <<http://www.susinitork.in/pdf/pneumaticactuatorcatalogue.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 31.

LONGTSUEN. Electric valve actuator. 2019. Disponível em: <https://www.alibaba.com/product-detail/UM2-1-direct-mount-series-Taiwan_219811798.html>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.

NASA. *Liquid Rocket Valve Assemblies*. 1973. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 27.

NIST. Propriedades termofísicas de sistemas fluidos. 2019. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>>. Citado na página 34.

SAMPAIO, P. S. *Coeficiente de vazão - CV*. [S.l.]: DHM Automação, 2019. Citado na página 27.

SERVOCITY. Cm-d950tw-180 servo gearbox. 2019. Disponível em: <<https://www.servocity.com/cm-d950tw-180-servo-gearbox>>. Citado 4 vezes nas páginas 7, 9, 39 e 40.

SHYINKARENKO, O. Desenvolvimento e teste da válvula de controle digital para sistema de alimentação do motor de foguete híbrido. 2019. Disponível em: <<http://fga.unb.br/cpl/desenvolvimento-e-teste-da-valvula-de-controle-digital-para-sistema-de-alimentacao-do-motor-de-fo>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 41.

SILVA, E. C. N. *Apostila de pneumática*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 30.

SMAR. Atuadores elétricos. 2001. Citado na página 29.

SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. *Rocket propulsion elements*. 7th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 7, 16 e 18.

SWAGELOK. Stainless steel 3-piece 60 series ball valve, reinforced ptfe seats, 1/2 in. fnpt. 2019. Disponível em: <<https://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-63TF8>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 38.

TECO. Industrial plug valves. 2019. Disponível em: <<https://blog.teco-inc.com/2018/02/industrial-plug-valves.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 24.

TORKFORT. Torquímetro de relógio 20 n.m. 2019. Disponível em: <https://www.torkfort.com.br/torquimetro_relogio_trna20pa>. Citado na página 43.

VALTORC. Difference between a double and triple offset butterfly valve. 2019. Disponível em: <<http://www.valtorc.com/valve-news/difference-between-a-double-and-triple-offset-butterfly-valve>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 23.

WICVALVE. 1-1/2"inch high pressure brass electric solenoid steam valve. 2019. Disponível em: <<https://www.wicvalve.com/1-1-2-Inch-High-Pressure-Brass-Electric-Solenoid-Steam-Valve-2BCL-1-1-2-D.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 33.

WIKILIVROS. *Mecânica dos fluidos/Válvulas de controle* — Wikilivros, Livros abertos por um mundo aberto. 2017. [Online; accessed 26-maio-2018]. Disponível em: <https://pt.wikibooks.org/w/index.php?title=Mec%C3%A2nica_dos_fluidos/V%C3%A1lvulas_de_controle&oldid=443976>. Citado na página 28.

WILLIAMSVALVE. Cast steel marine flanged globe valves 150lb aluminum bronze trim. 2019. Disponível em: <<http://www.williamsvalve.com/marine-globe-valve-cast-steel.asp>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 25.