



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

EDITAL 02/2017 - PDPD

**Desenvolvimento e construção de sistema de ejeção de foguetes
experimentais utilizando gases frios**

Autor: Matheus Augusto Pinto (RA 11201721392)

Orientadora: Thais Maia Araújo

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

Santo André, 2018

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de ejeção de paraquedas para foguetes de alta potência, utilizando o dióxido de carbono, contido em cartuchos, como gás de trabalho. Baseando-se no conceito do não uso de elementos pirotécnicos, dois sistemas de pressurização, utilizando cilindros de gás sem e com rosca, foram inteiramente projetados, construídos e testados. A concepção do sistema final é constituída por uma estrutura de integração feita em ABS por impressão 3D, por uma válvula eletronicamente atuada e controlada por Arduino e por um sistema de pressurização principal adaptável para cartuchos de CO₂. Testes para a ejeção de paraquedas foram conduzidos em câmaras de 4" e 6" de diâmetros e, ambos os sistemas projetados, apresentaram resultados acima do esperado. Dessa forma, conclui-se ser possível a utilização desses sistemas para acionar os eventos de recuperação em foguetes modelo.

Palavras-chaves: sistemas de recuperação, ejeção não pirotécnica, foguetes alta potência

1. Introdução

Ao redor do mundo existem pessoas que se dedicam a construir foguetes modelo ou mesmo foguetes de alta potência [1] como recreação ou para competições, como é o caso de muitas organizações universitárias, por exemplo. Nesse sentido, um grupo de alunos da UFABC-Universidade Federal do ABC fundou a UFABC Rocket Design [2] na passagem de 2009/2010, a qual é uma equipe de foguetemodelismo vinculada ao GPDA-Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento Aeroespacial da universidade. Inicialmente o intuito era de construir motores-foguete e outros componentes aeroespaciais de forma a tornar prático o conhecimento teórico desenvolvido na base curricular dos bacharelados interdisciplinares (BI) e cursos de formação específica da universidade, como a Engenharia Aeroespacial. Ao longo do desenvolvimento dos projetos, se percebeu uma possibilidade e necessidade da criação de novas soluções para os desafios encontrados no processo de construção de um foguete de competição. Desta forma, criou-se o Núcleo de Pesquisa da equipe, ao qual este trabalho está vinculado. Assim, o tema desta pesquisa tem como origem problemas reais que surgiram da prática do foguetemodelismo relacionada à arte de recuperar foguetes.

Enfaticamente, esta pesquisa tem como âmbito os sistemas de recuperação de foguetes. Estes são definidos pela *National Association of Rocketry*-NAR [3] como dispositivos que alteram a configuração física e reduzem a taxa de descida vertical do foguete quando acionados e que, assim, permitam recuperá-lo com segurança. Além disso, a eficiência desses sistemas são fatores mandatários para a certificação de um foguete de alta potência [3]. Nesse âmbito, existem diversas possibilidades para o dispositivo que irá aumentar o arrasto aerodinâmico e também para o mecanismo que irá ejetá-lo da fuselagem do modelo. Em relação ao primeiro tem como representante mais comum os paraquedas. Ainda, são utilizados também *gliders* em diversas configurações, flâmulas entre outros [4]. Adicionalmente,

associado aos mecanismos de ejeção os dispositivos mais comuns são as molas, pirotécnicos como a pólvora negra ou similar e a ejeção utilizando o dióxido de carbono submetido à alta pressão contido em cartuchos metálicos. Afinal, a combinação de um paraquedas, cordas e o sistema ejedor é um exemplo da configuração de uma seção de recuperação de um foguete.

Nessa direção, o atual sistema de ejeção utilizado pela UFABC *Rocket Design* igniza e utiliza a expansão dos gases provenientes da combustão da pólvora para liberar os componentes necessários para recuperar o foguete. Entretanto, esse método apresenta algumas desvantagens, que consistem no risco inerente no manuseio de pólvora, possibilidade de queimar o tecido e as cordas do paraquedas já que os gases liberados são quentes e também as diferentes variações na composição química que fazem que seja necessário realizar testes adicionais quando em competições em outros países, por exemplo. Além disso, a pólvora é bastante energética e, assim, pequenos incrementos ou decrementos na massa de explosivo utilizado podem tanto explodir a estrutura quanto não ejeter o paraquedas como requisitado. Logo, foi proposto ao Núcleo de Pesquisa da equipe buscar uma alternativa que solucionasse os problemas encontrados no desenvolvimento dos projetos, a qual se materializou nesse estudo e na construção de um sistema de ejeção livre de pirotécnicos.

Dessa forma, com enfoque em sistemas de ejeção de paraquedas para foguetes de alta potência, este projeto de pesquisa tem como objetivo desenvolver, construir e testar um dispositivo que utilize o CO₂ comprimido em cartuchos metálicos para realizar trabalho e ejeter para fora da fuselagem do foguete o paraquedas e cordas e, assim, proporcionar um evento de recuperação seguro.

O sistema de ejeção com CO₂ utiliza o mesmo princípio dos sistemas pirotécnicos: a expansão dos gases para ejeter o paraquedas. Entretanto, neste caso o trabalho obtido vem do gás pressurizado e liquefeito em ampolas/cilindros que contêm de 8g a 44g de CO₂, em geral, e são utilizados em armas *Airsoft*, fabricação de bebidas gaseificadas, para inflar coletes

salva-vidas entre outras aplicações. Assim, as vantagens de se utilizar o CO₂ residem no fato de que os cilindros são de livre comercialização e padronizados globalmente, entretanto não podem ser transportados em aviões, ser um sistema livre de resíduos e que não oferece perigo ao paraquedas, visto que os gases não são quentes, ao contrário dos pirotécnicos. Além disso, não existem limitações de altitude para o funcionamento.

2. Sistemas de recuperação para foguetes de alta potência

Os foguetes de alta potência são assim denominados de acordo com uma classificação de impulso total da Associação Nacional de Proteção Contra Incêndios (do inglês, NFPA - *National Fire Protection Association*) [5]. Existem diversas formas de produzir foguetes nessa classe como, por exemplo, utilizando motores com propelentes sólidos, líquidos ou híbridos. Entretanto, em geral, os veículos nessa rotulação podem ser segmentados como exemplificado na Figura 1, em que os componentes fundamentais são o motor, empenas, fuselagem, coifa, eletrônica e sistema de recuperação que está alocado dentro da estrutura do foguete.

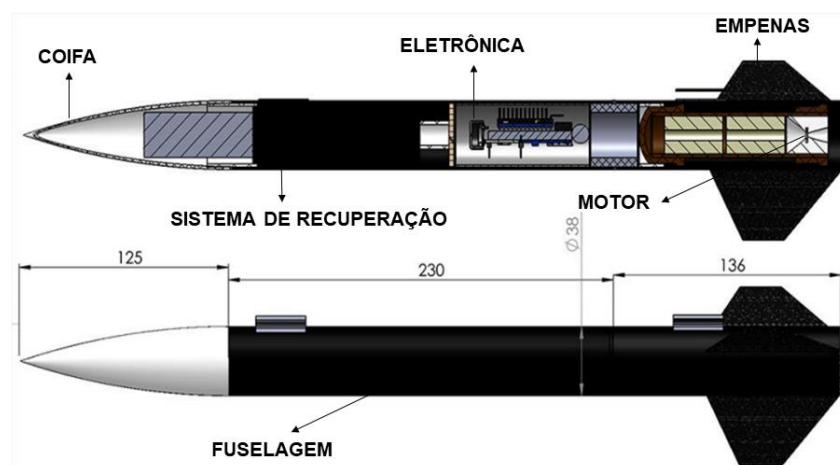


Figura 1 : Foguete de alta potência e suas subdivisões.

A função principal deste último sistema é retornar o foguete ao solo de forma a possibilitar tanto a análise dos dados armazenados na eletrônica, a integridade da estrutura após o lançamento como também prevenir o projeto de percorrer uma trajetória balística. Esta característica é ao máximo evitada em competições estudantis de foguetes por ser um critério de julgamento, assim como pelo fato de representar um risco à segurança das pessoas que possam estar no entorno do lançamento. Entretanto, a fim de esclarecimento, recuperar o foguete não é, necessariamente, sinônimo de retorná-lo ao local de lançamento, mas sim fazer com que este chegue ao solo em uma velocidade a qual minimize quaisquer danos estruturais.

Dessa forma, o principal meio de recuperação de foguetes de alta potência é por meio da utilização de paraquedas. Ainda, é possível utilizar um ou dois paraquedas e, assim, ter um único evento de ejeção do(s) paraquedas ou dois eventos.

Na ejeção única, no momento em que é detectado o apogeu pela eletrônica do foguete por meio de um barômetro, por exemplo, um sinal elétrico é enviado para o sistema de recuperação para que seja realizada a ejeção do paraquedas. Nesse sentido, o mecanismo que irá propiciar o evento pode ser baseado em pirotécnicos, em molas, dióxido de carbono pressurizado entre outros. Assim, considerando um mecanismo pirotécnico, a sequência de voo de um foguete, esquematizada na Figura 2, é dada pelo lançamento, o período de subida, a chegada ao apogeu, ou seja, ponto mais alto da trajetória, e ignição da carga pirotécnica disposta dentro da câmara de recuperação, a abertura do paraquedas, diminuição da razão de descida e posterior pouso no solo, finalizando o voo.

Ao contrário, na ejeção em dois eventos temos a liberação de dois paraquedas que geralmente estão armazenados em dois compartimentos: um entre a coifa e a eletrônica, e outro entre a eletrônica e o motor. Porém, a liberação de cada um ocorre em momentos distintos os quais são pré-programados no plano de voo do foguete e executados pela aviônica

a partir de dados de altura com relação ao solo ou mesmo diferenças de tempo entre as ejeções.

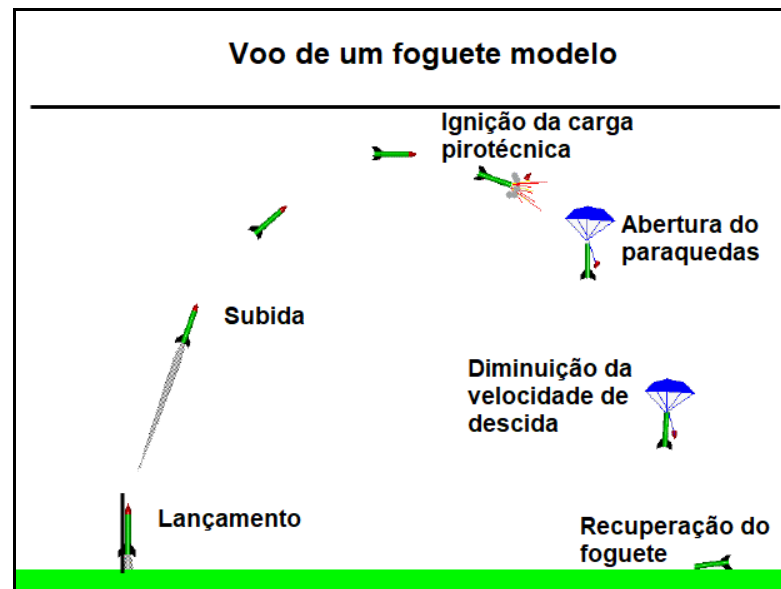


Figura 2: Voo de um foguete hipotético.

Desta forma, em relação à liberação do paraquedas, a UFABC *Rocket Design*, até o momento, utiliza a pólvora como componente principal do sistema de recuperação nos projetos representado na Figura 3. Quando ignizada por um fósforo eletrônico, que está fixado dentro do cilindro com pólvora, esta libera os gases da combustão que se expandem rapidamente, realizando trabalho e, conseqüentemente, ejetando o paraquedas para fora da fuselagem do foguete.

Além disso, o sistema de recuperação é composto também pelas cordas de sustentação, cordas de choque, *quick-links*, destorcedores, parafuso em U para a conexão ao foguete e tecido antichamas. Porém, a utilização do mecanismo pirotécnico está relacionada a diversas desvantagens e que conduziram o Departamento de Recuperação da equipe a interagir com o Núcleo de Pesquisa e propor a busca de alternativas que solucionassem os problemas mencionados.

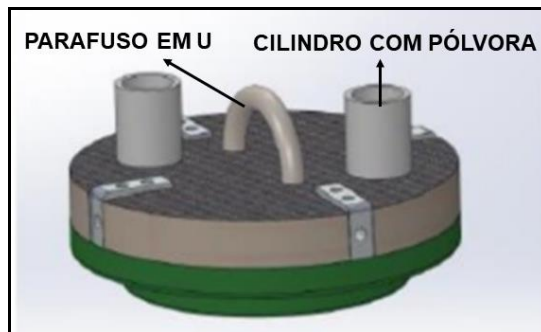


Figura 3: Sistema de ejeção pirotécnico similar ao utilizado pela UFABC Rocket Design.

Nesse viés, os principais empecilhos relacionados ao uso da pólvora como componente fundamental do sistema de recuperação são: alta periculosidade no manuseio já que é um explosivo; uso restrito pelo Exército, no Brasil, e por governos ao redor do mundo dificultando a compra; como esta pesquisa está inserida no escopo de uma equipe de foguetemodelismo participante de competições nacionais e internacionais, as diferentes variações nas composições da pólvora em países como EUA fazem com que seja necessário realizar novos testes no local da prova. Porém, pelo fato da pólvora ser demasiadamente energética esta não é uma prática ideal, pois pequenos acréscimos em relação à quantidade ideal podem ocasionar a destruição da fuselagem do foguete, queima do paraquedas e, assim, tornando os testes *in loco* um risco a ser evitado. Além disso, sistemas com pólvora deixam resíduos de enxofre, carvão, resíduos de pólvora etc. na câmara do paraquedas, havendo necessidade de limpeza para reutilização.

Assim, frente às desvantagens do sistema pirotécnico, propõe-se estudar e construir um sistema que utilize o CO₂, pressurizado em cartuchos metálicos, como gás de trabalho para ejetar o paraquedas em foguetes de alta potência. Porém, esta ideia não é inédita já que algumas equipes de desenvolvimento de foguetes ao redor do mundo utilizam esse sistema.

Além do mais existem sistemas de ejeção de paraquedas utilizando dióxido de carbono sob alta pressão disponíveis no mercado americano, por exemplo.

Consequentemente, como feito no processo de pesquisa e desenvolvimento em grandes empresas, inicialmente é fundamental analisar as soluções existentes no mercado para o problema a ser resolvido. Logo, para a ejeção de paraquedas em foguetes de alta potência as duas principais estratégias comercializadas são representadas pelos sistemas conhecidos por *Peregrine Raptor CO₂* [5] e pelo *Hawk CO₂ Release* [6]. O funcionamento básico de ambos os sistemas é relatado, assim com vantagens, desvantagens e principais características, enfatizando quais serviram de base para o desenvolvimento do protótipo desta iniciação científica. O detalhamento do funcionamento desses dois sistemas tem a intenção mostrar os diferentes mecanismos de sistemas de recuperação que utilizam CO₂ como fluido, pois equipes como a UFABC Rocket Design, têm como objetivos criarem os próprios sistemas, uma vez que visam inovação, originalidade e criatividade nos projetos dos foguetes que desenvolvem.

2.1 Peregrine Raptor CO₂

O sistema *Peregrine Raptor CO₂* é produzido pela empresa americana *Tinder Rocketry* e se aplica à ejeção de paraquedas em foguetes e drones. Contém uma carga pirotécnica que quando ignizada por um fósforo eletrônico aciona um pistão com um pino perfurante contra o selo do cartucho de CO₂, rompendo-o e liberando o dióxido de carbono para a câmara de ejeção do paraquedas, conforme pode ser observado no esquema apresentado na Figura 4. A visualização do produto real pode ser encontrada na Figura 5.



Figura 4: Esquema de funcionamento do Peregrine Raptor



Figura 5: Foto do sistema de ejeção paraquedas Peregrine Raptor

As principais características de design que foram observadas são a utilização do alumínio na usinagem dos componentes do sistema e a simplicidade no acionamento, bastante similar a um sistema puramente pirotécnico como o ilustrado na Figura 3. Porém, tem como desvantagem o uso ainda de pirotécnicos, pois utiliza a pólvora, ou similar, para propiciar a abertura do cartucho de gás.

2.2 Hawk CO₂ Release

possam utilizar esse tipo de tecnologia em seus foguetes, é mais viável ao invés de utilizando peças disponíveis no mercado nacional, adquirir o sistema completo por exemplo. Assim, se procedeu o desenvolvimento de um sistema alternativo e que fosse confiável e seguro: o Cygnus II T e NT.

Ao contrário do *Peregrine Raptor CO₂*, o *Hawk CO₂ Release* é completamente livre de pirotécnicos, é produzido pela empresa americana *Fruity Chutes* e também se aplica para a ejeção de paraquedas em foguetes e drones. Nesse sistema, que pode ser verificado na Figura 6, a abertura do cartucho de CO₂ é feita por meio de um pino perfurante acoplado a um pistão que se encontra dentro do corpo da válvula, similar ao funcionamento do *Peregrine Raptor*. O pino é propelido por uma mola que, inicialmente, estava comprimida dentro do corpo e, no momento da ejeção, é liberada para se expandir por um servo motor controlado pela eletrônica do foguete ou drone. Consequentemente, é um sistema puramente mecânico e livre de pirotécnicos, sendo esta última a principal característica de projeto que serviu de base para o desenvolvimento do presente trabalho.

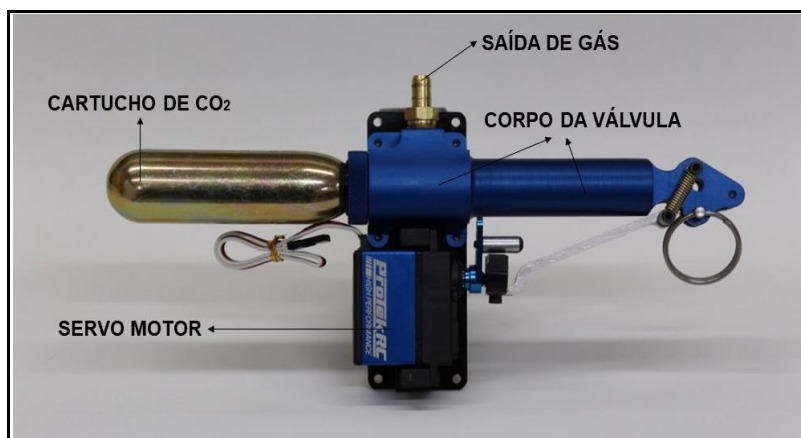


Figura 6: Ilustração do Hawk CO₂ Release.

Importante mencionar que uma afinidade de projeto entre um sistema pirotécnico e um que utiliza CO₂ pressurizado, no caso o *Peregrine Raptor* e o *Hawk*, todos sofrem a pressurização apenas no momento do evento de recuperação. Por outro lado, existem mais diferenças do que afinidades, portanto um comparativo das principais características entre sistema pirotécnico e o *Hawk CO₂ Release*, totalmente não pirotécnico, é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparativo entre o sistema de ejeção pirotécnico e o Hawk CO₂

CARACTERÍSTICAS	SISTEMA PIROTÉCNICO	SISTEMA CO ₂ (HAWK)
Risco de queima do paraquedas, cordas etc.	SIM	NÃO
Contém explosivos	SIM	NÃO
Momento da ejeção coincide com a pressurização do sistema	SIM	SIM
Refis são restritos/controlados	SIM	NÃO
Livre de resíduos na câmara do paraquedas	NÃO	SIM

3. Desenvolvimento do sistema de pressurização

Após uma extensa pesquisa bibliográfica e análises do sistema pirotécnico utilizado na UFABC *Rocket Design*, dos produtos *Peregrine Raptor CO₂* e *Hawk CO₂ Release* e de outras aplicações dos cartuchos de dióxido de carbono, foram projetados, construídos e testados três protótipos de sistema de recuperação de paraquedas inteiramente não pirotécnico, denominados: a) Cygnus I-NT (CI-NT), b) Cygnus II-NT (CII-NT) e c) Cygnus II-T (CII-T).

O primeiro modelo construído funcionou conforme as expectativas de projeto, mas com as dificuldades que se apresentaram, concluiu-se que o projeto podia ser melhorado, principalmente nos tópicos de obtenção, fabricação e fixação de peças, levando-se em conta diminuição de massa e volume das peças. Com o aprendizado e a experiência adquirida foi possível corrigir e aprimorar o projeto, resultando no Cygnus II-NT, que difere do CII-T apenas porque utiliza cartuchos de CO₂ sem rosca.

A configuração completa do sistema de ejeção de paraquedas Cygnus II-T é apresentada na Figura 7. O sistema completo é composto por três subsistemas principais: estrutura de integração feita em ABS por impressão 3D; válvula eletronicamente atuada e

controlada por Arduino e sistema de pressurização adaptável para cartuchos de CO₂ com rosca de diversos tamanhos.

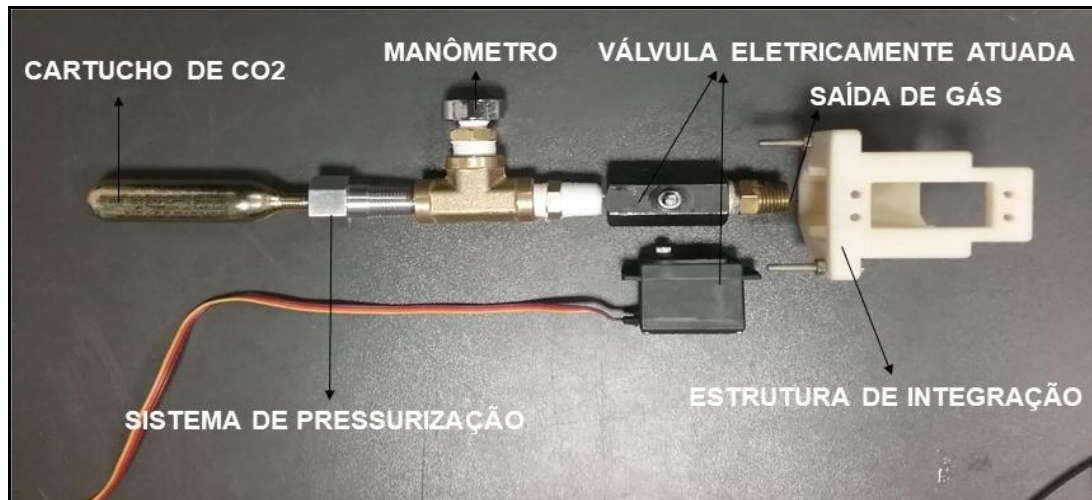


Figura 7: Configuração do sistema de recuperação Cygnus II-T.

3.1 Válvula eletricamente atuada

Tanto o *Peregrine Raptor* CO₂ quanto o *Hawk* CO₂ pressurizam o sistema no momento em que é requisitada a ejeção do paraquedas. Entretanto, nas duas versões do Cygnus II o conjunto de pressurização rompe o lacre do cilindro de gás no momento em que é feita a montagem pré-voo de todo o aparato no foguete de alta potência. Portanto, é necessário a presença de um mecanismo que mantenha o gás contido e que seja capaz de liberá-lo para a câmara do paraquedas quando preciso. Isso foi projetado para ser feito por meio de uma válvula eletricamente atuada composta por uma válvula esfera, um servo motor e um sistema de controle feito com Arduino. Desta forma, foi possível alcançar o objetivo de construir um sistema livre de pirotécnicos pelo fato de não ser necessário abrir o cilindro com explosivos, como no *Peregrine Raptor* CO₂.

3.1.1 Válvula esfera

O CO₂ dentro dos cartuchos se encontram em uma fase líquida e outra gasosa. Por conseguinte, enquanto a fase líquida existir a pressão interna é determinada somente pela temperatura já que é igual à pressão de vapor do gás. Esta é a pressão exercida por um vapor quando este está em equilíbrio termodinâmico com o líquido que lhe deu origem. Desta forma, para o CO₂ a 25°C a pressão de vapor é 928 psi e a 31°C é 1065,35 psi [8]. Consequentemente, este deve ser o intervalo mínimo que deve conter a especificação de pressão nominal da válvula para que seja garantida a vedação e confiabilidade do sistema de ejeção de paraquedas.

Nesse viés, foi escolhida uma válvula esfera, que recebe esse nome, porque tem obturador na forma esférica vazada, onde o fluido passa quando está aberta e alinhada à tubulação. Quando fechada, seu furo fica perpendicular ao sentido do fluxo, bloqueando a passagem. Outras vantagens ao se utilizar esse tipo de válvula residem na agilidade de abertura e bloqueio, ótima estanqueidade, mesmo em alta pressão, e tamanho e peso reduzidos [9]. Assim, a opção escolhida foi a de uma válvula esfera 2 vias 3/8" FNPT X 3/8" FNPT com corpo em aço carbono ASTM A-105, interior em aço inox 316 e vedação em Politetrafluoretileno (PTFE), conhecido mundialmente pelo nome comercial de Teflon. Na Tabela 2 são apresentadas as principais condições operacionais fornecidas pelo fabricante.

Além disso, é necessário variar os estados da passagem de gás entre completamente fechado e completamente aberto para ocorrer o evento de recuperação do foguete, que significa uma variação de 90° na posição da alavanca de abertura da válvula, e que é feito por um servo motor instalado no Cygnus II-NT e T.

Tabela 2: Condições operacionais da válvula esfera utilizada nos Cygnus II.

Faixa de Temperatura	-20°C a 190°C
Pressão máxima de trabalho(nominal)	2000psi
Meio de funcionamento	Água, gás, óleo, ácido etc
Inspeção e teste	API 598
Rosca	ANSI B1.20.1, BS 21/2779, DIN 259/2999, ISO 228-1

3.1.2 Servo motor

O componente eletromecânico utilizado para abrir a válvula esfera é o servo motor. Este tem como característica variar 90° para cada direção, horário e anti-horário, totalizando 180° de variação angular, além de possuir um sensor de resposta que indica a posição. Ainda, para atender as exigências deste projeto, o servo motor deve ter torque suficiente para movimentar a alavanca da válvula entre os estados necessários.

Ademais, como a plataforma de desenvolvimento do Departamento de Eletrônica da UFABC *Rocket Design* é baseada em Arduino, foi escolhido um servo motor comumente utilizado em projetos de robótica, que é o MG996R, cujo desenho esquemático é apresentado na Figura 8. As especificações de operação deste servo motor, fornecidas pelo fabricante, a empresa Tower Pro, são mostradas na Tabela 3 [10] .

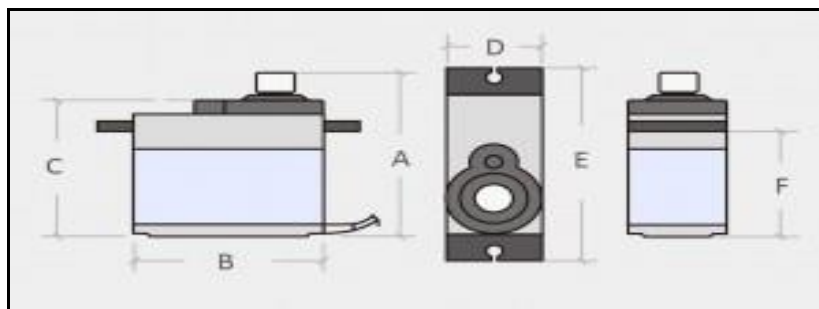


Figura 8: Servo motor MG996R da Tower Pro.

Tabela 3: Especificações do servo motor MG996R

Peso	55g
Torque(@4.8V)	9,4kg/cm
Velocidade	0,17s/60°
A	42,7mm
B	40,9mm
C	37mm
D	20mm
E	54mm
F	26,8mm
Engrenagens	Metal

O servo motor MG996R possui três fios de cores diferentes, amarelo, vermelho e marrom, cujas funções devem ser conhecidas para adequada instalação.

- Fio amarelo: recebe o sinal de controle do tipo PWM (largura de pulso modulada, do inglês Pulse Width Modulation), que é um tipo de sinal digital com modulação por largura de pulso. Pois, em algumas portas digitais do Arduino UNO R3 é possível ter como saída este tipo de sinal para controle do servo motor.
- Fio vermelho: recebe alimentação elétrica de 4.8V até 6.6V fornecida pela própria placa de controle ou uma fonte externa.
- Fio marrom: é a referência para Terra (GND).

Para a transferência de torque entre o eixo do servo motor e o da válvula, foi necessário adaptar uma peça para fazer a conexão entre os eixos. A solução encontrada é

ilustrada na Figura 9. Produzir esta conexão foi um dos maiores desafios na construção do Cygnus I-NT, pois a alavanca original não pode ser utilizada, por causa das restrições de espaço na fuselagem do foguete utilizado como modelo de testes.

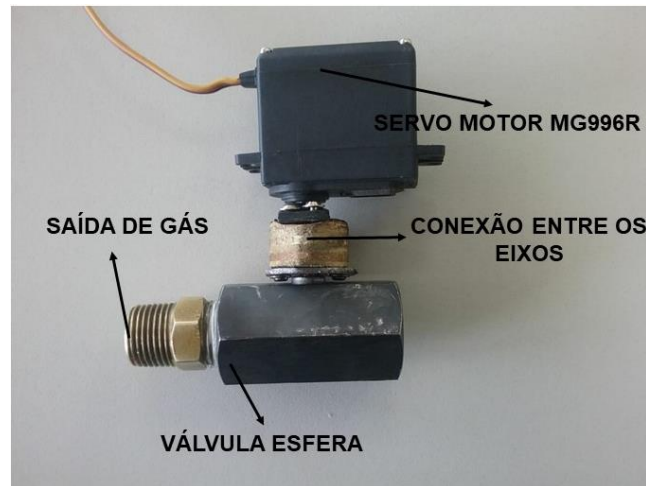


Figura 9: Conexão entre a válvula esfera e o servo motor

3.1.3 Sistema de Controle

A UFABC *Rocket Design* utiliza na maioria dos foguetes de alta potência um sistema de controle e aquisição de dados de voo baseado na plataforma Arduino. Portanto, optou-se por usar o Arduino UNO R3 como controlador do servo motor.

Entretanto, no código escrito não é feita nenhuma referência a parâmetros relacionados aos momentos em que o paraquedas deveria ser ejetado em um foguete. Assim, o modelo de testes foi simplificado, dispensando os sensores de atitude, por exemplo, altímetro, barômetro, giroscópio, acelerômetro e etc., que fazem parte da aviônica embarcada e o código resultante é apresentado na Figura 10. Com o servo motor na posição zero graus e a válvula esfera na posição fechada, se conectam os seus eixos. Ainda, no código se inicia a posição do servo em zero graus para que durante o voo do foguete seja garantida a manutenção desta, mesmo que alguma vibração tenda a modificá-la. Em sequência, quando requisitada a abertura da válvula

no momento da ejeção do paraquedas, o servo irá movimentar em 90 graus o eixo da válvula esfera, abrindo-a completamente. Nesse sentido, esquematicamente na Figura 11, se tem as ligações de uma fonte de alimentação externa fornecendo 6V e a ligação entre o fio amarelo de controle do servo na porta digital 10 com saída PWM e a junção entre os fios terra tanto da bateria quanto na placa do Arduino UNO R3. Além disso, é necessário conectar o computador/notebook utilizando a porta USB do Arduino para que este receba o código e o execute. Consequentemente, esta foi a montagem utilizada durante os testes em solo realizados para a validação tanto do Cygnus I-NT quanto do Cygnus II-NT e T e que finaliza a descrição de funcionamento da válvula eletricamente atuada.

```
programa_servo$
#include <Servo.h>
Servo myservo;
int angServo, i;
String servo="";
void setup() {
  myservo.attach(10);
  Serial.begin(9600);
  angServo=0;
  myservo.write(0); //REFERENTE À VÁLVULA NA POSIÇÃO COMPLETAMENTE FECHADA
  i=15;
}
void loop() {
  Serial.println("Deseja ejetar o paraquedas? SIM/NAO");
  delay(1000);
  servo= Serial.readString();
  if(servo=="SIM"){
    Serial.println("Abertura programada!");
    angServo=90;
    //CONTAGEM REGRESSIVA DE 15 SEGUNDOS-PADRÃO DE TESTE
    for(i;i>0;i--){
      Serial.print(i);
      delay(1000);}
    myservo.write(angServo); //GIRA O EIXO DA VÁLVULA DE 90 GRAUS, ABRINDO-A
    delay(10000);
  }
}
```

Figura 10: Código de controle da válvula eletricamente atuada feito no console Arduino

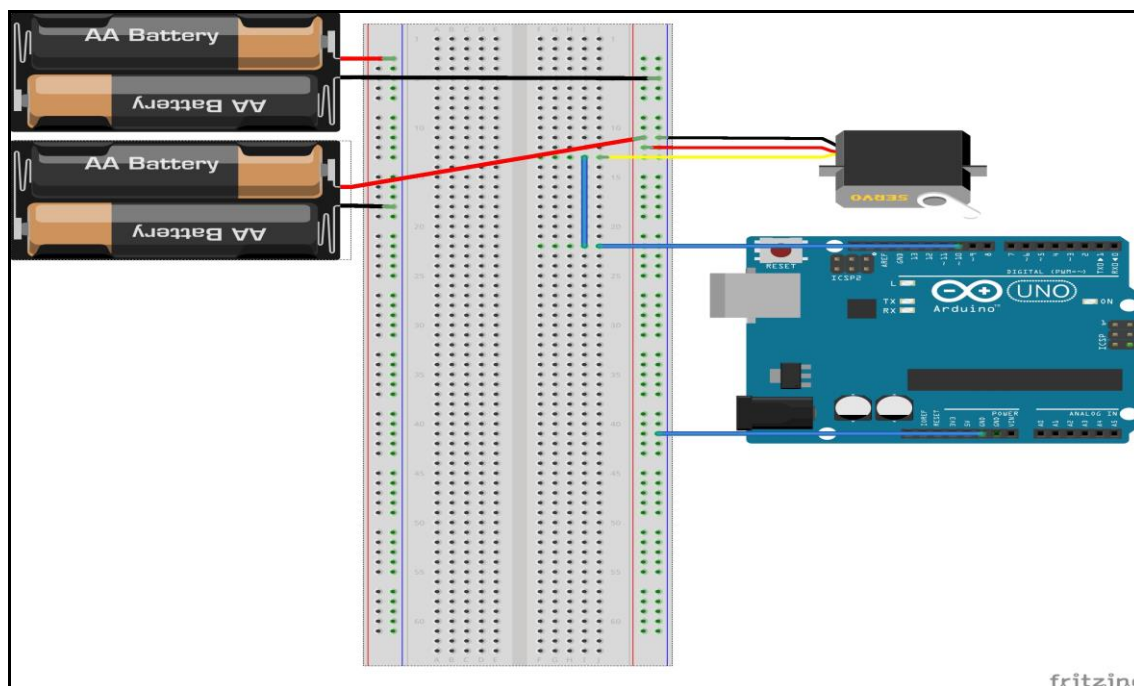


Figura 11: Diagrama das conexões entre o Arduino UNO R3, o servo moto e a fonte de alimentação externa.

3.2 Sistema de pressurização

O sistema de pressurização tem como função abrir o cartucho de CO₂ e, para os modelos CII-NT e CII-T, duas versões diferentes foram concebidas, uma em que utiliza-se cartuchos sem rosca e outra com cartuchos com rosca, respectivamente. Os dois sistemas têm em comum o pino perfurante indicado na Figura 12, que tem como função romper o selo do cilindro de gás. Denominado de parafuso-agulha, foi feito utilizando um parafuso de aço Allen M6 com um furo central passante, que foi realizado por uma broca de aço rápido de 1mm. Além disso, a extremidade da rosca foi desbastada utilizando-se uma lima até se assemelhar a uma agulha com diâmetro externo de 1,6mm. Sendo assim, após a abertura do cartucho de gás é possibilitada a passagem do gás para a válvula eletricamente atuada. Todas as peças projetadas foram, inicialmente, desenhadas utilizando o Autodesk Inventor e depois construídas.

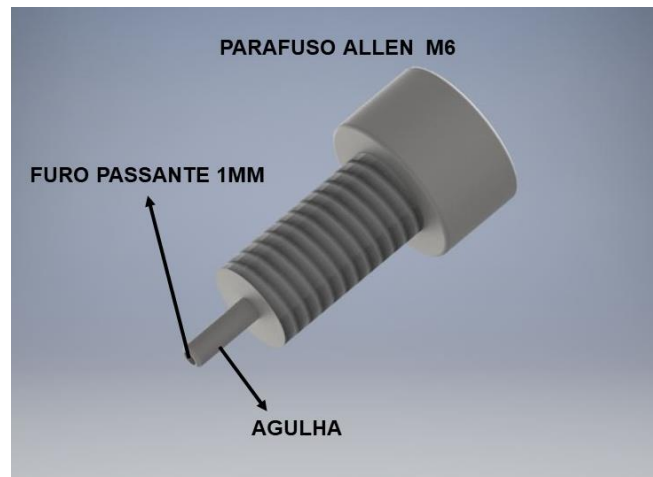


Figura 12: Parafuso-agulha confeccionado com um Allen M6.

3.2.1 Cygnus II-NT

O sistema de pressurização do modelo Cygnus II-NT utiliza cilindros de 12g de CO₂ que não possuem rosca, portanto foi necessário projetar uma estrutura metálica, onde o cartucho fica encapsulado, para conter o gás até o momento da ejeção do paraquedas. Uma configuração com os componentes, que compuseram a estrutura metálica, desacoplados, mas na ordem da montagem, pode ser vista na Figura 13 e uma configuração do sistema de pressurização montado é mostrado na Figura 14. A estrutura de pressurização primária é composta pelo parafuso agulha e a base na qual é rosqueado. Já a estrutura de pressurização secundária é um cilindro com rosca 1/2" MNPT X 3/4" MNPT na qual uma extremidade é conectada à válvula eletricamente atuada e a outra a um tampão 3/4" FNPT rosqueáveis. Ao inserir um cartucho de CO₂ sem rosca dentro da estrutura de pressurização secundária e rosquear o tampão, o fundo deste pressiona o selo do cilindro contra a agulha, rompendo-o e pressurizando o sistema.

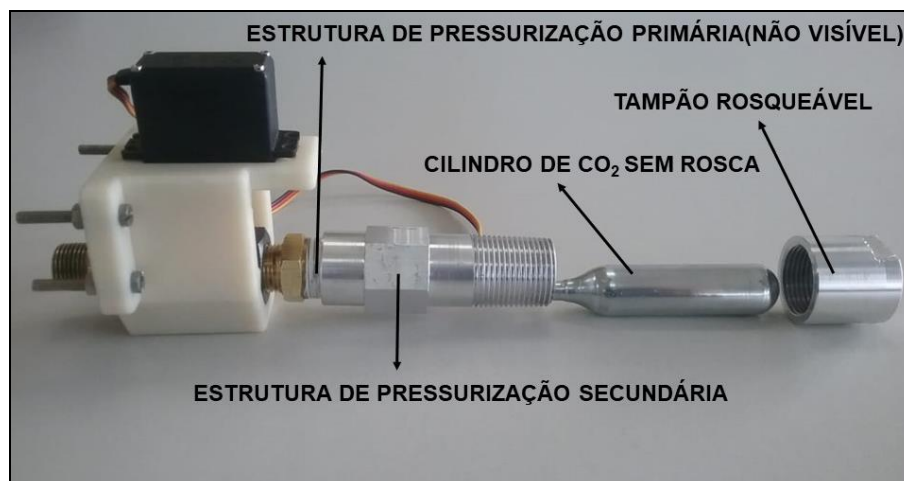


Figura 13: Componentes do sistema Cygnus II-NT para cartuchos de gás sem rosca, desacoplados.



Figura 14: Sistema de ejeção de paraquedas Cygnus II-NT montado.

3.2.2 Cygnus II-T

O CII-T utiliza cartuchos de gás com rosca 3/8" MUNF, o que deu uma maior versatilidade ao sistema de pressurização. O sistema, que é composto pela peça representada na Figura 15, foi denominado de pressurização principal, foi idealizado e construído em alumínio, possui uma rosca 3/8"MNPT, uma rosca interna para a fixação do parafuso agulha M6, uma para os cilindros de CO2 3/8"FUNF e o corpo sextavado. O aspecto de

compatibilidade com qualquer cartucho de gás que possua rosca 3/8"MNPT foi priorizado no desenvolvimento desse sistema.

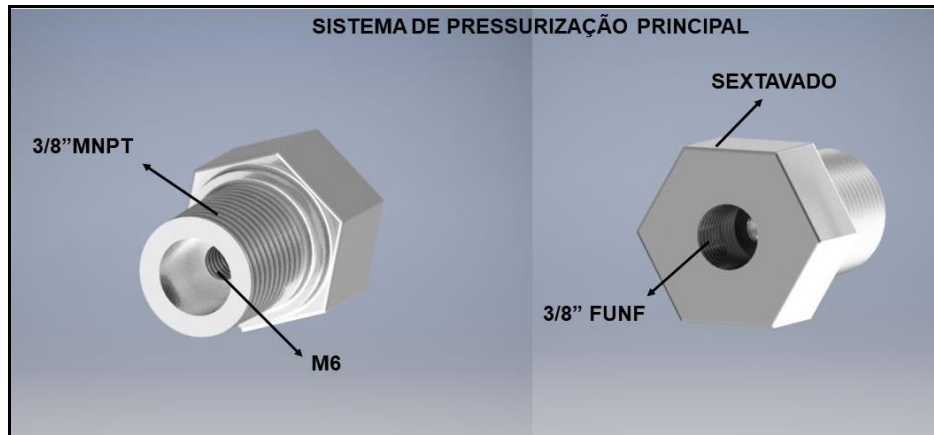


Figura 15: Sistema de pressurização do Cygnus II T para cartuchos de CO₂ com rosca.

De um lado o sistema de pressurização principal estará rosqueado na válvula eletricamente atuada com o parafuso agulha M6 em seu interior. Logo, ao rosquear o cilindro do CO₂ o selo irá se aproximar da agulha até que ocorra o rompimento do lacre e pressurização do sistema. O sistema de pressurização modelo Cygnus II-T, com todos os componentes acoplados e pronto para ser instalado, é representado na Figura 16.



Figura 16: Sistema de ejeção Cygnus II T

3.3 Estrutura de integração

Para que a válvula eletricamente atuada seja montada e integrada com o Sistema de Pressurização foi desenvolvida uma Estrutura de Integração (EI), que foi projetada no Autodesk Inventor e impressa em ABS por uma impressora 3D. Na imagem da EI, apresentada na Figura 17, nota-se que foi projetado um suporte para a válvula esfera sextavada, um suporte para o encaixe e fixação do servo motor com parafusos, e furos passantes para a fixação de todo o aparato em uma base dentro do foguete de alta potência.

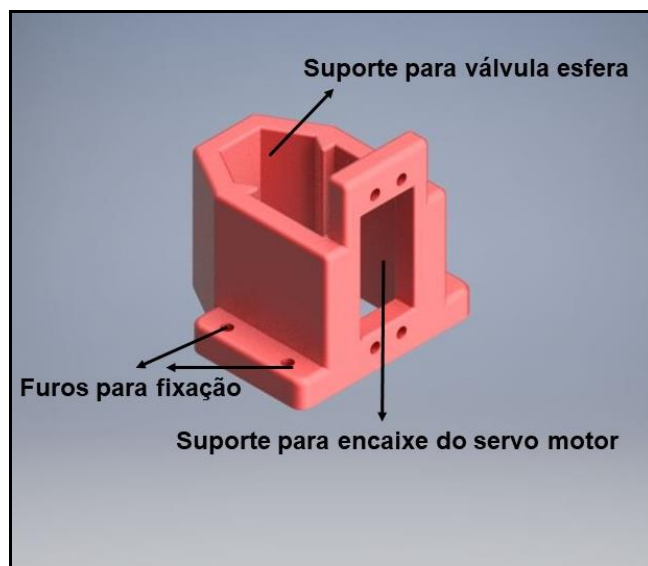


Figura 17: Estrutura de integração feita por impressão 3D

Assim, após a integração dos três subsistemas, válvula eletronicamente atuada, sistema de pressurização e estrutura de integração, foram construídos os Cygnus II-NT representado na Figura 14 e o Cygnus II-T representado na Figura 16, que foram submetidos a testes para validar seus funcionamentos de acordo com o propósito de ejetar o paraquedas para fora da fuselagem de um foguete de alta potência.

4 Testes e discussão dos resultados

Um modelo de testes, baseado nos padrões já utilizados pela UFABC Rocket Design, foi desenvolvido para validar o sistema pirotécnico de ejeção de paraquedas. O protótipo CI-NT foi testado e validado com base na estrutura de um foguete de 4" de diâmetro e ambos os sistemas, CII-T e CII-NT, foram testados na estrutura de um foguete de 6" de diâmetro. Pelo fato da construção e testes do CI-NT terem servido como etapa de aprendizado para o desenvolvimento dos outros dois, somente serão mencionados os testes com os modelos CII.

Para os modelos Cygnus II foram utilizados tubo de PVC de 6" de diâmetro e 40cm de comprimento, representando a câmara do paraquedas, ou seja, a seção do foguete na qual o sistema deve ser fixado. Além disso, para simular a massa do paraquedas, coifa, cordas e afins foram utilizados panos e um segmento de PVC, análogo à coifa, com massa similar à que voou no projeto desenvolvido pela equipe, aproximadamente 700g. Na Figura 18 é possível ver a câmara do paraquedas, a base feita com tubulações de PVC e o conteúdo de panos a ser ejetado pelos modelos Cygnus.

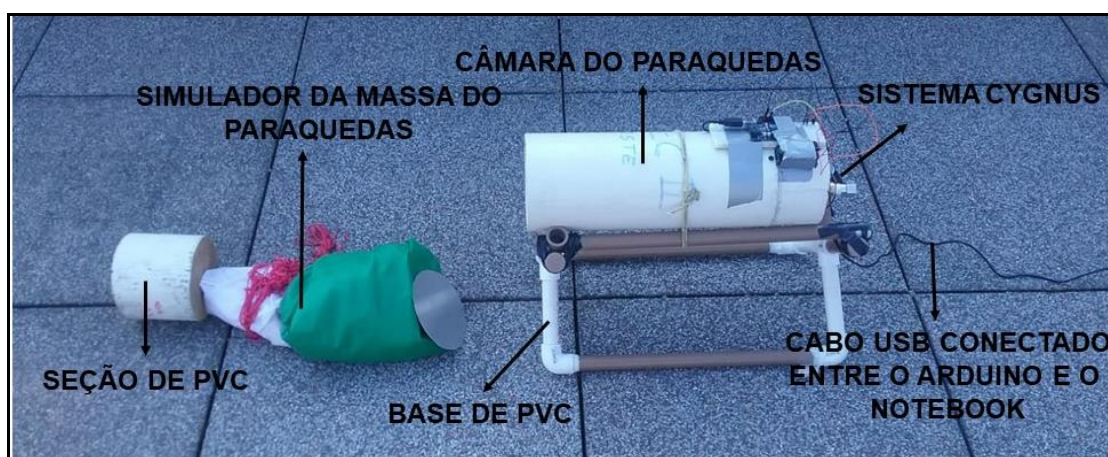


Figura 18: Aparato de testes para os sistemas Cygnus II-NT e T

Na Tabela 4 estão relacionados os tipos de testes feitos e os resultados obtidos com o sistema Cygnus II-NT. O teste de ejeção do paraquedas foi descrito acima. Adicionalmente, também

foram realizados testes de liberação do gás que consistem em montar o sistema Cygnus II-NT e verificar se ocorre o vazamento de dióxido de carbono por alguma conexão por rosca.

Em relação aos testes de ejeção do paraquedas e testes de liberação de gás, os resultados insatisfatórios ocorreram por conta de vazamentos de gás e consequente despressurização do sistema antes da requisição de execução do evento de recuperação. Isso se deveu à alta pressão (50-60 atm) dentro do cartucho e à relativa dificuldade para vedar as conexões com rosca. Assim, esse problema foi corrigido, utilizando fita veda rosca e silicone de cura acética nas roscas e no cilindro de gás.

Tabela 4: Resultados dos testes para o sistema Cygnus II-NT.

Testes feitos	Resultados
Ejeção do paraquedas	4 ejeções realizadas com sucesso e 3 com resultado insatisfatório
Teste de liberação do gás	4 testes com resultado insatisfatório e 2 testes com resultado satisfatório
Teste da válvula eletronicamente atuada	Mais de uma dezena de testes, todos bem sucedidos

O Cygnus II-T foi testado de acordo com o aparato apresentado na Figura 18. Três testes foram realizados e foram alcançadas três ejeções satisfatórias do paraquedas respeitando as condições pré-estabelecidas.

Uma comparação entre os dois sistemas comerciais, Peregrine Raptor e Hawk CO2, e os sistemas projetados, Cygnus II-NT e T, em relação a preços, massas, presença de pirotécnicos e compatibilidade com os tipos de cartuchos de gás disponíveis no mercado, é apresentada na Tabela 5. O valor estimado dos sistemas Cygnus II-NT e T foi baseado no preço de peças individuais sem considerar o preço da mão de obra envolvida. Embora o valor tenha ficado próximo ao do Peregrine Raptor, é importante o fato do modelo projetado ser totalmente não pirotécnico. Também convém ressaltar o fato de se ter liberdade para

modificação e adaptação para o uso em qualquer motor de competição. Portanto, a escolha pelo projeto aqui desenvolvido parece ser a mais recomendada.

Tabela 5: Comparação entre os sistemas de ejeção de paraquedas projetados e os encontrados no mercado, que utilizam CO₂ como gás de trabalho

Características	Cygnus II NT e T	Peregrine Raptor	Hawk CO ₂
Massa	Cygnus II NT= 470g Cygnus II T= 334g	Não encontrado	284g
Preço	Aproximadamente R\$180,00	\$130 ~ R\$537,00	\$433~R\$1791,00
Utiliza pirotécnicos	Não	Sim	Não
Compatível com os dois tipos de cartuchos de gás	Sim	Sim	Não

5 Conclusão

O objetivo fundamental do presente trabalho foi desenvolver e construir um sistema de ejeção de paraquedas que utilizasse o CO₂ contido a alta pressão em cilindros metálicos. O resultado obtido foi bastante além das expectativas iniciais, pois foram produzidos dois sistemas de pressurização, denominados Cygnus II-NT e Cygnus II-T, os quais resolvem o desafio apresentado e são competitivos com as alternativas disponíveis no mercado.

Além disso, os níveis de performance atingidos pelos modelos projetados e testados possibilitaram que a UFABC *Rocket Design* elegesse o modelo Cygnus II-T como sistema de ejeção de paraquedas oficial para o foguete Angra, o qual irá competir na maior competição de foguetes universitários do mundo, a *Spaceport America*, realizada nos Estados Unidos em 2019.

Bibliografia

1. APOGEE COMPONENTS. High-Power Rocketry and Certification. **Apogee Rockets**. Disponível em: <<https://www.apogeerockets.com/High-Power-Rocketry-Certification>>. Acesso em: 24 jul. 2018.
2. UFABC ROCKET DESIGN. Sobre: A UFABC Rocket Design. **UFABC Rocket Design**. Disponível em: <<http://ufabcrocketdesign.com.br/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.
3. TULANKO, C. Definition of Active Recovery. **National Association of Rocketry**, 2006. Disponível em: <<http://www.nar.org/high-power-rocketry-info/definition-of-active-recovery/>>. Acesso em: 24 jul. 2018.
4. MILLIGAN, T. V. The Different Rocket Recovery Techniques. **Peak of Flight**, Colorado Springs, n. 447, p. 11, Julho 2017.
5. TECHNICAL COMMITTEE ON PYROTECHNICS. **Code for High Power Rocketry**. NFPA. Minneapolis, p. 23. 2002.
6. FRUITY CHUTES. Peregrine Raptor CO2 System Kit- 23 to 45gram. **Fruity Chutes**, 2018. Disponível em: <<https://fruitychutes.com/buyachute/co2-ejection-system-c-20/peregrine-raptor-co2-system-kit-23-to-45-gram-p-183.html>>. Acesso em: 23 Agosto 2018.
7. FRUITY CHUTES. Hawk CO2 System Kit - 16 to 45 gram. **Fruity Chutes**, 2018. Disponível em: <<https://fruitychutes.com/buyachute/co2-ejection-system-c-20/hawk-co2-system-kit-16-to-45-gram-p-224.html>>. Acesso em: 23 Agosto 2018.
8. DORTMUND DATA BANK. Vapor Pressure of Carbon Dioxide. **Dortmund Data Bank**. Disponível em: <http://www.ddbst.com/en/EED/PCP/VAP_C1050.php>. Acesso em: 27 Agosto 2018.
9. UNIVAL VÁLVULAS E CONEXÕES. Válvula Esfera, **Unival**. Disponível em: <<https://www.unival.com.br/produto/valvulas-industriais/valvula-esfera/>>. Acesso em: 27 Agosto 2018.
10. TOWER PRO. MG996R Robot servo 180° Rotation. **Tower Pro Online Shop**. Disponível em: <<http://www.towerpro.com.tw/product/mg995-robot-servo-180-rotation/>>. Acesso em: 27 Agosto 2018.
11. KIDNAY, B. Y. A. A. J. Vapor–Liquid Equilibria in the Nitrogen + Carbon Dioxide + Propane System from 240 to 330 K at Pressures to 15 MPa. **Journal of Chemical & Engineering Data**, n. 44, p. 926-931, 1999. ISSN DOI: 10.1021/je980321e.