

Desenvolvimento do minifoguete Saturno-Gama/Titã para apogeu de 3 km

AEN-8

Palavras-chave: foguete, propelente, motor-foguete, aerodinâmica, trajetória, foguetemodelismo

Período de execução previsto: 1 ano (Jan/2021 – Dez/2021)

PROJETO de DESENVOLVIMENTO submetido à
Agência Espacial Brasileira (AEB)
para concorrer a financiamento do
Anúncio de Oportunidade de Apoio aos Grupos de Foguetes Acadêmicos – 2020

Carlos Henrique Marchi

(proponente/coordenador)

Curitiba, 26 de novembro de 2020.

Resumo

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um foguete acadêmico para atingir 3 km de apogeu, composto pelo motor-foguete Saturno-Gama e a cápsula Titã. O projeto será executado pelo Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Está sendo solicitado R\$ 10 mil principalmente para fabricar 10 protótipos do motor-foguete visando realizar 12 testes em solo e 3 em voo. Dados principais do foguete: 1177 mm de comprimento; 76,2 mm de diâmetro externo; 5,139 kg de massa na decolagem; 2,556 kg de propelente sólido KNSu; e motor-foguete da classe K. O projeto está estruturado em três fases e dez etapas, que deverão ser realizadas em 12 meses, de janeiro a dezembro de 2020, por uma equipe de quinze pessoas, envolvendo alunos de graduação e pós-graduação de engenharias, física, química e matemática, professor da UFPR e profissionais colaboradores.

1. Proponente

- a) **Nome do proponente (coordenador do projeto):** Carlos Henrique Marchi
- b) **Formação:** graduação (1990), mestrado (1992) e doutorado (2001) em engenharia mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), de Florianópolis
- c) **Especialização:** não se aplica
- d) **Título:** doutor em engenharia mecânica (Dr.Eng.Mec.)
- e) **Cargo:** professor titular da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba
- f) **Currículo Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/8251643344377056>
- g) **E-mail:** chmcf@gmail.com
- h) **Celular:** (41) 999-279-282
- i) **Tel. Fixo:** (41) 3372-1220
- j) **Cidade/UF:** Curitiba/PR

2. Instituição Responsável

- a) **Nome da Instituição Responsável:** Universidade Federal do Paraná (UFPR)
- b) **Departamento/Laboratório/Instituto:** Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)
Laboratório de Atividades Espaciais (LAE)
Setor de Tecnologia (TC)
- c) **Cidade/UF:** Curitiba/PR
- d) **Tel. Fixo:** (41) 3361-3123

3. Equipe

a) Nome da equipe: **Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS)**

b) Número de participantes: **11**

c) Nome de cada membro, curso e semestre: são apresentados na Tabela 1, para cada participante do projeto: nome, curso, nível, instituição e semestre.

Tabela 1. Participantes do projeto.

Nº	Nome	Curso	Semestre
1	Arthur Borges Bernardo	Química – graduação/UFPR	2º
2	Carlos Eduardo Américo	Engenharia Mecânica – mestrado/UFPR	4º
3	Dener Augusto Iorio	Engenharia Mecânica – mestrado/UFPR	4º
4	Edson Ernesto Deretti	Engenharia Mecânica – graduação/UFPR	5º
5	Filipe Melo de Aguiar	Engenharia Mecânica – doutorado/UFPR	2º
6	Gabriel de Souza Negrão	Engenharia Mecânica – graduação/UFPR	5º
7	Géverson Luciano Ramos	Engenharia Química – graduação/UFPR	8º
8	Giovanne Deni Iorio	Engenharia Mecânica – mestrado/UFPR	4º
9	Stephanie Caroline Bonzanini	Física – graduação/UFPR	7º
10	Thiago Lopes Quevedo	Engenharia Mecânica – doutorado/UFPR	8º
11	Willian Matheus Roik	Engenharia Eletrônica – graduação/UFPR	3º

d) **Descreva a equipe**, seu histórico de projetos, tecnologias desenvolvidas, infraestrutura para desenvolvimento e teste disponíveis à equipe, métodos e abordagens técnico/científicas, competições passadas, lições aprendidas e outras informações relevantes

O **Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS)** foi fundado em 27 Ago 2005 na Universidade Federal do Paraná (UFPR) na cidade de Curitiba (PR). Provavelmente é o mais antigo grupo de foguetes acadêmicos brasileiro em atividade, tendo já completado 15 anos de existência. O GFCS foi fundado e é coordenado pelo proponente do presente projeto, e constituído por alunos de graduação, mestrado e doutorado, na maioria da UFPR, e por profissionais já formados com interesse em minifoguetes.

Histórico de projetos: a partir de 2014 o GFCS começou a desenvolver motores-foguete próprios usando o propelente KNSu (mistura de nitrato de potássio com açúcar). Foram desenvolvidos e qualificados motores não metálicos para as classes 1/8A até D, e motores metálicos para as classes F a K.

Tecnologias desenvolvidas:

- **Preparo do propelente KNSu:** o processo habitual de preparo do KNSu é a quente, tornando o açúcar uma massa derretida para misturar com o nitrato de potássio, mas isso requer um bom controle da temperatura; sabe-se que esse método de preparo já causou vários acidentes. A tecnologia que desenvolvemos é simplesmente prensar o KNSu dentro do tubo-motor em um processo a frio, que é muito mais seguro do que o a quente. Sabemos que outros grupos de foguetes vem começando a adotar o nosso método de preparo. Além disso, o nitrato de potássio que usamos vem do fertilizante Krista-K da Yara diretamente, sem purificá-lo. Um artigo científico (Foltran et al., 2015) foi publicado sobre isso.
- **Taxa de queima do propelente KNSu:** para ser possível projetar com segurança os nossos motores, inicialmente projetamos um Motor de Teste de Propelente (MTP). Ele foi usado no

período de 2014 a 2016 na realização de 57 testes estáticos para obter a curva da taxa de queima do propelente em função da pressão de combustão.

- **Ignição do propelente KNSu:** para os motores atingirem rapidamente a força propulsiva projetada em grãos tubulares, desenvolvemos um ignitor à base de fita adesiva e pólvora negra granulada que fica dentro da alma do grão e não causa obstrução da garganta da tubeira, por não deixar resíduos. Este ignitor é iniciado por um squib elétrico.
- **Sistemas de recuperação:** no início o GFCS usava procedimentos habituais da literatura para ejetar paraquedas através do nariz do minifoguete. Porém, o sistema não era muito confiável, o que causava danos aos equipamentos a bordo ou a queda do minifoguete em alta velocidade, levando risco às pessoas envolvidas na operação ou nas proximidades. Nos anos 2018 e 2019 desenvolvemos um método muito mais confiável que ejeta paraquedas através de aberturas laterais na cápsula e usa 0,05 a 0,07 grama de pólvora em vez de 0,50 grama ou mais; com isso, também eliminamos a possibilidade de acidentes na fase de preparação do minifoguete na rampa de lançamento pois mesmo que seja disparada acidentalmente, a carga de pólvora usada não causará qualquer ferimento às pessoas próximas. O sistema desenvolvido permite fazer uma ou duas ejeções durante o voo.
- **Fixação de empenas:** desenvolvemos um sistema de fixar empenas ao minifoguete que é leve e não aumenta o arrasto aerodinâmico pois não necessita de parafusos ou qualquer elemento que fique exposto ao escoamento principal sobre o minifoguete. O sistema é baseado em criar uma aba na empena, quando ela é cortada, dobrar essa aba para baixo da tubeira e fixá-la à tubeira através de um parafuso.
- **Motores-foguete:** onze projetos diferentes de motores metálicos já foram desenvolvidos pelo GFCS desde 2014, tendo sido realizados mais de 200 testes de resistência e estáticos com estes motores, comprovando que vão da classe F a K. Os principais parâmetros deles podem ser vistos em Marchi (2020a) [<http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/07/recordes-de-motores-foguete-do-gfcs-lae.html>]. Alguns dados são: massa de propelente = 100 a 1930 gramas; diâmetro externo do tubo-motor = 44 a 102 mm; impulso total = 65 a 1294 N.s; tempo de queima do propelente = 1,4 a 8,2 segundos; impulso específico = 63 a 82 segundos; tubo-motor e tampa do motor em ligas de alumínio; a tubeira é feita de liga de alumínio nas classes de motores de F a H e de aço nas classes I a K.
- **Aplicativos computacionais:** visando o projeto e análise de nossos minifoguetes e seus motores, temos desenvolvido aplicativos computacionais para calcular: o coeficiente de arrasto e a trajetória de minifoguetes, parâmetros de desempenho de motores testados estaticamente e projetar motores-foguete a propelente sólido.

Infraestrutura para desenvolvimento e teste disponíveis à equipe (este tópico está detalhado no item 6.b.iv deste projeto, abaixo): temos os equipamentos necessários e dispomos de locais adequados para realizar com segurança os experimentos previstos para executar este projeto, que envolverão testes de resistência, testes estáticos, testes de sistemas e testes de voo (lançamentos).

Métodos e abordagens técnico/científicas: para desenvolver um novo motor-foguete e minifoguete, o GFCS normalmente realiza os seguintes tipos de testes:

- **Teste de calibração (TC):** teste executado para avaliar o correto funcionamento de equipamentos usados nos vários tipos de testes e lançamentos de minifoguetes como células de carga, termopares, balanças e paquímetros.
- **Teste de propelente (TP):** teste realizado para avaliar o desempenho, alteração, formulação, procedimento de preparo e carregamento de propelente, ignição do propelente, estudar a área de queima do propelente etc.
- **Teste de resistência (TR):** tipo de teste qualitativo no qual o motor-foguete é colocado em funcionamento em uma bancada sem instrumentos, para impedir o seu movimento. O objetivo principal deste teste é verificar se o motor funciona sem qualquer anomalia. Mas este teste

também pode ser usado para medir o tempo de queima com vídeo, verificar o estado dos componentes do motor após o teste e medir a massa de resíduos da queima. O teste de resistência deve ser feito antes de qualquer teste estático.

- **Teste de sistema (TS):** este conceito envolve vários tipos de testes que podem ser feitos com os sistemas do minifoguete e seu motor; por exemplo: teste do sistema que ejeta o paraquedas da cápsula do minifoguete, teste do altímetro de bordo, teste de resistência de componentes como o paraquedas.
- **Teste estático (TE):** tipo de teste quantitativo no qual o motor-foguete é colocado em funcionamento em uma bancada com instrumentos para medir parâmetros de desempenho do motor. O objetivo principal deste teste é medir a força de empuxo produzida pelo motor durante o seu funcionamento. Este teste também pode ser usado para medir o tempo de queima com vídeo, verificar o estado dos componentes do motor após o teste, medir a massa de resíduos da queima, medir a temperatura do motor durante e/ou após o seu funcionamento. Testes estáticos só devem ser feitos com motores aprovados anteriormente em testes de resistência.
- **Teste de voo (TV):** tipo de teste no qual o motor-foguete é unido a uma cápsula e empenas para realizar um voo. Os objetivos deste teste são: verificar o desempenho do motor em voo, registrar a trajetória do minifoguete, testar os sistemas de recuperação e localização, e comparar a trajetória prevista com a real.

No presente projeto, exceto testes de propelentes, todos os demais tipos de testes serão executados.

Competições passadas: o GFCS participou com várias equipes dos três Festivais de Minifoguetes de Curitiba, de 2014 a 2016, dos três Festivais Brasileiros de Minifoguetes, de 2017 a 2019, e duas participações no desafio H300 da OBA em Barra do Piraí (RJ) em 2018 e 2019. Nos seis Festivais ficamos em primeiro, segundo ou terceiro lugares 31 vezes e vencemos os dois desafios da OBA.

Lições aprendidas: em algumas situações, aprendemos na prática que nunca é bom improvisar algo em campo pois geralmente o resultado não é o esperado. Sempre procuramos seguir as normas de segurança e protocolos nacionais e internacionais da área bem como as nossas próprias normas que vêm sendo aprimoradas ao longo do tempo.

Já tivemos explosões ou rompimento da câmara de combustão em seis testes de resistência, que são feitos justamente para se verificar a segurança e confiabilidade dos motores em desenvolvimento, antes dos motores irem para uma bancada instrumentada; mesmo assim, nunca nenhuma pessoa, seja do GFCS ou não, foi ferida devido aos cuidados que tomamos nos testes. Com estas explosões acabamos mudando os projetos dos tubo-motores para incluir uma embocadura neles visando romper o tubo-motor em caso de sobrepressão, antes que ocorra uma explosão. Este novo procedimento de fabricação funcionou perfeitamente no maior motor que já desenvolvemos, o Júpiter com quase 2 kg de propelente, quando em um teste de resistência houve o rompimento do tubo-motor no local da embocadura, conforme projetado, fazendo com que os fragmentos fossem direcionados de acordo com o previsto.

Outras informações relevantes: o GFCS criou, organizou e executou os três Festivais de Minifoguetes de Curitiba, de 2014 a 2016, e os três Festivais Brasileiros de Minifoguetes, de 2017 a 2019. Nos últimos quatro Festivais, o GFCS ministrou diversos minicursos aos participantes visando difundir no Brasil a sua tecnologia de projeto e análise de minifoguetes.

Desde 2005, o proponente deste projeto leciona anualmente uma disciplina sobre foguetemodelismo no curso de graduação em engenharia mecânica da UFPR. A partir de 2014 esta disciplina também foi aberta à comunidade externa à UFPR, permitindo a participação de alunos do ensino médio, professores e outros interessados no assunto. Atualmente, **esta disciplina está sendo ofertada de forma remota pela internet (YouTube) para quase 800 alunos** inscritos, e sabe-se que há muitas pessoas acompanhando a disciplina sem estarem inscritas.

Atualmente, o GFCS está organizando um novo evento, a MARATONA Brasileira de Minifoguetes, que será executada em 2021, em um novo formato de evento no qual cada equipe fará seus lançamentos em sua própria cidade ou no local que preferir.

O GFCS atualmente mantém 21 dos 26 recordes brasileiros de minifoguetes (Marchi, 2020b) cuja relação pode ser vista no seguinte link http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Recordes/2020-01-02_Recordes-BAR-17_resumo.pdf.

A filosofia principal do GFCS é desenvolver minifoguetes e motores leves, simples, baratos, seguros e confiáveis para ampla divulgação e uso.

4. Parcerias e Colaborações

- a) **Nome de colaboradores (e vínculo com esta ou outra instituição) e equipe técnica envolvidos:** são apresentados na Tabela 2, para cada colaborador do projeto: nome e formação. Todos são membros do Grupo de Foguetes Carl Sagan da UFPR.

Tabela 2. Colaboradores do projeto.

Nº	Nome	Curso de graduação	Pós-graduação
1	Antonio Carlos Foltran	Engenharia Mecânica	Doutor em engenharia mecânica
2	Carlos Alberto Rezende de Carvalho Junior	Matemática	Doutor em métodos numéricos em engenharia
3	Carlos Eduardo Libero da Silva	Engenharia Mecânica	Especialista em engenharia industrial 4.0

- b) **Parcerias da equipe com outras instituições de ensino:**

O Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS) da UFPR fundou em 2016 e coordena a chamada **Equipe Gralha Azul** cujo principal objetivo é participar de competições nacionais e internacionais de minifoguetes através da união de conhecimentos e infraestrutura de quatro grupos de foguetes. Os demais grupos de foguetes que integram a Equipe Gralha Azul são: **GREAVE (Grupo de Estudos em Aerodinâmica de Veículos Autopropelidos)** da Universidade Positivo (UP), também de Curitiba; **GFT (Grupo de Foguetes Tsiolkovsky)**, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), de Francisco Beltrão/PR; e **BRAVO (Bravo Rocket Team)**, da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), de São José dos Campos/SP.

O GFCS também colabora desde 2016 com a Equipe CEELL do Colégio Estadual do Paraná, de Curitiba, treinando e apoiando com conhecimentos e infraestrutura seus membros, que são alunos do ensino médio e fundamental, para participarem de competições de minifoguetes.

- c) **Colaborações da equipe com empresas, indústrias e afins:**

O GFCS já colaborou com a empresa Boa Vista Modelismo (Bandeirante) avaliando o desempenho de seus motores-foguete através de testes estáticos e emissão de relatórios como Marchi (2010). Também chegou a fazer um estudo científico em conjunto com esta empresa para entender melhor as tuberias usadas em motores para foguetemodelos, tanto no Brasil quanto nos Estados Unidos. O resultado foi o trabalho Moro et al. (2014) apresentado no Simpósio Aeroespacial Brasileiro.

O GFCS também colaborou com o sr Carlos Alberto de Souza, do Rio de Janeiro (RJ), que fabrica motores da classe 1/2A distribuídos pela empresa Boa Vista Modelismo (Bandeirante). Foram avaliados três tipos de motores em Fev/2020 através de testes estáticos e emissão de relatórios.

Desde Set/2020 iniciamos uma colaboração com a empresa Kazdan Aeroespacial, de Campo Largo (PR). A empresa está patrocinando o desenvolvimento do motor-foguete Saturno-Beta, concebido pelo GFCS no início deste ano. A previsão inicial é que este motor consiga levar uma cápsula de 1500 gramas a 2 km de altura. Os testes de resistência e estáticos em solo deverão ser realizados no período de Dez/2020 a Mar/2021, e dois lançamentos até Jun/2021. Os resultados dessa colaboração ajudarão muito no desenvolvimento do motor Saturno-Gama, foco do presente projeto.

d) Outras fontes de financiamento:

Através de projetos de pesquisa, o GFCS já contou no passado com apoio financeiro da AEB, CAPES e CNPq.

Em 2018 e 2019 também conseguiu pequenos apoios financeiros da OBA através da participação e premiações obtidas em demonstrações de lançamentos de minifoguetes experimentais na MOBFOG em Barra do Piraí (RJ).

O GFCS também já obteve recursos financeiros para suas atividades através de doações de seus membros e de taxas de inscrição em minicursos lecionados por seus membros nos Festivais Brasileiros de Minifoguetes de 2016 a 2019.

Nos últimos três anos (2018 a 2020), o GFCS tem obtido pequenos apoios financeiros anuais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMec) da UFPR.

Os outros três grupos de foguetes (GREAVE, GFT e BRAVO) que integram a **Equipe Gralha Azul** também colaboram com o GFCS fornecendo equipamentos, materiais e componentes para a realização de seus projetos em conjunto.

5. Projeto

Indique a categoria escolhida pela equipe e subdivisão de tecnologia segundo as opções abaixo:

a) Construção de Foguetes Acadêmicos.

- I. Desenvolvimento e construção, ou melhorias em projeto já existente de foguete universitário com apogeu maior ou igual a 3 km com tecnologia de propulsão sólida.

6. Descrição do projeto

a) Relevância e mérito técnico-científico.

- i. **Objetivos do projeto:** cada grupo deve indicar claramente quais os objetivos do seu projeto em termos de apogeu do foguete, testes em bancada, estudos envolvidos no projeto, participação em competições etc.

Os objetivos do projeto são:

- 1) Desenvolver o minifoguete Saturno-Gama/Titã para atingir apogeu de 3 km, realizando três voos-teste.

- 2) Determinar qual o valor limite de K do motor-foguete a propelente sólido Saturno-Gama, onde K é a razão entre a área máxima de queima do propelente e a área da garganta da tubeira; para isso, realizar oito testes de resistência e quatro testes estáticos.
- 3) Desenvolver a cápsula Titã com diâmetro de 3 polegadas ou 76,2 mm, sistema de recuperação de dois eventos, paraquedas, computador de bordo, altímetro e localizador; para isso, fabricar três cápsulas e testá-las em voo.
- 4) Realizar estudos experimentais de aerodinâmica e trajetória do minifoguete Saturno-Gama/Titã.
- 5) Com o minifoguete desenvolvido no presente projeto, participar das seguintes competições: Maratona Brasileira de Minifoguetes de 2021 e 2022, e LASC/2022 na categoria H3k.

ii. **Resultados pretendidos:** cada grupo deve indicar claramente quais os resultados pretendidos com a execução do seu projeto, atentando a uma ou mais áreas citadas abaixo:

Propulsão; Aerodinâmica; Propelente; Materiais; Estabilidade; Sistema de injeção de propelentes; Trajetória; Instrumentação; Aplicativo computacional; Experimento científico/tecnológico; outras propostas que tenham relação com foguetes.

Para cada objetivo do projeto, os resultados pretendidos são respectivamente:

- 1) **Trajatória:** comprovar com voos e altímetros a bordo que o minifoguete Saturno-Gama/Titã atinge o apogeu de 3 km.
- 2) **Propulsão:** conseguir o melhor desempenho possível do motor-foguete Saturno-Gama em termos de impulso específico. Futuramente, com o valor de K máximo determinado, será possível também melhorar o desempenho de outros motores do GFCS.
- 3) **Instrumentação:** ter uma cápsula funcional, confiável e segura para uso em futuros voos e experimentos.
- 4) **Aerodinâmica:** obter o coeficiente de arrasto efetivo do minifoguete e comparar a trajetória prevista com a real visando melhorar o procedimento de projeto de minifoguetes do GFCS e seus aplicativos computacionais.
- 5) **Competições:** ficar entre os três primeiros colocados na categoria H3k dos seguintes eventos: Maratona Brasileira de Minifoguetes de 2021 e 2022, e LASC/2022.

iii. **Histórico do grupo:** cada grupo deverá apresentar um histórico descrevendo sua experiência com motores-foguete comerciais e não comerciais, foguetes didáticos e acadêmicos, apogeus alcançados, participação e resultados obtidos em eventos, composição do grupo, instituição à qual está ligado, tipo de ligação com a instituição, organização do grupo, data de fundação etc.

Experiência com motores-foguete comerciais: o GFCS tem experiência com motores-foguete comerciais desde 2005, ano em que foi fundado. Já foram realizados mais de 400 testes de resistência e testes estáticos com motores comerciais para foguetemodelos fabricados pelas empresas Boa Vista Modelismo (Bandeirante), Estes, Aerotech e Brasil Aeroespacial. Também já foram usados diversos tipos de motores comerciais de fogos de artifício fabricados por várias empresas brasileiras. Todos estes motores foram classificados como sendo das classes 1/8A até E.

Experiência com motores-foguete não comerciais: a partir de 2014 o GFCS começou a desenvolver motores-foguete próprios (não comerciais) usando o propelente sólido KNSu (mistura

de nitrato de potássio com açúcar). Através de mais de 300 testes de resistência e testes estáticos, foram desenvolvidos e qualificados motores não metálicos da classe 1/8A até a D, e motores metálicos da classe F até J. Mais detalhes sobre os motores metálicos foram apresentados acima no item 3.d.Tecnologias desenvolvidas.

Experiência com minifoguetes didáticos: desde 2005, o GFCS efetuou 654 lançamentos de minifoguetes com motores comerciais, isto é, com foguetes didáticos. Os motores usados foram produzidos pelas empresas citadas acima e classificados, segundo testes estáticos do GFCS, como sendo das classes 1/8A até E.

A experiência e qualidade dos projetos do GFCS de minifoguetes com motores comerciais podem ser constatadas nos recordes brasileiros de minifoguetes (Marchi, 2020b) disponível no seguinte link:

http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Recordes/2020-01-02_Recordes-BAR-17_resumo.pdf. Pode-se ver que vários recordes brasileiros são do GFCS/UFPR.

Visando a popularização dos minifoguetes no Brasil, o GFCS desenvolveu um minifoguete de baixo custo, montado com materiais baratos e fáceis de conseguir, e motor de foguete de vara pequeno, da classe 1/2A ou A. O custo total do minifoguete é inferior a R\$ 2,00. Detalhes podem ser vistos na postagem (Marchi, 2019) disponível no seguinte link:

<http://fogueteufpr.blogspot.com/2019/12/minifoguete-de-baixo-custo-do-lae.html>.

Um extenso trabalho com minifoguetes didáticos, patrocinado pelo CNPq, foi realizado pelo GFCS no período 2008 a 2011. Neste trabalho foram avaliados diversos motores e kits de minifoguetes nacionais, bem como parâmetros que influenciam no apogeu. Os resultados estão disponíveis em Marchi (2011) no link:

http://ftp.demec.ufpr.br/CFD/projetos/aen2/relatorio_final_projeto_AEN2_CNPq_2008_v12.pdf.

Experiência com minifoguetes acadêmicos: desde 2015, o GFCS efetuou 53 lançamentos de minifoguetes com motores não comerciais, isto é, com foguetes acadêmicos. Os motores usados foram desenvolvidos pelo GFCS. Após a realização de dezenas de testes estáticos, concluiu-se que são das classes F a J.

Para executar voos com estes motores, o GFCS desenvolveu vários tipos de cápsulas, com diversos tipos de sistemas de recuperação, bem como sistema de fixação de empenas ao minifoguete e rampas de lançamento.

A experiência e qualidade destes projetos do GFCS, de minifoguetes com motores próprios (não comerciais), pode ser constatada nos recordes brasileiros de minifoguetes (Marchi, 2020b) disponível no seguinte link:

http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Recordes/2020-01-02_Recordes-BAR-17_resumo.pdf. Pode-se ver que os recordes de apogeu para minifoguetes com motores não comerciais das classes F, G e H são do GFCS/UFPR e Equipe Galha Azul (que é liderada pelo GFCS), bem como os recordes de precisão para apogeu de 300 e 1000 metros.

Apogeus alcançados: a evolução no tempo dos apogeus alcançados pelos minifoguetes do GFCS pode ser vista em Marchi (2020c) no seguinte link:

<http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/03/recordes-de-apogeu-de-minifoguetes.html>.

Com motores comerciais, começamos em 2010 em cerca de 100 metros de apogeu com um motor da classe B. Fomos evoluindo até chegar em 723 metros no ano de 2015 com um motor da classe E. Há cerca de um ano, em dezembro de 2019 atingimos o maior apogeu atual do GFCS para minifoguete com motor comercial: 751 metros com um motor da classe D da Aerotech que usa propelente *composite*. Estes recordistas nossos têm comprimento entre 330 e 590 mm, diâmetro de 20 a 26 mm, e massa de decolagem de 45 a 148 gramas. O nosso recordista, minifoguete LAE-137, pode ser visto na Figura 1 e a sua trajetória na Figura 2. Detalhes sobre este minifoguete e seu voo podem ser vistos em Marchi (2020d) na postagem disponível no seguinte link:

<http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/01/751-metros-novo-recorde-brasileiro-de.html>.



Figura 1. O minifoguete LAE-137, recordista de apogeu (751 metros) do GFCS com motor comercial (classe D).

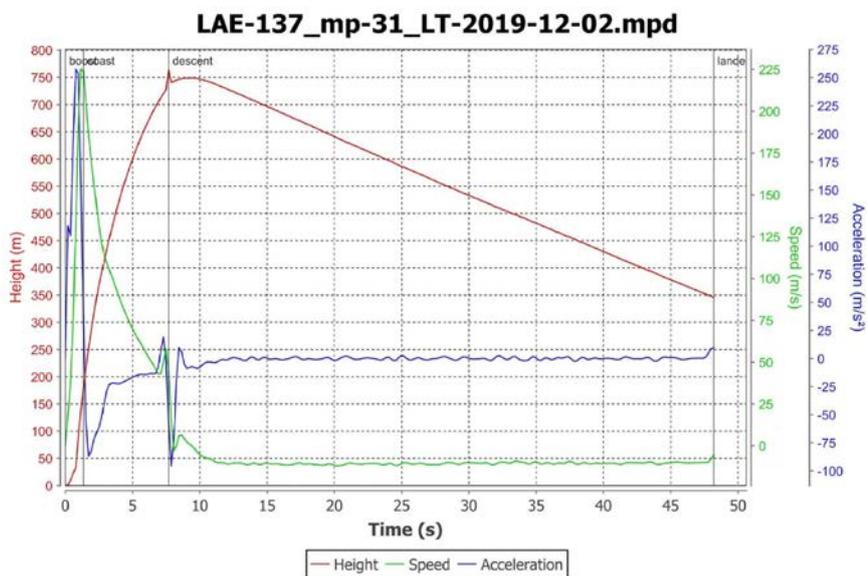


Figura 2. Gráfico da trajetória do minifoguete LAE-137, recordista de apogeu (751 metros) do GFCS com motor comercial (classe D).

Com motores não comerciais, ou seja, motores desenvolvidos pelo próprio GFCS, começamos em 2015 com 368 metros de apogeu com um motor da classe F. Fomos evoluindo até chegar em 1219 metros no ano de 2018 com um motor da classe H, isto é, há mais de dois anos.

Isso ocorreu porque em 2019 nos dedicamos a desenvolver um sistema de recuperação mais confiável e seguro. Em 2020 provavelmente chegaríamos no apogeu de 1500 ou 1600 metros com motores da classe I, porém a pandemia da Covid-19 nos impediu de fazer testes desde fevereiro de 2020. Os nossos foguetes acadêmicos recordistas têm comprimento entre 512 e 992 mm, diâmetro de 44 a 61 mm, e massa de decolagem de 725 a 1397 gramas. O nosso recordista, minifoguete Urano/Paraná-15b, pode ser visto na Figura 3 e a sua trajetória na Figura 4. Detalhes sobre este minifoguete e seu voo podem ser vistos em Marchi (2020e) na postagem disponível no seguinte link: <http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/11/1219-metros-recorde-brasileiro-de.html>.

Todos estes valores de apogeu citados acima foram obtidos com altímetros a bordo dos minifoguetes, que começamos a usar a partir de 2010.



Figura 3. O minifoguete Urano/Paraná-15b, recordista de apogeu (1219 metros) do GFCS com motor não comercial (classe H).

Participação e resultados obtidos em eventos: o GFCS participou com várias equipes dos três Festivais de Minifoguetes de Curitiba, de 2014 a 2016, dos três Festivais Brasileiros de Minifoguetes, de 2017 a 2019, e duas vezes no desafio H300 da OBA em Barra do Piraí (RJ) em 2018 e 2019. Nos seis Festivais ficamos em primeiro, segundo ou terceiro lugares 31 vezes e vencemos os dois desafios da OBA.

Composição do grupo: o GFCS é constituído por alunos de graduação, mestrado e doutorado, na maioria da UFPR, e por profissionais já formados com interesse em minifoguetes.

Instituição à qual está ligado e tipo de ligação com a instituição: a sede do GFCS é o Laboratório de Atividades Espaciais (LAE), que fica dentro do Campus Centro Politécnico da UFPR (Universidade Federal do Paraná) em Curitiba, sendo um dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR. O GFCS é coordenado pelo proponente do presente projeto, que é professor titular da UFPR.

Organização do grupo: o GFCS é coordenado pelo proponente do presente projeto, que define as atividades a serem executadas pelos membros, de acordo com suas especialidades, interesses e disponibilidade de tempo. As atividades são definidas em função da disponibilidade de recursos financeiros, eventos e objetivos de interesse do grupo.

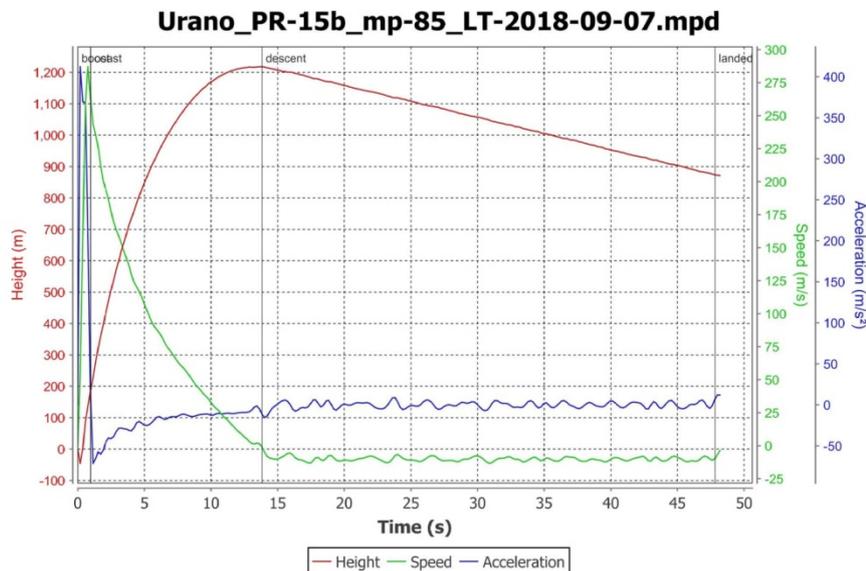


Figura 4. Gráfico da trajetória do minifoguete Urano/Paraná-15b, recordista de apogeu (1219 metros) do GFCS com motor não comercial (classe H).

Data de fundação etc: o **Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS)** foi fundado em 27 Ago 2005 na Universidade Federal do Paraná (UFPR) na cidade de Curitiba (PR). Provavelmente é o mais antigo grupo de foguetes acadêmicos brasileiro em atividade, tendo já completado 15 anos de existência. O GFCS foi fundado e é coordenado pelo proponente do presente projeto.

b) Exequibilidade da Proposta

i. Metodologia e estratégias de funcionamento dos grupos;

A execução do projeto está dividida em três fases:

- **Fase A:** testes de resistência: etapas 1 a 5. Nesta fase serão testadas 3 a 5 tubeiras diferentes para selecionar a mais adequada, ou seja, a tubeira com menor diâmetro de garganta que não rompa o motor durante o seu funcionamento e, conseqüentemente, que produza o maior desempenho do propelente. Por segurança e repetibilidade, a tubeira selecionada deverá passar por dois testes de resistência.
- **Fase B:** testes estáticos: etapas 5 a 7. Nesta fase, para conhecer a variabilidade do desempenho do motor, deverão ser feitos quatro testes estáticos com medida da força x tempo.
- **Fase C:** testes de voo: etapas 2 a 10. Nesta fase, deverão ser feitos três lançamentos de um minifoguete com o motor-foguete Saturno-Gama e desenvolvida a sua cápsula Titã.

As dez etapas do trabalho são as seguintes:

- 1) Projetar/desenhar as peças do motor da Fase A: Jan/21. Definir os detalhes das peças que serão necessárias na Fase A do projeto e executar seus desenhos mecânicos. As peças são: tubo-motor, tampa do motor, punção para prensar o propelente e três geometrias de tubeiras.
- 2) Projetar/desenhar as peças da cápsula Titã e fabricar as peças do motor da Fase A: Fev/21. Fazer pelo menos três cotações diferentes com empresas das peças do motor da Fase A e pedir a fabricação delas com a empresa que apresentar o menor preço. Projetar e fazer o desenho mecânico das peças a serem fabricadas para a cápsula Titã.
- 3) Realizar a primeira sessão de testes de resistência do motor com três tipos de tubeira ($K=120$, 135 e 150); se necessário, projetar/desenhar uma ou duas novas tubeiras: Mar/21. O objetivo nesta etapa é selecionar uma tubeira com o maior valor de K , onde K é a razão entre a área máxima de queima do propelente e a área da garganta da tubeira. Caso o motor não resista com nenhuma destas três tubeiras iniciais, serão projetadas outras duas tubeiras a serem testadas na próxima etapa.
- 4) Realizar a segunda sessão de testes de resistência do motor e fabricar peças para a cápsula Titã: Abr/21. Eventualmente, nesta etapa talvez seja feito o primeiro teste de resistência de uma ou duas novas tubeiras devido aos resultados negativos que poderão ocorrer na fase 3.
- 5) Fazer testes de sistemas da cápsula Titã; fabricar peças do motor da Fase B; se necessário, realizar a terceira sessão de testes de resistência do motor: Mai/21. Nesta etapa é possível que sejam feitos um ou dois novos testes de resistência. Com base nos testes de resistência das etapas 3 e 4, será definida a tubeira a ser usada na Fase B e executada a sua fabricação e das demais peças necessárias.
- 6) Realizar a primeira sessão de testes estáticos e projetar/desenhar peças do motor da Fase C: Jun/21. Deverão ser feitos dois testes estáticos com medida de força x tempo da tubeira aprovada na Fase A. Com um aplicativo próprio do GFCS serão extraídos outros parâmetros relevantes das curvas de empuxo para uso na Fase C.
- 7) Realizar a segunda sessão de testes estáticos e fabricar peças do motor da Fase C: Jul/21. Com esta etapa se chegará a quatro testes estáticos.
- 8) Realizar o primeiro voo-teste do minifoguete Saturno-Gama/Titã: Ago/21. Nesta etapa pretende-se testar em voo o funcionamento do motor-foguete Saturno-Gama bem como todos os sistemas da cápsula Titã, principalmente seu sistema de recuperação.
- 9) Realizar o segundo voo-teste do minifoguete Saturno-Gama/Titã: Out/21. Segundo teste de voo para ajustes necessários com base no primeiro voo.
- 10) Participar da MARATONA Brasileira de Minifoguetes: Dez/21. Este voo deverá ser realizado para participar do evento mencionado na categoria de apogeu de 3 km.

Comentários sobre os valores de K apresentados acima: com base na experiência adquirida nos projetos de motores anteriores do GFCS, que usam propelente KNSu e componentes metálicos, sabe-se que $K = 150$ será o máximo valor que o motor deverá resistir, enquanto que $K = 120$ é o valor que os motores Saturno-Alfa e Júpiter-Alfa, já desenvolvidos, operam, ou seja, é muito provável que o novo motor Saturno-Gama consiga funcionar com $K = 120$. O valor $K = 135$ será uma tentativa de melhorar o desempenho do novo motor, pois quanto maior o valor de K significa que maior será o impulso específico do motor e, conseqüentemente, maior o seu impulso total, o que implica geralmente em maior apogeu para um minifoguete que use o mesmo motor.

Principais características do **motor-foguete** Saturno-Gama:

- Massa do motor sem propelente = 1,433 kg
- Massa total do motor com propelente = 3,989 kg
- Diâmetro externo = 76,2 mm
- Diâmetro interno da câmara de combustão = 70,0 mm

- Comprimento total = 592 mm
- Material do tubo-motor: liga de alumínio ABNT 6063-T5
- Material da tampa: liga de alumínio ABNT 2024-T3
- Material da tubeira: aço inox AISI 304
- Tempo de queima = 5,0 s
- Empuxo médio = 351 N
- Impulso total = 1755 N.s
- **Classe = K**
- Impulso específico = 70 s

Principais características do **propelente**:

- **Massa = 2,556 kg**
- Sólido
- 65% de fertilizante Krista-K Yara
- 35% de açúcar refinado União
- Fabricação do grão-propelente por prensagem a frio sem aditivos
- Geometria do grão-propelente: tubular tronco de cone sem inibição
- Diâmetro máximo do grão-propelente = 70,0 mm
- Diâmetro mínimo do grão-propelente = 23,8 mm
- Comprimento do grão-propelente = 500 mm

Principais características da **cápsula Titã**:

- Diâmetro externo = 76,2 mm
- Comprimento total = 585 mm
- Sistema de recuperação com dois eventos: ejeção de paraquedas piloto e principal
- Computador de bordo para acionar os dois eventos do sistema de recuperação
- Dois altímetros de bordo para registrar a trajetória
- Localizador a bordo para permitir encontrar o minifoguete após o voo
- Material da estrutura: fibra de carbono
- **Massa = 1,00 kg**

Principais características do **minifoguete Saturno-Gama/Titã**:

- Diâmetro externo = 76,2 mm
- Comprimento total = 1177 mm
- **Massa total de decolagem = 5,139 kg**

Principais parâmetros da **trajetória** do minifoguete Saturno-Gama/Titã:

- Coeficiente de arrasto = 0,46
- Altura no fim da queima = 841 m
- Velocidade máxima = 1254 km/h
- Tempo de voo até o apogeu = 23,0 s
- **Apogeu = 3011 m**
- Tempo de queda com paraquedas piloto a 25 m/s até 300 m = 108,4 s ou 1 min 48,4 s
- Tempo de queda com paraquedas principal a 10 m/s por 300 m = 30,0 s
- Tempo total de voo = 161,4 s ou 2 min 41,4 s

As informações acima sobre o motor e minifoguete Saturno-Gama/Titã são baseadas na metodologia de projeto do GFCS, que tem sido bem-sucedida conforme descrito nos tópicos anteriores deste texto, principalmente nos eventos que temos participado e nos recordes brasileiros obtidos.

Na Figura 5 apresenta-se a altura do minifoguete em função do tempo de voo sem paraquedas.

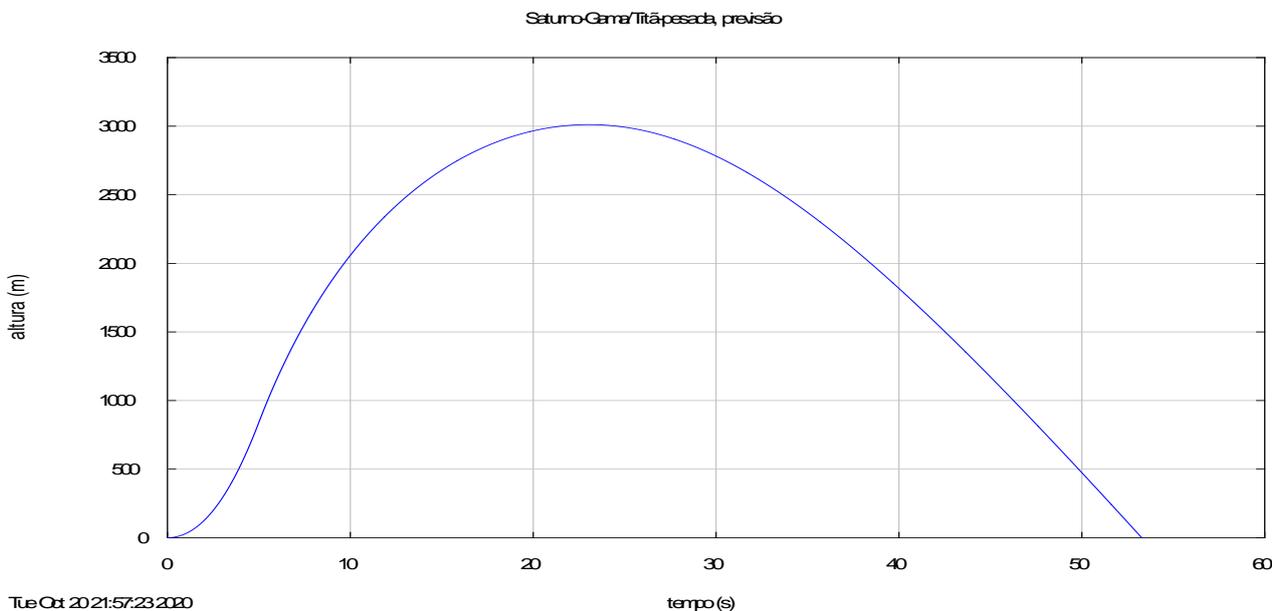


Figura 5. Altura x tempo de voo do minifoguete Saturno-Gama/Titã.

ii. Adequação do cronograma às atividades planejadas;

A Tabela 3 apresenta o cronograma previsto para executar as dez etapas do trabalho. Cada coluna temporal representa um mês de 2021, de janeiro (J) a dezembro (D).

O cronograma está de acordo com o ritmo habitual de trabalho do GFCS, que pode ser visto na Tabela 4. Portanto, é provável que ele seja executado da forma que está planejado.

iii. Experiência do proponente na orientação de grupos de foguetes;

Enquanto cursava o ensino médio em Rio do Sul (SC), o proponente do presente projeto fundou e coordenou um grupo de foguetes chamado Equipe Espacial Wernher von Braun (EEWB). Esta equipe chegou a contar com sete membros e atuou de 1982 a 1984. A EEWB desenvolveu minifoguetes metálicos que usavam como propelente a pólvora negra, montou e lançou kits comerciais do foguetemodelo Sondinha II, fazendo também adaptações para ejetar paraquedas, fabricou e lançou o minifoguete X-1 (IAE, 1976), projeto desenvolvido pelo IAE para servir de

minifoguete padrão aos clubes espaciais da época. Estima-se que o apogeu alcançado pelos minifoguetes ficou no intervalo de 70 a 500 metros.

Tabela 3. Etapas e cronograma de execução do projeto.

Etapa	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1) Projetar/desenhar as peças do motor da Fase A	X											
2) Projetar/desenhar as peças da cápsula Titã		X										
3) Primeira sessão de testes de resistência			X									
4) Segunda sessão de testes de resistência				X								
5) Fazer testes de sistemas da cápsula Titã					X							
6) Primeira sessão de testes estáticos						X						
7) Segunda sessão de testes estáticos							X					
8) Primeiro voo-teste do minifoguete								X				
9) Segundo voo-teste do minifoguete										X		
10) MARATONA Brasileira de Minifoguetes												X

Tabela 4. Lista de testes do Grupo de Foguetes Carl Sagan
(atualizado em 24 Set 2020)

Ano	TC	TE	TP	TR	TS	TT	LT	Total
2005							8	8
2006		15					9	24
2007		15						15
2008		28					12	40
2009		18					9	27
2010		51			43		41	135
2011		11		15	1		123	150
2012	22	81		21				124
2013		131	19	26	83		48	307
2014	2	135	46	30	50		74	337
2015	9	343	14	35	34	12	83	530
2016		241	8	26	34		102	411
2017		76	3	16	29		74	198
2018		51	4	10	52		53	170
2019		66		10	27		47	150
2020		19			9		22	50
Total	33	1281	94	189	362	12	705	2676

Tipos de teste:

TC = teste de calibração de sensores

TP = teste de propelente

TS = teste de sistema

LT = lançamento (TV = teste de voo)

TE = teste estático com medida de força x tempo

TR = teste de resistência

TT = teste em túnel de vento

Enquanto cursava a graduação em engenharia mecânica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis, o proponente do presente projeto fundou a equipe denominada Laboratório de Atividades Espaciais (LAE). Esta equipe foi constituída principalmente por quatro estudantes de engenharia mecânica e atuou de 1988 a 1990. O LAE montou e lançou kits comerciais do foguetemodelo Sondinha II, fabricou e lançou o minifoguete X-1 (IAE, 1976), desenvolveu o motor-foguete Netuno-R com propelente KNSu fazendo vários testes de resistência e estáticos, desenvolveu um banco estático mecânico, desenvolveu sistemas de recuperação com paraquedas, e lançou diversos minifoguetes com o motor Netuno-R. Estima-se que o apogeu alcançado pelos minifoguetes ficou no intervalo de 40 a 600 metros.

Já como professor na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba, o proponente do presente projeto fundou em 2005 e coordena até hoje o Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS), que já foi apresentado nos itens anteriores desse projeto.

Em resumo, o proponente do presente projeto tem 21 anos de experiência na orientação e coordenação de grupos de foguetes.

iv. Adequação da infraestrutura existente ou proposta às atividades planejadas.

Para realizar testes de resistência, em solo, usamos uma área grande, em região pouco povoada, que pertence ao Governo do Estado do Paraná e fica na cidade de Piraquara, vizinha a Curitiba. Esta área é tão adequada que parte do Festival Brasileiro de Minifoguetes de 2019 foi realizado lá, com lançamentos de minifoguetes para apogeus de até 1 km. Utilizamos esta área desde Nov/2016.

Para realizar testes estáticos e testes de sistemas, dispomos do Laboratório de Máquinas Hidráulicas da UFPR. Temos feito testes neste laboratório desde Set/2006.

Para realizar os testes de voo com apogeu acima de 1 km, contamos com a colaboração dos proprietários de uma fazenda em Campo Largo (PR), a 80 km de Curitiba, que usamos desde 2017. Neste local, temos permissão do CINDACTA-II da Aeronáutica para realizar voos até 5 km de apogeu, portanto, adequado para realizar os voos-teste do presente projeto.

A sede do GFCS é o Laboratório de Atividades Espaciais (LAE), que fica dentro do Campus Centro Politécnico da UFPR em Curitiba. No LAE são montadas cápsulas dos minifoguetes, feitas reuniões, preparado e carregado propelente KNSu nos motores, armazenados motores carregados, guardadas peças de motores e outros componentes etc. O GFCS também dispõe do Laboratório de Experimentação Numérica (LENA), que fica no mesmo prédio do LAE. No LENA ficam alguns membros do GFCS e dispõe-se de infraestrutura computacional para projeto e análise de motores e minifoguetes. O LAE e LENA foram fundados e são coordenados pelo proponente do presente projeto.

Em resumo, temos locais adequados para realizar com segurança os experimentos necessários à execução deste projeto, bem como os equipamentos necessários.

7. Recursos Solicitados – Orçamento Detalhado

a. Detalhamento adequado dos itens necessários;

Para executar as dez etapas do projeto, será necessário fabricar n mínimo as seguintes quantidades de peças:

- 10 tubos de motor
- 10 tampas de motor
- 10 tubeiras de motor
- 2 punções

E será necessário adquirir os seguintes equipamentos e componentes:

- 1 localizador
- 2 altímetros
- outros

b. Relação entre itens e atividades propostas;

As 30 peças de motor (tubos, tampas e tubeiras) são necessárias para executar os 15 testes previstos nas dez etapas do projeto, sendo 8 testes de resistência, 4 testes estáticos e 3 lançamentos. Além disso, é necessário fabricar dois punções para prensar o propelente KNSu dentro dos tubos.

O localizador será usado a bordo da cápsula Titã para indicar a posição do minifoguete após cada lançamento.

Os dois altímetros serão usados a bordo da cápsula Titã para registrar a trajetória do minifoguete bem como acionar dois eventos do sistema de recuperação. Pretende-se usar os dois altímetros em cada voo para haver redundância no sistema de recuperação visando evitar acidentes e danos ao minifoguete.

Os outros itens poderão ser tubos de fibra de carbono e PVC, parafusos, paraquedas, espumas, fitas adesivas, lacres, squibs, o-rings, fertilizante etc necessários para a cápsula Titã e a execução dos testes.

c. Detalhamento financeiro:

CUSTEIO: material de consumo: R\$ 500

CUSTEIO: serviços de terceiros – pessoa jurídica: usinagem de no mínimo as seguintes peças do motor Saturno-Gama:

- 10 tubos de motor R\$ 2.000
- 10 tampas de motor R\$ 2.000
- 10 tubeiras de motor R\$ 4.000
- 2 punções R\$ 500

CAPITAL: equipamentos:

- 1 localizador R\$ 500
- 2 altímetros R\$ 500

Especificação detalhada de cada item		1º Semestre 2021 Valor R\$	2º Semestre 2021 Valor R\$	Total Valor R\$
Itens de Custeio	Material de consumo, componentes e/ou peças de reposição de equipamentos	500		500
	Serviços de terceiros – pagamento de pessoa jurídica e pagamento de pessoa física.	8.500		8.500
	Total Parcial Custeio	9.000		9.000
Itens de Capital	Equipamentos	1.000		1.000
	Materiais			
	Total Parcial Capital	1.000		1.000
TOTAL GERAL		10.000		10.000

Referências

FOLTRAN, A. C.; MORO, D. F.; SILVA, N. D. P.; FERREIRA, A. E. G.; ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Burning rate measurement of KNSu propellant obtained by mechanical press. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 7:193-199, 2015. Disponível no link http://ftp.demec.ufpr.br/CFD/artigos_revistas/2015_Foltran_Moro_Silva_Ferreira_Araki_Marchi_JATM.pdf. Acesso em 31 Out 2020.

IAE - INSTITUTO DE ATIVIDADES ESPACIAIS. **II Reunião nacional de clubes espaciais; projeto X-1**. São José dos Campos, 1976. 72 p.

MARCHI, C. H. **Testes estáticos de 27 Jul e 13 Set 2010 de motores-foguete do tipo BT de espaçomodelos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Disponível no link http://ftp.demec.ufpr.br/CFD/projetos/aen2/relatorio_TE_motores_BT_2010_Jul_e_Set_v4.pdf. Acesso em 27 Out 2020.

MARCHI, C. H. **Relatório técnico final do projeto Desenvolvimento de kit didático de minifoguetes para difusão e popularização da Astronáutica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011. 39 p. Disponível no link http://ftp.demec.ufpr.br/CFD/projetos/aen2/relatorio_final_projeto_AEN2_CNPq_2008_v12.pdf. Acesso em 31 Out 2020.

MARCHI, C. H. **Minifoguete de baixo custo do LAE-GFCS/UFPR/2018**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019. Disponível no link <http://fogueteufpr.blogspot.com/2019/12/minifoguete-de-baixo-custo-do-lae.html>. Acesso em 2 Nov 2020.

MARCHI, C. H. **Recordes de motores-foguete do GFCS – LAE / UFPR**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020a. Disponível no link <http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/07/recordes-de-motores-foguete-do-gfcs-lae.html>. Acesso em 1º Nov 2020.

MARCHI, C. H. **Recordes Brasileiros de Minifoguetes**. Curitiba: Associação Brasileira de Minifoguetes – BAR, 2020b. 17ª ed. 2 p. Disponível no link http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Recordes/2020-01-02_Recordes-BAR-17_resumo.pdf. Acesso em 1º Nov 2020.

MARCHI, C. H. **Recordes de apogeu de minifoguetes do GFCS – LAE / UFPR**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020c. Disponível no link <http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/03/recordes-de-apogeu-de-minifoguetes.html>. Acesso em 2 Nov 2020.

MARCHI, C. H. **751 metros: novo recorde brasileiro de minifoguete com motor comercial da classe D**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020d. Disponível no link <http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/01/751-metros-novo-recorde-brasileiro-de.html>. Acesso em 25 Nov 2020.

MARCHI, C. H. **1219 metros: recorde brasileiro de apogeu para minifoguete com motor não comercial da classe H**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020e. Disponível no link <http://fogueteufpr.blogspot.com/2020/11/1219-metros-recorde-brasileiro-de.html>. Acesso em 26 Nov 2020.

MORO, D. F.; MARCHI, C. H.; ANDRADE E PAULA, J. R.; MARQUES, A. Desempenho experimental de sete tipos de divergente de tubeira de motor-foguete a propelente sólido. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014. Disponível no link http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Trabalhos/2014_Moro_Marchi_Andrade-Paula_Marques_SAB_2014.pdf. Acesso em 27 Out 2020.