



Relatório técnico final do projeto

Desenvolvimento de kit didático de minifoguetes para difusão e popularização da Astronáutica

AEN-2

Processo CNPq 550729/2008-9

Período: Ago/2008 a Jul/2011

Palavras-chave: foguete, espaçomodelo, educação, engenharia aeroespacial, espaçomodelismo

Projeto de ensino financiado pelo
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
Edital MCT/CNPq 42/2007

Carlos Henrique Marchi

Coordenador do projeto

Professor associado da

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Endereço: Caixa postal 19040

81531-980, Curitiba, PR

Telefone: (41) 3361-3126

Fax: (41) 3361-3701

e-mail: marchi@ufpr.br

Curitiba, 30 de setembro de 2011.

RESUMO

Este relatório resume as atividades desenvolvidas com minifoguetes na UFPR desde o ano 2005; o apoio financeiro do CNPq iniciou-se em 2008. Os objetivos principais do projeto submetido e aprovado pelo CNPq em 2008 eram: (1) desenvolver um kit didático de minifoguetes com diversas configurações geométricas, motores e massas para facilitar o entendimento da teoria e prática envolvidas nos princípios da engenharia aeroespacial; (2) escrever um livro sobre espaçomodelismo e os fundamentos teóricos da engenharia aeroespacial; e (3) através de exposições públicas de lançamento de espaçomodelos, *site* na internet, curso e filme-documentário despertar vocações para carreiras científicas e tecnológicas, e difundir e popularizar o espaçomodelismo no Brasil. A parte prática do projeto resultou em 197 testes estáticos de cinco classes de motores e 202 lançamentos de vários tipos de espaçomodelos, totalizando 399 experimentos realizados de junho de 2005 a agosto de 2011. Os resultados principais obtidos com a execução deste projeto foram: (a) caracterizado o desempenho de quatro tipos de motores para espaçomodelos, que são atualmente comercializados no Brasil; (b) concebido um kit de minifoguetes composto por sete efeitos que são considerados mais didáticos para se entender, facilmente e na prática, conceitos fundamentais sobre engenharia de foguetes; (c) caracterizado o desempenho de seis tipos de espaçomodelos, um deles para dois tipos de motores, que são atualmente comercializados no Brasil; (d) treinados 80 alunos de engenharia mecânica através da disciplina “TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos”, que participaram da realização de 74 testes estáticos de motores e 71 lançamentos de minifoguetes, totalizando 145 experimentos; (e) o público que participou da realização dos testes estáticos de motores e lançamentos de minifoguetes do projeto foi de 336 pessoas; (f) preparada uma apostila com 119 páginas que é adotada na disciplina “TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos”; (g) criado o *site* www.foguete.ufpr.br, cujo conteúdo inclui o material da disciplina do item d, bibliografia adicional e *softwares* usados na disciplina, apostila do item f, dados, vídeos, fotos, resultados e relatórios dos testes estáticos e lançamentos do projeto; e (h) criada infra-estrutura, procedimentos e equipe para caracterizar adequadamente o desempenho de motores e espaçomodelos; tudo isso está disponível às empresas nacionais.

SUMÁRIO

1	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	4
2	RESULTADOS DO KIT DE MINIFOGUETES	4
2.1	Caracterização de motores	4
2.2	Lançamentos realizados	10
2.3	Kit de minifoguetes	10
2.3.1	Efeito do vento e da variação do motor	11
2.3.2	Efeito da classe do motor	14
2.3.3	Efeito da massa de decolagem do espaçomodelo	15
2.3.4	Efeito da estabilidade do espaçomodelo	16
2.3.5	Efeito do diâmetro do espaçomodelo	17
2.3.6	Efeito da geometria do nariz do espaçomodelo	19
2.3.7	Efeito do sistema de recuperação do espaçomodelo	20
2.4	Caracterização de espaçomodelos comerciais	22
2.4.1	Sondinha II da Bandeirante	22
2.4.2	DI da Spacotech com motor da classe B	23
2.4.3	DI da Spacotech com motor da classe C	25
2.4.4	VLS da Spacotech com 1 motor da classe C	26
2.4.5	LMS da Spacotech com motor da classe C	27
2.4.6	Beta da Spacotech com motor da classe C	28
2.4.7	Super DI da Spacotech com motor da classe C	30
3	OUTROS RESULTADOS	31
3.1	Ensino	31
3.2	Exibições	31
3.3	Livro	32
3.4	Filme	32
3.5	Artigos	33
3.6	<i>Site</i>	33
3.7	Fabricante	34
4	OUTRAS INFORMAÇÕES	34
4.1	Equipes	34
4.1.1	Testes estáticos	34
4.1.2	Montagem de espaçomodelos	34
4.1.3	Lançamentos	35
4.1.4	<i>Site</i>	35
4.2	<i>Softwares</i> usados e implementados	35
4.3	Dificuldades principais	35
4.4	Perspectivas futuras	36
4.5	Recordes	36
5	AGRADECIMENTOS	37
6	DEDICATÓRIA	39
7	CONCLUSÃO	39

1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral proposto em 2008 para este projeto era divulgar e difundir, para estudantes e o público em geral, a astronáutica, engenharia aeroespacial, engenharias, física, química, matemática e o programa espacial brasileiro.

Os objetivos específicos eram:

- 1) Desenvolver um kit didático de minifoguetes para os estudantes entenderem na prática, através de lançamentos, os princípios da engenharia aeroespacial. O conceito considerado aqui para kit é o de um conjunto de minifoguetes, com diversas configurações geométricas, motores e massas que permitam entender a teoria e a prática envolvidas nos princípios da engenharia aeroespacial
- 2) Escrever um livro sobre o conteúdo de um curso de espaçomodelismo, ministrado na Universidade Federal do Paraná, para estudantes do ensino médio e superior entenderem os fundamentos teóricos da engenharia aeroespacial, e confrontá-los com resultados experimentais.
- 3) Através de exposições públicas de lançamento de espaçomodelos, *site* na internet e filme-documentário despertar vocações para carreiras científicas e tecnológicas e difundir e popularizar o espaçomodelismo no Brasil.
- 4) Treinar cerca de 30 alunos de graduação nos princípios da engenharia aeroespacial.
- 5) Disponibilizar às indústrias nacionais infra-estrutura para teste e qualificação de motores destinados a minifoguetes nacionais.

Minifoguetes (MF) são foguetes de pequeno porte. Eles usam propelente sólido, como o foguete brasileiro VLS. Espaçomodelos (EM) são minifoguetes feitos de materiais não-metálicos e dotados de motores comerciais. Eles podem ter até centenas de gramas de massa, geralmente menos de 10 gramas de propelente, e podem atingir centenas de metros de altura.

2 RESULTADOS DO KIT DE MINIFOGUETES

2.1 CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES

A Tabela 1 resume os 197 testes estáticos (TE) realizados durante este projeto. O significado dos termos usados nesta tabela é o seguinte: Data é a data em que se realizaram os testes estáticos; TEd é o número total de testes feitos na data mencionada; Classe é a classe efetiva do motor testado, isto é, a que se mediu de fato em banco estático; a interrogação significa que a classe é a informada pelo fabricante, sem ter sido comprovada neste projeto; Fabricante é a abreviação do fabricante do motor (SE = Saber Eletrônica; ITA = ITA Aeroespacial; FE = José Félix de Santana; e BT = Bandeirante); Mês/Ano é a data de fabricação do motor; a interrogação significa que não há certeza sobre a informação; TE_p é o número de testes feitos na data mencionada para cada classe específica de motor. Atualmente conhece-se apenas uma empresa nacional que fabrica comercialmente motores de espaçomodelos, a Bandeirante (BT), de Pernambuco.

Foram gerados oito relatórios técnicos descrevendo quase todos os testes estáticos realizados. Eles estão disponíveis na internet no item Testes estáticos do *site* www.foguete.ufpr.br.

A Figura 1 mostra fotos de alguns dos motores das classes A6-0, B6-0, C6-0 e C6-5, fabricados pela Bandeirante, e que foram mais usados no projeto.

A Tabela 2 apresenta os valores médios e suas respectivas incertezas expandidas (U) dos seguintes dados sobre cada tipo de motor-foguete testado: De = diâmetro externo; Lt = comprimento total; Mo = massa total do motor antes da queima do propelente; Mf = massa total do motor depois da queima do propelente; e Mp = massa de propelente.

Tabela 1. Resumo sobre os 197 testes estáticos realizados de Set/2006 a Abr/2011.

Data	Ted	Classe	Fabricante	Mês/Ano	TEp
11 Set 2006	4	A4	SE	?1990	1
		B9	SE	?1990	2
		B8	ITA	?1986	1
5 Out 2006	11	½A3	SE	?1990	1
		A3 a A5	SE	?1990	5
		B7 a B9	SE	?1990	5
6 Jun 2007	15	½A3	SE	?1990	1
		A3 e A4	SE	?1990	3
		B7	SE	?1990	8
		A20	ITA	?1986	1
		B8 e B22	ITA	?1986	2
5 Mai 2008	5	B4, B7 e B8	SE	?1990	5
13 Out 2008	5	A3 e A4	SE	?1990	2
		A3	BT	2004	1
		B6	BT	2004	1
		C9	BT	2004	1
27 Nov 2008	18	A3	BT	Out/2008	6
		B3 e B4	BT	Out/2008	6
		C3	BT	Out/2008	6
28 Set 2009	18	A4	BT	Jul/2009	6
		B4	BT	Jul/2009	6
		C4	BT	Jul/2009	6
20 Jan 2010	30	?A6-4	BT	Out/2009	5
		?B6-4	BT	2004	5
		?B6-4	FE	Jul/2008	5
		?B6-4	BT	Out/2008	5
		?C6-5	BT	Out/2008	5
		?C6-5	BT	Out/2009	5
22 Mar 2010	12	½A4 e A4	BT	Jul/2009	4
		B4 e B5	BT	Jul/2009	4
		C4	BT	Jul/2009	4
27 Jul 2010	40	A3 e A4	BT	Abr/2010	10
		B3 e B4	BT	Abr/2010	10
		C3	BT	Abr/2010	10
		?C6-5	BT	Fev/2010	10
13 Set 2010	12	A3 e A4	BT	Abr/2010	3
		B4	BT	Abr/2010	3
		C3 e C4	BT	Abr/2010	3
		?C6-5	BT	Fev/2010	3
14 Abr 2011	11	C4-3, C4-4 ou C4-6	BT	Fev/2010	11
30 Abr 2011	16	?C6	BT	Abr/2010	1
		?C6-7	BT	Nov/2010	5
		?C20	BT	Abr/2011	5
		?D20	BT	Abr/2011	5



Figura 1. Fotos mostrando os motores-foguete BT do tipo A6-0, B6-0, C6-0 e C6-5.

Tabela 2. Valores médios e suas incertezas (U) dos dados dos motores BT de 2010.

Motores	A6-0	B6-0	C6-0	C6-5
De (mm)	17,49	17,59	17,49	17,63
U de De (mm)	0,13	0,39	0,47	0,42
U de De (%)	0,76	2,2	2,7	2,4
Lt (mm)	82,3	70,4	78,2	79,2
U de Lt (mm)	1,4	1,4	2,7	3,0
U de Lt (%)	1,7	2,0	3,5	3,8
Mo (g)	16,2	17,24	22,3	22,8
U de Mo (g)	1,3	0,44	2,0	1,7
U de Mo (%)	8,2	2,6	9,0	7,2
Mf (g)	13,7	12,33	12,6	11,5
U de Mf (g)	1,5	0,70	1,8	1,2
U de Mf (%)	11	5,6	14	11
Mp (g)	2,50	4,90	9,64	11,18
U de Mp (g)	0,55	0,74	0,94	0,96
U de Mp (%)	22	15	9,8	8,6

A Tabela 3 apresenta os valores médios e suas respectivas incertezas expandidas (U) dos seguintes resultados sobre cada tipo de motor-foguete testado: classe = classificação do motor segundo It, onde A = 1,26 a 2,50 Ns, B = 2,51 a 5,00 Ns, e C = 5,01 a 10,00 Ns; It = impulso total; Emed = empuxo médio; tq = tempo de queima do propelente; Is = impulso específico médio; Emax = empuxo máximo; fm = fluxo de massa médio do propelente; e c = velocidade de ejeção efetiva média dos gases.

Tabela 3. Valores médios e suas incertezas (U) dos resultados dos motores BT de 2010.

Motores	A6-0	B6-0	C6-0	C6-5
Classe	A4	B3	C3	C4-3
It (Ns)	1,61	3,43	6,76	7,5
U de It (Ns)	0,33	0,65	0,77	1,0
U de It (%)	21	19	11	14
Emed (N)	3,82	3,45	3,18	3,81
U de Emed (N)	0,90	0,33	0,39	0,25
U de Emed (%)	24	9,6	12	6,7
tq (s)	0,42	0,99	2,13	1,96
U de tq (s)	0,11	0,18	0,24	0,29
U de tq (%)	25	18	11	15
Is (s)	66	71,4	71,6	-
U de Is (s)	11	4,0	4,9	-
U de Is (%)	16	5,6	6,8	-
Emax (N)	7,0	6,8	7,3	8,1
U de Emax (N)	1,5	2,1	1,8	2,6
U de Emax (%)	22	31	25	32
fm (g/s)	5,9	4,94	4,53	-
U de fm (g/s)	1,0	0,46	0,31	-
U de fm (%)	17	9,3	6,9	-
c (m/s)	650	699	701	-
U de c (m/s)	100	39	48	-
U de c (%)	16	5,6	6,9	-

As Figuras 2 a 7 mostram fotos de alguns motores BT durante a realização de seus testes estáticos. As Figuras 8 a 11 mostram curvas de empuxo típicas obtidas destes motores em testes estáticos.



Figura 2. Foto mostrando o motor BT-80 (A6-0) durante o seu teste estático.



Figura 3. Foto mostrando o motor BT-90 (B6-0) durante o seu teste estático.



Figura 4. Foto mostrando o motor BT-100 (C6-0) durante o seu teste estático.



Figura 5. Foto mostrando o motor BT-123 (C6-5) durante a queima da sua carga propulsora.



Figura 6. Foto mostrando o motor BT-123 (C6-5) durante a queima da sua carga temporizadora.



Figura 7. Foto mostrando o motor BT-123 (C6-5) durante a queima da sua carga ejetora.

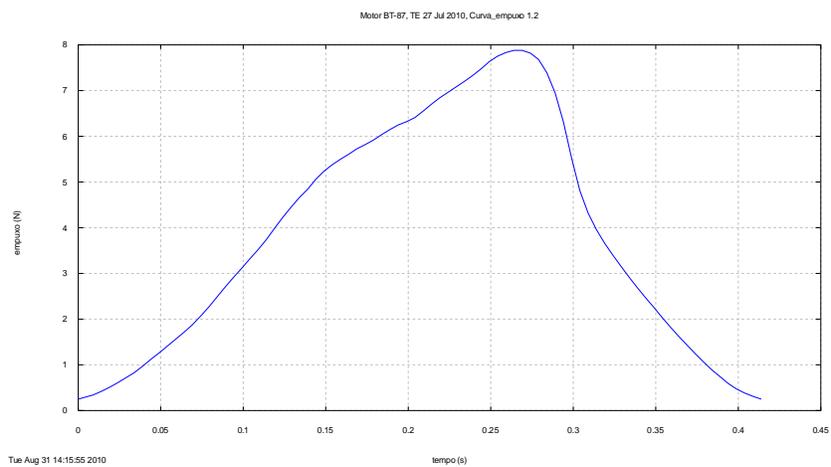


Figura 8. Curva empuxo *versus* tempo processada do motor-foguete BT-87 (A6-0).

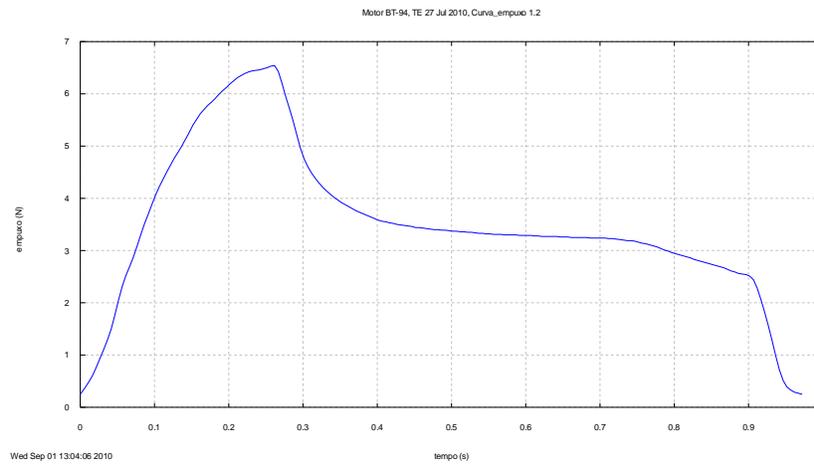


Figura 9. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-94 (B6-0).

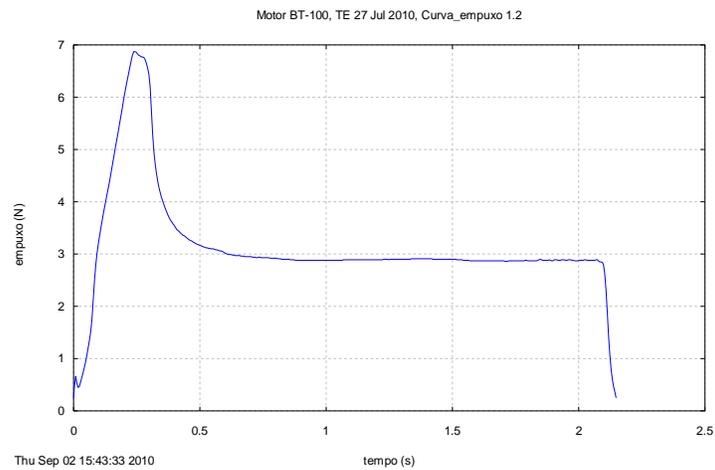


Figura 10. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-100 (C6-0).

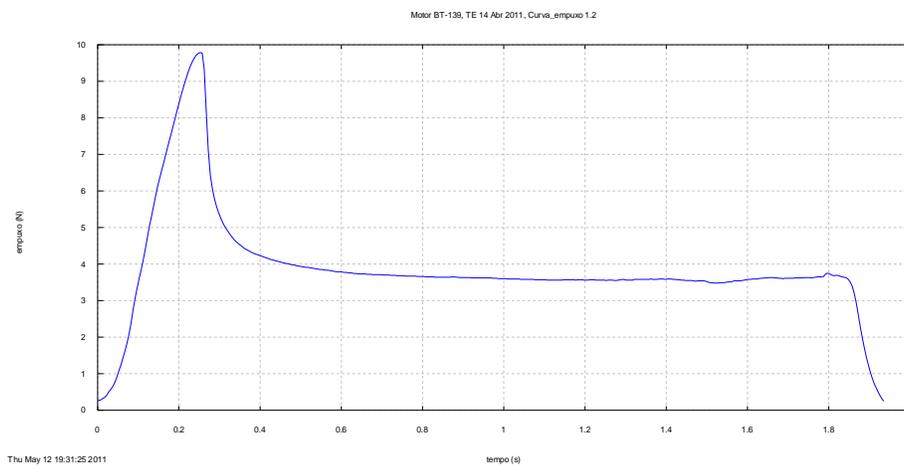


Figura 11. Curva empuxo versus tempo processada do motor-foguete BT-139 (C6-5).

2.2 LANÇAMENTOS REALIZADOS

As Tabelas 4 e 5 resumem os 202 lançamentos (LT) realizados durante este projeto. O significado dos termos usados nestas tabelas é o seguinte: Data é a data em que se realizaram os lançamentos; LTd é o número total de lançamentos feitos na data mencionada; EM é o nome do espaçomodelo lançado, onde a numeração se refere a uma sequência de EMs do mesmo tipo; Motor é a classe efetiva do motor testado, isto é, a que se mediu de fato em banco estático; a interrogação significa que a classe é a informada pelo fabricante, sem ter sido comprovada neste projeto; LTp é o número de lançamentos feitos na data mencionada para cada tipo de EM; e Objetivo é o objetivo de cada série de LTs. Atualmente conhece-se apenas dois fabricantes nacionais comerciais de espaçomodelos, a Bandeirante (BT), de Pernambuco, e a Spacotech (Mi), de São Paulo.

Para cada dia de lançamentos de espaçomodelos, foi gerado um relatório resumido dos dados e resultados. Os relatórios estão disponíveis na internet no item Lançamentos do [site www.foguete.ufpr.br](http://www.foguete.ufpr.br), incluindo fotos relacionadas.

Tabela 4. Resumo sobre os 79 lançamentos realizados de 2005 a 2010.

Data	LTd	EM	Motor	LTp	Objetivo
19 Jun 2005	8	α -1 e 2	A3/BT/2005	2	Trabalho da disciplina EM para obter H máximo
		S2/SE-a1 e a2	A3/BT/2005	2	
		β -1 e 2	B3/BT/2005	2	
		S2/SE-b1 e b2	B3/BT/2005	2	
15 Nov 2006	9	α -1 a 3	$\frac{1}{2}$ A3,A3 ou A4/SE/?1990	3	Trabalho da disciplina EM para obter H máximo
		β -1 a 3	$\frac{1}{2}$ A3,A3 ou A4/SE/?1990	3	
		S2/SE-19 a 21	$\frac{1}{2}$ A3,A3 ou A4/SE/?1990	3	
22 Jun 2008	6	γ -1 a 3	A4,A5,B7 ou B8/SE/?1990	3	Trabalho da disciplina EM para obter H máximo
		δ -1 a 3	A4,A5,B7 ou B8/SE/?1990	3	
30 Nov 2008	6	ϕ -1 a 3	A4,B7 ou B8/SE/?1990	3	Trabalho da disciplina EM para obter H máximo
		ψ -1 a 3	A4,B7 ou B8/SE/?1990	3	
12 Dez 2009	9	ϵ -1 a 3	A3/BT/2008	3	Trabalho da disciplina EM para obter H máximo
		η -1 a 3	A3/BT/2008	3	
		λ -1 a 3	A3/BT/2008	3	
14 Mar 2010	6	Fita	$\frac{1}{2}$ A4 ou A4/BT/2009	1	H máximo para A4/BT/2009
		Rolha	$\frac{1}{2}$ A4 ou A4/BT/2009	1	Idem
		Durepoxi-1	$\frac{1}{2}$ A4 ou A4/BT/2009	1	Idem
		VLS	$\frac{1}{2}$ A4 ou A4/BT/2009	1	Idem
		α -1/Mi/H	$\frac{1}{2}$ A4 ou A4/BT/2009	1	Testar H bordo
		T-1/Estes/H/PQ	?A6-4/BT/2009	1	Testar H bordo e PQ
1 Mai 2010	6	α -2/Mi/H/PQ	?A6-4/BT/2009	1	Testar H bordo e PQ
		T-2/Estes/H/PQ	?B6-4/FE/2008	1	Idem
		α -3/Mi/H/PQ	?B6-4/FE/2008	1	Idem
		α -4/Mi/H	B4 ou B5/BT/2009	1	Testar H bordo
		α -5/Mi/H/PQ	?C6-5/BT/2009	1	Testar H bordo e PQ
		Durepoxi-2	B4 ou B5/BT/2009	1	H máximo para B/BT/2009
3 Jun 2010	9	κ -1 a 3	B3 ou B4/BT/2008	3	Trabalho da disciplina EM para obter H máximo
		μ -1 a 3	B3 ou B4/BT/2008	3	
		θ -1 a 3	B3 ou B4/BT/2008	3	
28 Nov 2010	20	DI- σ /Mi-1 a 5	B3 ou B4/BT/2010	5	Caracterizar o EM DI
		Apache- ρ /BT-1 a 5	B3 ou B4/BT/2010	5	Caracterizar o EM Apache
		S2- π /BT-1 a 5	B3 ou B4/BT/2010	5	Caracterizar o EM S2/BT
		S2-v/Fe-1 a 5	B3 ou B4/BT/2010	5	Caracterizar o EM S2/Fe

2.3 KIT DE MINIFOGUETES

Nas sete subseções abaixo, são apresentados o objetivo, metodologia, dados, resultados e conclusão para cada um dos sete efeitos propostos para o kit de minifoguetes. Dentre todos os lançamentos realizados no projeto, estes sete efeitos constituem-se naqueles que são considerados mais didáticos para se entender, facilmente e na prática, conceitos fundamentais sobre engenharia de foguetes.

Tabela 5. Resumo sobre os 123 lançamentos realizados de janeiro a agosto de 2011.

Data	LTD	EM	Motor	LTP	Objetivo
16 Jan 2011	19	NS-1 a 5	A3 ou A4/BT/2010	5	Efeito do nariz para
		NF-1 a 5	A3 ou A4/BT/2010	5	obter H máximo com motor
		NV-1 a 4	A3 ou A4/BT/2010	4	A/BT
		NI-1 a 5	A3 ou A4/BT/2010	5	
13 Fev 2011	12	A-DI/Mi-1 a 5	A3 ou A4/BT/2010	5	Efeito do motor sobre o
		B-DI/Mi-1 a 5	B3 ou B4/BT/2010	5	EM DI/Mi
		C-DI/Mi-1 e 2	C3 ou C4/BT/2010	2	
27 Fev 2011	2	α /Mi/H-6 e 7	C3 ou C4/BT/2010	2	Efeito do U do motor C/BT e vento, e caracterizar o EM α /Mi
27 Mar 2011	8	α /Mi/H-8 a 15	C3 ou C4/BT/2010	8	Idem
16 Abr 2011	5	DI/Mi-8 a 12	C3 ou C4/BT/2010	5	Efeito da massa sobre o EM DI/Mi
26 Abr 2011	10	DI/Mi-1 a 7	C3 ou C4/BT/2010	7	Efeito da massa sobre o EM DI/Mi
		C-DI/Mi-3 a 5	C3 ou C4/BT/2010	3	Efeito do motor sobre o EM DI/Mi
17 Mai 2011	13	VLS/Mi-1 a 4	C3 ou C4/BT/2010	4	Caracterizar o EM VLS/Mi
		LMS/Mi-1 a 4	C3 ou C4/BT/2010	4	Caracterizar o EM LMS/Mi
		TR-1 a 4	A3 ou A4/BT/2010	4	tubo-foguete alternativo
		PH-1	A3 ou A4/BT/2010	1	tubo-foguete alternativo
6 Jun 2011	7	β /Mi-1 a 4	C3 ou C4/BT/2010	4	Caracterizar o EM β /Mi
		SDI/Mi-1 a 3	C3 ou C4/BT/2010	3	Caracterizar o EM SDI/Mi
23 Jun 2011	10	α /Mi/H/PQ-17 a 21	C4-3,C4-4 ou C4-6/BT/2010	5	Efeito do PQ e massa sobre o EM α /Mi
		α /Mi/PQ-22 a 25	Idem	4	Idem
		α /Mi/PQ/Hg-16	C3 ou C4/BT/2010	1	Testar PQ com cápsula Hg
16 Jul 2011	12	DI/Mi-13 a 24	B3 ou B4/BT/2010	12	Efeito do E (empenas) sobre o EM DI/Mi
6 Ago 2011	17	ME-1 a 4	A3 ou A4/BT/2010	4	Efeito do E (empenas) sobre o EM ME com motor A
		VS/BT-2 a 5	B3 ou B4/BT/2010	4	Efeito do diâmetro do
		DI/Mi-25 a 28	B3 ou B4/BT/2010	4	tubo-foguete sobre H
		α /Mi/H/Fita-26 a 30	C4-3,C4-4 ou C4-6/BT/2010	5	Efeito da Fita e massa
20 Ago 2011	8	ME-5 a 8	A3 ou A4/BT/2010	4	H máximo com motor A/BT
		ME-9 a 12	B3 ou B4/BT/2010	4	H máximo com motor B/BT

2.3.1 EFEITO DO VENTO E DA VARIACÃO DO MOTOR

Objetivo

Mostrar a influência causada pelo vento e pela variação do desempenho de um mesmo tipo de motor sobre o vôo do espaçomodelo.

Metodologia

- O kit do EM α foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacetech.
- Foram montados e lançados 10 EMs sem pára-quedas (Figura 12).
- Cada EM tinha um altímetro eletrônico a bordo (Figura 12) para registrar a trajetória do seu vôo.
- A massa de decolagem foi controlada para que todos os 10 EMs tivessem o mesmo valor.
- Em cada EM α foi usado um motor C6-0/BT/2010.

Nas Tabelas abaixo de Dados, para cada espaçomodelo específico, EM é o seu nome, Mo é a sua massa total de decolagem em gramas, Dm é o seu diâmetro máximo em milímetros, Lt é o seu comprimento total em milímetros, em é a espessura média de suas empenas em milímetros, e U é a incerteza expandida relativa, em percentual do valor médio.

Dados

EM	Mo (g)	Dm (mm)	Lt (mm)	em (mm)
α -6	126,638	25,21	435	1,92
α -7	126,654	25,27	435	1,84
α -8	126,646	24,97	436	2,05
α -9	126,630	25,13	436	1,93
α -10	126,637	25,18	435	1,99
α -11	126,633	25,29	435	2,27
α -12	126,605	25,29	434	1,93
α -13	126,653	25,36	435	1,94
α -14	126,585	25,28	436	2,03
α -15	126,614	25,32	435	2,05
α-médico	126,630	25,23	435	2,00
U (%)	0,04	1,0	0,33	13

Nas Tabelas abaixo de Resultados, para cada espaçomodelo específico, EM é o seu nome, H é o apogeu (isto é, a altura máxima alcançada pelo EM) em metros, t_H é o tempo de vôo entre a decolagem e o apogeu em segundos, t_I é o tempo de vôo entre a decolagem e o retorno ao solo em segundos, ou seja, é o tempo total de vôo do EM, X é a distância entre o ponto de decolagem e o retorno ao solo em metros, e U é a incerteza expandida relativa, em percentual do valor médio.

Resultados

EM	H (m)	t_H (s)	t_I (s)	X (m)
α -6	62,8	4,3	8,0	99
α -7	63,4	4,2	8,0	93
α -8	61,0	4,3	8,1	115
α -9	56,1	4,3	7,4	130
α -10	42,4	3,9	6,6	154
α -11	71,0	4,6	8,6	87
α -12	65,2	4,5	8,2	122
α -13	83,8	4,8	9,2	45
α -14	37,8	3,6	6,0	76
α -15	77,1	4,8	9,0	32
α-médico	62,1	4,3	7,9	95
U (%)	52	20	29	89

**Simulação do efeito da velocidade do vento sobre o EM α -médico com
It médio do motor C6-0/BT/2010**

Vento (km/h)	H (m)	t_H (s)	t_I (s)	X (m)
0	90,0	5,42	9,83	0
1	89,6	5,41	9,78	22
2	88,4	5,38	9,72	43
4	84,0	5,27	9,49	81
8	69,6	4,86	8,71	135
12	53,6	4,36	7,74	158
16	40,1	3,87	6,79	159
20	30,0	3,43	5,95	149
24	22,9	3,06	5,26	135
32	14,5	2,49	4,26	102

Simulação do efeito da variação do desempenho do motor C6-0/BT/2010 sobre o EM α -médio para $C_D = 0,75$

Dado	It (Ns)	tq (s)	Em (N)	t _H (s)	t _I (s)	hq (m)	H (m)
It Min U	5,99	2,130	2,812	4,82	8,54	29	65
It Min real	6,09	2,048	2,973	4,88	8,73	30	70
It Med real	6,76	2,130	3,174	5,34	9,68	35	88
It Max real	7,35	2,108	3,487	5,71	10,51	40	106
It Max U	7,53	2,130	3,535	5,83	10,75	42	111

Na tabela acima, C_D é o coeficiente de arrasto do EM, It é o impulso total, Min é mínimo, Med é médio, Max é máximo, real significa valor medido em banco estático, U significa valor dentro da margem de U, tq é o tempo de queima do motor, Em é o empuxo médio, hq é a altura do EM no fim da queima do motor.

Discussão

Sem considerar o efeito do vento, a variação real do desempenho do motor C6-0/BT/2010 sobre o vôo do EM α pode resultar no apogeu variando entre 70 e 106 m. Assim, a variação percentual do apogeu é de 20% em relação ao apogeu médio de 88 m. Considerou-se aqui a variação máxima real do impulso total (It) medida nos testes estáticos, que foi de 6,09 a 7,35 Ns.

Para os dados fixos do motor, isto é, sem considerar a sua variação de desempenho, o efeito do vento sobre o vôo do EM α pode resultar no apogeu variando entre 30 e 90 m para o vento entre 20 e 0 km/h, respectivamente. Esta faixa de vento é até inferior à velocidade máxima do vento medida nos lançamentos, que alcançou 23,1 km/h. Assim, a variação percentual do apogeu é de 50% em relação ao apogeu médio de 60 m.

Conclusão

O vento e a variação do desempenho do motor têm efeito grande sobre o vôo do espaçomodelo.



Figura 12. EMs α -6 a 15, altímetro eletrônico de bordo e lançamento de um EM α .

2.3.2 EFEITO DA CLASSE DO MOTOR

Objetivo

Mostrar a influência causada pela classe do motor sobre o desempenho do espaçomodelo.

Metodologia

- Foi empregado o EM DI com motores das classes A, B e C da Bandeirante (BT). Externamente todos os EMs são iguais.
- O kit do EM DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacetech.
- Foram montados e lançados 5 EMs para cada uma das três classes de motores.
- A massa de decolagem foi controlada para que todos os 15 EMs (Figura 13) tivessem o mesmo valor.

Dados

Tipo do EM DI	A	B	C
Espaçomodelo específico	A-5	B-1	C-2
Motor	A6-0/BT/2010	B6-0/BT/2010	C6-0/BT/2010
Massa de decolagem (g)	67,58	67,59	67,62
Massa de propelente (g)	2,72	4,85	9,55
Massa final (g)	64,86	62,74	58,07
Diâmetro máximo do EM (mm)	20,05	20,19	20,13
Comprimento total do EM (mm)	378	378	378

Resultados

Tipo do EM DI	A	B	C
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	4,90	8,84	15,41
Apogeu estimado (m)	26	84	244



Figura 13. EMs DI A-1 a 5, B-1 a 5 e C-1 a 5, e o EM DI C-5 na rampa de lançamento.

Conclusão

A classe do motor tem efeito muito grande sobre o desempenho do espaçomodelo. Em relação ao apogeu atingido pelo EM DI com motor da classe C, os EMs com motores das classes B e A atingiram 34% e 11% respectivamente. Em outras palavras, o EM DI com motor da classe C atingiu

apogeu que é cerca de 3 vezes o apogeu do EM com motor da classe B, e cerca de 9 vezes o apogeu do EM com motor da classe A.

2.3.3 EFEITO DA MASSA DE DECOLAGEM DO ESPACOMODELO

Objetivo

Mostrar a influência causada pela massa de decolagem sobre o desempenho do espaçomodelo.

Metodologia

- Foi empregado o EM DI com motor C6-0/BT/2010 e quatro valores de massa (M) de decolagem.
- Externamente todos os 17 EMs são iguais.
- O kit do EM DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacetech.
- Foram montados e lançados 4 EMs para os três maiores valores de massa (Figura 14), e 5 EMs para o menor valor de massa (EMs DI C-1 a 5, da Figura 13).

Dados

Tipo do EM DI	M1	M2	M3	M4
Espaçomodelo específico	C-2	DI-1	DI-8	DI-11
Mo = Massa de decolagem (g)	67,62	88,05	122,06	160,17
Mo / Mo do C-2	1,0	1,30	1,81	2,37
Diâmetro máximo do EM (mm)	20,13	20,33	20,32	20,32
Comprimento total do EM (mm)	378	377	376	380

Resultados

Tipo do EM DI	M1	M2	M3	M4
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	15,41	13,24	9,90	7,46
H = apogeu estimado (m)	244	177	92	47
H / H do C-2	1,0	0,73	0,38	0,19

Conclusão

A massa de decolagem tem efeito muito grande sobre o desempenho do espaçomodelo. Em relação ao EM com o menor Mo, o aumento de 30%, 81% e 137% de Mo reduz o apogeu em 27%, 62% e 81% respectivamente.



Figura 14. EMs DI-1 a 12.

2.3.4 EFEITO DA ESTABILIDADE DO ESPAÇOMODELO

Objetivo

Mostrar a influência causada pela estabilidade do espaçomodelo.

Metodologia

- A versão original do EM DI tem 3 empenas de resina epoxi (Figura 15, EM DI-14), que foi comparada com duas outras geometrias de empenas feitas de madeira balsa (Figura 15, EM DI-19 e 24). Os demais componentes do EM DI foram exatamente os mesmos.
- Em cada EM DI foi usado um motor B6-0/BT/2010.
- O kit do EM DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacetech.
- Foram montados e lançados 4 EMs para cada um dos três valores de margem estática (E): E = 4 nos EMs DI-13 a 16; E = 1 nos EMs DI-17 a 20; e E = 0 nos EMs DI-21 a 24.
- A massa de decolagem foi controlada para que todos os 12 EMs tivessem o mesmo valor.

Dados

Margem estática (E) do EM DI	E = 4	E = 1	E = 0
Espaçomodelo específico	DI-15	DI-19	DI-24
Massa de decolagem (g)	57,64	57,64	57,65
Diâmetro máximo do EM (mm)	20,49	20,38	20,45
Comprimento total do EM (mm)	378	379	381
Raiz de cada empena (mm)	24	12	20
Ponta de cada empena (mm)	19	10	14
Envergadura de cada empena (mm)	38	18	14
Espessura média das 3 empenas (mm)	2,04	1,67	1,67

Resultados

Margem estática (E) do EM DI	E = 4	E = 1	E = 0
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	10,12	6,51	6,30
Atitude na subida (Figura 16)	OK	Instável	Instável
Atitude na descida (Figuras 17 e 18)	OK	De lado	De lado
Apogeu estimado (m)	112	33	40

Conclusão

A margem estática (E) inadequada pode tornar o vôo instável e reduzir muito o apogeu do espaçomodelo: as reduções foram superiores a 64%.

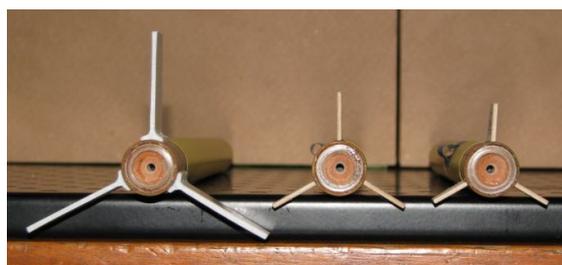


Figura 15. Empenas dos EMs DI-14, 19 e 24.

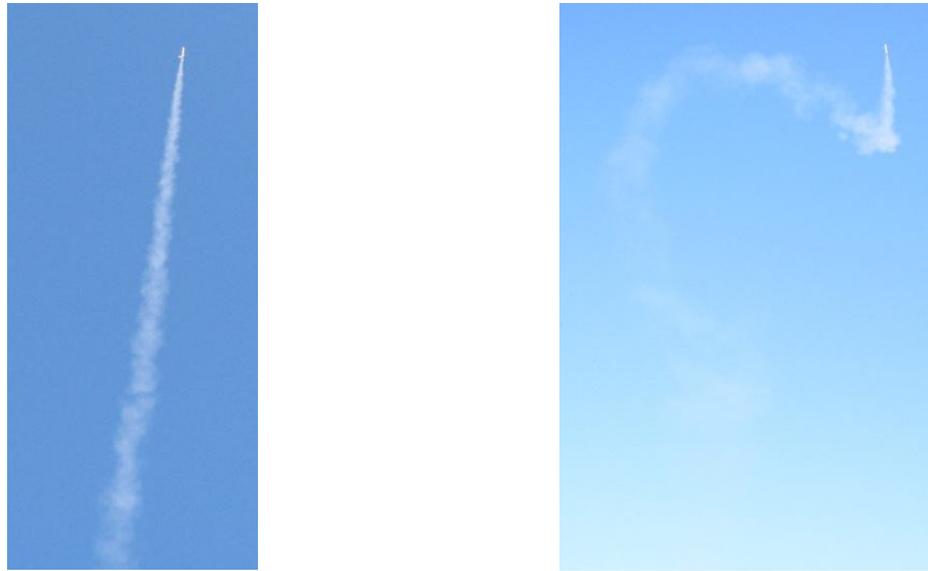


Figura 16. Vôo reto do EM DI-16 e instável do DI-22 na subida.

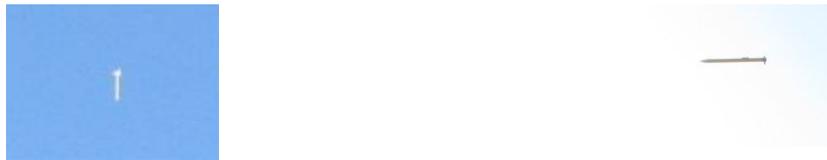


Figura 17. Vôo reto do EM DI-16 e de lado do DI-19 na descida.



Figura 18. Impacto de nariz no solo do EM DI-14 e de lado do DI-24.

2.3.5 EFEITO DO DIÂMETRO DO ESPACOMODELO

Objetivo

Mostrar a influência causada pelo diâmetro do espaçomodelo.

Metodologia

- A versão original do EM VS-40 tem 4 empenas do tipo retangular. Para os lançamentos, foram usadas as mesmas empenas do EM DI e quantidade (3), visando reduzir as diferenças geométricas entre os dois tipos de EMs (Figura 19).
- O kit do EM DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacetech. O kit do EM VS-40 foi comprado diretamente do seu fabricante, a Bandeirante.
- Em cada EM foi usado um motor B6-0/BT/2010.
- Foram montados e lançados 4 EMs de cada tipo.
- A massa de decolagem foi controlada para que todos os 8 EMs tivessem o mesmo valor.

Dados

Tipo de EM	DI	VS-40
Espaçomodelo específico	DI-28	VS-2
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	20,55	34,39
Dm / Dm do DI-28	1,00	1,67
Massa de decolagem (g)	59,52	59,52
Comprimento total do EM (mm)	369	359

Resultados

Tipo de EM	DI	VS-40
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	10,52	9,64
H = apogeu estimado (m)	122	101
H / H do VS-2	1,21	1,00

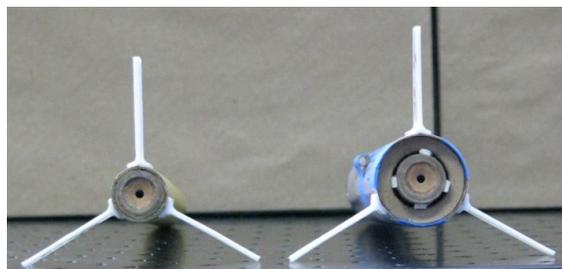


Figura 19. EMs DI-25 e VS-40/2.

Conclusão

O diâmetro do espaçomodelo tem efeito pequeno sobre o desempenho do espaçomodelo. Em relação ao diâmetro do EM DI, ao se aumentar em 67% o diâmetro do EM (VS-40), o apogeu foi reduzido em 17%. Em outras palavras, em relação ao diâmetro do EM VS-40, ao se reduzir em 40% o diâmetro do EM (DI), o apogeu foi aumentado em 21%.

2.3.6 EFEITO DA GEOMETRIA DO NARIZ DO ESPACOMODELO

Objetivo

Mostrar a influência causada pela geometria do nariz sobre o desempenho do espaçomodelo.

Metodologia

- Foi empregado um EM próprio cujo corpo é constituído pelo motor A6-0/BT/2010, três empenas de madeira balsa, um tubo-guia e quatro tipos de narizes (Figura 20).
- Externamente todos os EMs são iguais, exceto quanto ao nariz.
- Foram montados 5 EMs para cada um dos quatro tipos de narizes.
- A massa de decolagem foi controlada para que todos os 20 EMs tivessem aproximadamente o mesmo valor.

Dados

Tipo de EM	NS	NF	NV	NI
Espaçomodelo específico	NS-5	NF-1	NV-4	NI-1
Mo = Massa de decolagem (g)	20,22	20,47	20,08	20,21
Mo / Mo do NV-4	1,007	1,019	1,000	1,006
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	17,73	19,74	20,76	18,31
Dm / Dm do NS-5	1,000	1,113	1,171	1,033
Comprimento total do EM (mm)	101	113	114	126

Resultados

Tipo de EM	NS	NF	NV	NI
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	11,65	12,26	10,61	11,87
H = apogeu estimado (m)	158	176	130	165
H / H do NV-4	1,22	1,35	1,00	1,27

Conclusão

A geometria do nariz do espaçomodelo tem efeito grande sobre o desempenho do espaçomodelo. Em relação ao apogeu atingido pelo EM NV, a simples alteração do nariz resultou em aumentos de 22%, 27% e 35% respectivamente para os EMs NS, NI e NF.



Figura 20. Quatro tipos de narizes sobre o motor A6-0/BT/2010.

2.3.7 EFEITO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DO ESPAÇOMODELO

Objetivo

Mostrar a influência causada pelo tipo do sistema de recuperação sobre o tempo de voo e a velocidade de queda do espaçomodelo.

Metodologia

- O kit do EM α foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacetech.
- Foram montados e lançados 10 EMs sem pára-quadras (Figura 12), 5 EMs com fita (Figuras 21 e 22) e 5 EMs com pára-quadras (PQ) (Figuras 23 a 25).
- Cada EM tinha um altímetro eletrônico a bordo para registrar a trajetória do seu voo.
- Em cada EM α sem pára-quadras foi usado um motor C6-0/BT/2010. Nos demais EMs com pára-quadras e com fita foram usados motores C6-5/BT/2010.



Figura 21. Componentes do EM α -26 já montado, com fita e altímetro.

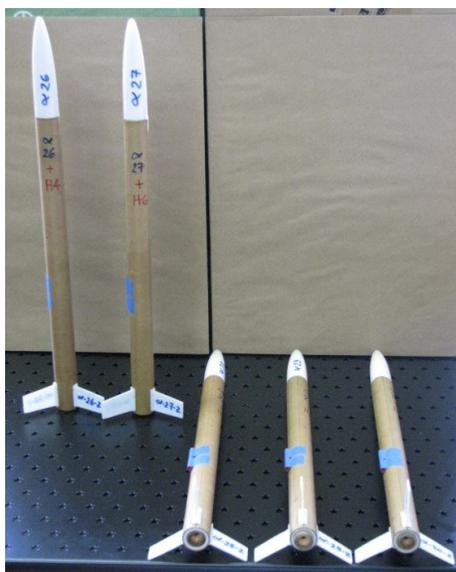


Figura 22. EMs α -26 a 30 já montados e integrados com fita e altímetro.

Dados

Sistema de recuperação	sem	fita	PQ
Espaçomodelo específico	α -13	α -29	α -17
Mo = Massa de decolagem (g)	126,65	130,83	123,04
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	25,36	25,12	25,24
Comprimento total do EM (mm)	435	440	435

Resultados

Sistema de recuperação	sem	fitas	PQ
Tempo total de vôo (s)	9,2	13,9	18,6
Apogeu (m)	83,8	91,1	116
V = Velocidade de queda média (km/h)	69	39	31
V / V sem sistema de recuperação	1	0,57	0,45



Figura 23. Componentes do EM α -21 com pára-quadras e altímetro.



Figura 24. EMs α -17 a 21 já montados e integrados com pára-quadras e altímetro.

Conclusão

O tipo do sistema de recuperação tem efeito grande sobre o tempo de vôo e a velocidade de queda do espaçomodelo.



Figura 25. EM α -17 na rampa, decolando, voando e caindo com seu pára-quadras.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DE ESPAÇOMODELOS COMERCIAIS

Nas sete subseções abaixo, são apresentados o objetivo, metodologia, dados, resultados e conclusão sobre a caracterização do desempenho de seis tipos de espaçomodelos nacionais, sendo um deles para duas classes de motores e os demais, para uma. A caracterização do desempenho de espaçomodelos não era um objetivo do projeto. Ela passou a ser um objetivo porque os resultados preliminares indicaram que havia muita diferença entre o apogeu previsto pelo fabricante do EM e o realmente alcançado; além disso, no primeiro EM abaixo, nem há previsão de apogeu do fabricante.

2.4.1 SONDINHA II DA BANDEIRANTE

Objetivo

Verificar o desempenho do espaçomodelo Sondinha II com motor da classe B.

Metodologia

- O kit do EM Sondinha II foi comprado diretamente do seu fabricante, a Bandeirante.
- Foram montados e lançados 5 EMs (Figura 26).
- Não houve controle da massa de decolagem para reproduzir as condições encontradas por um usuário comum.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	π -1
Tipo do motor	B6-0/BT/2010	B3-0 ou B4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	35	43,98
Mo / Mo do projeto	0,80	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	19	19,97
Dm / Dm do projeto	0,95	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	300	349
Lt / Lt do projeto	0,86	1

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	-	11,38
H = apogeu estimado (m)	-	142
H / H do fabricante	-	-

Conclusão

Há diferenças consideráveis entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. O espaçomodelo Sondinha II, fabricado pela Bandeirante, atingiu no máximo 142 m de apogeu com um motor da classe B.



Figura 26. Os 5 EMs Sondinha II testados, e um decolando.

2.4.2 DI DA SPACETECH COM MOTOR DA CLASSE B**Objetivo**

Verificar o desempenho do espaçomodelo DI com motor da classe B.

Metodologia

- O kit do EM DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacotech.
- Foram montados e lançados 4 EMs (Figura 27).
- A massa de decolagem foi controlada para que os 4 EMs ficassem com a mesma massa do EM mais pesado depois de montado.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	DI-28
Tipo do motor	B6-0/BT/2010	B3-0 ou B4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	40	59,52
Mo / Mo do projeto	0,67	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	20	20,55
Dm / Dm do projeto	0,97	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	362	369
Lt / Lt do projeto	0,98	1

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	-	10,52
H = apogeu estimado (m)	350	122
H / H do fabricante	1	0,35



Figura 27. Os 4 EMs DI testados, e um decolando.

Conclusão

Há diferenças grandes entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. Com um motor da classe B, o espaçomodelo DI, fabricado pela Spacotech, atingiu no máximo 35% do apogeu informado pelo fabricante.

2.4.3 DI DA SPACETECH COM MOTOR DA CLASSE C

Objetivo

Verificar o desempenho do espaçomodelo DI com motor da classe C.

Metodologia

- O kit do EM DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacotech.
- Foram montados e lançados 5 EMs (Figura 28).
- A massa de decolagem foi controlada para que os 5 EMs ficassem com a mesma massa do EM mais pesado depois de montado.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	C-2
Tipo do motor	C6-0/BT/2010	C3-0 ou C4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	40	67,62
Mo / Mo do projeto	0,59	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	20	20,13
Dm / Dm do projeto	0,99	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	362	378
Lt / Lt do projeto	0,96	1



Figura 28. Os 5 EMs DI testados, e um decolando.

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de voo cronometrado em solo (s)	-	15,41
H = apogeu estimado (m)	500	244
H / H do fabricante	1	0,49

Conclusão

Há diferenças grandes entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. Com um motor da classe C, o espaçomodelo DI, fabricado pela Spacotech, atingiu no máximo 49% do apogeu informado pelo fabricante.

2.4.4 VLS DA SPACOTECH COM 1 MOTOR DA CLASSE C

Objetivo

Verificar o desempenho do espaçomodelo VLS com 1 motor da classe C.

Metodologia

- O kit do EM VLS foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacotech.
- Foram montados e lançados 4 EMs (Figura 29).
- A massa de decolagem foi controlada para que os 4 EMs ficassem com a mesma massa do EM mais pesado depois de montado.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	VLS-2
Tipo do motor	C6-0/BT/2010	C3-0 ou C4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	90	130,13
Mo / Mo do projeto	0,69	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	-	23,40
Dm / Dm do projeto	-	1
Dt = diâmetro do tubo-foguete (mm)	20	20,08
Dt / Dt do projeto	1,00	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	400	397
Lt / Lt do projeto	1,01	1

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de voo cronometrado em solo (s)	-	8,59
H = apogeu estimado (m)	200	66
H / H do fabricante	1	0,33

Conclusão

Há diferenças grandes entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. Com um motor da classe C, o espaçomodelo VLS, fabricado pela Spacotech, atingiu no máximo 33% do apogeu informado pelo fabricante.

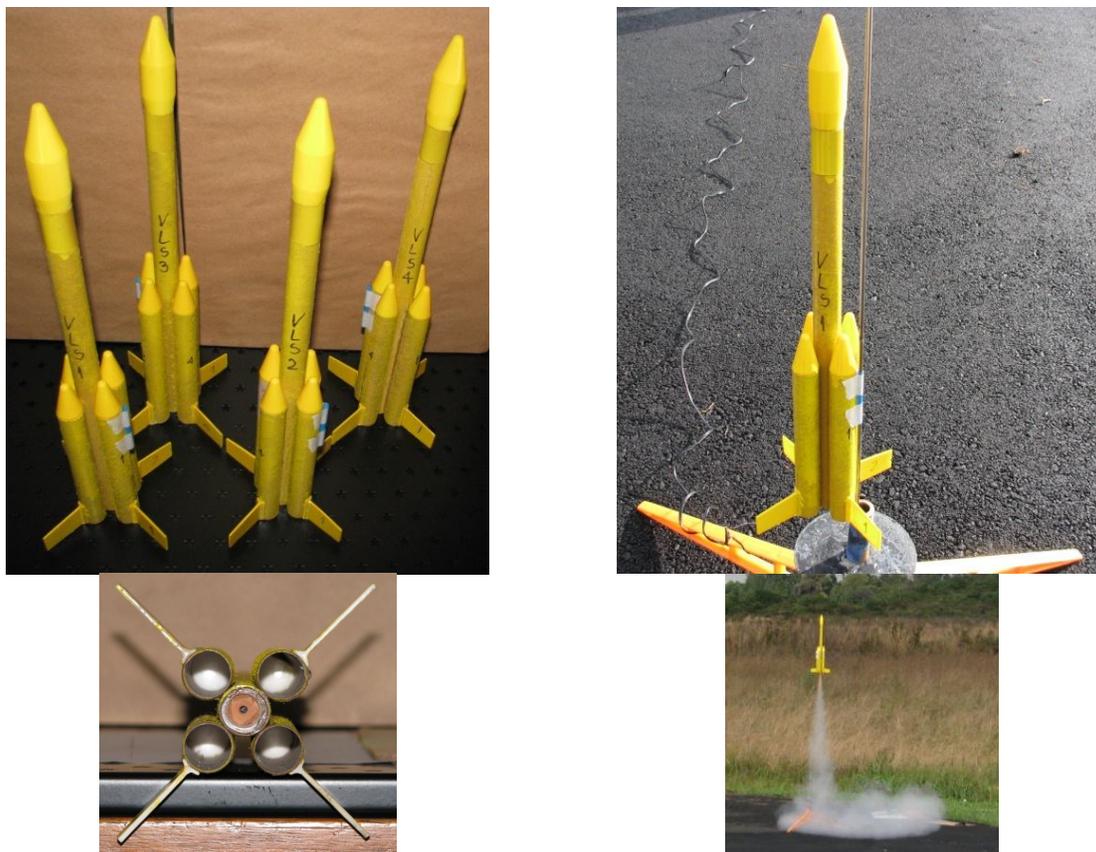


Figura 29. Os 4 EMs VLS testados, e um decolando.

2.4.5 LMS DA SPACETECH COM MOTOR DA CLASSE C

Objetivo

Verificar o desempenho do espaçomodelo LMS com motor da classe C.

Metodologia

- O kit do EM LMS foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacotech.
- Foram montados e lançados 4 EMs (Figura 30).
- A massa de decolagem foi controlada para que os 4 EMs ficassem com a mesma massa do EM mais pesado depois de montado.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	LMS-1
Tipo do motor	C6-0/BT/2010	C3-0 ou C4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	70	105,20
Mo / Mo do projeto	0,67	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	20	20,30
Dm / Dm do projeto	0,99	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	363	349
Lt / Lt do projeto	1,04	1

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	-	10,51
H = apogeu estimado (m)	200	105
H / H do fabricante	1	0,52

Conclusão

Há diferenças grandes entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. Com motor da classe C, o espaçomodelo LMS, fabricado pela Spacotech, atingiu no máximo 52% do apogeu informado pelo fabricante.



Figura 30. EMs LMS na rampa, decolando, voando e após colidir com o solo.

2.4.6 BETA DA SPACETECH COM MOTOR DA CLASSE C

Objetivo

Verificar o desempenho do espaçomodelo Beta com motor da classe C.

Metodologia

- O kit do EM Beta foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacotech.
- Foram montados e lançados 4 EMs (Figura 31).
- A massa de decolagem foi controlada para que os 4 EMs ficassem com a mesma massa do EM mais pesado depois de montado.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	β -2
Tipo do motor	C6-0/BT/2010	C3-0 ou C4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	60	86,55
Mo / Mo do projeto	0,69	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	25	25,26
Dm / Dm do projeto	0,99	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	448	422
Lt / Lt do projeto	1,06	1

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de vôo cronometrado em solo (s)	-	13,11
H = apogeu estimado (m)	350	173
H / H do fabricante	1	0,49

Conclusão

Há diferenças grandes entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. Com motor da classe C, o espaçomodelo Beta, fabricado pela Spacotech, atingiu no máximo 49% do apogeu informado pelo fabricante.

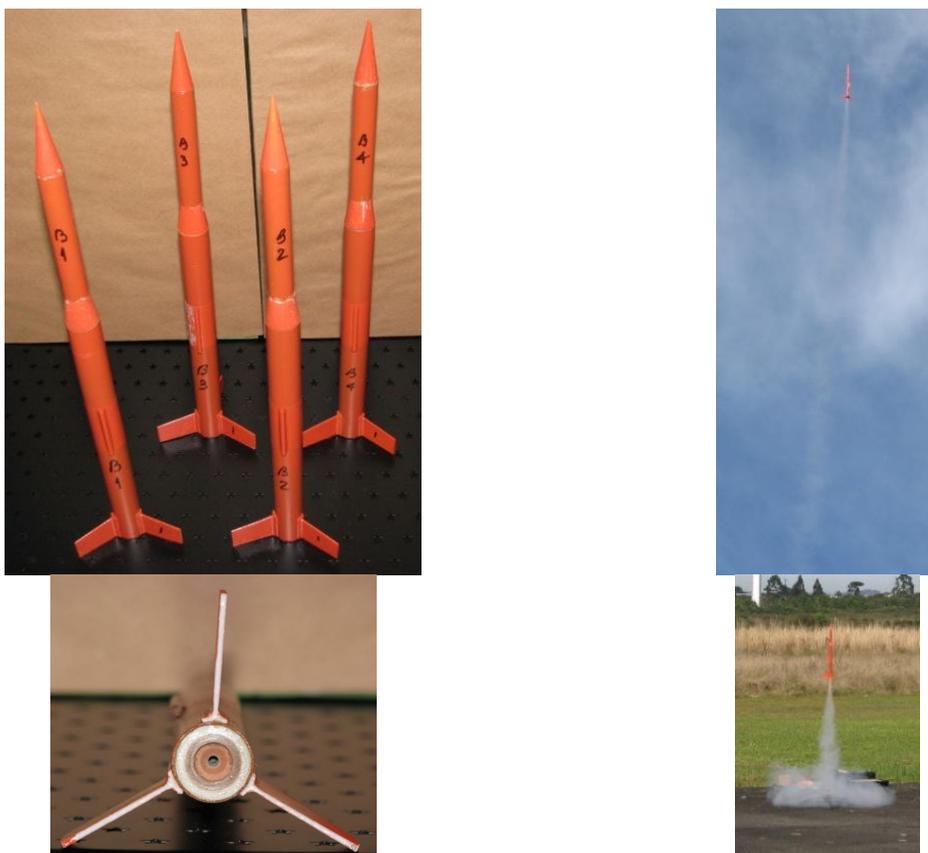


Figura 31. Os 4 EMs Beta testados, e um decolando e voando.

2.4.7 SUPER DI DA SPACETECH COM MOTOR DA CLASSE C

Objetivo

Verificar o desempenho do espaçomodelo Super DI com motor da classe C.

Metodologia

- O kit do EM Super DI foi comprado diretamente do seu fabricante, a Spacotech.
- Foram montados 4 EMs (Figura 32) e lançados 3.
- A massa de decolagem foi controlada para que os 4 EMs ficassem com a mesma massa do EM mais pesado depois de montado.

Dados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Espaçomodelo específico	-	SDI-3
Tipo do motor	C6-0/BT/2010	C3-0 ou C4-0/BT/2010
Mo = Massa de decolagem (g)	50	78,75
Mo / Mo do projeto	0,63	1
Dm = diâmetro máximo do EM (mm)	20	20,28
Dm / Dm do projeto	0,99	1
Lt = comprimento total do EM (mm)	362	349
Lt / Lt do projeto	1,04	1

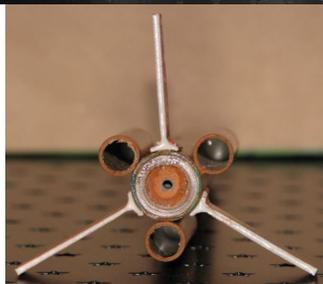


Figura 32. Os 4 EMs Super DI montados, e um na rampa e voando.

Resultados

Parâmetro	Fabricante	Projeto
Tempo total de voo cronometrado em solo (s)	-	12,80
H = apogeu estimado (m)	400	162
H / H do fabricante	1	0,40

Conclusão

Há diferenças grandes entre os dados do fabricante e os verificados neste projeto. Com motor da classe C, o espaçomodelo Super DI, fabricado pela Spacotech, atingiu no máximo 40% do apogeu informado pelo fabricante.

3 OUTROS RESULTADOS

3.1 ENSINO

Objetivo

Treinar cerca de 30 alunos de graduação nos princípios da engenharia aeroespacial.

Metodologia

Lecionar a disciplina optativa TM-273 Projeto e Lançamento de Espaçomodelos no curso de graduação em engenharia mecânica da UFPR. Nesta disciplina, os alunos desenvolvem projetos e lançam minifoguetes em equipe, bem como fazem testes estáticos dos motores usados.

Resultados

Podem ser vistos na Tabela 6 abaixo.

Conclusão

Em 8 ofertas da disciplina, foram treinados 80 alunos, que participaram da realização de 74 testes estáticos (TE) de motores e 71 lançamentos (LT) de minifoguetes, totalizando 145 experimentos.

Tabela 6. Resultados da linha de ação Ensino do projeto.

Semestre	Alunos	TE	LT	Total
2005/1	7	0	8	8
2006/2	9	11	9	20
2008/1	5	5	6	11
2008/2	12	5	6	11
2009/2	13	18	9	27
2010/1	13	12	9	21
2010/2	19	12	20	32
2011/1	2	11	4	15

3.2 EXIBIÇÕES

Objetivo

Realizar exposições públicas de lançamento de espaçomodelos e testes estáticos de seus motores para difundir e popularizar o espaçomodelismo.

Metodologia

Esta linha de ação se resumiu basicamente aos alunos da disciplina da seção 3.1, aos integrantes do projeto que realizaram os testes estáticos e lançamentos, e a eventuais convidados e outros participantes.

Resultados

Incluindo-se os 80 alunos da disciplina da seção 3.1, os integrantes das equipes do projeto que realizaram os experimentos, eventuais convidados e outros participantes, o público total que participou de testes estáticos foi de 125 pessoas, e dos lançamentos, 211 pessoas.

Conclusão

336 pessoas participaram da realização dos testes estáticos de motores e lançamentos de minifoguetes do projeto.

3.3 LIVRO**Objetivo**

Escrever um livro sobre o conteúdo da disciplina TM-273 Projeto e Lançamento de Espaçomodelos, lecionada no curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná.

Resultados

Foi preparada uma apostila sobre o conteúdo da disciplina TM-273 Projeto e Lançamento de Espaçomodelos. Em resumo, esta apostila aborda: os tipos de foguetes e minifoguetes; motor-foguete e empuxo; testes estáticos e análises; centro de gravidade e pressão; coeficiente de arrasto; trajetória; projetos; lançamentos e análises. Os objetivos desta apostila são: (1) apresentar a teoria básica envolvida no projeto de espaçomodelos a propelente sólido; (2) ensinar a projetar espaçomodelos; e (3) mostrar como realizar e analisar experimentos com espaçomodelos.

Conclusão

Foi preparada uma apostila que é adotada na disciplina “TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada na UFPR, consistindo em 119 páginas. Esta apostila está disponível na internet no item Apostila Espaçomodelismo do *site* www.foguete.ufpr.br.

3.4 FILME**Objetivo**

Produzir um filme-documentário com duração aproximada de 30 minutos para mostrar as atividades do projeto, com reprodução livre a partir de *site* na internet. O objetivo era mostrar principalmente a parte experimental do projeto, isto é, os testes estáticos e lançamentos, as exposições públicas e as diversas fases da montagem de motores e minifoguetes, e seus testes.

Metodologia

A cada campanha de testes estáticos e lançamentos foram feitos vídeos e fotos dos motores, dos espaçomodelos e seus componentes, equipamentos envolvidos nos testes, e os testes em si.

Resultados

Há centenas de arquivos gravados de vídeos sobre as atividades realizadas no projeto.

Conclusão

Infelizmente não houve tempo para concluir o filme. Falta selecionar e editar os vídeos já gravados, o que deverá ocorrer nos próximos meses.

3.5 ARTIGOS

Objetivo

Divulgar as atividades do projeto através de artigos técnicos, em congressos, e leigos, na imprensa.

Metodologia

Em congressos profissionais técnicos, que têm sessões de caráter educativo, pretendia-se apresentar trabalhos para divulgar os resultados do projeto. Já na imprensa, a intenção era publicar artigos para divulgar os resultados do projeto para o público em geral.

Resultados

Foi preparado um artigo para ser submetido a um periódico científico brasileiro relatando os testes estáticos realizados com os motores. Este artigo está em fase final de preparação.

Em fase inicial de preparação está outro artigo para ser submetido a um periódico científico relatando os lançamentos realizados.

Foi feita uma divulgação do projeto dentro de uma matéria para a TV da UFPR, veiculada em 02/06/10. O vídeo está disponível na internet. Para vê-lo, executar o seguinte procedimento: acessar <http://www.tv.ufpr.br/>; clicar na opção EM TESE; localizar o programa de 02/06/10 e clicar sobre o título Em Tese - 02/06/10; clicar sobre a FOTO.

Foram gerados oito relatórios técnicos descrevendo quase todos os testes estáticos realizados. Eles estão disponíveis na internet no item Testes estáticos do *site* www.foguete.ufpr.br.

Para cada dia de lançamentos de espaçomodelos, foi gerado um relatório resumido dos dados e resultados. Os relatórios estão disponíveis na internet no item Lançamentos do *site* www.foguete.ufpr.br, incluindo fotos relacionadas.

Conclusão

Infelizmente não houve tempo para atingir plenamente o objetivo desta linha de ação, mas que deverá ser concluída nos próximos meses.

3.6 SITE

Objetivo

Criar um *site* na internet para incluir todas as atividades das linhas de ação do projeto, visando difundir e popularizar livremente o espaçomodelismo.

Resultados

O *site* foi criado dentro do domínio da UFPR. O conteúdo inclui: o material da disciplina da seção 3.1; bibliografia adicional e *softwares* usados na disciplina; apostila da seção 3.3; e dados, vídeos, fotos, resultados e relatórios dos testes estáticos e lançamentos do projeto. Falta apenas atualizar algumas fotos e vídeos.

Conclusão

O *site* está disponível na internet em www.foguete.ufpr.br.

3.7 FABRICANTE

Objetivo

Encontrar uma empresa para fabricar e comercializar o kit de minifoguetes a ser desenvolvido.

Metodologia

Procurar na internet fornecedores brasileiros de motores e kits de espaçomodelos para atender ao desenvolvimento do projeto. Dentre os fornecedores encontrados, escolher o mais adequado para fabricar o kit de minifoguetes.

Resultados

De acordo com a busca realizada durante o projeto, atualmente só existe uma empresa fabricante de kits e motores de espaçomodelos no Brasil. É a empresa Boa Vista Modelismo Ltda. (CNPJ: 03.393.674/0001-91), marca Bandeirante, de São Lourenço da Mata, Pernambuco. Seu site na internet é <http://www.boavistamodelismo.com.br/>.

Existe no Brasil outro fornecedor, mas apenas de kits de espaçomodelos. Seu nome comercial é Spacetech. Seu site na internet é www.foguete.org. Mas legalmente, esta empresa é representada pela Boa Vista Modelismo Ltda.

Conclusão

A única empresa brasileira que pode fabricar o kit de minifoguetes desenvolvido no projeto é a Boa Vista Modelismo Ltda. (CNPJ: 03.393.674/0001-91), de São Lourenço da Mata, Pernambuco. Seu site na internet é <http://www.boavistamodelismo.com.br/>.

Nos próximos meses deverá ser estabelecida uma colaboração formal entre a UFPR e a empresa Boa Vista Modelismo Ltda. para que a equipe deste projeto ajude esta empresa no aperfeiçoamento de seus produtos (motores e kits de espaçomodelos).

Este relatório técnico final do projeto será encaminhado às empresas Boa Vista Modelismo Ltda. e Spacetech.

4 OUTRAS INFORMAÇÕES

4.1 EQUIPES

O coordenador deste projeto contou com a colaboração voluntária das diversas pessoas mencionadas abaixo para executar o presente projeto.

4.1.1 TESTES ESTÁTICOS

As seguintes pessoas participaram das equipes que realizaram os testes estáticos, auxiliando nas atividades, realizando medições com equipamentos, e filmando e fotografando:

- Ignição: Luciano Kiyoshi Araki
- Fotos: Diego Fernando Moro
- Os 80 alunos de 8 turmas da disciplina TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos.

4.1.2 MONTAGEM DE ESPAÇOMODELOS

As seguintes pessoas participaram da montagem dos minifoguetes lançados neste projeto:

- Diego Fernando Moro
- Eduardo Henrique Costa

- Eduardo Matos Germer
- Fábio Pinheiro Thomaz
- Guilherme Bertoldo
- Mateus das Neves Gomes
- Reedlei Nagornni Júnior,
- Os 80 alunos de 8 turmas da disciplina TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos.

4.1.3 LANÇAMENTOS

As seguintes pessoas participaram das equipes que realizaram os lançamentos, auxiliando nas atividades, realizando medições com equipamentos, e filmando e fotografando:

- Ignição: Luciano Kiyoshi Araki
- Fotos: Diego Fernando Moro e Fabiana de Fátima Giacomini.
- Vídeos: Fabiana de Fátima Giacomini, Lucília Araki, Mateus das Neves Gomes e Eduardo Henrique Costa.
- Cronômetros: Reedlei Nagornni Júnior, Guilherme Bertoldo, Mateus das Neves Gomes, José Osmar Klein Júnior e Antonio Carlos Foltran.
- Ângulo do apogeu: Eduardo Matos Germer, Ney Lizandro Tabalipa e Antonio Carlos Foltran.
- Distância de queda: Luciano Kiyoshi Araki, Mateus das Neves Gomes, José Osmar Klein Júnior, Gustavo e Carlos Fernando Pinnola.
- Os 80 alunos de 8 turmas da disciplina TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos.

4.1.4 SITE

O coordenador deste projeto definiu a estrutura e o conteúdo do *site*, que foi implementado e é atualizado por José Osmar Klein Júnior.

4.2 SOFTWARES USADOS E IMPLEMENTADOS

Para executar este projeto, foram implementados os seguintes *softwares*:

- Altimetro 1.0: para calcular parâmetros de vôo do espaçomodelo a partir da trajetória obtida com altímetro eletrônico de bordo.
- Apogeu 1.1: para estimar o apogeu de espaçomodelos através de 5 métodos.
- Curva Empuxo 1.2: para calcular parâmetros de desempenho de motor-foguete a partir de dados obtidos com célula de carga em teste estático.
- Trajetoria 1.1: para calcular trajetória de espaçomodelos.

Para executar este projeto, foram utilizados os seguintes *softwares* comerciais:

- AeroCP 3.0: para calcular centro de pressão.
- RockSim 7.0 e 9.0: para calcular trajetória de espaçomodelos e centro de pressão.

Todos estes softwares estão disponíveis na internet no item Softwares do *site* www.foguete.ufpr.br.

4.3 DIFICULDADES PRINCIPAIS

O desenvolvimento deste projeto foi muito prejudicado pelos seguintes motivos:

- Cada lote de motores recebidos apresentava desempenho diferente dos lotes anteriores do mesmo tipo específico de motor. Na prática isso significa que cada lote é um motor diferente, mesmo que o fabricante informe ser o mesmo motor. Isso fica claro ao se ler os relatórios sobre os testes estáticos realizados.

- Os motores fabricados em 2008 e 2009 apresentavam funcionamento inadequado e inseguro, principalmente devido à ejeção de tubeiras e tampas dos motores.
- Cada lote de kits de espaçomodelos recebidos apresentava características diferentes, por exemplo, a massa do nariz aumentava muito. Na prática isso significa que cada lote é um kit diferente, mesmo que o fabricante informe ser o mesmo kit.
- Não há no mercado nacional componentes de EMs para aquisição; por exemplo, narizes, tubos e empenas. Desta forma, teve-se que improvisar componentes; por exemplo, o teste do efeito dos 4 narizes, da seção 2.3.6, foi feito usando-se: um nariz de foguetes-de-vara (fogos de artifício); dois tipos de tampa de tubo de cola; e uma tampa de tubo de esmalte.
- Os três locais usados para realizar os lançamentos tinham restrições que limitaram de certa forma os tipos de testes e experimentos realizados, principalmente em relação ao apogeu máximo possível de se atingir. Dois dos locais, na UFPR, eram relativamente pequenos. O terceiro local era um pouco maior mas com mato, o que resultou na perda de vários espaçomodelos.
- Outra dificuldade importante, que limitou muito os tipos de testes e resultados, refere-se aos limites de visualização a olho nu dos espaçomodelos em vôo. Por exemplo, dos 19 lançamentos feitos em 16 de janeiro de 2011, com EMs medindo cerca de 10 a 13 centímetros de comprimento, apenas um deles foi visualizado no apogeu.

4.4 PERSPECTIVAS FUTURAS

Em julho deste ano, conseguimos uma sala com 25 m², no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, exclusivamente para guardar os equipamentos, espaçomodelos, materiais, livros, relatórios do projeto, e para montagem de minifoguetes. Esta sala passou a ser denominada de Laboratório de Atividades Espaciais (LAE). Certamente, este espaço permitirá o crescimento das atividades com minifoguetes na UFPR.

A curto e médio prazos, pretende-se:

- Concluir os artigos técnicos para relatar as atividades desenvolvidas no projeto com motores e espaçomodelos, e submetê-los para publicação.
- Concluir o filme-documentário.
- Completar o *site* do projeto.
- Continuar a lecionar a disciplina optativa TM-273 Projeto e Lançamento de Espaçomodelos, no curso de graduação em engenharia mecânica da UFPR.
- Atualizar o conteúdo da apostila da disciplina TM-273, com os dados e resultados do projeto, e colocá-lo em formato de livro para submeter a uma editora visando a sua publicação.
- Reiniciar atividades com minifoguetes experimentais.

4.5 RECORDES

Na Tabela 7 são apresentados os recordes obtidos durante este projeto em várias categorias. Isso permite facilmente verificar os limites dentro dos quais se trabalhou. Nesta tabela, apogeu comprovado significa aquele obtido com altímetro eletrônico de bordo; e apogeu estimado, aquele obtido com cálculos de trajetória baseados nos dados sobre o espaçomodelo usado, seu motor e t_f .

Os maiores apogeus estimados foram obtidos pelos espaçomodelos Durepoxi 1 (Figura 33) na classe A, Durepoxi 2 (Figura 34) na classe B, e DI/C-2 (Figuras 28 e 35) na classe C.

Tabela 7. Recordes obtidos durante os 202 lançamentos realizados no projeto.

Categoria	Recorde	EM	Data LT	Motor	Dm (mm)	Lt (mm)	Mo (g)	t₁ (s)	H (m)
Maior apogeu comprovado com motor da classe A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maior apogeu comprovado com motor da classe B	100 m	α -4/Mi	1 Mai 2010	B6-0/BT/2009	25,75	434	76,83	9,60	100
Maior apogeu comprovado com motor da classe C	116 m	α -17/Mi	23 Jun 2011	C6-5/BT/2010	25,24	435	123,04	18,60	116
Maior apogeu estimado com motor da classe A	197 m	Durepoxi 1	14 Mar 2010	A6-0/BT/2009	17,21	81	15,60	12,97	197
Maior apogeu estimado com motor da classe B	307 m	Durepoxi 2	1 Mai 2010	B6-0/BT/2009	18,04	84	21,77	16,60	307
Maior apogeu estimado com motor da classe C	244 m	DI/C-2/Mi	13 Fev 2011	C6-0/BT/2010	20,13	378	67,62	15,41	244
EM com a menor massa de decolagem	12,62 g	Fita	14 Mar 2010	A6-0/BT/2009	17,32	72	12,62	?	?
EM com a maior massa de decolagem	160,17 g	DI-11/Mi	16 Abr 2011	C6-0/BT/2010	20,32	380	160,17	7,46	47
EM mais curto	71,65 mm	Fita	14 Mar 2010	A6-0/BT/2009	17,32	72	12,62	?	?
EM mais comprido	572 mm	T1/Estes	14 Mar 2010	A6-4/BT/2009	24,46	572	67,85	3,45	13
EM com menor diâmetro	17,21 mm	Durepoxi 1	14 Mar 2010	A6-0/BT/2009	17,21	81	15,60	12,97	197
EM com maior diâmetro	41,47 mm	PH-1	17 Mai 2011	A6-0/BT/2010	41,47	377	36,31	12,34	35
Menor tempo total de voo	2,92 s	α -2/Mi	1 Mai 2010	A6-4/BT/2009	25,70	435	77,51	2,92	9
Maior tempo total de voo	34,62 s	α -23/Mi	23 Jun 2011	C6-5/BT/2010	25,03	434	103,34	34,62	136
EM com empena de menor envergadura	14 mm	DI-24/Mi	16 Jul 2011	B6-0/BT/2010	20,45	381	57,65	6,30	40
EM com empena de maior envergadura	101 mm	PH-1	17 Mai 2011	A6-0/BT/2010	41,47	377	36,31	12,34	35

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos muito ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, do Brasil) pelo apoio financeiro a este projeto, que motivou a equipe e proporcionou avançar muito nas atividades com minifoguetes realizadas na UFPR. O coordenador do projeto é bolsista do CNPq.

Sou muito grato a todas as pessoas nominalmente mencionadas na seção 4.1, que participaram diretamente, de forma voluntária, da execução prática do projeto, atuando nas equipes dos testes estáticos, de montagem e lançamento dos espaçomodelos, e na criação do *site* do projeto.

Aos 80 alunos da disciplina “TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada em oito semestres letivos de 2005/1 a 2011/1, no curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná, pelo projeto e montagem de 71 espaçomodelos.

Ao Centro de Educação Física e Desportos (CED) da UFPR, especialmente ao sr Roberto Luiz Cavagnari, por permitir a utilização dos campos de futebol 1 e 2 e a pista de atletismo para quase todos os lançamentos realizados. Ao Clube Paranaense de Aeromodelismo (CPAER), especialmente ao sr Cristiano Tobler, por permitir a utilização da área do clube para diversos lançamentos do projeto.

Ao prof. Marcos Carvalho Campos, que disponibilizou o sistema de aquisição de dados da HBM, forneceu o banco estático usado e permitiu utilizar o laboratório que coordena para a realização dos testes estáticos em bancada de empuxo. Ao técnico José Osmar Klein Júnior e ao engenheiro Alexandre Stall pelo auxílio na instalação e uso da nova versão do *software* Catman 4.5 da HBM. Ao Programa de Recursos Humanos PRH-24 da UFPR, financiado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), que disponibilizou recursos financeiros para a compra da célula de carga utilizada nos testes estáticos. À profa. Ana Sofia Clímaco Monteiro D’Oliveira, que permitiu utilizar até 2009 uma balança de precisão quando ainda não tínhamos uma própria do projeto.

Ao sr José Roberto de Andrade e Paula, proprietário da Bandeirante (Boa Vista Modelismo Ltda.), pelo fornecimento de vários lotes de motores, sob encomenda, na forma de *boosters*.

À memória de Basílio Baranoff, que forneceu gratuitamente os motores-foguete e espaçomodelos usados até o ano 2008.



Figura 33. O EM Durepoxi 1 na rampa e após o vôo. É o EM com recorde de apogeu para motor da classe A.



Figura 34. O EM Durepoxi 2 na rampa e após o vôo. É o EM com recorde de apogeu para motor da classe B.



Figura 35. O EM DI/C-2 após o seu vôo. É o EM com recorde de apogeu para motor da classe C.

6 DEDICATÓRIA

Este projeto é dedicado à memória de Basílio Baranoff, meu grande amigo, incentivador e apoiador das atividades com minifoguetes no Brasil, que infelizmente faleceu em 2008. Ele era capitão da Aeronáutica, e serviu no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

7 CONCLUSÃO

A parte prática deste projeto resultou em 197 testes estáticos de cinco classes de motores e 202 lançamentos de vários tipos de espaçomodelos, totalizando 399 experimentos realizados de junho de 2005 a agosto de 2011.

Em resumo, os resultados obtidos com a execução deste projeto foram:

- 1) Caracterizado o desempenho de quatro tipos de motores para espaçomodelos, que são atualmente comercializados no Brasil.
- 2) Concebido um kit de minifoguetes composto por sete efeitos que são considerados mais didáticos para se entender, facilmente e na prática, conceitos fundamentais sobre engenharia de foguetes.
- 3) Caracterizado o desempenho de seis tipos de espaçomodelos, um deles para dois tipos de motores, que são atualmente comercializados no Brasil.
- 4) Treinados 80 alunos em oito ofertas da disciplina “TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos”, nos semestres letivos de 2005/1 a 2011/1, no curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná. Estes alunos participaram da realização de 74 testes estáticos de motores e 71 lançamentos de minifoguetes, totalizando 145 experimentos.
- 5) O público que participou da realização dos testes estáticos de motores e lançamentos de minifoguetes do projeto foi de 336 pessoas.
- 6) Foi preparada uma apostila que é adotada na disciplina “TM-273 Projeto e lançamento de espaçomodelos”, lecionada na UFPR, consistindo em 119 páginas.
- 7) Criado o *site* www.foguete.ufpr.br. Seu conteúdo inclui: o material da disciplina da seção 3.1; bibliografia adicional e *softwares* usados na disciplina; apostila da seção 3.3; e dados, vídeos, fotos, resultados e relatórios dos testes estáticos e lançamentos do projeto.
- 8) Criada infra-estrutura, procedimentos e equipe para caracterizar adequadamente o desempenho de motores e espaçomodelos. Tudo isso está disponível às empresas nacionais.