

ARTHUR DE ALMEIDA PENHA

Metodologia para desenvolvimento de um Foguete

São Bernardo do Campo

2019

ARTHUR DE ALMEIDA PENHA

Metodologia para desenvolvimento de um Foguete

Relatório de atividades referente ao projeto
de Pesquisa Desde o Primeiro Dia

Área de Concentração: Engenharia Aeroes-
pacial

Orientador: Prof. Dr. Cesar Monzu Freire

São Bernardo do Campo

2019

RESUMO

O desenvolvimento de produtos espaciais, tais como: satélites, sondas e foguetes, estão relacionados a projetos que dependem, em geral, de elevada verba e investimento financeiro, mas que podem gerar lucros de valor ainda mais elevado e a ampliação do conhecimento humano acerca do Universo, além de possibilitar grande parte da tecnologia atual, principalmente a relacionada à transmissão de dados por satélites. A fim de obter o maior rendimento possível e menos gastos no desenvolvimento de um foguete, uma comunicação interna e um planejamento de projeto eficaz é de suma importância para que isso ocorra de maneira eficiente. Assim, uma metodologia foi proposta para se adequar ao dia a dia de uma equipe universitária de foguetes, a elaboração desse plano de projeto, foi baseada na área de Engenharia de Sistemas. Buscando facilitar a compreensão do que significa um foguete, foi desenvolvido um embasamento teórico acerca das principais componentes do veículo.

Palavras-chave: *Sistemas Aeroespaciais; Foguetes; metodologia do projeto*

LISTA DE FIGURAS

Figura - 1.1	Sala do GPDA	7
Figura - 1.2	Sala do GPDA	7
Figura - 2.1	Veículo estável	14
Figura - 2.2	Veículo instável	15
Figura - 2.3	Esquema de um motor de foguete com tubeira	17
Figura - 2.4	Terceira Lei de Newton no foguete	18
Figura - 2.5	Equação do Empuxo em um foguete	19
Figura - 2.6	Classificação de motores	21
Figura - 3.1	Engenharia de Sistemas Padrão V (Ciclo V)	25
Figura - 3.2	Níveis de Prontidão de Tecnologia (TRL)	26
Figura - 3.3	Nível de Prontidão de Tecnologia (TRL) e Nível de Prontidão Integrada (IRL)	27
Figura - 3.4	Nível de Prontidão de Sistemas (SRL)	28
Figura - 4.1	Pergunta formulário	29
Figura - 4.2	Gráfico de Pareto para figura 9	30
Figura - 4.3	Importância de escrever relatórios	30
Figura - 4.4	Porcentagens sobre escrita de relatórios	31
Figura - 4.5	Avaliação da Metodologia	31
Figura - 5.1	Sistema Matricial	32

SUMÁRIO

1	Introdução	6
	UFABC Rocket Design	6
2	Definição de Conceitos Fundamentais	9
	Carga Útil	9
	Desempenho	9
	Estágio de um foguete	9
	Estagiamento	10
	Atmosfera	10
	Ventos de superfície	10
	Empuxo	11
	Aceleração gravitacional e Peso	11
	Massa estrutural	12
	Centro de massa	12
	Centro de Gravidade	12
	Centro de pressão	13
	Margem estática	13
	Pressão dinâmica	13
	Pressão estática	13
	Arrasto aerodinâmico	14
	Ângulo de ataque	14
	Força Normal	14

Estabilidade Estática	14
Lastro	15
Trajectoria	15
Janela de lançamento	15
Elevação do lançador	16
Apogeu da trajetória	16
Alcance	16
Zona livre de evolução (ZLE)	16
Ablação.....	16
<i>Booster</i>	16
Tubeira	17
Empuxo	17
Impulso	19
Equação de foguete de Tsiolkovsky	21
3 Metodologia	22
Modelos de Engenharia de Sistemas	22
Primeira Etapa - Formulação	22
Pre fase A - Estudos de Conceitos	22
Fase A - Conceito e Desenvolvimento de Tecnologia	23
Fase B - Design Preliminar e Tecnologia Concluída	23
Segunda Etapa - Implementação	23
Fase C - Design Final e Fabricação	23
Fase D - Montagem do Sistema, Integração e Teste, Lançamento.....	24
Fase E - Operações e Sustentação	24
Fase F - Encerramento	24
3.1 Ciclo V	25

Tecnologia, Integração e Prontidão de Sistemas	26
4 Análise das respostas das entrevistas	29
5 Metodologia Proposta	32
6 Referências Bibliográficas	34

1 INTRODUÇÃO

O objetivo desta pesquisa era estudar as características técnicas e multidisciplinares envolvidas em um projeto de foguete a nível universitário. Tendo em vista que é um veículo que não é de simples construção, foi necessário para a primeira parte da pesquisa uma subdivisão desse, separando-o em aspectos:

- Estrutural;
- Eletrônico;
- Propulsão.

Para isso foi realizada uma revisão bibliográfica na qual abordou, de maneira não tão aprofundada, alguns conceitos fundamentais sobre as diferentes partes de um foguete, pois para o desenvolvimento de um veículo de tamanha complexidade é necessário o entendimento desses conceitos.

O modo como a equipe se organiza durante a execução de um projeto é extremamente importante para que bons resultados e boas análises pós-projeto sejam alcançados, por isso foi desenvolvido um estudo teórico para o entendimento de como essas relações entre diferentes departamentos deve ocorrer.

Para uma análise mais prática para o desenvolvimento desta pesquisa, foi realizado um acompanhamento à UFABC Rocket Design, uma equipe de foguetes universitários da Universidade Federal do ABC.

UFABC Rocket Design

A equipe faz parte do Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento Aeroespacial da UFABC (GPDA), grupo composto pela UFABC Rocket Design, Harpia AeroDesign e Colibri Helicopter, todas as três equipes possuem um local concedido pelo GPDA para atuarem figura

1.1, figura 1.2 uma sala no campi de Santo André, entretanto, atualmente, a UFABC Rocket Design é a equipe que possui maior frequência na utilização do espaço.



Figura 1.1: Sala do GPDA



Figura 1.2: Sala do GPDA

Considerando que para uma equipe, que trabalha com projetos de médio porte, atuar com eficiência, além de uma boa metodologia e preparo dos membros, é de extrema importância um local que permita uma boa mobilidade. Atualmente, a UFABC Rocket Design possui cerca de 60 membros, é inconcebível a presença de todos os membros no

espaço, além do fato de que durante a execução de um projeto, é impossível todos os departamentos atuarem com quantidade significativa de integrantes nesse espaço simultaneamente.

O núcleo de projetos da UFABC Rocket Design é subdividido nos seguintes departamentos:

- Departamento de Carga Paga;
- Departamento de Eletrônica;
- Departamento de Estruturas;
- Departamento de Propulsão;
- Departamento de Recuperação.

2 DEFINIÇÃO DE CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nesta primeira parte da revisão serão descritos, de maneira simples, alguns componentes que estão diretamente ou indiretamente ligados ao funcionamento de um foguete. É válido ressaltar que alguns assuntos serão melhores discutidos um pouco mais à frente.

Carga Útil

A finalidade da existência de um veículo é o que ele transporta e quais as condições que ele é colocado para realizar tal propósito. Ou seja, é a "diferença entre o peso total de uma aeronave carregada e o peso da mesma vazia".

Desempenho

Também denominada de performance, é a capacidade de impulsionar uma carga útil a fim de que essa atinja a altitude necessária, ou seja, quanto mais próximo chegar ao que foi proposto, maior será o desempenho do veículo.

Estágio de um foguete

A segmentação de um foguete, é necessária para a redução da quantidade de propelente, implicando em uma redução de custos. Os estágios permitem o alijamento de massas que não são mais úteis ao desempenho da missão, ou seja, elimina-se a carga em "excesso", já que essa não tem mais utilidade naquele lançamento. O maior exemplo disso, atualmente, foi a recuperação de dois dos três propulsores do foguete Falcon Heavy da empresa SpaceX.

Em cada estágio encontra-se um, ou um grupo de motores e todos os equipamentos necessários à execução de sua fase propulsada.

Estagiamento

Embasamento teóricos que permite decidir:

- Quantos serão os estágios do foguete;
- Quais serão a energia embarcada e a massa estrutural de cada estágio.

Ou seja, nesta parte são realizados estudos e análises, sobre as condições energéticas necessárias para a missão, definição da órbita a ser percorrida, seleção dos motores principais - no nível preliminar, pode-se recorrer à equação desenvolvida pelo cientista russo Konstantin E. Tsiolkovsky, sabendo-se o incremento de velocidade a ser fornecido pelo estágio. Logo, é necessário experimentar os vários parâmetros de massa e do propulsor para atingir o objetivo, ou seja, analisar a combinação que gera o resultado esperado e mais viável financeiramente. (PALMERIO, 2017)

Devido às limitações de compatibilidade com a realidade, esses estudos só podem ser realizados nas fases iniciais do projeto. Nas demais, devem ser refinados, pois muitos aspectos reais do voo não foram considerados anteriormente. Entre esse, podemos destacar: a perda de energia por arrasto, a perda gravitacional, e a posição relativa do campo de lançamento em relação à inclinação da órbita. (PALMERIO, 2017)

Atmosfera

A atmosfera terrestre é estratificada, ou seja, é dividida em camadas cada qual com propriedades físico-química específicas. Para fins de lançamento dos foguetes, a parte de interesse é que as forças aerodinâmicas que possuem intensidade suficiente para influenciar na tarefa. Mas devido às limitações das competições e verbas, pode-se basear os estudos apenas na Troposfera, aproximadamente 12 km de altitude.

Ventos de superfície

É o perfil de velocidades do vento até a altitude em torno de 100 m. Para determinar a velocidade do vento a certa altura, pode-se usar a expressão:

$$V(h) = x \cdot \left(\frac{h}{h(x)} \right)^n \quad (2.1)$$

onde $V(h)$ é a velocidade do vento na altura desejada, x , a velocidade do vento em uma altura conhecida, h , a altura que quer se medir a velocidade do vento, $h(x)$, a altura da velocidade conhecida, e n , o índice de rugosidade do meio.

Como referencial teórico, pode-se citar a Lei de Prandtl, a qual afirma que o atrito entre a superfície terrestre e o o vento tem como consequência o retardo da velocidade deste. As camadas mais baixas de ar retardam as camadas superiores, implicando em uma variação da velocidade média do vento a medida em que aumenta-se a altura.

Empuxo

O empuxo (E) é calculado pela relação entre a massa de propelente ejetada por unidade de tempo (M_e) e da velocidade com que ocorre essa ejeção (V_e), portanto é uma grandeza vetorial, definida então por: intensidade, direção e sentido.

$$E = M_e \cdot V_e \quad (2.2)$$

Tal força é responsável por retirar o foguete da base de lançamento, pois se temos uma força (F) e uma massa (m), pela Segunda Lei de Newton:

$$F = m \cdot a_i \quad (2.3)$$

obtemos uma aceleração inicial (a) imposta ao foguete, essa tem sempre que ser maior que a aceleração gravitacional do local de lançamento.(PUCCI, 2014))

Aceleração gravitacional e Peso

Considerados propriedades físicas da matéria, o campo gravitacional (g) e o peso (P), possuem uma constante de proporcionalidade que é a massa (m) da partícula

$$P = m \cdot g \quad (2.4)$$

Nos foguetes, durante a operação dos motores, a massa do foguete diminui com o consumo de propelente, se o empuxo (E) for constante, através da equação 3, concluímos que a aceleração aumenta, por serem grandezas inversamente proporcionais.

A aceleração da gravidade varia dentro do campo gravitacional da Terra, em função da distância ao centro da Terra e em função da latitude e longitude, pois o planeta não é perfeitamente esférico e sua massa não é uniformemente distribuída.

Massa estrutural

É a soma das massas que não produzem energia para aumentar a velocidade do foguete, é composta por:

- elementos estruturais;
- equipamentos elétricos, pirotécnicos, hidropneumáticos;
- propelente que não será queimado durante uma fase propulsada;
- carga útil.

Portanto, a massa estrutural de um lançador, durante a fase propulsada de um estágio, é a massa do foguete naquele estágio menos a massa de propelente do mesmo estágio.

Centro de massa

Intuitivamente, o centro de massa de um corpo é o ponto no qual uma força aplicada só produz translação no corpo, ou seja, o corpo gira em torno do seu eixo no sentido da força aplicada. Logo, concluímos que o centro de massa é um ponto que se comporta como se toda a massa do corpo estivesse concentrada nele.

O foguete em voo apresenta massa variável devido à combustão do propelente. Assim, é notável que a posição o centro de massa varia no tempo e sua determinação é essencial para que se possa simular o movimento do veículo no espaço.

Centro de Gravidade

O campo gravitacional são linhas imaginárias, que convergem para o centro do corpo perpendicularmente, gerando uma força de atração com qualquer corpo que esteja situado a uma distância. Logo o campo atua sobre cada partícula de massa de um corpo produzindo o seu peso.

Se considerarmos um corpo extenso, sabe-se que o campo gravitacional que o envolve, não é uniforme. Sendo assim, o centro de massa e o centro de gravidade não necessariamente se coincidem.

Levando em consideração os foguetes atuais, suas dimensões são suficientemente pequenas, assim o centro de massa e gravidade coincidem, pois tal diferença é desprezível.

Centro de pressão

Um corpo, ao se deslocar na atmosfera, sofre a pressão do ar distribuída em toda sua superfície, a força resultante cruza o eixo de simetria do veículo.

Margem estática

É a distância entre o centro de pressão e o centro de gravidade

Pressão dinâmica

Um gás em movimento exerce uma pressão sobre uma superfície com qual venha de encontro. Isso se deve ao impacto das moléculas do gás ao atingirem uma superfície com energia cinética. A expressão de tal pressão dinâmica é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (2.5)$$

onde P é a pressão dinâmica, V é a velocidade do gás e a densidade do gás é ρ .

Quando um veículo se desloca na atmosfera, o ar está inerte, ou seja em velocidade (vento) muito inferior à do foguete, portanto V será a velocidade do veículo.

Pressão estática

Essa pressão é exercida por um gás sobre as paredes do recipiente que o contém. Considerando os chamados gases perfeitos, podemos definir essa pressão através da Equação de Clapeyron:

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (2.6)$$

onde P é a pressão estática, n é a massa molecular do gás (número de mols), R é a constante universal dos gases perfeitos, T é a temperatura absoluta, em Kelvin (K) e V é o volume no qual o gás está contido.

Arrasto aerodinâmico

É a componente da força aerodinâmica na direção do eixo do foguete, opondo-se ao seu avanço na atmosfera, ou seja, uma força que reduz a energia cinética do veículo. Por ser uma grandeza vetorial, seu módulo é determinado pela geometria do foguete e pelas condições de escoamento aerodinâmico.

Ângulo de ataque

É o ângulo entre o eixo do foguete e o seu vetor velocidade, em um certo instante do voo

Força Normal

É o componente da força aerodinâmica, na direção perpendicular ao eixo do veículo, e a sua linha de ação passa pelo centro de pressão. A força normal é proporcional ao ângulo de ataque, quando este é inferior a 5 graus.

Estabilidade Estática

O foguete é aerodinamicamente estável quando volta à posição de equilíbrio, após ser excitado por uma perturbação. Isso ocorre quando a força normal restaura a posição de equilíbrio, anulando o ângulo de ataque ocasionado pela perturbação. A margem estática positiva está associada à essa condição e é ilustrada na figura 2.1.

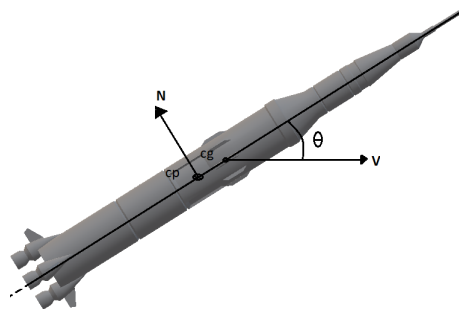


Figura 2.1: Veículo estável

Perceba que a força normal N produz torque em torno do centro de gravidade, alinhando o eixo do foguete como vetor velocidade. Quando o foguete é aerodinamicamente instável, o ângulo de ataque provocado por uma perturbação aumenta pela ação da força normal. A margem estática negativa está associada a essa condição e é ilustrada na figura 2.2.

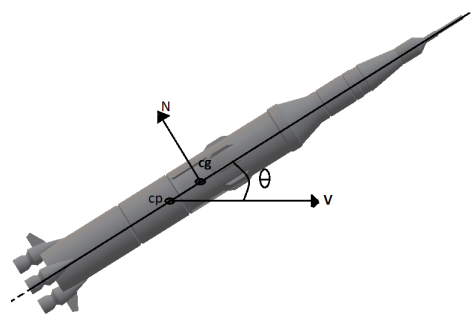


Figura 2.2: Veículo instável

Perceba que a força normal N agora produz momento em torno do centro de gravidade, desalinhando ainda mais o eixo do foguete em relação ao vetor velocidade, aumentando indefinidamente o ângulo e ataque, ocasionando a perda do voo.

Lastro

Adição de peso (lastro) no compartimento inferior de carga útil, por essa ser a região mais distante do centro de gravidade do veículo, logo, pela fórmula

$$T = F \cdot d \quad (2.7)$$

onde momento/torque (T), é o produto entre a força (F) e o braço de alavanca (d), perpendicularmente ao ponto fixo, que neste caso será o centro de gravidade, concluímos que isso permite uma menor adição de massa para fins de estabilização. (PALMEIRO, 2017)

Trajectoria

A trajetória de um foguete é o conjunto de parâmetros que caracteriza a cada instante, o percurso do foguete entre o seu ponto de decolagem até o ponto em que sua missão é concluída.

Janela de lançamento

Período de tempo dentro do qual o lançamento do foguete deve ocorrer, quando são satisfeitas as condições requeridas pelos experimentos, pelas condições climáticas e pela segurança.

Elevação do lançador

É o ângulo formado entre o eixo do foguete, quando ligado ao lançador, e a horizontal do local. Essa parte leva em conta os efeitos dos ventos na obtenção da trajetória desejada, sempre buscando elevar a favor do vento, sendo igual ou superior à elevação nominal.

Apogeu da trajetória

É o ponto de maior altitude, ou seja, a altura máxima alcançada pela carga útil do veículo. Assim, considerando o eixo cartesiano, o vetor velocidade vertical será nulo, e o módulo da velocidade vertical, será igual a velocidade impressa pelo motor no último estágio, pois as forças dissipativas em uma atmosfera rarefeita, tendem à zero.

Alcance

Denominado como a distância entre o ponto de lançamento e o local de impacto, da carga útil, de partes do veículo.

Zona livre de evolução (ZLE)

Região da superfície da Terra onde são permitidos os impactos de partes do foguete. Essa região abrange tanto o comportamento esperado do foguete, como perdas de rumo.

Ablação

Um material exposto a uma atmosfera de gases quentes, seu revestimento sofre carbonização, ou seja, ele queima, essa camada é lentamente arrastada pelo fluxo, fazendo com que a parte mais inferior também seja carbonizada. Tal processo é conhecido como ablação.

Booster

É um conjunto de motores, que são ativados paralelamente ao motor principal, cujo a função é fornecer empuxo suficiente para auxiliar naquela fase propulsada. (PALMEIRO, 2017) Em geral, é acionado no início do lançamento para fornecer um impulso (I) para o foguete, ou seja, uma força de empuxo (F) é aplicada devido à queima, durante um período de tempo Δt ,

$$I = F \cdot \Delta t \quad (2.8)$$

facilitando o veículo vencer a força gravitacional e os ventos.

Podemos exemplificar o impulso através de um lance livre no basquete, no qual o jogador abaixa-se, depois levanta lentamente e lança a bola na cesta. Assim, é mais eficiente do que aplicar uma força com maior intensidade e um curto período de tempo.

Tubeira

Componente com função de acelerar o ar proveniente da combustão de propelente, antes de lançá-los para atmosfera, tal ganho de velocidade pode ser descrito através do Princípio de Bernoulli, no qual um fluido em escoamento, neste caso, com baixa velocidade e alta pressão passa por uma zona na qual a área é reduzida, assim sua velocidade aumenta e a pressão reduz como é mostrado na figura 2.3.

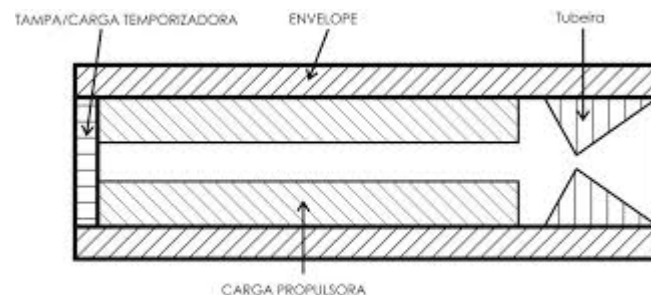


Figura 2.3: Esquema de um motor de foguete com tubeira

Nesta segunda parte da revisão bibliográfica serão abordados assuntos relacionados a como um time de projetos deve seguir para desenvolver um produto de qualidade, no prazo e não tendo gastos desnecessários, além de aprofundar alguns tópicos que gerem o funcionamento de um veículo espacial.

Empuxo

Matematicamente falando, empuxo é a força externa líquida agindo sobre um objeto que pode ser calculado como a taxa de mudança do momento linear do corpo. Em outras palavras,

$$p = mv$$

onde p é o momento linear de um corpo de massa m e movendo com velocidade escalar v . A força média aplicada no corpo é

$$F = \frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \quad (2.9)$$

Podemos notar que nessa equação, a massa e a velocidade não são constantes, logo é um equação que pode ser relacionada com o modo que um foguete funciona, ocorre o consumo de combustível, consequentemente a sua massa é reduzida e a sua velocidade aumenta. Esse consumo de combustível gera gases, devido à combustão, que são liberados na parte inferior do foguete, tubeira, que pela Terceira Lei de Newton ocorre o movimento do veículo no sentido oposto da ejeção dos gases resultantes da combustão figura 6.

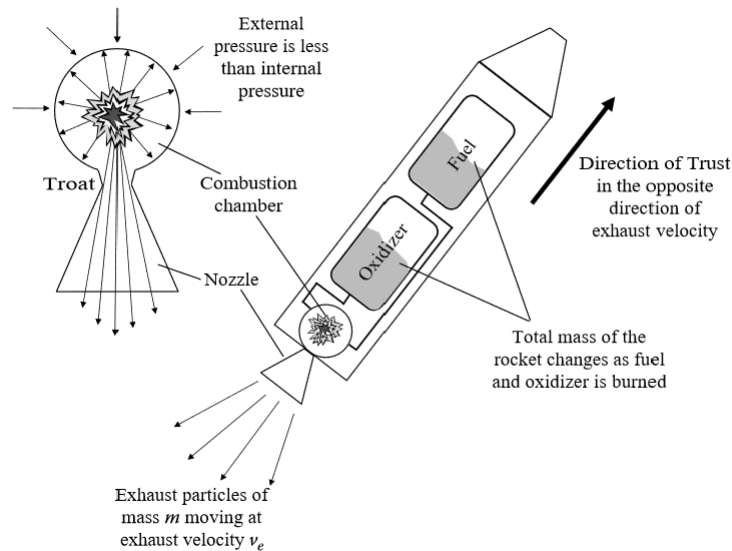


Figura 2.4: Terceira Lei de Newton no foguete

É importante ressaltar que a velocidade do veículo é dependente da velocidade de escape dos gases. Assim, podemos reescrever a equação anterior da seguinte maneira

$$F = m \frac{dv_e}{dt} + v_e \frac{dm}{dt} \quad (2.10)$$

onde v_e é a velocidade de escape dos gases resultantes do consumo de propelente. (TAYLOR, 2009)

Na parte mais à direita da equação anterior, $\frac{dm}{dt} = \dot{m}$ representa a taxa que o propelente é consumido e essa taxa é controlada pelo acelerador do veículo. Já na parte central da equação, temos $m \frac{dv_e}{dt} = m \dot{v}_e$ que representa uma força, porém essa é dependente

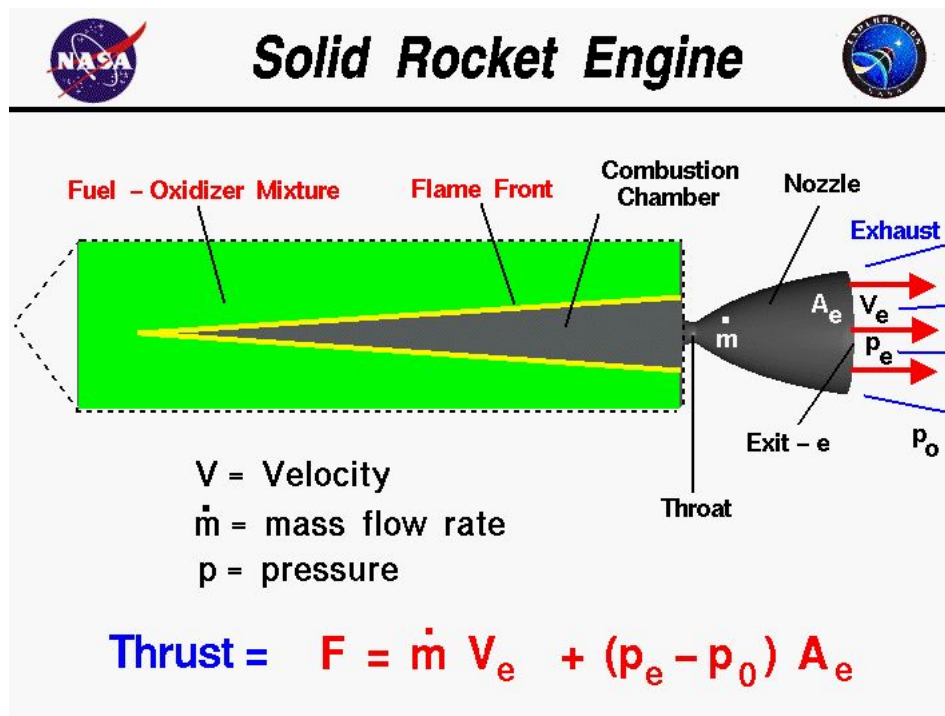


Figura 2.5: Equação do Empuxo em um foguete

da diferença de pressão existente entre a pressão dentro do bocal, pouco antes dos gases serem ejetados do foguete, e a pressão fora do bocal de exaustão (TAYLOR, 2009). Assim, a equação pode ser reescrita como

$$F_{empuxo} = (P_e - P_o)A_e + v_e \frac{dm}{dt} = (P_e - P_o)A_e + v_e \dot{m} \quad (2.11)$$

onde P_e e P_o são as pressões interna e externa do bocal, respectivamente, e A_o é a área de saída do bocal figura 2.5.

Essa equação é importante, pois nos permite analisar um determinado motor e calcular o empuxo que ele pode gerar, além da mobilidade que nos permite em projetar um motor com um empuxo específico.

Impulso

Conhecido como uma grandeza física que está relacionada à variação da quantidade de movimento, ou momento linear, de um corpo sobre o qual atua uma força durante um intervalo de tempo. O Impulso, I às vezes chamado de impulso total, pode ser definido como a força total integrada em relação ao tempo e pode ser escrito como

$$I = \int F dt$$

Contudo, usando a relação $F = \frac{dp}{dt}$, obtemos o *Teorema do Impulso-Momento*

$$I = Ft = \Delta p$$

Se considerarmos uma força gerada por uma massa variando e a velocidade constante chegamos à seguinte equação

$$I = \Delta p = (m_i - m_f)v$$

Por outro lado, e considerarmos a variação da massa como sendo a variação da massa de propelente, ou seja, essa diferença seria a quantidade de combustível que fora queimada, e a velocidade como a velocidade de exaustão dos gases resultantes da combustão, sabemos que esta é constante. Temos que

$$v_e = \frac{I}{\Delta m_{\text{propelente}}} \quad (2.12)$$

Reexaminando a equação anterior, se definirmos um novo parâmetro denominado *velocidade equivalente* ou *velocidade efetiva de exaustão*, C , podemos reescrever a equação da seguinte forma

$$C = \frac{I}{\Delta m_{\text{propelente}}} = \frac{F_{\text{empuxo}}}{\dot{m}} \quad (2.13)$$

Essa equação nos mostra que o impulso embarcado no motor do foguete dividido pela massa propulsora ejetada é igual à velocidade equivalente. Por outro lado, sem perda de generalidade, se dividirmos a equação pela gravidade local, ou seja, g , chegaremos à uma equação mais útil

$$I_{sp} = \frac{I}{\Delta m_{\text{propelente}}g} = \frac{C}{g} \quad (2.14)$$

O novo parâmetro é I_{sp} cujo representa o Impulso Específico do motor. Essa equação nos diz que o I_{sp} de um motor é a quantidade de tempo total que o foguete pode entregar um impulso igual ao peso da massa total do propulsor a aceleração devido à gravidade terrestre. De forma mais direta, quanto maior o I_{sp} , maior será a velocidade de ejeção que pela Terceira Lei de Newton irá garantir uma maior velocidade de reação no sentido oposto da ejeção.

A figura 8 traz uma tabela exemplificando a classificação de um motor conforme o impulso total que é embarcado nesse

Rocket Motor Classification	
Class	Total Impulse (Newton-sec.)
A	1.26 - 2.5
B	2.5 - 5
C	5 - 10
D	10 - 20
E	20 - 40
F	40 - 80
G	80 - 160
H	160 - 320
I	320 - 640
J	640 - 1280
K	1280 - 2560
L	2560 - 5120
M	5120 - 10240
N	10240 - 20480
O	20480 - 40960
P	40960 - 81920
Q	81920 - 163840

Figura 2.6: Classificação de motores

Equação de foguete de Tsiolkovsky

Uma equação que se apoia em ideias simples, mas de profundos significados que rege o ganho de velocidade do foguete, pode ser utilizada na fase inicial do projeto para ter um estimativa preliminar de desempenho, visto que a equação não leva em consideração fatores reais que influenciam no ganho final de velocidade. (PALMERIO, 2017) (TAYLOR, 2009)

$$v_f = v_i + I_{sp}g \ln \frac{m_i}{m_f} \quad (2.15)$$

Onde:

- v_f : velocidade final do foguete;
- v_i : velocidade inicial do foguete;
- I_{sp} : impulso específico do motor;
- g : gravidade ao nível do mar;
- m_i : massa total inicial;
- m_f : massa total final.

3 METODOLOGIA

Tendo em vista que a metodologia atual da equipe não está cumprindo totalmente as necessidades a qual deveria, sendo na maioria das vezes precária. A seguir serão analisados dois modelos de estrutura de desenvolvimento de projetos abordados na revisão bibliográfica.

Modelos de Engenharia de Sistemas

Primeira Etapa - Formulação

Nesta etapa serão realizados estudos sobre os requisitos da missão/competição, desenvolvimento do escopo do projeto, definição de como será o cronograma a ser elaborado pela equipe, prévia dos custos do projeto.

Pre fase A - Estudos de Conceitos

O ponto de início do projeto é a fundamentação teórica de como será o produto final, quais devem ser as suas especificações, restrições de materiais, requisitos da competição, pretensões da equipe com o projeto.

Geralmente nesta parte são realizados pequenos estudos para o estabelecimento da missão no projeto e para formular requisitos de sistema de alto nível, ou seja, é a elaboração da infraestrutura do produto, neste caso um foguete, assim, a equipe irá analisar qual posição cada sistema do foguete deve ocupar, por exemplo: o sistema de recuperação fica mais perto da eletrônica, a propulsão fica na parte inferior.

Vale lembrar que existem requisitos não definidos pela competição como as restrições no transporte de propelentes, explosivos. Todos esses aspectos devem ser bem analisados e estruturados no início do projeto, a fim de evitar possíveis gastos desnecessários.

Fase A - Conceito e Desenvolvimento de Tecnologia

Nesta fase é iniciado o desenvolvimento das tecnologia necessárias, o esforço da equipe neste período se concentra em analisar e estabelecer uma arquitetura da missão, metas e objetivos são solidificados, os riscos são identificados mais detalhadamente, e o desenvolvimento da tecnologia é focado neste processo. (NASA, 2007)

Assim, nesta etapa há o esforço na alocação de itens específicos de hardware, software, seleção de materiais etc. Requisitos funcionais e de desempenho do sistema, ao longo com arquiteturas e desenhos, tornar-se firme como sistema compensações e compensações de subsistemas iteram de um lado para o outro no esforço de buscar projetos com melhor custo-benefício. (NASA, 2007)

Fase B - Design Preliminar e Tecnologia Concluída

Nesta etapa são atualizados os gerenciamentos de riscos, custos e cronograma do projeto, relatar o que foi desenvolvido na fase anterior, finalizar e executar os requisitos de nível superior para o próximo nível de requisitos, estabelecer e design de linha de base para as especificações (hardware e software) e desenhos, verificação planos de validação e documentos de interface em níveis mais baixos. (NASA, 2007)

Segunda Etapa - Implementação

Fase C - Design Final e Fabricação

Neste estágio são analisados os designs desenvolvidos, por cada departamento, na fase anterior. Se aprovados, será fundamentado o design final do produto e em seguida começará a manufaturas dos componentes dos sistemas e subsistemas, e em seguida a sua validação, ou seja, analisar se as peças/códigos foram produzidos conforme esperado. Durante esta fase, aspectos técnicos, cronograma e orçamentos são acompanhados de perto, a fim de evitar que aspectos indesejáveis - tais como: aumento da massa do veículo, crescimento dos custos - sejam percebidos tardiamente, reduzindo as soluções de contorno. Ainda nesta fase, após a checagem de todas as manufaturas, é iniciado o processo de integração dessas peças ao produto final. (NASA, 2007)

Fase D - Montagem do Sistema, Integração e Teste, Lançamento

Durante esta fase é focado o processo de montagem, integração e teste do sistema. Etapa a qual foi iniciada durante a fase A e agora ocorrerá a validação do produto final, ou seja, verificar se os resultados obtidos pelos testes são correspondentes aos esperados na fase inicial do projeto. Nesta fase são iniciadas as atividades para o pré-lançamento, o lançamento e a integração do veículo final. (NASA, 2007)

Esta etapa só é concluída quando ocorre a validação de todos os sistemas, ou seja, o projeto final atenderá ao propósito para o qual foi criado. (NASA, 2007)

Fase E - Operações e Sustentação

Nesta fase todas as atividades desenvolvidas são para conseguir, efetivamente, validar o ofício do veículo, ou seja, fazer com que o foguete e sua *payload* (carga paga) cumpram a missão primordial.

Assim, é perceptível que grandes mudanças nesta fase acarretarão a necessidade da criação de um novo produto, já que o desenvolvimento de veículos de grande complexidade tais como: foguetes, possuem relações muito delicadas entre os departamentos, por exemplo uma mudança no sistema de recuperação influenciará em uma alteração na estrutura e eletrônica do veículo.

Logo, é economicamente mais viável alterações de grande escala durante a etapa de formulação do projeto, impactando muito menos do que se ocorressem mudanças nesta etapa.

Fase F - Encerramento

Na última etapa do ciclo de vida de um projeto conforme (NASA, 2007) ocorre o retorno do veículo, ou seja, o acionamento do sistema de recuperação, a coleta e análise dos dados obtidos. Esta fase, assim como as outras, é importante porque ao estudar as informações obtidas, a equipe de projetos saberá quais aspectos devem ser melhorados para que projetos semelhantes possam ter mais sucesso.

3.1 Ciclo V

Um modelo muito conhecido dentro da Engenharia de Sistemas é o "Ciclo V"^{3.1}, ele representa esquematicamente como um projeto deve ser elaborado, no quesito de organização e validação dos sistemas e subsistemas para obter sucesso ao final do projeto.

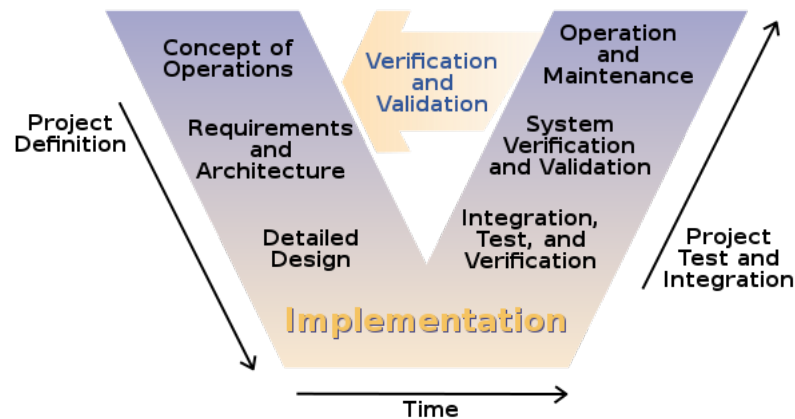


Figura 3.1: Engenharia de Sistemas Padrão V (Ciclo V)

Analisando o Ciclo V, o projeto será iniciado na parte superior esquerda do esquema no sentido *"top-down"*, ou seja, da parte superior para a inferior. Aqui é onde a concepção da arquitetura global do produto começa a ser elaborada, os requisitos de design de sistema devem ser definidos. (TAYLOR, 2009)

Em seguida, o caminho segue para a parte inferior do V, nesta parte os requisitos de projeto de componentes individuais são desenvolvidos na revisão preliminar de design (PDR). (TAYLOR, 2009)

Uma vez que os requisitos de design foram cumpridos do sistema superior para as componentes de nível são desenvolvidas, uma revisão de design crítico (CDR) é realizada para fazer os ajustes finais antes de ser autorizada a manufatura das peças e os testes. (TAYLOR, 2009)

É válido ressaltar a importância da nomenclatura, visto que o engenheiros de projetos devem trabalhar no cumprimento dos prazos PDR ou CDR.

Após o CDR é iniciado a fabricação das componentes de cada subsistema. As peças são integradas em um sistema maior, o qual os testes são iniciados após uma revisão de prontidão de teste (TRR). (TAYLOR, 2009)

Após vários testes de alto rigor, o sistema passa por uma revisão de verificação do sistema (SVR) (TAYLOR, 2009), onde a análise de todos os dados do processo de

engenharia de sistemas até o momento é conduzido para verificar e validar se o foguete está pronto para entrar em operação. Se após essa análise, verificarem que o sistema precisa de mais desenvolvimento, é necessário recomeçar todo o ciclo.

Tecnologia, Integração e Prontidão de Sistemas

Embasado no livro *Introduction to Rocket Science and Engineering*, para poderem localizar em qual parte do ciclo o projeto se encontra, os engenheiros e cientistas da NASA¹ utilizam níveis de prontidão que descrevem a maturidade dos componentes e integração. Os componentes são descritos pela TRLs -*technology readiness levels*- que são divididos em nove partes TRL 1 à TRL 9. A figura 15 2.5 mostra a definição das TRLs.

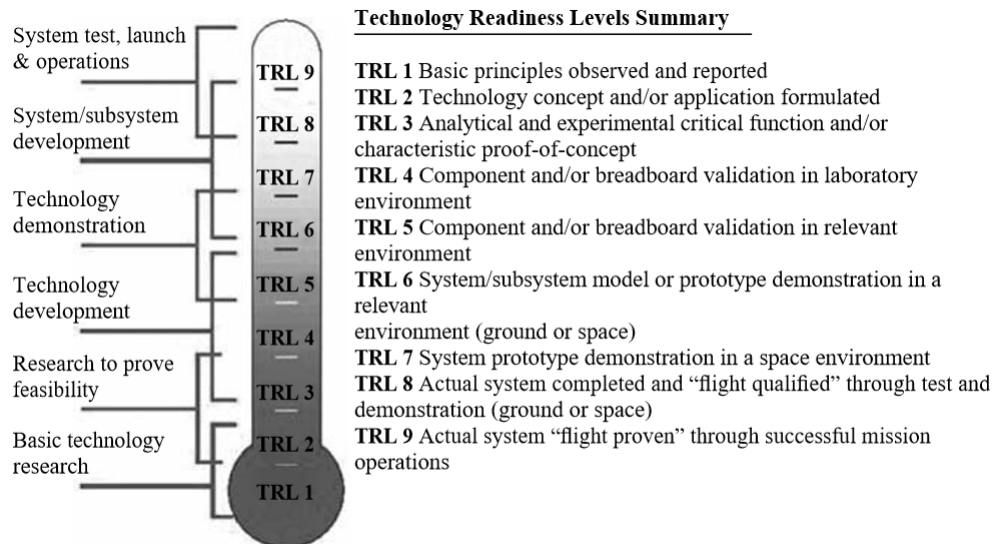


Figura 3.2: Níveis de Prontidão de Tecnologia (TRL)

Assim, os envolvidos na construção do veículo devem aprender essas definições como discussões, reuniões, testes que devem ser sobre em qual TRL um componente específico de sistema/subsistema se encontra. E é através disso que um componente é conduzido ao TRL seguinte, por meio de análise, modelagem e simulação. É válido notar que a princípio o objetivo é alcançar a TRL 6 onde um experimento em voo pode acontecer, e, assim, chegar à TRL 9 onde o lançamento na competição ocorre.

As TRLs abordam os componentes individuais do foguete, mostrando o nível de maturidade elemento particular, entretanto, um veículo espacial é a integração de todos os itens específicos e todos devem funcionar em perfeita harmonia. Assim, existe

¹ NASA é uma agência do Governo Federal dos Estados Unidos da América responsável pela pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e programas de exploração espacial.

a necessidade de um meio o qual os engenheiros, cientistas e líderes de projeto possam avaliar em qual nível essa união está. A ideia de nível de prontidão integrada (IRL) atende a essa necessidade, são subdivididas em cinco níveis- IRL 1 ao IRL 5- a figura 8 mostra as definições do IRL e TRL. Como citado no livro *Introduction to Rocket Science and Engineering*, a IRL

"Descreve a maturidade de vários componentes trabalhando juntos como um subsistema."

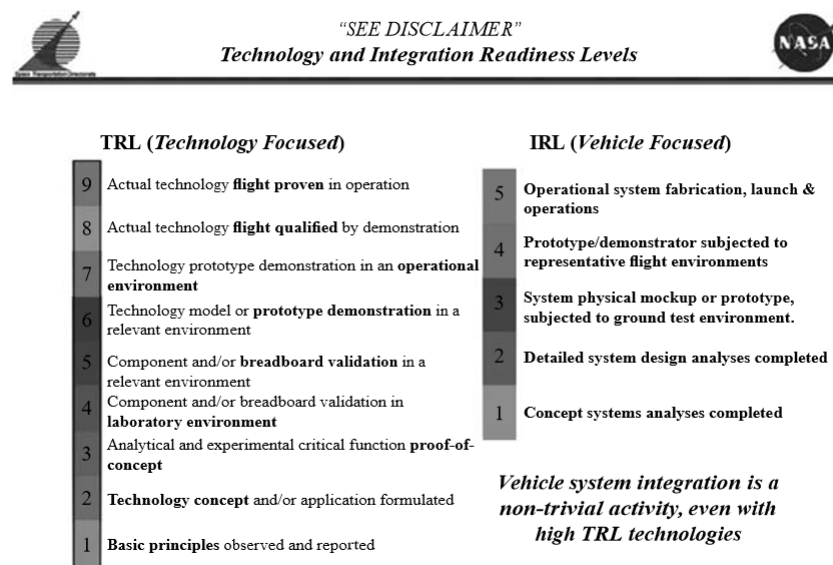


Figura 3.3: Nível de Prontidão de Tecnologia (TRL) e Nível de Prontidão Integrada (IRL)

Como o IRL e TRL estão intimamente ligados, existe um sentido em que ambos prevalecem à execução d projeto, ou seja, não é vantajoso avançar no desenvolvimento dos componentes individuais e não realizar um integração ao nível, mas avançar na integração enquanto os itens específicos não foram devidamente elaborados também não é conveniente. Assim, o "caminho perfeito" no qual ambos devem seguir é denominando de nível de prontidão de sistemas (SRL), que é um gráfico IRL *versus* TRL, figura 17 4.1. (TAYLOR, 2009)

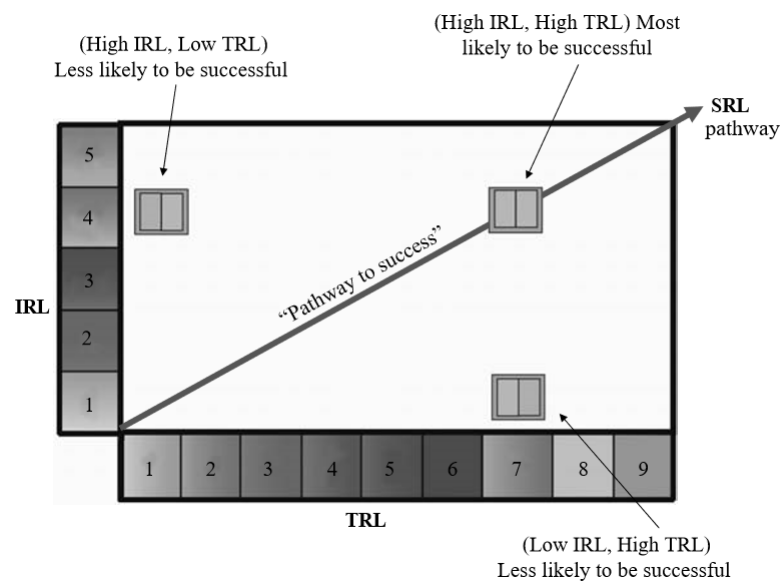


Figura 3.4: Nível de Prontidão de Sistemas (SRL)

4 ANÁLISE DAS RESPOSTAS DAS ENTREVISTAS

Em uma das perguntas realizadas aos integrantes da UFABC Rocket Design, realizada por meio de um formulário eletrônico, foi realizada a seguinte questão: "Após o seu ingresso na equipe, quais os principais pontos que você sentiu dificuldade quando começou a desenvolver a atividade ao qual foi destinado?". Após a resposta da grande maioria dos integrantes, foi obtida a relação a seguir, figura 9 1.2.

Após o seu ingresso na equipe, quais os principais pontos que você sentiu dificuldade quando começou a desenvolver a atividade ao qual foi destinado?

36 respostas

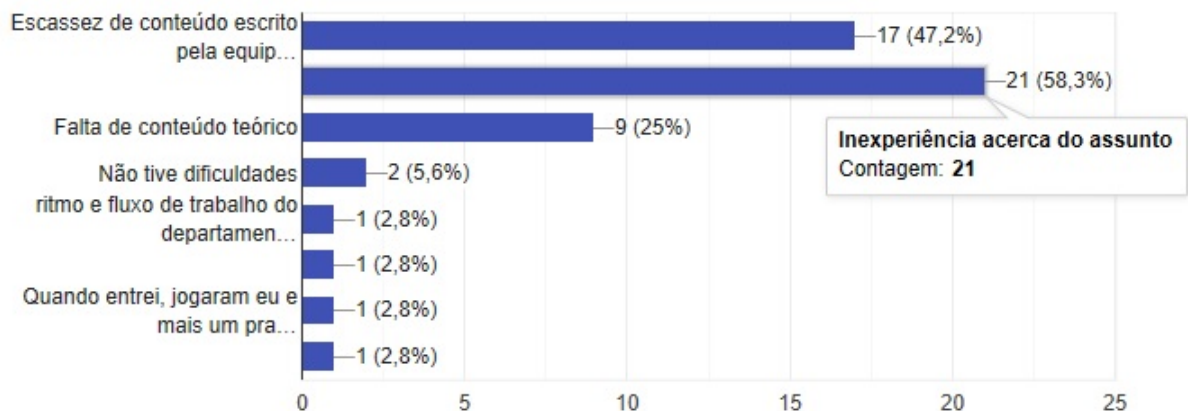


Figura 4.1: Pergunta formulário

Considerando que uma possível causa de retardamento durante a execução de um projeto, principalmente por novos membros, seja devido às dificuldades mencionadas em algumas das respostas e analisando um princípio bem conhecido no meio de gestão de projetos, o Princípio de Pareto ¹, o qual, entre suas diversas interpretações, demonstra

¹ Este esquema foi criado por um economista e sociólogo italiano, Vilfredo Pareto, que nasceu em Paris, e morreu em 1923, em Genebra. O Diagrama de Pareto tem o objetivo de compreender a relação ação - benefício, ou seja, prioriza a ação que trará o melhor resultado.

um desequilíbrio entre causa e efeito, ou seja, a minoria das causas, fatores ou esforços, em geral leva à maioria dos resultados, produtos ou consequências. 1.1

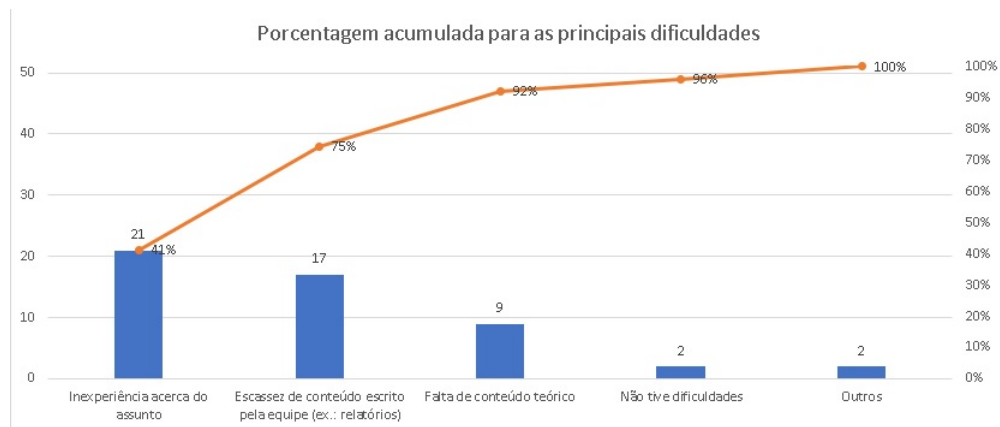


Figura 4.2: Gráfico de Pareto para figura 9

De acordo com a figura 4.2, a porcentagem acumulada da "escassez de conteúdo" e "inexperiência acerca do assunto" somam em 75%, e as duas respostas correspondem à aproximadamente 30% de todas as respostas listadas na figura 4.2.

Assim, uma maneira de reduzir esse possível retardo causado pelas dificuldades que os novos membros se deparam ao entrar na equipe, seria tratar os 30% que foram responsáveis por 75% das respostas afirmativas.

Outro aspecto que a equipe deve tratar é o relato de produtos e técnicas desenvolvidas pelo grupo. Foi abordado no questionário a seguinte pergunta: "Qual a importância de escrever relatórios durante a execução de um projeto?", e como resposta figura 4.3.

Qual a importância de escrever relatórios durante a execução de um projeto?

36 respostas

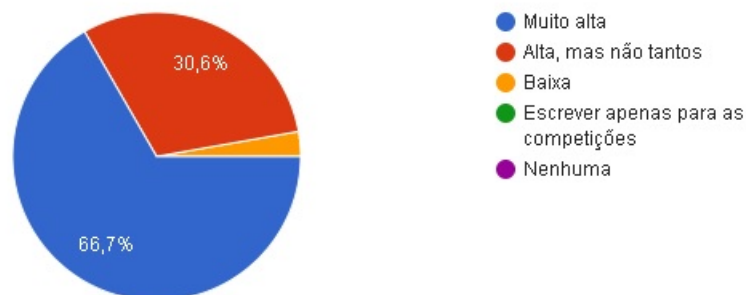


Figura 4.3: Importância de escrever relatórios

Em seguida foi questionado sobre: se o membro escrevia ou não relatórios, e como respostas figura 4.4.

Você escreve relatórios relacionados ao núcleo de projetos?

36 respostas

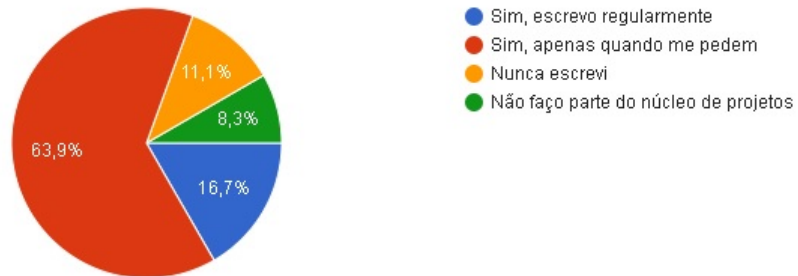


Figura 4.4: Porcentagens sobre escrita de relatórios

Analisando as figuras 4.3 e 4.4, é perceptível que a maioria dos membros considera de alta importância a equipe possuir um banco de dados, entretanto, menos de 20% dos entrevistados escreve relatórios regularmente, ou seja, existe uma falha nesse aspecto ao qual deve ser melhorada, visando aumentar a quantidade de membros que produzem tal conteúdo.

Quando abordados sobre como classificam a metodologia adotada pela equipe durante a execução de um projeto figura 4.5. Apenas 5,6% considera o sistema muito bom, os outros 94,4% consideram que a metodologia não é boa ou poderia ser melhor. Assim, é importante a reavaliação da estrutura de desenvolvimento de um projeto que a equipe está adotando, aspecto que será apresentado mais a frente nesta pesquisa.

Durante a execução de um projeto. Como você avalia a metodologia adotada pela equipe?

36 respostas

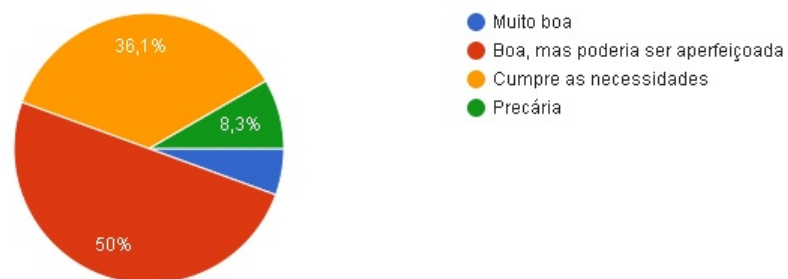


Figura 4.5: Avaliação da Metodologia

5 CONCLUSÕES - METODOLOGIA PROPOSTA

Visando uma melhor performance durante o desenvolvimento de um projeto e considerando a metodologia do Ciclo V, assim como a proposta em *NASA Systems Engineering Handbook* e *Introduction to Rocket Science and Engineering*, a equipe poderia buscar desenvolver um sistema matricial de organização de projeto, composto por: líderes de projetos, consultores e membros. Tal aspecto pode ser resumido na figura 5.1.

	Projeto A	Projeto B	Projeto C
	Líder A	Líder B	Líder C
Consultor 1	Membros		
Consultor 2			
Consultor 3			

Figura 5.1: Sistema Matricial

Analisando a figura 5.1, durante o desenvolvimento de um projeto a equipe necessitaria de um ou dois líderes de projeto, a quantidade pode variar conforme a necessidade do grupo e as dimensões do programa, consultores e membros.

O papel do líder será coordenar o projeto, analisando o cronograma, o desenvolvimento do veículo, o custo, nível de integração, ou seja, o líder necessitará de acompanhar a fundo cada etapa que o projeto possui, começando na análise do edital da competição até a verificação pós voo.

Para os consultores, sua função é auto explicada pelo nome, deverão servir de referência para sanar quaisquer dúvidas que ocorreram durante a execução de um projeto, como exemplo: durante um teste estático, ao analisar os dados, verificou-se uma anormalidade, o encargo do consultor será descobrir alguma razão para tal anomalia ocorrer, juntamente com os membros e o líder de projeto. Não será necessária a participação efetiva dos consultores na construção do projeto, mas sim no seu desenvolvimento, normalmente os consultores serão os membros que possuem mais experiência na equipe.

Já para os membros, sua função é construir o projeto e realizar todos os testes para que o veículo possa receber "GO" antes do lançamento.

É válido lembrar que a comunicação entre esses três grupos deve ocorrer de maneira fluída e clara, a fim de evitar que o cronograma do projeto não seja cumprido. Para isso serão necessárias reuniões quinzenais para discutirem as atividades que serão propostas para as duas semanas seguintes, as que foram propostas e as concluídas, assim como problemas que aconteceram durante o desenvolvimento das atividades quinzenal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TAYLOR, Travis. *Introduction to Rocket Science and Engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2009.

NASA. *NASA Systems Engineering Handbook*. [S.l.]: NASA Headquarters, 2007.

PUCCI, Luís Fábio. Dinâmica de foguetes - A Segunda Lei de Newton. 2014. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/sica/dinamica-de-foguetes-a-segunda-lei-de-newton.html>>.