



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



PROJETO DE FOGUETES PARA LANÇAMENTO DE NANO SATÉLITES

Wagner Frederico Cesar Mahler

Trabalho de Iniciação Científica, orientado
pelo Dr. Denilson Paulo Souza dos Santos.

NPE
São José dos Campos
2013

"Eu me abstive de escrever uma outra tese, pensando comigo mesmo: não se importe, você vai provar que pode se tornar um grande cientista, mesmo sem o título de doutor."

Hermann Oberth

"A Terra é o berço da humanidade, mas ninguém pode viver no berço para sempre!"

Konstantin E. Tsiolkovsky

"Deus tenha piedade de um homem de um sonho só."

Robert H. Goddard

"O foguete trabalhou perfeitamente, exceto por ter pousado no planeta errado".

Wernher von Braun

Dedico este trabalho a todos aqueles que sempre me incentivaram e apoiaram.

AGRADECIMENTOS

BS”D, agradeço a D’us por capacitar-me todos os dias de minha vida. Agradeço a minha mãe por ensinar-me os verdadeiros valores da vida. Ensinar-me que existem bens maiores que o dinheiro, sendo estes a sabedoria e o conhecimento, pois dinheiro algum poderá comprá-los e ladrão algum poderá roubá-los. Ao meu pai por todo incentivo moral e a minha irmã pelos conselhos em meio aos momentos difíceis. Agradeço também ao Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), aos meus grandes mestres pelo conhecimento adquirido e por fim, para que não seja feita injustiça evitarei nomes em específico, agradeço também aos meus familiares e amigos por todo apoio.

RESUMO

Primeiramente, serão apresentadas pesquisas referentes às revisões bibliográficas a respeito da corrida espacial, mais especificamente o surgimento do foguete, suas concepções teóricas e práticas. O trabalho seguirá apresentando, de forma gradual, a definição do que vem a ser um foguete, tal como sua função civil (veículo) ou militar (míssil), suas partes e qual sua funcionalidade.

Os sistemas de coordenadas são apresentados por meio de triedros dispostos no corpo e no referencial inercial, sendo este fixado na plataforma de lançamento e o outro localizado no centro de massa do veículo. As forças e torques, inerentes ao comportamento do foguete em voo, serão apresentados e decompostos no triedro do corpo. Os conceitos da física e da matemática foram fundamentais para a modelagem teórica do foguete. A modelagem inicia-se apresentando as equações da dinâmica translacional e rotacional de um foguete. De acordo com algumas condições específicas de voo e de projeto foram feitas simplificações no modelo adotado capazes de facilitar os cálculos. Admite-se que haja apenas movimento de ROLL. Como o nozzle é fixo, ou seja, não haverá deflexão da tubeira e conseqüentemente variação do fluxo de gases expelidos pelo bocal, os movimentos de PITCH e YAW serão considerados pequenos o suficiente para serem desconsiderados. O voo será considerado como sendo planar, sendo este definido como plano de voo.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1 – MODELOS DE MÍSSEIS PROJETADOS PELO PROGRAMA ESPACIAL ALEMÃO.....	5
FIGURA 2 – COMPARAÇÃO DE TAMANHO DO SATURNO V COM OS DEMAIS LANÇADORES.	6
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE ESPECIFICAÇÃO DE CLASSE (FOGUETE/MÍSSIL). .	9
FIGURA 4 – TRAJETÓRIA PARABÓLICA, UNS DOS TIPOS DE TRAJETÓRIA DE UM FOGUETE.	15
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE FORÇAS QUE ATUAM NUM FOGUETE EM VOO....	16
FIGURA 6 – COORDENADAS DO SISTEMA INERCIAL LOCALIZADO NO CENTRO DA TERRA REPRESENTADOS POR $(X_I; Y_I; Z_I)$ E SISTEMA TOPOCÊNTRICO LOCALIZADO NO PLANO TANGENTE DE LANÇAMENTO REPRESENTADOS $(x_1; y_1; z_1)$	20
FIGURA 7 – TRIEDRO INERCIAL E TRIEDRO DO CORPO. REPRESENTAÇÕES ANGULARES DOS MOVIMENTOS DE ROTAÇÃO E TRANSLAÇÃO AO REDOR DOS EIXOS DO FOGUETE.....	21
FIGURA 8 – ROTAÇÃO DO TRIEDRO INERCIAL SOBRE OS ÂNGULOS DE EULER E REPRESENTAÇÃO DOS PLANOS DE ROTAÇÃO DO FOGUETE.	22

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
TABELA 1 – CATEGORIA E CARACTERÍSTICA DE CADA TIPO DE VOO.....	11

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3. FOGUETES	8
3.1. Definição	8
3.2. Tipos de Foguete	8
3.3. Uso/Finalidade	9
3.3.1. Militar	10
3.3.2. Investigação Científica	10
3.3.3. Voo Espacial	12
3.3.4. Resgate.....	12
3.3.5. Entretenimento e Missilismo	12
3.4. Concepção Físico-Matemática do Movimento e Dinâmica de Forças	13
3.4.1. Sistemas do Corpo e Ângulos de Euler	19
4. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	24

1. INTRODUÇÃO

A humanidade como conhecemos foi construída devido às pessoas que em algum momento de suas vidas, motivados por um sonho, pela curiosidade humana, pela busca do conhecimento e pela sua criatividade, foram responsáveis por encontrar soluções que transformaram não só as nossas vidas, como também a face de nosso planeta.

Desde os primórdios o homem tem observado o espaço e tentado entender as perguntas que surgiam e o indagavam. Aos poucos a luz do conhecimento foi trazendo brilho através de equações que explicavam ou tentavam explicar o que era observado. Da *Philosophiae* lançada pelos gregos (CHAUI, 2000) até a Relatividade de Einstein (EINSTEIN, 1920), o ser humano foi adquirindo ferramentas para poder expandir seus horizontes terrestres em busca da conquista espacial.

Como peça fundamental para o desenvolvimento da ciência e conseqüentemente da humanidade pode-se citar o surgimento dos foguetes. Estes lançaram e lançam, ainda hoje, equipamentos ao espaço como sondas interplanetárias capazes de revelar os segredos dos planetas mais distantes. Telescópios espaciais que observam as estrelas e as galáxias longínquas. Não é preciso ir muito além, basta ater-se aos satélites que orbitam o planeta Terra revelando detalhes impossíveis de serem percebidos da superfície.

O desenvolvimento de todos esses equipamentos se iniciou no final do século XIX, início do século XX e que talvez fique marcado como o século em que o homem saiu da Terra e chegou ao espaço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por volta do século X e XI os chineses fabricavam fogos de artifício por meio de uma mistura de salitre, enxofre e pó de carvão (MEDEIROS, 2004). No início do séc. XIII, a dinastia Sung chinesa, adiciona aos seus dardos foguetes usados para repelir os invasores mongóis na batalha de Kai-fung-fu em 1232 era comum. Além da possibilidade de alcances maiores estas setas explodiam ao chocar-se com o solo (HAMILTON, 1999).

A história do foguetismo está atrelada aos grupos de entusiastas que, em meio a muitos fracassos, iniciaram de fato a construção destes veículos. O surgimento da ciência astronáutica deve-se a Robert Hutchings Goddard (EUA), Konstantin Tsiolkovsky (Rússia) e Hermann Oberth (Alemanha) os grandes pioneiros na concepção de foguetes e responsáveis pelo ato inicial do estudo e desenvolvimento do assunto.

Robert Hutchings Goddard (1882 – 1945) especializou-se na concepção e construção de foguetes propelidos por combustível líquido (gasolina e oxigênio). Seu primeiro voo aconteceu em 16 de março de 1926, em Auburn, Massachusetts nos Estados Unidos (JENNER, 2012).

Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky (1857 – 1935) foi o primeiro a calcular a velocidade de escape de um veículo da Terra. Esta equação é conhecida com “Equação de Tsiolkovsky” e é apresentada em sua obra literária intitulada "Исследование мировых пространств реактивными приборами" (A exploração do espaço cósmico por meio de dispositivos de reação). Publicada em 1903 é provavelmente o primeiro estudo acadêmico sobre foguetes. Foram mais de quinhentas as publicações ao longo de sua vida relacionadas a assuntos espaciais. Entre suas obras encontram-se esquemas para foguetes com múltiplos estágios, estações espaciais e sistemas biológicos de ciclo fechado para fornecer comida e oxigênio a colônias no espaço (CANRIGHT, 2012).

Hermann Oberth (1894 – 1989) suas ideias iniciais surgiram após ler um livro de Júlio Verne chamado "Da Terra à Lua". A partir de então ele ficou intrigado com este tipo de assunto e aos poucos foi assimilando o conceito de viagem espacial. Aos 14 anos

de idade, Oberth imaginou o que ele veio a chamar de “foguetes de recuo” baseado em um impulso gerado pela expulsão de gases de escape por um bocal.

Em 1929 ele explicou em um livro como foguetes poderiam escapar à gravidade da Terra. Oberth tornou-se mentor de um jovem conhecido pelo nome de Wernher Von Braun. Juntos, eles trabalharam na pesquisa de foguetes para a Alemanha e para os Estados Unidos (CANRIGHT, 2010).

Até então nenhum míssil capaz de atingir altitudes e velocidades elevadas havia surgido. Apesar de Goddard ter feito um foguete sair do solo, seu projeto voou por poucos metros (JENNER, 2012).

Durante a segunda metade de 1933 surge o projeto *Aggregat*, sob o comando da Wehrmacht (Força de Defesa), cujo objetivo era o projeto e o desenvolvimento de foguetes (LEY, et al., 1969). No total foram idealizados doze projetos *Aggregat*, todavia nem todos saíram do papel. Ao mesmo tempo surge na Rússia o RNII (Instituto de Pesquisas de Propulsão a Jato) pelo decreto n^o 113 da ação militar revolucionária soviética, (assinada por Tukhachevskiy), como resultado de uma fusão entre o GDL (Laboratório de Dinâmica e Gás) em Leningrado (agora São Petersburgo) e do Grupo com sede em Moscou para a Investigação do Movimento Reage (MosGIRD). Em 01 de outubro de 1933, o GDL tornou-se oficialmente um ramo de Leningrado (LO) do RNII.

O primeiro foguete da série *Aggregat* foi o A-1 projetado pelo engenheiro Wernher Von Braun em Kummersdorf sob o comando de Walter Dornberger. Com finalidades militares este míssil foi o primeiro a usar sistema de arrefecimento por seu próprio combustível (LEY, et al., 1969). Estes fluíam através de uma camisa de refrigeração especial envolvendo a câmara de combustão (PRYBILSKI, 2012). O conceito foi desenvolvido pela primeira vez, aparentemente por Arthur Rudolph e Piesstch Alfons (ZAK, 2008). Desde o início do foguetismo este havia sido o projeto mais sofisticado e complexo devido aos sistemas de comando e controle inseridos em seu hardware (giroscópios, aletas de controle, direcionadores de fluxo de queima) (PRYBILSKI, 2012). Uma ignição atrasada detonou uma mistura explosiva que havia se acumulado na câmara de combustão fracassando lançamento do A-1. Melhorias foram realizadas no sistema de ignição e de acordo com relatórios de Von Braun um segundo A-1 havia

sido construído e lançado. Apesar de ter voado bem, como dito por ele, outros fatores o chamaram pra uma reformulação completa. O nariz do foguete era pesado demais e isso deslocava demais o centro de gravidade para cima, problema este que poderia ser resolvido deslocando o giroscópio para o centro do corpo, entre os motores. Esta nova configuração foi chamada de A-2 (ZAK, 2008).

O foguete A-2 era a melhoria realizada sobre o A-1. Como já citado acima, o giroscópio foi posicionado entre os motores e tanques de propelente realocando o centro de gravidade do veículo para baixo (REISIG, 1997).

O míssil A-3 surgiu em fevereiro de 1935 após um orçamento de quase meio milhão de marcos enviado para o General Karl Becker por comando do Major Ernst Ritter Von Horstig para a construção de novas bancadas de ensaios estáticos em Kummersdorf (NEUFELD, 2007). Introduziu o conceito de sistemas de orientação inercial e foi o primeiro a ser lançado da região de Peenemünde em 04 de dezembro de 1937 como parte da Operação Farol (NEUFELD, 2007) e (HUZEL, et al., 1981). Por apresentar problemas com a abertura dos paraquedas de captura, do sistema de orientação inercial, instabilidades do corpo e do projeto da aleta este foguete voltou as bancadas de projeto e deu origem ao A-4 ou V2 (NEUFELD, 2007).

Em uma base secreta em Peenemünde os alemães criam o foguete A-4, um míssil capaz de atingir 112 km de altitude e alcançar uma velocidade de 5600 km/h. Em 1942 foram realizados os primeiros testes (citação). Conhecido por *Vergeltungswaffe 2* ou simplesmente V2 este foi efetivamente o primeiro míssil balístico da história. Esta bomba era propelida por álcool (mistura de 75% de álcool etílico e 25% de água) e oxigênio líquido. Os motores geravam um máximo de 160000 lbs de empuxo, desenvolvendo velocidade de 5600 km/h, com um raio de alcance de 290 a 320 km. Elas foram usadas para bombardear Bélgica, Paris e Londres durante a Segunda Guerra Mundial. O engenheiro responsável pelo projeto foi Wernher Von Braun (1912 – 1977) (A SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, 1966).

Após o A-4 foi desenvolvido e lançado o A-4b e o A-5. Com o início da derrota da Alemanha o programa de desenvolvimento e pesquisas espaciais perdeu força e os modelos A-6, A-7, A-8, A-9, A-10, A-11 e A-12 jamais saíram do papel. Todo o programa espacial alemão pode ser visto na Figura 1.

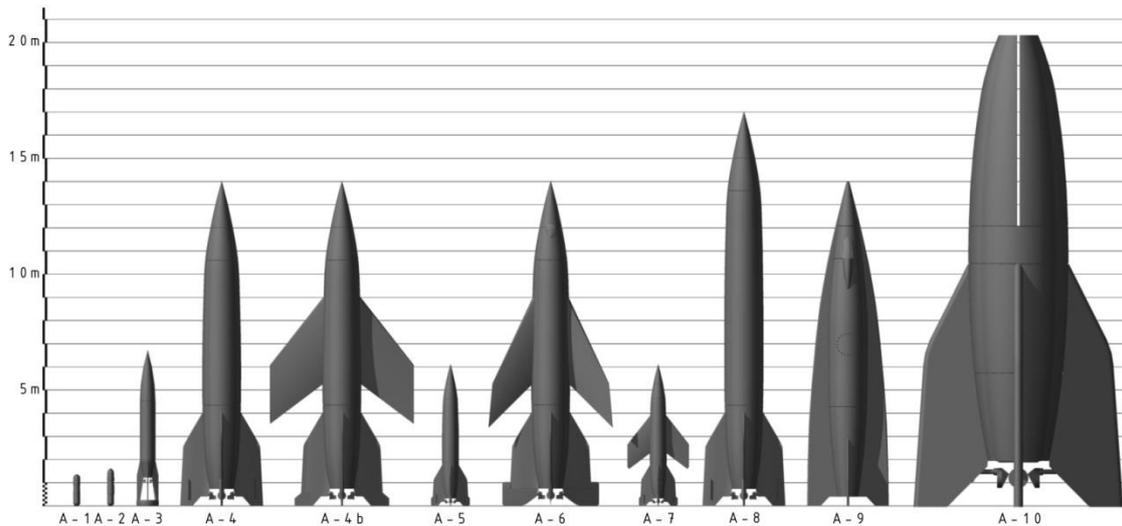


Figura 1 – Modelos de mísseis projetados pelo programa espacial alemão.

Com o final da Segunda Grande Guerra, a Alemanha foi dividida em duas partes, uma ocidental e outra oriental tendo como tutores Estados Unidos e União Soviética, respectivamente. Devido ao sucesso da V2, ambos os países capturaram os engenheiros responsáveis pelo projeto e deram início a pesquisa e construção de seu veículo espacial.

O primeiro a conseguir foi a U.S.S.R. com o míssil balístico intercontinental R7 (ou "Sputnik I") (1957–1957). Este foi o responsável pelo lançamento da primeira sonda espacial conhecida como Sputnik, lançada em 4 de outubro de 1957 do Cosmódromo de Baikonur. Em 3 de novembro de 1957, o veículo Sputnik II carrega a bordo o primeiro ser vivo a ir para o espaço, a cadela russa chamada Kudriavka. Os E.U.A. responderam com seu primeiro satélite, o Explorer I, lançado em 31 de janeiro de 1958 pelo foguete Júpter-C (CONWAY, 2003).

A tentativa de uma missão tripulada Russa ceifou a vida de muitos cosmonautas (HAIMOFF, 1999). Até que Vladimir Ilyushin (1927 – 2010) se torna o primeiro homem a ir para o espaço em 7 de abril de 1961 dando três voltas em torno da Terra dentro de uma sonda (HAIMOFF, 1999), (ENCYCLOPEDIA ASTRONAUTICA, 2012) e (OLDHAM, et al., 2009). Por motivos do governo comunista essa história foi ocultada e uma simulação de lançamento rendeu os créditos a Yuri Alekseyevich Gagarin (1934

– 1968). Do lado americano em maio de 1961 um Mercury-Redstone lançou Shepard a bordo da Freedom-7 em um voo suborbital (GRAY) e (DRYDEN, 1961).

O Titan II, foguetão de dois andares, foi usado para o lançamento das capsulas Gemini no período de 1964 – 1966. Lançou doze cápsulas, dentre essas dez tripuladas (STUMPF, 2000).

Em 1958 no Marshall Space Flight Center da NASA inicia-se o desenvolvimento do Saturno V (WILSON, 2012). Classificado como um dos maiores veículos desenvolvidos até o momento, como pode ser visto na Figura 2, este foi responsável pelo lançamento da Apollo 8 e conseqüentemente a conquista da Lua pelo homem. Operou de dezembro de 1968 com a Apollo 8 até maio de 1973 para colocar o Skylab em órbita (WILSON, 2009).

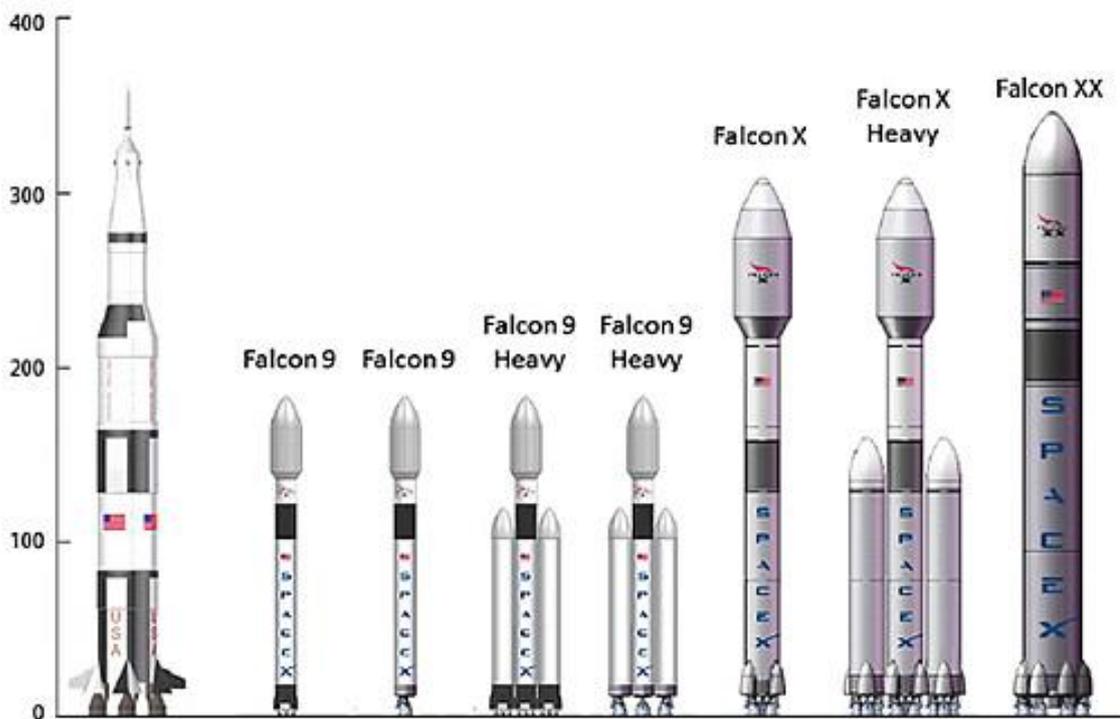


Figura 2 – Comparação de tamanho do Saturno V com os demais lançadores.

Daí por diante *rovers* (definir rovers) foram enviados para estudar o solo de Marte (NASA, 2010) e (JPL - NASA, 2012) entre outras diversas missões (DAVIS, 2010) todas possíveis e realizadas por meio de foguetes lançadores.

O Brasil deu início com seu programa espacial na década de sessenta com o MEB (Missão Espacial Brasileira) e chegou a fazer lançamentos como, por exemplo, os foguetes de sondagem meteorológico SONDA. O VLS (Veículo Lançador de Satélite) ainda não foi lançado. Há pretensões para que o lançamento ocorra o mais breve possível (DA SILVEIRA, 2012).

Os primeiros foguetes surgiram de forma amadora e se aperfeiçoaram com o passar do tempo, tornando-se veículos complexos e avançados. Hoje em dia, grupos amadores de foguete modelismo projetam, constroem e lançam foguetes de pequeno porte. Richard Nakka é um dos mais conhecidos modelistas de foguetes experimentais, dando início aos seus projetos em meados da década de 70, o qual prossegue até os dias de hoje (NAKKA, 2013).

3. FOGUETES

Foguetes são veículos com potencialidades civis ou militares.

Neste capítulo serão desenvolvidos os tópicos referentes a:

- Definição;
- Tipos de Foguete;
- Uso/Finalidades;
- Concepção Físico-Matemática do Movimento e Dinâmica de Forças;
- Componentes;
- Motores;
- Propelentes.

3.1.DEFINIÇÃO

Foguetes ou mísseis podem ser definidos como sendo veículos ou armas, respectivamente, geralmente de geometria cilíndrica, de formato esguio, comprido ou curto, lançados na vertical ou horizontal por meio de motores que queimam, em sua cavidade interna, uma mistura definida como propelente. Podendo ser lançados também de pontos estacionários ou em movimento, com finalidades civis ou militares (HILL, et al., 1992), (SUTTON, et al., 2001) e (OXFORD UNIVERSITY, 2013).

3.2.TIPOS DE FOGUETE

Existem muitos tipos de foguetes, cada qual de acordo com sua finalidade. Eles podem ser desde simples artefatos típicos de festas folclóricas de um país (ASSUNÇÃO, 2010) como veículos complexos responsáveis por realizar viagens espaciais (BARRY, 2012). Todavia, todos tem uma característica comum que é carregar todo o propelente consigo.

Alguns exemplos de foguetes:

- Modelos minúsculos de foguete (“busca pé”, “espada de São João”) (ASSUNÇÃO, 2010);
- Foguetes amadores que podem ser produzidos ou comprados em uma loja de hobby missilismo (NAKKA, 2012);
- Carros foguete; (ARNDT)

- Motos foguete;
- Aeronaves de motor a jato (HILL, et al., 1992);
- Trens foguete;
- Torpedos (geralmente mísseis militares) (POLMAR, et al., 2004) e (III BAKER, 2000);
- Mochilas a jato (THE ROCKETMAN, 2010);
- Sistemas de assento ejetável (BONSOR, 2008);
- Foguetes lançadores, foguetes espaciais e sondas (BARRY, 2012).

3.3.USO/FINALIDADE

Foguetes são utilizados para muitas finalidades dentre elas militares, investigações científicas, voos espaciais, resgates e entretenimento. A Figura 3 apresenta o diagrama de especificação de classe.

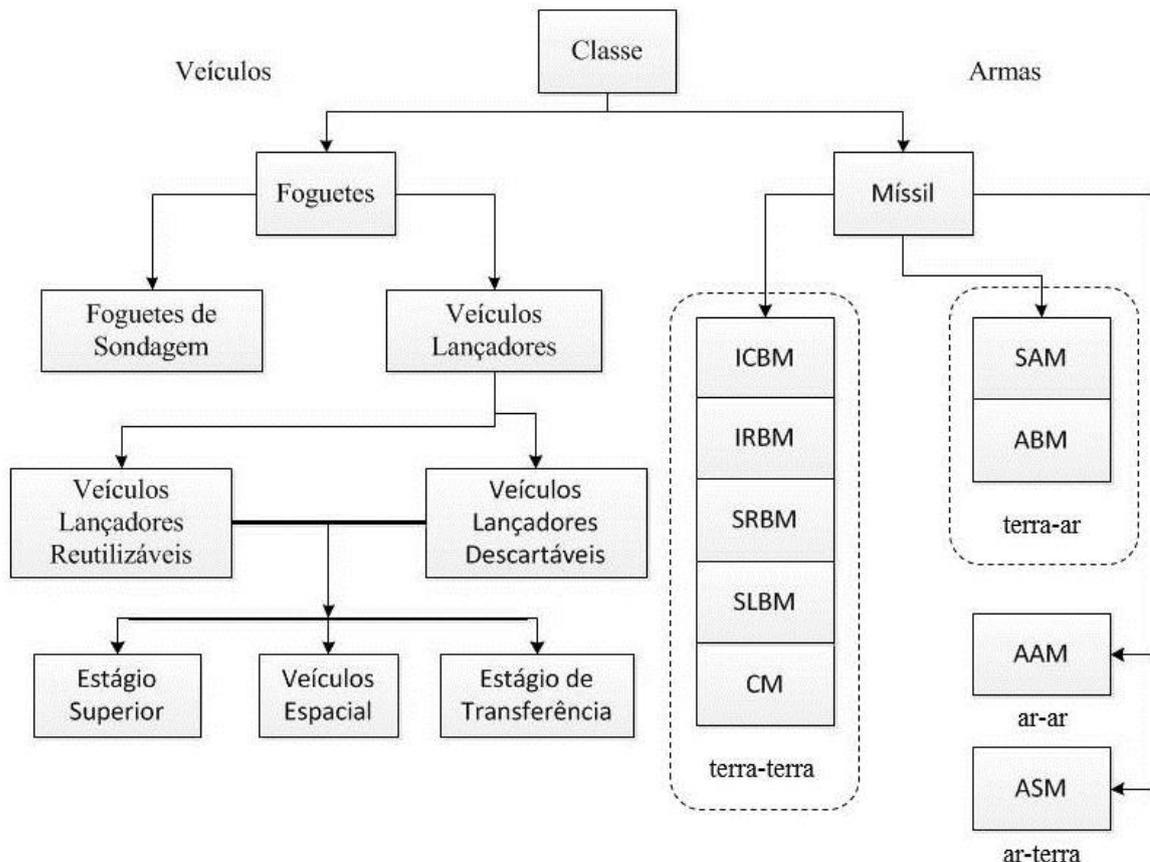


Figura 3 – Diagrama de especificação de classe (foguete/míssil).

3.3.1. MILITAR

Algumas armas militares usam foguetes para impulsionar cargas explosivas até seus objetivos. Se um foguete e a sua carga possuem um sistema de orientação são geralmente referidos como mísseis (nem todos os mísseis utilizam motores foguete), caso contrário, se não é dirigido, será chamado foguete (RIPER, 2004).

Altamente destrutivos são usados em combates com o objetivo de eliminar ou imobilizar o inimigo. Seu lançamento pode ser de uma base estática localizada na terra ou de algum outro veículo (avião, submarino, tanque) em movimento. Eles podem ser do tipo ar-ar (AAM), ar-superfície (ASM), superfície-ar (SAM), superfície-superfície (SSM), míssil de cruzeiro, míssil antinavio, míssil anticarro ou antitanque (ATGM), míssil balístico, míssil balístico intercontinental (ICBM), míssil balístico lançado de submarino (SLBM), míssil antibalístico e míssil antissatélite (ASATs). Por exemplo, mísseis antitanque e antiaéreo utilizam motores de foguete para atingir alvos em alta velocidade a uma distância de vários quilômetros, enquanto mísseis balísticos intercontinentais podem ser usados para o carregamento de várias ogivas, por exemplo, nucleares a milhares de quilômetros de distância do ponto de lançamento (THE INDEPENDENT TEAM, 2008) e mísseis antibalísticos usados para tentar detê-los.

3.3.2. INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

Os veículos responsáveis por embarcar instrumentos capazes de realizar testes em instrumentos usados em satélites e naves espaciais, instrumentos de leitura, de aferição e por realizar experimentos em voo sub-orbital são conhecidos como foguetes de sondagem. Geralmente atingem altitudes em torno de 50 a 1500 km acima da superfície da Terra (MARCONI, 2007). A Tabela 1 apresenta as categorias e características de cada tipo de voo.

Tabela 1 – Categoria e característica de cada tipo de voo.

Categoria	Descrição	Altitude
Voo suborbital espacial	A nave espacial chega espaço e, em seguida, retorna para a atmosfera após seguir uma trajetória balística (principalmente).	100 km acima do nível do mar.
Voo espacial orbital	Voo espacial orbital (ou voo orbital) é aquele cujo uma sonda é colocada numa trajetória, o qual poderia permanecer no espaço por pelo menos uma órbita.	Altitudes acima de 100 km.
Voo espacial interplanetário	Voo interplanetário é aquele cuja as viagens são entre os planetas dentro de um único sistema planetário.	Tomando a Terra como referência, a distância varia de acordo com o período orbital do planeta em que se pretende chegar. Marte, por exemplo quando está mais próximo da Terra se encontra a 56.000.000 km.
Voo espacial interestelar	Voo interestelar é aquele cuja as viagens são entre planetas de outros sistemas estelares dentro de uma mesma galáxia.	Também varia conforme as condições orbitais e de um sistema estelar para outro. Por exemplo, Alpha Centauri se encontra a 4,3 anos luz da Terra e é o sistema solar mais próximo do nosso.
Voo espacial Intergaláctico	Voo intergaláctico é aquele cuja as viagens são entre galáxias.	A galáxia anã ou satélite mais próxima do centro da Via Láctea é a de Cão Maior que está a 42 mil anos luz.
Voo suborbital espacial ponto-a-ponto	Ponto-a-ponto é uma categoria de voo espacial, entre países, em que utiliza-se de um voo suborbital como forma de transporte de passageiros.	Por exemplo, uma viagem de Londres a Sydney pode durar duas horas em um voo ponto-a-ponto.

3.3.3. VOO ESPACIAL

O voo espacial é realizado por meio de uma nave, tripulada (ENCYCLOPEDIA ASTRONAUTICA, 2012) ou não (JPL - NASA, 2012), que parte de uma plataforma de lançamento que fornece suporte estável até alguns segundos após a ignição, em voo balístico, com o objetivo de exploração espacial ou atividades comerciais como o turismo espacial e de telecomunicações por satélite. Como geralmente esses voos são de caráter orbital (SIDDIQI) ou além (BUTRICA, 1998) a velocidade de escape precisa ser vencida e daí se faz o uso dos foguetes com o intuito de aumentar a velocidade de lançamento e conseqüentemente vencer a velocidade de escape do planeta Terra. Desta forma, a nave começa a desprender-se e passa a sair do solo, ou seja, escapar do efeito gravitacional terrestre. O programa espacial americano tem o *Space Shuttle*, por exemplo, como voo tripulado (JENKINS, 2002). Por outro lado, voos não tripulados como sondas espaciais que deixam a órbita da Terra (JPL - NASA, 2012) ou satélites orbitais terrestres (INPE, 2011), podem ser citados como exemplo. Estes operam tanto por controle tele robótico ou são completamente autônomos.

3.3.4. RESGATE

Alguns foguetes tripulados como Saturno V e Áries, por exemplo, são capazes de arremessar os astronautas para longe do foguete caso a missão falhe e precise ser abortada. Este sistema é conhecido como "Torre de Abortamento de Lançamento" (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009). Este sistema é bastante parecido com os assentos ejetáveis de aeronaves militares e que por sinal podem ser considerados também como foguetes de resgate por serem capazes de impulsionar os pilotos para longe de suas aeronaves quando as mesmas encontram-se sobre perda total do controle de voo (BONSOR, 2008).

Outro exemplo seriam os foguetes de emergência mais conhecidos como pistolas sinalizadoras. Quando acionadas propulsionam uma carga luminosa para o alto que pode ser vista a alguns quilômetros de distância.

3.3.5. ENTRETENIMENTO E MISSILISMO

Por se tratar de um assunto fascinante muitos entusiastas propõem-se a projetar, construir e lançar foguetes de pequeno porte classificados como foguetes amadores. Muitas destas pessoas acabam trabalhando de forma profissional nesta área. Um

caso bastante conhecido é o de Homer Hickam, cientista da NASA (HICKAM JR, 2000) e (JOHNSTON, 1999).

Foguetes amadores podem ser construídos por meio de utensílios simples, como uma com garrafa pet, por exemplo. Movido a água sob pressão, estes modelos atingem poucos metros de altura. Modelos mais complexos a base de propelentes ignitivos podem atingir altitudes mais elevadas, entretanto a periculosidade e os riscos de danos sérios aumentam. É preciso cautela com estes tipos de projeto. Um nome muito conhecido entre os missilistas é o de Richard Nakka, que tem por finalidade foguetes movidos a propelente de açúcar e nitrato de potássio (NAKKA, 2012).

Foguetes também são usados por alguns tipos de fogos de artifício profissionais e amadores.

3.4. CONCEPÇÃO FÍSICO-MATEMÁTICA DO MOVIMENTO E DINÂMICA DE FORÇAS

A dinâmica de lançamento e voo destes veículos está baseada em duas leis fundamentais da física, mais precisamente expressa pela Terceira Lei de Newton e pelo princípio da conservação da quantidade de movimento descrita pela Segunda Lei de Newton (SUTTON, et al., 2001). Ao expelir uma quantidade de gases em um sentido o foguete adquirirá uma aceleração no sentido contrário ao de saída destes gases. Para que haja conservação do momentum linear, o foguete desloca-se no sentido oposto com tal velocidade que, multiplicada pela massa total do foguete naquele instante, o valor de sua quantidade de movimento é igual à quantidade de movimento dos gases expelidos.

À medida que o propelente é queimado o foguete é acelerado, ou seja, sua velocidade aumenta. Se a última parcela de massa de propelente for queimada no instante de tempo $t_n = n - 1$ a velocidade máxima poderá ser calculada pela Equação (1.1):

$$|\vec{v}_n| = m |\vec{u}_e| \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{M - im} \right) \quad (1.1)$$

Onde $|\vec{v}_n|$ é a velocidade final após a queima da última parcela de massa de propelente; m é a massa de propelente; $|\vec{u}_e|$ é a velocidade de exaustão dos gases e M é a massa total do foguete.

Tendo a gravidade e a resistência do ar como forças impeditivas ao movimento, o que ocasionam a não conservação da energia mecânica do sistema, isto não implicará numa desaceleração abrupta do veículo, ele continuará seu movimento baseado no princípio da Primeira Lei de Newton. A trajetória segue uma função do segundo grau como mostra a Equação (1.2), o que caracteriza uma parábola, assim ilustrada pela Figura 4.

$$y(t) = y_0 + v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (1.2)$$

Onde $y(t)$ representa a altitude máxima relativa a $|\vec{v}_n|$; y_0 é a altitude em que se encontra o plano de lançamento; Δt a variação de tempo entre o instante inicial de queima e o instante final de queima; v_0 é a velocidade inicial do foguete e a é a aceleração do foguete.

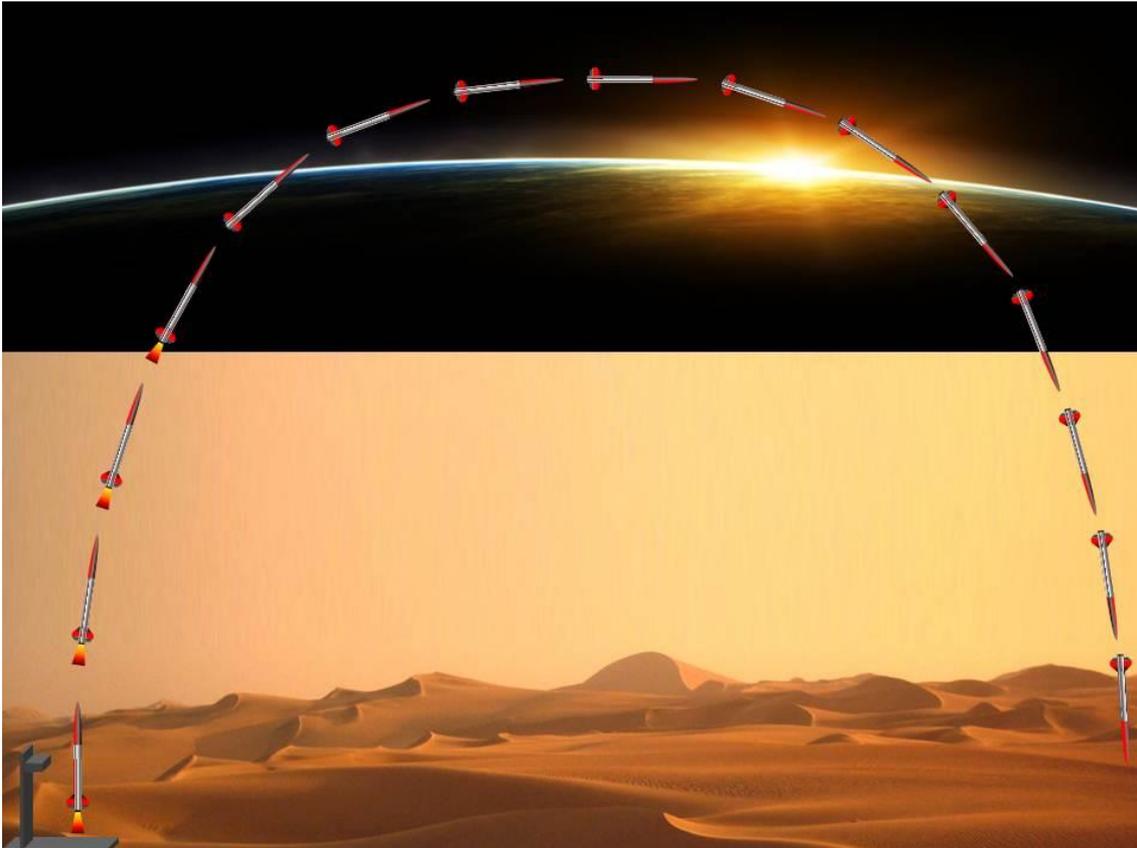


Figura 4 – Trajetória parabólica, uns dos tipos de trajetória de um foguete.

As Leis de Newton são válidas apenas para referenciais inerciais (MEIROVITCH, 1970) e (GOLDSTEIN, et al., 2001). Para isso um sistema de referência deverá ser definido de maneira que todos os vetores de forças e momentos possam ser representados neste sistema. Geralmente dois triedros são posicionados, sendo um no referencial e outro no corpo. Como os sensores encontram-se localizados no corpo e as medidas são realizadas no mesmo, normalmente todos os vetores são representados no triedro do corpo.

Para o VLS (Veículo Lançador de Satélites) adota-se o triedro inercial na plataforma de lançamento e o outro triedro no centro de massa do veículo (LEITE FILHO, 2011).

Basicamente as forças que atuam sobre um veículo em voo são o empuxo, as forças aerodinâmicas, força gravitacional e as forças de controle (SUTTON, et al., 2001). No caso de veículos propulsionados, como foguetes, utilizam o empuxo para causar-lhe aceleração ou desaceleração, forças de arrasto ou mudar a direção de voo (rotação e

translação) por meio da técnica do *Thrust Vector Control* (TVC) na deflexão da tubeira. Esta técnica normalmente é aplicada a vários regimes de voo; voo dentro da atmosfera (mísseis ASM ou foguetes de sondagem), ambientes do espaço próximo (terra satélites), lunar e voos planetários e fora do raio de influência solar, em condições de voo estável ou perturbado (SUTTON, et al., 2001) e (ROSKAN, 2001). Na Figura 5 são apresentados os vetores das forças atuantes em um foguete e o vetor velocidade do corpo, relativo a superfície.

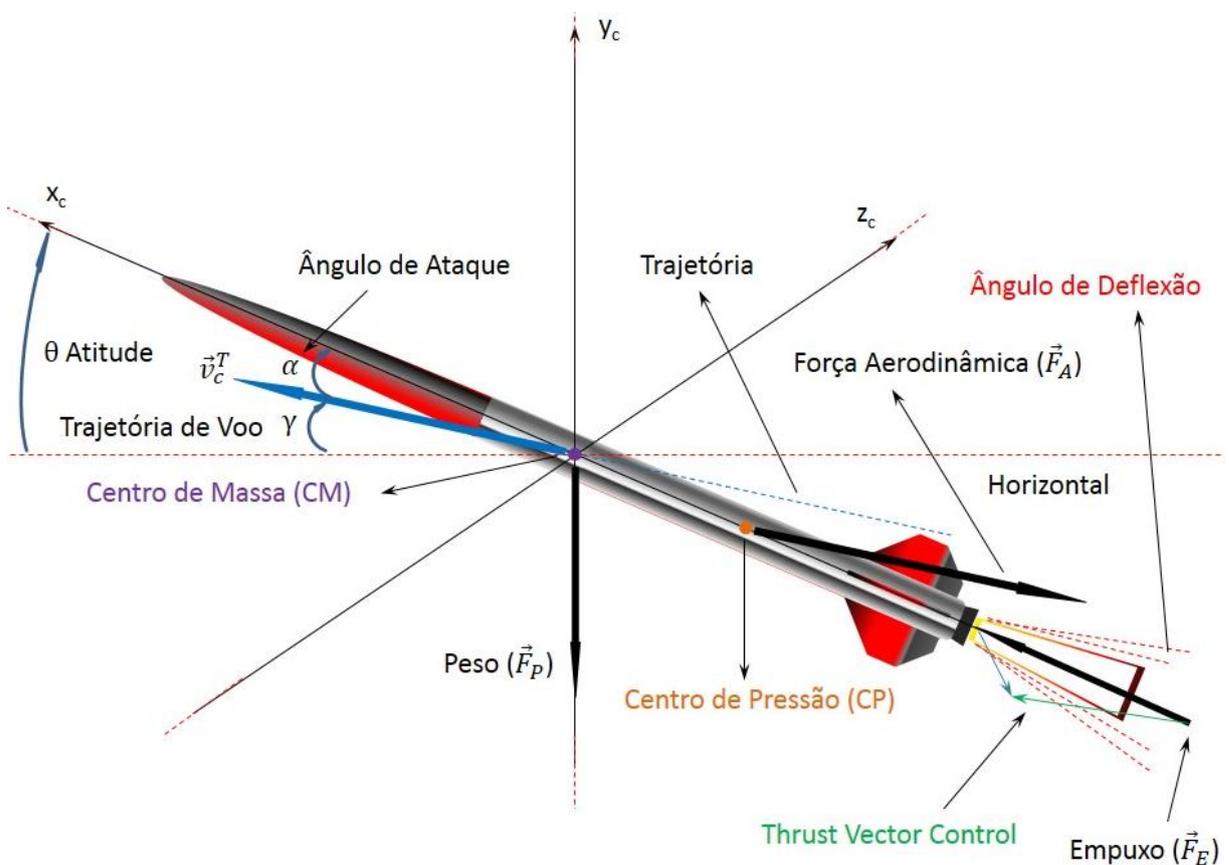


Figura 5 – Diagrama de forças que atuam num foguete em voo.

Basicamente em foguetes lançadores o somatório de forças é dado pela Equação (1.3):

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_G + \vec{F}_A \quad (1.3)$$

Onde \vec{F} é a representação vetorial das forças relativamente conhecidas¹ atuantes o corpo; \vec{F}_E é o vetor força de empuxo do foguete; \vec{F}_G é o vetor força gravitacional e \vec{F}_A é o vetor força aerodinâmica.

O empuxo é a força produzida por um motor gerador, como um propulsor ou um foguete. Ele normalmente atua na direção do eixo longitudinal do veículo, isto é, ao longo do eixo do veio propulsor do foguete (SUTTON, et al., 2001). Em muitos foguetes a taxa de consumo de massa \dot{m} do propulsor é essencialmente constante e os transientes de partida e parada são geralmente muito curtos e podem ser desprezados.

A força aerodinâmica surge em virtude do diferencial de pressão entre o intradorso e o extradorso e atua no centro de pressão (CP), neste caso, de um foguete. Ela é proporcional à velocidade do corpo relativa ao vento ($\vec{F}_A \propto \vec{v}_c^v$) e varia em função do ângulo de ataque, que é o ângulo entre o eixo do veículo (ou do plano da asa) e a direção do voo. A força aerodinâmica está localizada no triedro aerodinâmico do corpo e quando decomposta no triedro do corpo surgem duas componentes de sustentação e uma de arrasto.

O arrasto ($\vec{F}_{A_{x_c}}$) é a força aerodinâmica decomposta no triedro do corpo e tem sentido oposto ao da trajetória de voo e surge devido à resistência do movimento do corpo para com o fluido (ar). As sustentações ($\vec{F}_{A_{y_c}}$ e $\vec{F}_{A_{z_c}}$) também são forças aerodinâmicas decompostas no triedro do corpo, ambas normais ao eixo longitudinal do foguete. Todas as três são expressas como funções da área característica da superfície A , da pressão dinâmica de voo, onde esta, por sua vez, é função da velocidade do corpo relativa ao vento \vec{v}_c^v e da densidade de massa do fluido (ρ) em que o veículo se move (SUTTON, et al., 2001). Esquemáticamente, ambas as equações serão apresentadas mais adiante.

¹ Sabe-se de imediato de sua atuação, dado que o corpo tem massa e encontra-se sujeito a aceleração gravitacional, sofre interação por meio do fluido o qual encontra-se imerso através de uma pressão dinâmica e é impulsionado por meio de um dispositivo propulsor. Porém, dada certas condições, podem surgir forças “fictícias” no movimento causadas por movimento relativo e rotacional.

Para veículos dispostos de asa a área considerada será a área da asa. No caso de mísseis e veículos lançadores, que geralmente não possuem asa, a área considerada será a seção transversal perpendicular ao eixo dos mísseis.

Outra força inerente ao problema é força gravitacional que atrai o veículo na direção do centro de gravidade do corpo atraído (SUTTON, et al., 2001). Em voos espaciais alguns outros campos gravitacionais, além do terrestre, podem atuar no veículo e devem ser considerados. Estes, por sua vez, podem ser gerados por estrelas, astros, planetas e é conhecido como problema de N corpos. Se o voo é executado na superfície na Terra ou muito próximo a ela a ação gravitacional dos demais corpos Neste caso a força exercida sobre o veículo é conhecida por força peso e é expressa conforme mostra a Equação (1.4).

$$\vec{F}_G = \vec{F}_p = M\vec{g} \quad (1.4)$$

Onde \vec{F}_G representa o vetor força gravitacional; \vec{F}_p representa o vetor força peso; M é a massa total do foguete e \vec{g} o vetor aceleração da gravidade.

Por não ser homogênea e esférica, achatamento dos polos, o valor da aceleração gravitacional varia (GOLDSTEIN, et al., 2001) com a razão inversamente proporcional ao quadrado da distância, como mostra a Equação (1.5).

$$g \propto \frac{1}{R^2} \quad (1.5)$$

Em que R representa o valor do raio da Terra.

Se R_0 for o raio da Terra e g_0 a aceleração gravitacional efetiva a este raio, define-se a aceleração gravitacional local pela Equação (1.6).

$$g_0 \propto \frac{1}{R_0^2} \quad (1.6)$$

Dividindo a Equação (1.6) pela Equação (1.5), tem-se a aceleração gravitacional para qualquer região do planeta e pode ser calculada conforme mostra a Equação (1.7).

$$g = g_0 \frac{R_0^2}{R^2} \quad (1.7)$$

A Equação (1.7) representa, de forma simplória, o valor da aceleração da gravidade em qualquer região localizada na superfície da Terra.

3.4.1. SISTEMAS DO CORPO E ÂNGULOS DE EULER

De acordo com o primeiro postulado da relatividade restrita:

Princípio da relatividade especial: Se um sistema de coordenadas K é escolhido de tal forma que, em relação a ele, as leis da física se apresentam com a forma mais simples, as mesmas leis são válidas em relação a qualquer outro sistema de coordenadas K' se movendo em translação uniforme em relação a K (EINSTEIN, et al., 1952).

Um sistema inercial de referência é um sistema de coordenadas associado a algumas características envolvidas no voo. Por exemplo, a variação da posição do sistema escolhido relativa ao veículo. Se esta for considerada grande este sistema não poderá ser considerado como inercial e outro ponto deverá servir de referencial inercial para a navegação. Em caso de missões espaciais onde o movimento de rotação terrestre não pode ser negligenciado, ou seja, a Terra gira escolhe-se como referencial inercial alguma estrela bem distante, onde a variação da posição da estrela é irrelevante relativa à nave. Para o caso de um foguete que possui um tempo de voo pequeno e o movimento da Terra é considerado irrelevante relativo ao foguete, então pode-se admitir a Terra como estando parada. A origem do sistema e a fixação do triedro inercial, neste caso, tem como origem o centro de massa da Terra ou transladado para o centro de outro sistema. Já que a plataforma de lançamento encontra-se fixada

sobre a superfície da Terra, e, portanto, não se move relativamente ao foguete pode-se assumir como referencial para este um triedro localizado nela. Este é chamado sistema referencial topocêntrico, em outras palavras, o centro do elipsoide (ou origem dos eixos) não está localizado no centro de massa da Terra, mas sim no ponto de origem (vértice) escolhido (BRYS, 2008). Quanto à fixação dos eixos de coordenadas, estes devem ser fixos no espaço com relação à origem (BRYS, 2008) conforme pode ser visto na Figura 6.

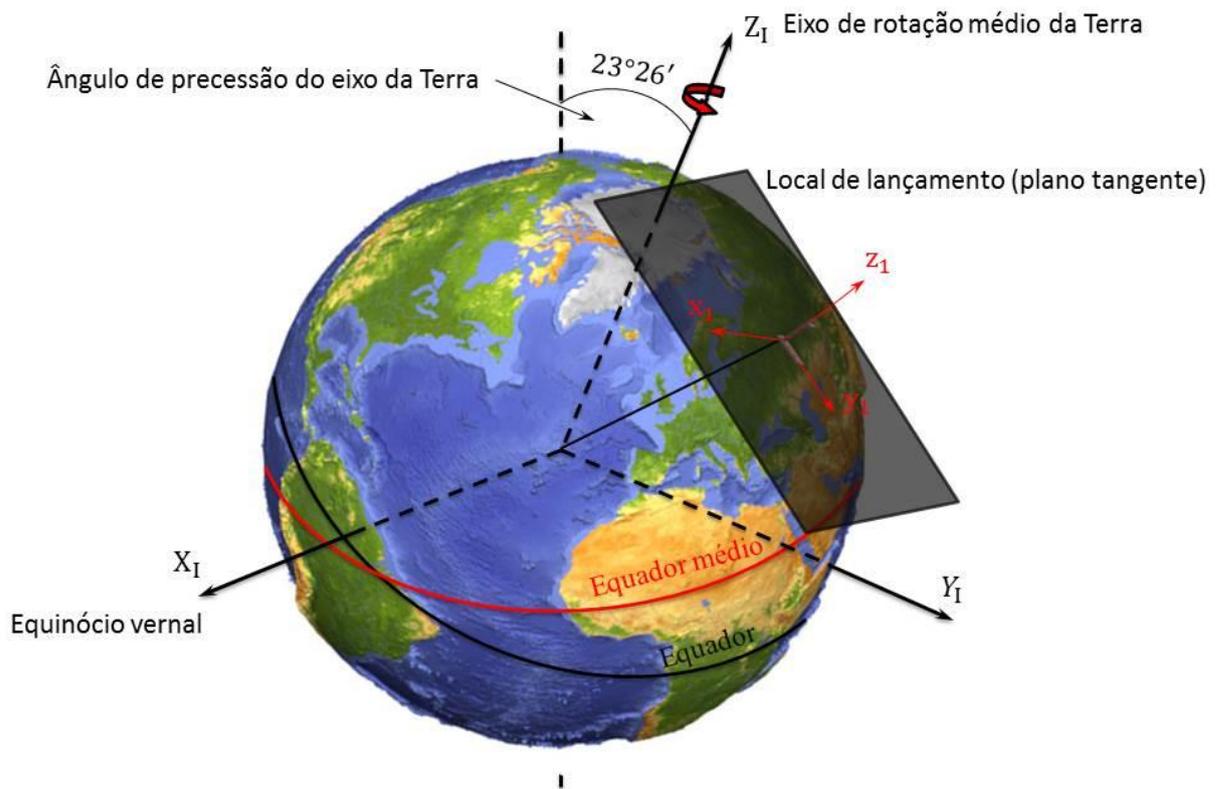


Figura 6 – Coordenadas do sistema inercial localizado no centro da Terra representados por $(X_I; Y_I; Z_I)$ e sistema topocêntrico localizado no plano tangente de lançamento representados $(x_1; y_1; z_1)$.

Os foguetes são considerados sistemas girantes o que viabiliza a utilização dos ângulos de Euler para especificar a orientação do corpo girante em relação ao sistema inercial.

Supondo um foguete parado sobre a superfície de lançamento, os triedros do corpo encontram-se alinhados com o triedro da plataforma. Quando o foguete começa a subir e executar suas manobras de apontamento, o triedro do corpo não mais estará

alinhado ao triedro inercial (topocêntrico), todavia qualquer movimentação do veículo estará orientada baseada aos referenciais do triedro da plataforma, conforme visto na Figura 2.5.

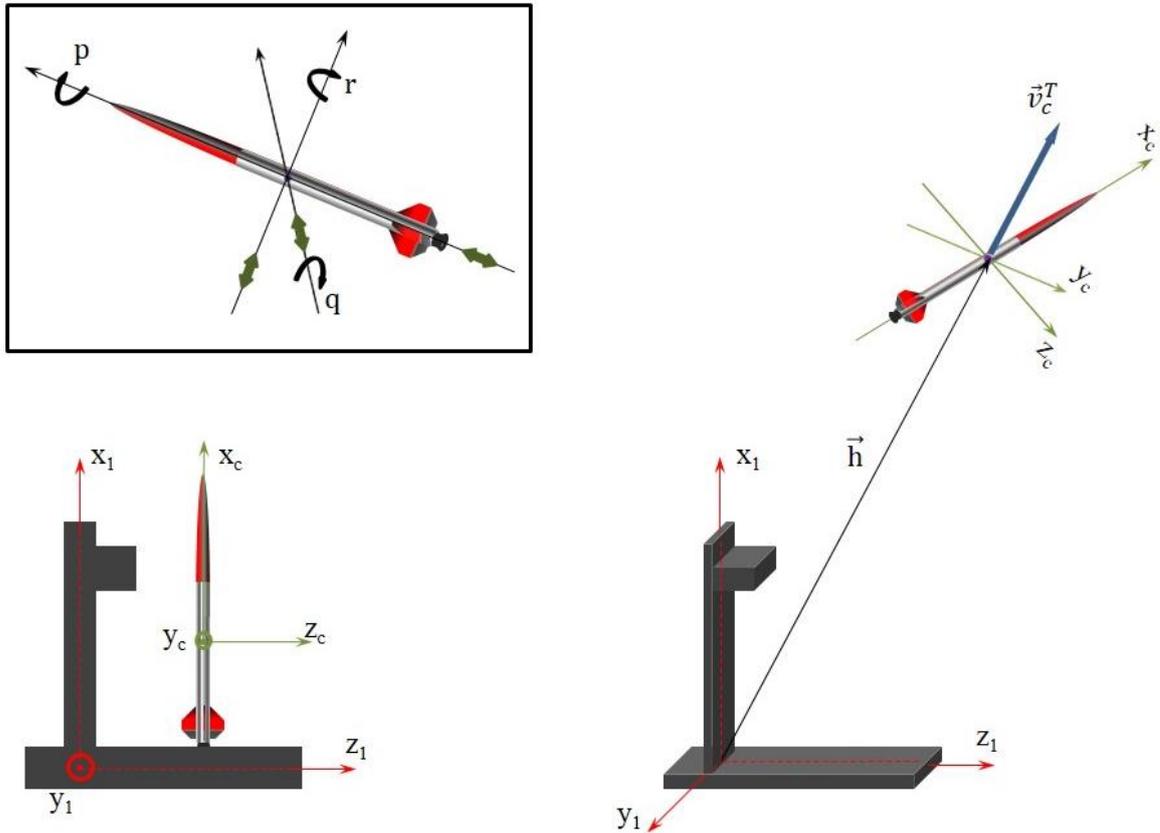


Figura 7 – Triedro inercial e triedro do corpo. Representações angulares dos movimentos de rotação e translação ao redor dos eixos do foguete.

O triedro fixo no corpo pode rotacionar sobre seus três eixos. A rotação sobre o eixo longitudinal é denominada *ROLL* ou rolamento, sobre o eixo vertical é *YAW* ou arfagem e sobre o eixo lateral é *PITCH* ou picagem/cabragem.

Os ângulos de Euler são apresentados pela Figura 8:

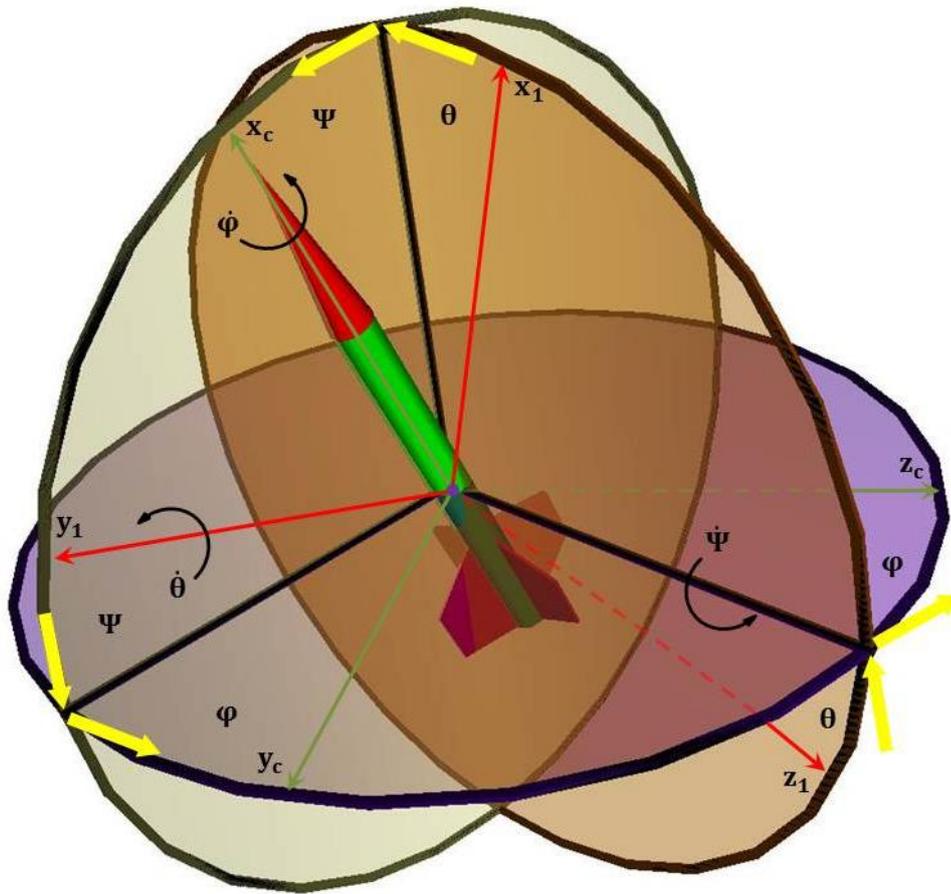


Figura 8 – Rotação do triedro inercial sobre os ângulos de Euler e representação dos planos de rotação do foguete.

A matriz de transformação é dada pela Equação (1.8), (1.9) e (1.10).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \Theta^{c/T} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \text{sen} \psi & -\text{sen} \theta \cos \psi \\ \text{sen} \theta \text{sen} \varphi - \cos \theta \text{sen} \psi \cos \varphi & \cos \psi \cos \varphi & \cos \theta \text{sen} \varphi + \text{sen} \theta \text{sen} \psi \cos \varphi \\ \text{sen} \theta \cos \varphi + \cos \theta \text{sen} \psi \text{sen} \varphi & -\cos \psi \text{sen} \varphi & \cos \theta \cos \varphi - \text{sen} \theta \text{sen} \psi \text{sen} \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \varphi}{\cos \psi} & \frac{-\operatorname{sen} \varphi}{\cos \psi} \\ 0 & \operatorname{sen} \varphi & \cos \varphi \\ 1 & -\cos \varphi \operatorname{tg} \psi & \operatorname{sen} \varphi \operatorname{tg} \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

A matriz de rotação é definida sobre dois sistemas quaisquer, desde que um deles seja um referencial parado e o outro o em movimento.

4. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[Sección de libro] // The red rockets' glare. Spaceflight and the Soviet imagination. / aut. libro SIDDIQI A. A.. - Cambridge : Cambridge University, 1957–1957. - 0-521-89760-2.

A SEGUNDA GUERRA MUNDIAL Bombas Voadoras Sobre Inglaterra! [Publicación periódica]. - Rio de Janeiro : Codex Ltda, 1966. - Vol. 85.

ARNDT R. Opel Rocket Vehicles [En línea] // Opel Rocket Vehicles (1928-1929). - 18 de janeiro de 2013. - <http://strangevehicles.greyfalcon.us/OPEL%20ROCKET%20VEHICLES.htm>.

ASSUNÇÃO R. Fogos de artifício - Espada de São Jorge [Entrevista]. - Estância : Rede Bandeirantes, 2010.

BARRY B. Rocket Vehicles [En línea] // General Description of Rocket Vehicles. - NASA, 5 de dezembro de 2012. - 18 de janeiro de 2013. - <http://www.hq.nasa.gov/pao/History/conghand/vehicles.htm>.

BONSOR K. HowStuffWorks [En línea] // Como funcionam os assentos ejetáveis. - 09 de setembro de 2008. - 21 de janeiro de 2013. - <http://ciencia.hsw.uol.com.br/assentos-ejetaveis4.htm>.

BRYS L. M. Página Dinâmica para Aprendizado do Sensoriamento Remoto [En línea] // Transformação entre Referenciais Geodésicos. - UFRGS, abril de 2008. - 02 de março de 2013. - http://www.ufrgs.br/engcart/Teste/refer_exp.html.

BUTRICA A. J. "Voyager: The Grand Tour of Big Science" [Libro]. - [s.l.] : From Engineering Science To Big Science, 1998. - 978-0-16-049640-0.

CANRIGHT S. Rocketry [En línea] // Hermann Oberth. - NASA, 22 de setembro de 2010. - 11 de dezembro de 2012. - <http://www.nasa.gov/audience/foreducators/rocketry/home/hermann-oberth.html>.

CANRIGHT S. Rocketry [En línea] // Konstantin E. Tsiolkovsky. - NASA, 22 de setembro de 2012. - 10 de dezembro de 2012. -

<http://www.nasa.gov/audience/foreducators/rocketry/home/konstantin-tsiolkovsky.html>.

CANRIGHT S. Student Features [En línea] // NASA's Great Observatories. - NASA, 13 de abril de 2009. - 18 de janeiro de 2013. - http://www.nasa.gov/audience/forstudents/postsecondary/features/F_NASA_Great_Observatories_PS.html.

CHAUÍ M. Convite à Filosofia [Libro]. - São Paulo : Ática, 2000.

CONWAY E. The Beginning of U.S. Space Exploration. [En línea] // Explorer I. - NASA, 31 de janeiro de 2003. - 11 de dezembro de 2012. - <http://www.jpl.nasa.gov/explorer/history/>.

CORNELISSE J. W., SCHÖYER H. F. R. y WAKKER K. F. Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics [Libro]. - Califórnia : Northern Ireland at the Universities, 1979.

DA SILVEIRA E. Problemas Brasileiros - Missão é colocar o Brasil em órbita [Publicación periódica]. - São Paulo : SESC, 2012. - Vol. 414. - 0101-4269.

DAVIS P. Solar System Exploration [En línea] // Galileo Legacy Site. - NASA, 28 de junho de 2010. - 3 de novembro de 2012. - <http://solarsystem.nasa.gov/galileo/>.

DEFENSE INTELLIGENCE AGENCY Defense Intelligence Agency [En línea] // China - Israel Relations. - 1983. - 12 de novembro de 2012. - <http://www.dia.mil/public-affairs/foia/pdf/CHINA/CHINA-ISRAEL%20RELATIONS.pdf>.

DRYDEN H. L. Results of The First U.S. Manned Suborbital Space Flight [Informe]. - Springfield : National Technical Information Service U.S. Department of Commerce, 1961.

EINSTEIN A. [y otros] The Principle of Relativity: a collection of original memoirs on the special and general theory of relativity [Libro]. - New York : Courier Dover Publications, 1952. - 0486600815.

EINSTEIN A. Relativity: The Special and General Theory [En línea] // Marxists Internet Archive. - 1920. - 21 de março de 2012. - <http://www.marxists.org/reference/archive/einstein/works/1910s/relative/index.htm>.

ENCYCLOPEDIA ASTRONAUTICA Ilyushin [En línea] // Encyclopedia Astronautica. - 2012. - 3 de novembro de 2012. - <http://www.astronautix.com/astros/ilyushin.htm>.

ETKIN B. y REID L. D. Dynamics of Flight Stability and Control [Libro]. - Canadá : John Wiley & Sons, 1995.

GARBER S. Sputnik and The Dawn of the Space Age [En línea] // Sputnik: The Fiftieth Anniversary. - NASA, 10 de outubro de 2007. - 04 de novembro de 2012. - <http://history.nasa.gov/sputnik/>.

GOLDSTEIN H., SAFKO J. L. y POOLE JR C. P. Classical Mechanics [Libro]. - [s.l.] : Addison-Wesley, 2001. - 0201657023.

GRAY T. 40th Anniversary of the Mercury 7 [En línea] // Alan B. Shepard, Jr.. - NASA. - 12 de janeiro de 2013. - <http://history.nasa.gov/40thmerc7/intro.htm>.

GREENSITE A. L. Analysis and Design of Space Vehicle Flight Control Systems [Libro]. - New York : Spartan Books, 1970. - Vol. II.

HAIMOFF E. The Cosmonaut Cover-Up. - Global Science Productions, 1999.

HAMILTON C. J. Views of the Solar System [En línea] // Uma Breve História dos Foguetes. - 1999. - 10 de dezembro de 2012. - <http://www.solarviews.com/portug/rocket.htm>.

HICKAM JR H. H. Rocket Boys - A Memoir [Libro]. - [s.l.] : Delta Publishing, 2000. - 9780385333214.

HILL P. y PETERSON C. Mechanics and Thermodynamics of Propulsion [Libro]. - Massachusetts : Prentice Hall, 1992. - 0-201-14659-2.

HUZEL D. K. y BRAUN W. V. Peenemünde to Canaveral [Libro]. - Westport : Greenwood Press, 1981. - 0313229287.

III BAKER A. D. Combat Fleets of the World, 1998-1999: Their Ships, Aircraft and Systems [Libro]. - Annapolis : US Naval Institute Press, 2000. - 978-1-55750-197-4.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA Inovação Tecnológica [En línea] // NASA testa nave de escape de astronautas. - 08 de setembro de 2009. - 23 de janeiro de 2013. -

<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=nasa-testa-nave-escape-astronautas&id=010130090708>.

INPE CBERS [En línea] // INPE. - 2011. - 23 de janeiro de 2013. - <http://www.cbbers.inpe.br/>.

JENKINS D. R. Space Shuttle: The History of the National Space Transportation System [Libro]. - [s.l.] : Voyageur, 2002. - 0-9633974-5-1.

JENNER L. NASA [En línea] // Goddard Space Flight Center. - NASA, 10 de outubro de 2012. - 10 de dezembro de 2012. - http://www.nasa.gov/centers/goddard/about/history/dr_goddard.html.

JOHNSTON J. October Sky. - Universal Pictures, 1999.

JPL - NASA Mars Science Laboratory [En línea] // Curiosity Rover. - NASA, 2012. - 31 de agosto de 2012. - <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>.

JÚNIOR A. D. P. Notas de aula Mecânica I // Divisão de Ciências Fundamentais ITA (FIS 14). - 2009.

LEITE FILHO W. C. Notas de Aula de Dinâmica de Voo // Guiagem e Controle (CMC-310-4). - São José dos Campos : [s.n.], 2011.

LEY W. y CLARKE A. C. Rockets, Missiles and Men in Space [Libro]. - New York : Signet, 1969. - 9780451388919.

MALYSHEV V. V. [y otros] Aerospace vehicle control - modern theory and applications. [Libro]. - São José dos Campos : Instituto de Aeronáutica e Espaço, 1996.

MARCONI E. M. What is a Sounding Rocket? [En línea] // NASA. - NASA, 22 de novembro de 2007. - 22 de janeiro de 2013. - http://www.nasa.gov/missions/research/f_sounding.html.

MEDEIROS M. A. Quiprocura química [En línea] // Fogos de Artifício - A Química das cores ou as cores da Química?. - 18 de junho de 2004. - 10 de janeiro de 2013. - <http://www.quiprocura.net/fogo.htm>.

MEIROVITCH L. Analytical Dynamics [Libro]. - New York : McGraw-Hill, 1970. - 0486432394.

NAKKA R. Richard Nakka's Experimental Rocketry [En línea]. - 11 de agosto de 2012. - 18 de janeiro de 2013. - <http://www.nakka-rocketry.net/>.

NAKKA R. Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site [En línea] // Amateur Experimental Rocketry. - 11 de maio de 2013. - 17 de junho de 2013. - <http://www.nakka-rocketry.net/>.

NASA Phoenix Mars Mission [En línea]. - NASA, 2010. - 11 de setembro de 2012. - <http://phoenix.lpl.arizona.edu/index.php>.

NEUFELD M. J. Von Braun: dreamer of space, engineer of war [Libro]. - New York : A.A. Knopf, 2007. - 0-307-26292-8.

OLDHAM S. y HOOTEN D. Yuri Gagarin Conspiracy: Fallen Idol. - Indican Pictures, 2009.

OXFORD UNIVERSITY Oxford Dictionaries [En línea] // Rocket. - Oxford University, 2013. - 21 de janeiro de 2013. - <http://oxforddictionaries.com/definition/english/rocket>.

POLMAR N. y MOORE K. J. Cold War Submarines: The Design and Construction of U.S. and Soviet Submarines, 1945-2001 [Libro]. - Washington : Potomac Books, 2004. - 978-1-57488-594-1.

PRYBILSKI O. Aggregat 1 [En línea] // Fehlerdiskussion. - 01 de março de 2012. - 10 de janeiro de 2013. - <http://aggregat1.aggregat-2.de/fehler.html>.

REISIG G. Raketenforschung in Deutschland [Libro]. - Münster : Wissenschaft & Technik, 1997. - 3-89019-500-8.

RIPER A. B. V. Rockets and Missiles - The LifeE Story of a Technology [Libro]. - Westport : Greenwood technographies, 2004. - 0-313-32795-5.

ROSKAN J. Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls [Libro]. - [s.l.] : Darcorporation, 2001. - 1-884885-17-9.

SEIBERT G. ESA [En línea] // The History of Sounding Rockets and Their Contribution to European Space Research. - novembro de 2006. - 12 de novembro de 2012. - http://www.esa.int/esapub/hsr/HSR_38.pdf.

SIDDIQI A. A. Korolev, Sputnik, and The International Geophysical Year [En línea]. - 04 de novembro de 2012. - <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/sputnik/siddiqi.html>.

STUMPF D. K. Titan II: A History of a Cold War Missile Program [Libro]. - Arkansas : University of Arkansas Press, 2000. - 1-55728-601-9.

SUTTON G. P. y BIBLARZ O. Rocket Propulsion Elements [Libro]. - New Jersey : John Wiley & Sons, 2001. - 0-471-32642-9.

SUTTON G. P. y BIBLARZ O. Rocket Propulsion Elements [Libro]. - New Jersey : John Wiley & Sons, 2001. - 0-471-32642-9.

TARG S. Curso Breve de Mecánica Teórica [Libro]. - [s.l.] : Mir, 1976. - 5396003812.

THE INDEPENDENT TEAM World's military powers [En línea] // The Independent. - 10 de setembro de 2008. - 23 de janeiro de 2013. - <http://www.independent.co.uk/index.php/reports/world-report/74-world-report-/172-worlds-military-powers>.

THE ROCKETMAN History [En línea] // Powerhouse Bio. - 2010. - 18 de janeiro de 2013. - <http://www.rocketman.tv/history.php>. - 214.390.3575.

WIE B. Space vehicle dynamics and control [Libro]. - Reston : AIAA Education Series, 1998.

WILSON J. Neil Armstrong: 1930-2012 [En línea] // NASA. - 11 de setembro de 2012. - 3 de novembro de 2012. - http://www.nasa.gov/topics/people/features/armstrong_obit.html.

WILSON J. Skylab [En línea] // America's First Space Station. - NASA, 1 de dezembro de 2009. - 16 de janeiro de 2013. - http://www.nasa.gov/mission_pages/skylab/index.html.

ZAK A. A-1 [En línea] // Russian Space. - 10 de outubro de 2008. - 10 de janeiro de 2013. - <http://www.russianspaceweb.com/a1.html>.