



Astronáutica

Prof. Thiago Paulin Caraviello

Introdução

A palavra “astronáutica” é a composição dos vocábulos gregos de *astron* (= astro) e *nautikee* (= navegação), nome proposto pelo escritor francês de ficção científica J. G. Rosny (1856-1940) em 1927. Podemos entender a astronáutica como a ciência que se ocupa com máquinas projetadas para operarem fora da atmosfera terrestre, sejam elas tripuladas ou não.

Entre essas máquinas estão: satélites artificiais, sondas espaciais, telescópios espaciais, robôs, etc. Todas essas máquinas são lançadas ao espaço por foguetes, que utilizam combustíveis líquidos ou sólidos, ativados em uma ou várias fases.

O início das Astronáutica

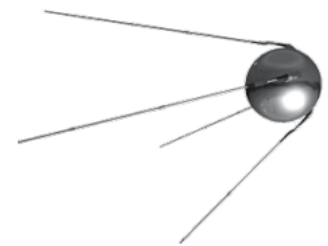
Podemos considerar a Astronáutica como uma “jovem” ciência do nosso tempo. Seus princípios foram expostos em 1687 por Isaac Newton, porém a realização prática só aconteceu 270 anos depois com o lançamento de um satélite artificial russo, *Sputnik I*, em 4 de outubro de 1957. O *Sputnik I* foi o primeiro objeto fabricado pelo homem a vencer a força gravitacional e se mover livremente pelo espaço exterior.

O lançamento desse satélite artificial foi um acontecimento histórico sem precedentes, tanto em caráter científico como político, e colocou, na época, a União Soviética em um nível de desenvolvimento tecnológico superior aos dos países ocidentais.

O programa espacial Sputnik tinha como objetivo estudar as camadas superiores da atmosfera terrestre, as condições de lançamento ao espaço de cargas úteis e os efeitos da microgravidade e da radiação solar sobre organismos vivos, tendo em vista futuras missões tripuladas.

O satélite *Sputnik I* era uma esfera de metal polido de 58 cm de diâmetro com quatro antenas para transmissão de sinais de rádio. Ele foi posicionado em uma órbita elíptica na qual viajava a cerca de 29 mil km/h, levando 96 min para concluir uma volta ao redor da Terra. O satélite soviético era visível com binóculos antes do amanhecer e logo após o pôr do sol. Seus pontos de perigeu e apogeu eram, respectivamente, 230 km e 940 km. Seus sinais eram facilmente detectáveis por radioamadores e foram monitorados por operadores de rádio em todo o mundo. Os sinais duraram 22 dias até que as baterias de seu transmissor acabaram em 26 de outubro de 1957.

Em 4 de novembro de 1957, exatamente um mês após o lançamento do *Sputnik I*, foi lançado o *Sputnik II* que possuía 113 kg e transportou o primeiro ser vivo para o espaço: a cadela *Laika*. O animal, de três anos de idade, foi escolhido entre outros três cães de rua e submetido a testes para suportar a viagem espacial. A missão completou 2570 voltas em torno da Terra e ficou 162 dias em órbita. Queimou-se ao tocar na atmosfera em 14 de abril de 1958.



Sputnik I

O verdadeiro destino de Laika, porém, só foi revelado em 2002, pelo cientista Dimitri Malashenkov, num congresso espacial promovido na cidade de Houston, no Texas. O cientista russo revelou que o animal morreu de cinco a sete horas depois do lançamento devido ao superaquecimento da aeronave.



Laika

Os primeiros foguetes

Como impulsionar uma máquina para fora da atmosfera terrestre? Precisamos de foguetes!

Pode-se associar os primeiros foguetes à invenção da pólvora pelos chineses no século IX. Inicialmente foguetes eram usados como fogos de artifício para entretenimento e, mais tarde, para fins bélicos. Existem relatos do uso de foguetes como técnica de defesa na China do século XIII devido às constantes invasões mongólicas.

Já na Europa, eles foram introduzidos pelos árabes, tornando a ser usados em conflitos logo após a Guerra dos Cem Anos (1337-1453). O alcance dos foguetes aumentou progressivamente durante os séculos XVIII e XIX. Em 1806, um modelo utilizado nas Guerras Napoleônicas percorreu uma distância de 2,8 km.

Porém, somente no século XX é que o sonho de sair da Terra impulsionado por um foguete começou a sair do papel. Pesquisadores atuaram de forma isolada em diferentes partes do mundo para construir artefatos capazes de atravessar a atmosfera e se manter na órbita da Terra. Entre eles, temos o professor russo Konstantin Tsiolkovsky (1857-1935), considerado o pai da Astronáutica, que derivou a famosa equação do foguete, que tornou possível calcular a velocidade final de um foguete em função de sua massa final.

Outros dois pesquisadores relevantes são Robert H. Goddard (1882-1945), físico estadunidense considerado o pai da fogueteria moderna, que inventou o foguete de propelente líquido, e o físico alemão Hermann Oberth (1894-1989), o primeiro a idealizar foguetes com múltiplos estágios e a imaginar estações espaciais.

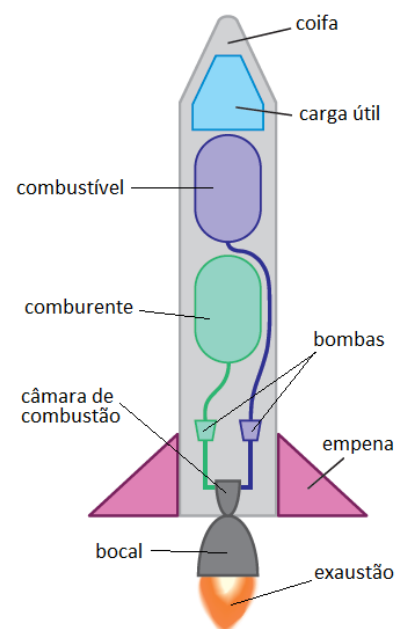
Foguetes espaciais

Para realizar uma viagem espacial, precisamos de um veículo que viaje além das camadas da atmosfera terrestre, este veículo é o foguete espacial. Por convenção, a fronteira entre a atmosfera e o espaço se situa a 100 km de altitude, onde adotou-se uma linha, chamada *Karman*, que define a fronteira com o espaço para fins da Astronáutica. A partir daí, podemos colocar um objeto na órbita da Terra ou enviá-lo para destinos mais distantes, tais como Marte, Lua ou outros planetas do Sistema Solar. Importante destacar que há diversas órbitas na Terra, que podem ser utilizadas para satélites com finalidades diferentes.

Um foguete espacial precisa de um mecanismo que permita que ele passe pela atmosfera por meio de sistemas de propulsão. A origem da palavra “propulsão” é latina: *pro* significa “antes” ou “para frente”, e *pellere* significa “dirigir”. Assim, “propulsão” significa “empurrar um objeto para frente, ou para cima.

A figura ao lado mostra a representação esquemática de um foguete de um único estágio.

A coifa serve para proteger a carga útil, que pode ser um satélite, um astronauta ou experimentos de microgravidade. A sua forma visa diminuir o atrito do foguete com a atmosfera terrestre. Em algumas situações, é de interesse recuperar a carga útil. Nesses casos, é necessária a utilização de um sistema de recuperação do tipo paraquedas para, quando do voo descendente do foguete, diminuir a velocidade de impacto com o solo ou com a água. As empenas servem para estabilizar o voo do foguete.



Representação esquemática de um foguete com seus principais componentes.

Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do foguete baseia-se na Terceira Lei de Newton, ação e reação, que diz que: a toda ação corresponde uma reação, com a mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário.

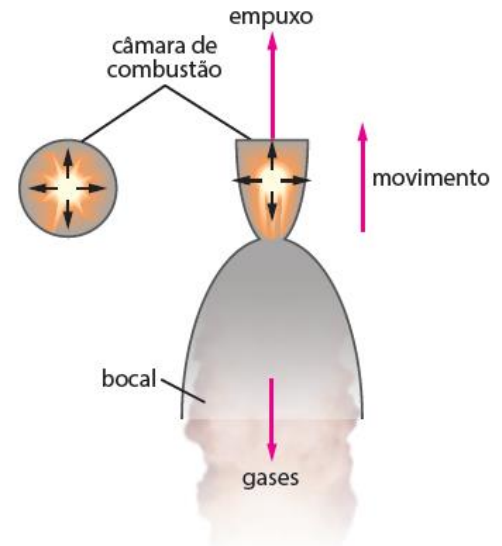
Imaginemos uma câmara fechada onde exista um gás em combustão. A queima do gás irá produzir pressão em todas as direções. A câmara não irá se mover em qualquer direção, pois as forças nas paredes opostas da câmara irão se anular.

Se introduzirmos um bocal na câmara, por onde os gases possam escapar, haverá um desequilíbrio. A pressão exercida nas paredes laterais opostas continuará não produzindo força, pois a pressão de um lado anulará a do outro. Já a pressão exercida na parte superior da câmara produzirá uma força denominada empuxo, expressão que designa a força produzida pelas explosões, pois não há pressão no lado de baixo onde está o bocal.

Assim, o foguete se deslocará para cima devido à reação à pressão exercida pelos gases em combustão na câmara de combustão do motor. Por isso, este tipo de motor é chamado de motor de propulsão por reação.

Como no espaço exterior não há oxigênio para queimar com o combustível, o foguete deve levar, armazenado em tanques, não só o propelente (combustível), mas também o oxidante (comburente).

A intensidade do empuxo produzido depende da massa e da velocidade dos gases expelidos pelo bocal. Logo, quanto maior a temperatura dos gases expelidos, maior o empuxo.



Os gases expelidos pelo bocal provocam um movimento para cima devido ao par ação e reação.

Equação do foguete

A equação do foguete de Tsiolkovsky é uma equação matemática que descreve a capacidade de um corpo variar a sua velocidade expelindo parte da sua massa. Considere um foguete cuja massa inicial m_0 é composta pela soma da sua estrutura e o propelente, já a sua massa final m é composta apenas pela estrutura devido à queima do propelente. A variação da velocidade do foguete Δv é dada por:

$$\Delta v = v_e \times \ln \frac{m_0}{m}$$

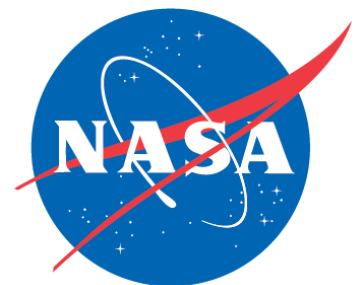
em que v_e é a velocidade de exaustão do propelente.

A corrida espacial

Entre os anos de 1957 a 1975, a União Soviética e os Estados Unidos disputaram a hegemonia na exploração do espaço, período que ficou conhecido como corrida espacial.

O lançamento do *Sputnik 1* pressionou o governo estadunidense a lançar o próprio satélite. Isso aconteceu em 31 de janeiro de 1958, com o lançamento da *Explorer 1*. Esse satélite acabou descobrindo a existência de uma região na atmosfera com alta concentração de partículas e forte campo magnético, posteriormente batizada de Cinturão de Van Allen.

Em abril de 1958, o presidente estadunidense D. D. Eisenhower (1890-1969) apresentou no Congresso um projeto de lei para a criação de uma Agência Nacional de Aeronáutica e Espaço (em inglês:



Logotipo da Agência Nacional de Aeronáutica e Espaço.

National Aeronautics and Space Administration). Em julho do mesmo ano, após aprovação do Congresso, é formalizada a criação dessa agência, mais conhecida por sua sigla: *Nasa*.

O primeiro homem no espaço

Os soviéticos foram os primeiros a enviarem um satélite e um ser vivo para o espaço, a cadela Laika, e os primeiros a enviarem uma sonda que orbitou o Sol.

Mas ainda faltava realizar o sonho de levar o primeiro ser humano para o espaço. Em 12 de abril de 1961, o sonho se torna realidade, com a viagem do cosmonauta russo Yuri Alekseyevich Gagarin (1934-1968) à órbita terrestre. Ele deu apenas uma volta ao redor da Terra. O percurso durou 108 minutos antes de retornar ao ponto de partida. A Gagarin coube apenas o papel de assistir sentado ao espetáculo a bordo da nave totalmente automatizada *Vostok 1* e contar a novidade à equipe de controle: “A Terra é azul”.

A essa altura, os soviéticos já haviam desenvolvido tecnologias para que a cápsula fizesse a reentrada na atmosfera e sobrevivesse a esse processo violento, mas ainda não havia meio de realizar um pouso suave. Gagarin foi ejetado da *Vostok 1* quando a cápsula estava a cerca de 4 km de altura, realizando o restante do percurso de paraquedas até o chão.

A missão de Gagarin enfatizou, mais uma vez, que os estadunidenses estavam atrás dos soviéticos na corrida espacial. O presidente dos Estados Unidos, J. F. Kennedy (1917-1963), em reunião com as lideranças da nova agência espacial estadunidense, a *Nasa*, perguntou qual projeto poderia colocar, a médio prazo, os Estados Unidos à frente dos soviéticos. A resposta foi propor uma missão tripulada à Lua.

Preparação

O programa Apollo foi criado para cumprir o objetivo de enviar expedições para a órbita lunar e foi modificado para viabilizar uma expedição tripulada à Lua. Dois outros programas muito importantes para o sucesso do Apollo foram o Mercury e o Gemini. Com programa Mercury, os estadunidenses repetiram o feito soviético e colocaram John Glenn em órbita da Terra, em 20 de fevereiro de 1962. Posteriormente, com as *Gemini*, os estadunidenses conseguiram efetuar o acoplamento de duas espaçonaves movendo-se a 28 000 km/h cada. Realizaram também a primeira atividade extraveicular estadunidense. Nela, Ed White (1930-1967) deixa a cápsula e enfrenta o ambiente espacial. Mas a primeira caminhada espacial foi feita pelos russos, em 1965, quando Alexei Leonov (1934-2019) passou alguns minutos fora de sua nave, a *Voskhod 2*.

No final do programa Gemini, os estadunidenses, capitaneados por Wernher von Braun (1912-1977), tinham desenvolvido o *Saturno V*, um foguete capaz de atingir a estonteante velocidade de 40 000 km/h e permitir, portanto, a viagem de uma tripulação em direção à Lua. O *Saturno V* permanece até hoje como um dos mais possantes foguetes construídos pelo ser humano. Com 110 metros de comprimento, 10 metros de diâmetro e pesando 3 milhões de quilogramas (equivalente a massa de 3000 automóveis), o *Saturno V* consumia cerca de 13 toneladas de combustível a cada segundo. Uma maravilha tecnológica, mesmo para os padrões tecnológicos da atualidade.

Os resultados conduzidos durante o programa Gemini conseguiram demonstrar que enviar uma expedição tripulada à Lua era possível. Ao todo, foram realizadas 12 expedições Gemini, e a última delas, a Gemini 12, aconteceu entre 11 e 15 de novembro de 1966. As missões realizadas pelo programa Apollo foram a fase final do projeto de enviar o homem à Lua.



Saturno V

A chegada do homem à Lua

Em 16 de julho de 1969, o foguete *Saturn V* lançou a espaçonave *Apolo 11*, com base no Cabo Canaveral, na Flórida, levando consigo no módulo lunar *Eagle* (Águia) a bordo os astronautas Neil Armstrong, Buzz Aldrin e Michael Collins.

A subida, inicialmente vertical, durou 13,2 segundos, até que o foguete pudesse ter a sua direção ajustada para entrar na órbita terrestre.

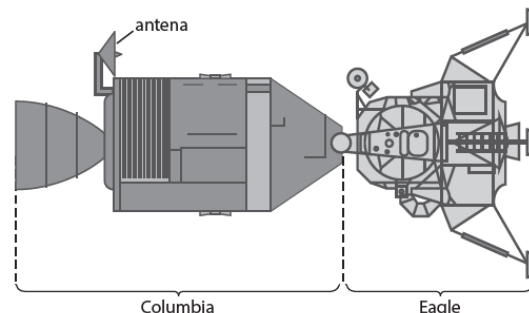
Aproximadamente 2 minutos e 40 segundos após o lançamento, o primeiro estágio do foguete foi desprendido, e a espaçonave *Apolo 11* entrou na órbita da Terra a uma altura de 185 km, após 12 minutos de voo. Cerca de 30 minutos após o início da órbita terrestre, a trajetória da espaçonave foi reajustada para que se iniciasse a manobra de injeção translunar.

A injeção translunar foi a manobra pela qual a espaçonave *Apolo 11*, constituída dos módulos *Columbia* e *Eagle*, foi propelida em direção à órbita da Lua.

Nesse processo, o módulo de comando da espaçonave (*Columbia*) foi desacoplado do último estágio do foguete, e, então, após uma complexa manobra de rotação, acoplou-se ao módulo lunar *Eagle* e passou a fornecer à espaçonave a propulsão necessária para o ajuste da rota e a chegada à Lua.

A espaçonave *Apolo 11* entrou em órbita lunar, e, após 30 órbitas completas, os astronautas puderam avistar seu local de pouso: o Mar da Tranquilidade, uma região da Lua conhecida por seu relevo relativamente plano e pouco irregular. Nesse ponto, o piloto Michael Collins permaneceu no módulo de comando, enquanto Aldrin e Armstrong adentraram no módulo *Eagle*. O módulo *Eagle* foi desacoplado do *Columbia*, que continuou em órbita. Após a alunissagem, os astronautas estabeleceram contato com Houston: “A águia pousou”.

Após algumas preparações, os astronautas vestiram seus trajes e saíram do módulo lunar, cerca de seis horas após a alunissagem. Foi nesse momento que Neil Armstrong pisou pela primeira vez sobre a superfície da Lua, proferindo sua famosa frase, transmitida ao vivo para milhões de espectadores: “Este é um pequeno passo para o homem, mas um grande passo para a humanidade”. Somente Armstrong e Aldrin exploraram a superfície lunar e o fizeram por cerca de 2h30min.



A *Apolo 11* é constituída dos módulos *Columbia* e *Eagle*.



Buzz Aldrin caminhando pela Lua.



Neil Armstrong deu o primeiro passo do homem na Lua.

Enquanto eles estiveram na superfície da Lua, coletaram cerca de 21 kg de rochas, fincaram a bandeira estadunidense, fizeram diversas fotos e receberam um telefonema do então presidente dos Estados Unidos, Richard Nixon, que falou com Armstrong para dar parabéns à tripulação.

O módulo Eagle estava equipado com um foguete para que os astronautas pudessem retornar ao Columbia, mas, para que isso fosse possível, uma grande parte do Eagle, o seu módulo de pouso, deveria ser deixada para trás.

A manobra de ascensão consistia em fazer com que o módulo Columbia pudesse interceptar o estágio final do Eagle a mais de 100 quilômetros da superfície da Lua. Entre o pouso e a ascensão à órbita lunar, os astronautas passaram cerca de 21 horas e 30 minutos na superfície da Lua. Depois de terem sido interceptados pelo módulo Columbia, os astronautas dormiram por sete horas. E antes de prepararem seu voo de volta para a Terra, o módulo Eagle foi descartado e caiu em direção à superfície da Lua.

A reentrada do módulo Columbia na atmosfera terrestre ocorreu 44 horas depois da sua saída da órbita lunar, no dia 24 de julho. A orientação do módulo de comando foi levemente alterada, de modo que adentrasse na atmosfera terrestre com o seu escudo térmico voltado para baixo.

O paraquedas do módulo de comando foi acionado após uma viagem de volta que durou cerca de 195 horas, 18 minutos e 35 segundos. Após esse tempo, Columbia amerissou (pousou na água) no oceano Pacífico e foi resgatada pelo porta-aviões estadunidense *USS Hornet*.

Em decorrência das normas internacionais sobre a exposição extraterrestre, os três astronautas ficaram em quarentena após a sua chegada, durante um período de três semanas.

Ao todo, foram realizadas 17 missões Apollo, que foram responsáveis por trazer 380 kg de rochas lunares, material que revelou importantes indícios do modo pelo qual a nossa vizinha se formou. Fileiras de espelhos foram deixadas na superfície, de maneira que possamos disparar raios *laser* da Terra e acompanhar a velocidade com que a Lua está se afastando de nós (atualmente, a um ritmo de 3,8 cm por ano). Detectores de atividades sísmicas foram embutidos nas areias do satélite para o estudo de tremores lunares.

Cooperação internacional

Se estadunidenses e russos tivessem mantido o ritmo de desenvolvimento e investimentos da época da corrida espacial, é certo que o ser humano já teria pousado em Marte. Entretanto, os elevados custos dessas missões levaram ao esfriamento dos ânimos, de ambos os lados. A partir de então, os russos caminharam em direção ao desenvolvimento de estações espaciais, da qual a Mir foi o principal destaque. Ela ficou em órbita de 1986 a 2001.

Os estadunidenses, por outro lado, partiram para o desenvolvimento dos ônibus espaciais e, numa homenagem ao voo de Gagarin, lançaram o seu primeiro ônibus espacial, o *Columbia*, em 12 de abril de 1981. A essas alturas os ex-adversários na corrida espacial tinham realizado algo inimaginável na década de 1960: em julho de 1975, a nave *Soyuz* (russa) e a *Apollo*, ambas tripuladas, acoplaram-se no espaço. Estavam abertas as portas para a cooperação entre dois ex-inimigos da Guerra Fria.

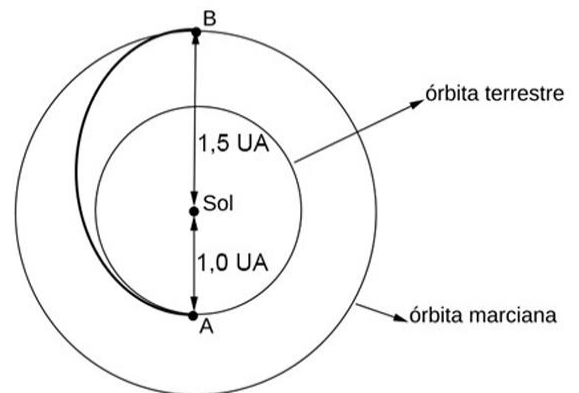
O maior resultado desses novos tempos é a cooperação envolvendo a construção da Estação Espacial Internacional (ISS – *International Space Station*), cuja montagem em órbita começou em 1998 e terminou oficialmente em 8 de julho de 2011 – o que, de certa forma, uniu a experiência dos russos na construção e operação de estações espaciais à experiência estadunidense com os ônibus espaciais, primordiais para a conclusão da ISS. Desenvolvida em parceria por Estados Unidos, Rússia, Canadá, Japão e países europeus, a ISS é o maior e mais espetacular laboratório de pesquisa já construído no espaço.



Estação Espacial Internacional

Exercícios

1. (OBA) A exploração de Marte é uma das áreas mais ativas da pesquisa espacial, com cerca de 50 missões já realizadas e/ou planejadas não tripuladas ao planeta vermelho e até há planos para levar humanos para lá em um futuro próximo. Neste momento, há dois jipes-robôs deslocando-se na superfície marciana (Curiosity e Perseverance), um pequeno helicóptero (Ingenuity) e sete satélites orbitando o planeta vermelho. Chegar a Marte é um desafio extraordinário, razão pela qual metade das missões para lá enviadas falharam. Imagine você arremessar uma espaçonave do tamanho de um carro em direção a um ponto do espaço onde Marte estará daqui a alguns meses. Para tanto, são utilizados foguetes que possuem 60 m de altura e 531.000 kg de massa. Isso mesmo, para arremessar uma espaçonave de 1.000 kg em direção a Marte, são necessários 480.000 kg de propelente (combustível + oxidante), que são consumidos em apenas 20 minutos. Durante quase toda a trajetória rumo a Marte, o gigantesco foguete já não mais existe. Pequenos motores-foguetes da espaçonave são utilizados apenas para correções de trajetória e para amortização (pouso em Marte). Durante essa fase de voo não propulsado, a espaçonave fica sob influência quase exclusiva do campo gravitacional do Sol. Muito antes que os grandes foguetes pudessem ser desenvolvidos, o cientista alemão Walter Hohmann propôs, em 1925, uma trajetória de transferência orbital que envolvia o menor consumo de propelente, desde então conhecida como órbita de transferência de Hohmann. Nessa trajetória (ver figura) o periélio da órbita de transferência encontra-se na órbita da Terra que corresponde ao ponto A, enquanto o afélio se encontra na órbita de Marte no ponto B. Para as questões abaixo, considere que as órbitas da Terra e de Marte são circulares e coplanares.

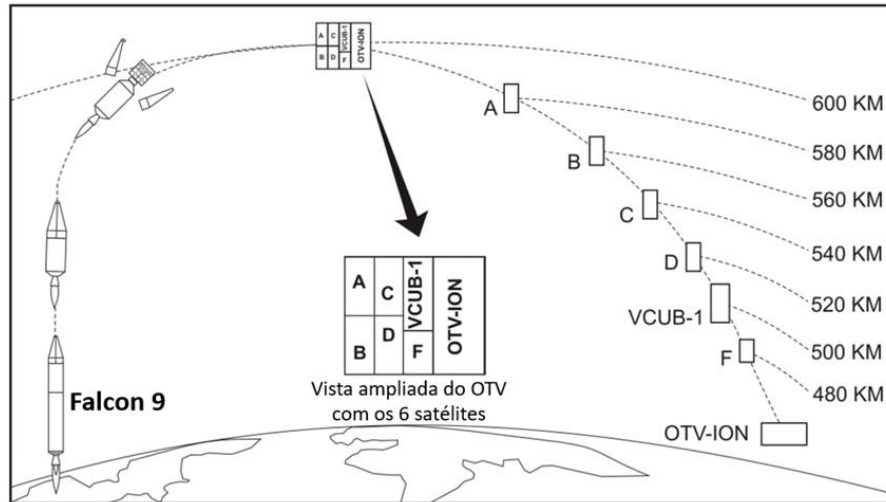


a) Sabendo que o semieixo maior de uma órbita elíptica ao redor do Sol corresponde à metade da distância entre o periélio e o afélio, calcule o valor do semieixo maior da órbita de transferência. Considere que a distância da Terra ao Sol seja de 1,0 UA e que a distância entre Marte e Sol seja de 1,5 UA. Apresente o resultado em unidades astronômicas (UA).

b) Em 1619, o alemão Johannes Kepler propôs a Terceira Lei de Kepler que diz que o quadrado do período de uma órbita dividido pelo cubo do semieixo maior dessa órbita é constante para todos os corpos que orbitam um mesmo corpo central. Por exemplo, sendo T o período e S o semieixo maior da órbita de transferência, tem-se que: $\frac{T^2}{S^3} = \frac{T_T^2}{R_T^3}$, onde T_T é o período da órbita da Terra, ou seja, 12 meses e R_T é a distância da Terra ao Sol, ou seja, 1,0 UA. Sendo assim, calcule o tempo para uma espaçonave viajar do ponto A ao B na órbita de transferência em meses. Lembre-se de que apenas metade da elipse é percorrida e que por isso, esse tempo corresponde à metade do período da órbita de transferência.

2. (OBA) O VCUB-1, da empresa Visiona, é o primeiro satélite brasileiro a fazer uso de uma nova tecnologia espacial que são os Veículos de Transferência Orbital (OTV – Orbital Transfer Vehicles). De modo simplificado, um OTV pode ser entendido como um satélite que, colocado em órbita terrestre por meio de um foguete, é capaz de inserir vários pequenos satélites em diferentes órbitas, por meio de manobras orbitais. Em decorrência da diminuição do tamanho dos satélites, por conta da miniaturização da eletrônica, um foguete, como o Falcon 9 (SpaceX), é capaz de levar em um único voo dezenas de satélites. Como cada satélite tem suas especificidades em relação à altitude e plano orbital, faz-se uso de um OTV para efetuar os ajustes orbitais de cada um dos pequenos satélites que ele transporta. Para tanto, o OTV possui seu

próprio sistema propulsivo. O VCUB-1, com 12 kg de massa, foi ao espaço em abril de 2023. O foguete Falcon 9 colocou o OTVION em uma órbita inicial de 600 km de altitude (ver figura). A partir dessa altitude, o OTV ION inseriu os satélites A, B, C, D, VCUB1 e F em suas órbitas finais de 580, 560, 540, 520 km, 500 km e 480 km, respectivamente. Para que possa realizar suas manobras orbitais, o OTV-ION possui um sistema propulsivo próprio com 2,6 kg de propelente. Depois de colocar o último satélite em órbita o OTV-ION reentrou na atmosfera terrestre, onde foi destruído pelo intenso calor gerado pela reentrada.



a) Para cada redução de 20 km na sua altitude, o OTV-ION necessita de 1 dia. Considerando que a ejeção dos satélites é instantânea, quantos dias foram necessários, no mínimo, para colocação do VCUB-1 em sua órbita de 500 km?

b) Para correção de 10 km na altitude o sistema propulsivo do OTV-ION consome 200 g de propelente. Quanto de massa de propelente será consumida pelo OTV-ION para colocar o VCUB-1 em sua órbita final, após lançar o satélite D?

3. (OLAA) A velocidade para se colocar um foguete em órbita é de 28 000 km/h. Na maioria dos casos um mesmo foguete faz uso de combustível sólido e líquido. Na terminologia espacial, o combustível e o oxidante são denominados propelentes. Na prática as toneladas de propelentes utilizadas para colocar um satélite em órbita são armazenadas em diferentes tanques, denominados estágios. Dessa forma, após a queima do combustível do primeiro estágio, os tanques de combustível e oxidante são descartados e o voo continua, com o acionamento sucessivo dos demais estágios. Armazenar e transportar todo o combustível e oxidante em tanque único é ineficiente, uma vez que durante boa parte do voo estar-se-ia acelerando uma massa inerte, representada pela estrutura da parte vazia do tanque. Em geral o número de estágios de um foguete varia entre 3 e 4, uma vez que um maior número de estágios requer uma massa adicional para alojar o sistema de separação de estágios.

A tabela abaixo fornece o ganho de velocidade obtido pela queima de cada um dos quatro estágios do Veículo Lançador de Satélites (VLS-1) brasileiro para se lançar um satélite de 100 kg.

Estágio	$M_{\text{propelente}}$ [kg]	$M_{\text{estrutura}}$ [kg]	Δv [m/s]
Primeiro	29 000	5 500	2 169
Segundo	7 250	1 375	1 650
Terceiro	4 544	1 183	2 704
Quarto	808	240	3 042
Total	41 602	8 298	9 565

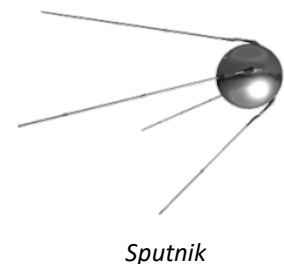
a) A partir dos dados apresentados na tabela, estime:

- i) a relação entre a massa de propelente e a massa total do foguete na decolagem; e
- ii) a relação entre a massa do satélite e a massa total do foguete na decolagem.

OBS: Expresse os seus resultados em termos percentuais.

b) Os dados de velocidade da tabela não consideram os efeitos da gravidade (que ocorre durante todo o voo) e do atrito do foguete com a atmosfera terrestre (que ocorre enquanto o foguete voa no interior da atmosfera terrestre, que tem 100 km de espessura, aproximadamente). Ambos os efeitos diminuem o ganho de velocidade teórico. Consequentemente, o valor de Δv real do VLS-1 é 80% daquele obtido a partir da equação do foguete. Baseado neste fato, expresse qual a velocidade final do VLS-1 após a queima dos seus quatro estágios. Expresse a velocidade em km/h.

4. (Desafio) A Era Espacial foi inaugurada em 04 de outubro de 1957, quando a antiga União Soviética colocou o satélite Sputnik em órbita da Terra (vide figura ao lado). Desde então, mais de 7.000 satélites foram lançados ao espaço, nos auxiliando na previsão do tempo, monitoramento do desmatamento da Amazônia e transmissão de grandes eventos como Copa do Mundo e Olimpíadas. Dos 1.200 satélites em operação atualmente, 400 são destinados às comunicações. Os satélites de comunicações percorrem órbitas circulares situadas no plano do Equador a uma distância tal que completam uma volta em torno da Terra em 23h 56min 4s, ou seja, no mesmo período de rotação da Terra (se necessário, aproxime este valor para 24h). Para todos os efeitos práticos, eles ficam “parados” em relação a um ponto fixo da Terra situado na linha do Equador, razão pela qual são chamados geoestacionários.



Sputnik

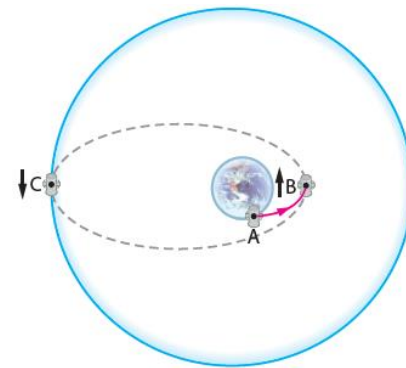
a) Considerando-se que, em cada volta em torno da Terra, um satélite geoestacionário percorre a distância de 265.000 km, qual a sua velocidade média em km/h?

b) A tabela abaixo mostra a velocidade para várias órbitas circulares no plano do Equador terrestre. Baseado nessa tabela e no resultado que você obteve no item a, coloque um X sobre o raio da órbita do satélite geoestacionário mencionado na pergunta a.

Raio orbital (km)	6.630	6.728	7.378	16.378	42.160
Velocidade orbital (km/h)	27.926	27.718	26.469	17.765	11.042

Colocar um satélite em órbita exige muito conhecimento, trabalho, tecnologia, laboratórios especializados e recursos financeiros. Além do satélite, é preciso um foguete com energia suficiente para transportar o satélite ao espaço. Normalmente, a massa de propelente (combustível + oxidante) constitui 90% da massa total do foguete, sendo a massa do satélite inferior a 1% da massa total do foguete. Embora o primeiro satélite artificial da Terra tenha sido lançado em 1957, em 1925 o engenheiro alemão Dr. Walter Hohmann já tinha pensado no problema. Não é incrível? Baseado no conhecimento da mecânica orbital Hohmann propôs a teoria que ficou conhecida como órbita de transferência de Hohmann, que minimiza a quantidade de energia (propelente) necessária para colocar satélites e espaçonaves em órbita da Terra. Fique tranquilo, que vamos lhe explicar a genial ideia do Dr. Hohmann.

De uma maneira simplificada, a ideia do Dr. Hohmann funciona da seguinte forma: em vez do foguete colocar o satélite geoestacionário em sua órbita final, representada pela linha cheia da figura ao lado, ele o coloca no ponto B situado a cerca de 200 km de distância da superfície terrestre. A partir do ponto B o movimento do satélite estará sujeito às leis da mecânica orbital e girará no sentido anti-horário ao longo de uma órbita elíptica representada pela linha tracejada da figura. Para efeitos de comunicação, este satélite não teria qualquer utilidade uma vez que a sua posição em relação a um ponto fixo da superfície terrestre localizado no Equador terrestre muda com o tempo. Mas é aqui que entra a genial ideia de Hohmann. De acordo com sua teoria, a órbita geoestacionária pode ser alcançada acionando o propulsor do satélite no apogeu de sua trajetória elíptica (ponto C da figura) e com isso ele sairá de sua órbita elíptica e alcançará a órbita geoestacionária.



c) Pelas leis da mecânica orbital, cada órbita, seja ela elíptica ou circular, é dotada de uma energia orbital específica, definida por $\varepsilon = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{R}$, onde v é a velocidade do satélite, R é o raio local da órbita (medido a partir do centro da Terra) e $\mu = 4 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$. Para as órbitas mostradas na figura tem-se $(\varepsilon_e) = \varepsilon_{elíptica} = -8,2 \text{ km}^3/\text{s}^2$ e $(\varepsilon_c) = \varepsilon_{circular} = -4,7 \text{ km}^3/\text{s}^2$. Calcule de quanto aumentou a velocidade (Δv) do satélite quando ele passou da órbita elíptica para a circular no ponto C. **Dica:** Você precisará transformar o valor de velocidade obtido no item a de km/h para km/s .



Resoluções dos exercícios