

Curso Introdutório em Tecnologia de Satélites

Órbitas

Petrônio Noronha de Souza

**Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial – ETE
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
São José dos Campos, SP
Novembro de 2002**

Unidade 2/Parte 2.2.1/Versão 1.0

2.2.1 – Órbitas: A Astronomia (*)

Embora vinculada, em suas primeiras etapas, à religião e à magia, a astronomia - a mais antiga das ciências - nunca deixou de apresentar, em maior ou menor grau, um caráter científico, já que seus resultados se baseavam em observações e eram explicados por modelos teóricos.

A astronomia é a ciência que tem por objetivo o estudo do universo como um todo, e também dos diferentes corpos que o compõem. Seus integrantes se agrupam em estruturas progressivamente crescentes: estrelas de diversas magnitudes, com seus planetas e satélites, que, acrescidos à matéria interestelar, formam as galáxias; estas, por sua vez, se agrupam em aglomerados e superaglomerados de galáxias. O astrônomo descreve todos esses corpos celestes, estuda sua composição e analisa tanto as relações que mantêm entre si quanto sua evolução no tempo.

Ramos da astronomia

Os avanços alcançados com a aplicação da física moderna ao estudo dos astros deram origem a duas especialidades bem diferenciadas da ciência astronômica: a **astronomia clássica** e a **astrofísica**. O fato de ser aquele primeiro ramo mais antigo não significa que tenha deixado de ser importante.

A astronomia clássica, por sua vez, subdivide-se em **astrometria** e **mecânica celeste**. A primeira é responsável pela localização dos astros, mediante os sistemas de coordenadas de espaço e tempo e com a utilização de instrumentos ou técnicas de medida cada vez mais precisos. Já a mecânica celeste estuda a movimentação dos planetas, satélites e outros astros, segundo a lei da gravitação universal de Newton. Seus objetivos são o cálculo de órbitas, a elaboração dos anuários astronômicos e das efemérides (mapas das coordenadas astrais em função do tempo).

A astrofísica aplica ao estudo dos astros as teorias e técnicas que revolucionaram a física desde o início do século XX. Sobressaem, entre tais técnicas, a fotometria, a espectroscopia e a análise das ondas de rádio emitidas pelos corpos celestes, ou radioastronomia. Além disso, fazem parte da astrofísica a física das estrelas, que tem como objeto de estudo a estrutura e composição desses astros; a **cosmogonia**, que trata da origem e evolução de todos os objetos celestes; e a **cosmologia**, que se volta para a estrutura e a evolução do universo como um todo.

Grandes figuras da Astronomia da Antiguidade ao Renascimento

A seguir são apresentados resumos biográficos de algumas das grandes figuras da astronomia desde a antiguidade até Newton.

2.2.1 – Grandes figuras da Astronomia (*)

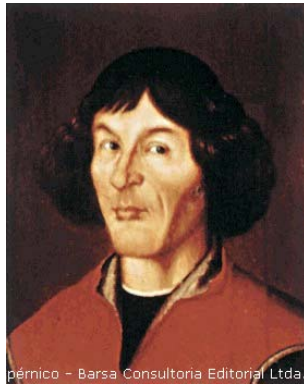
~1700

Século
II



**Cláudio
Ptolomeu**

~1470



**Nicolau
Copérnico**

~1550



**Tycho
Brahe**

~1570

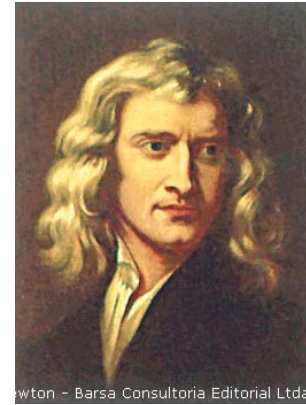


**Galileu
Galilei**

~1600



**Johannes
Kepler**



**Isaac
Newton**

2.2.1 – Órbitas: Cláudio Ptolomeu (século II) (*)

O compêndio de astronomia elaborado por Ptolomeu no século II foi adotado pela igreja durante toda a Idade Média. Sua tese de que a Terra ocupava o centro do universo foi aceita durante 14 séculos, até ser desmentida pelas teorias de Copérnico e Galileu.

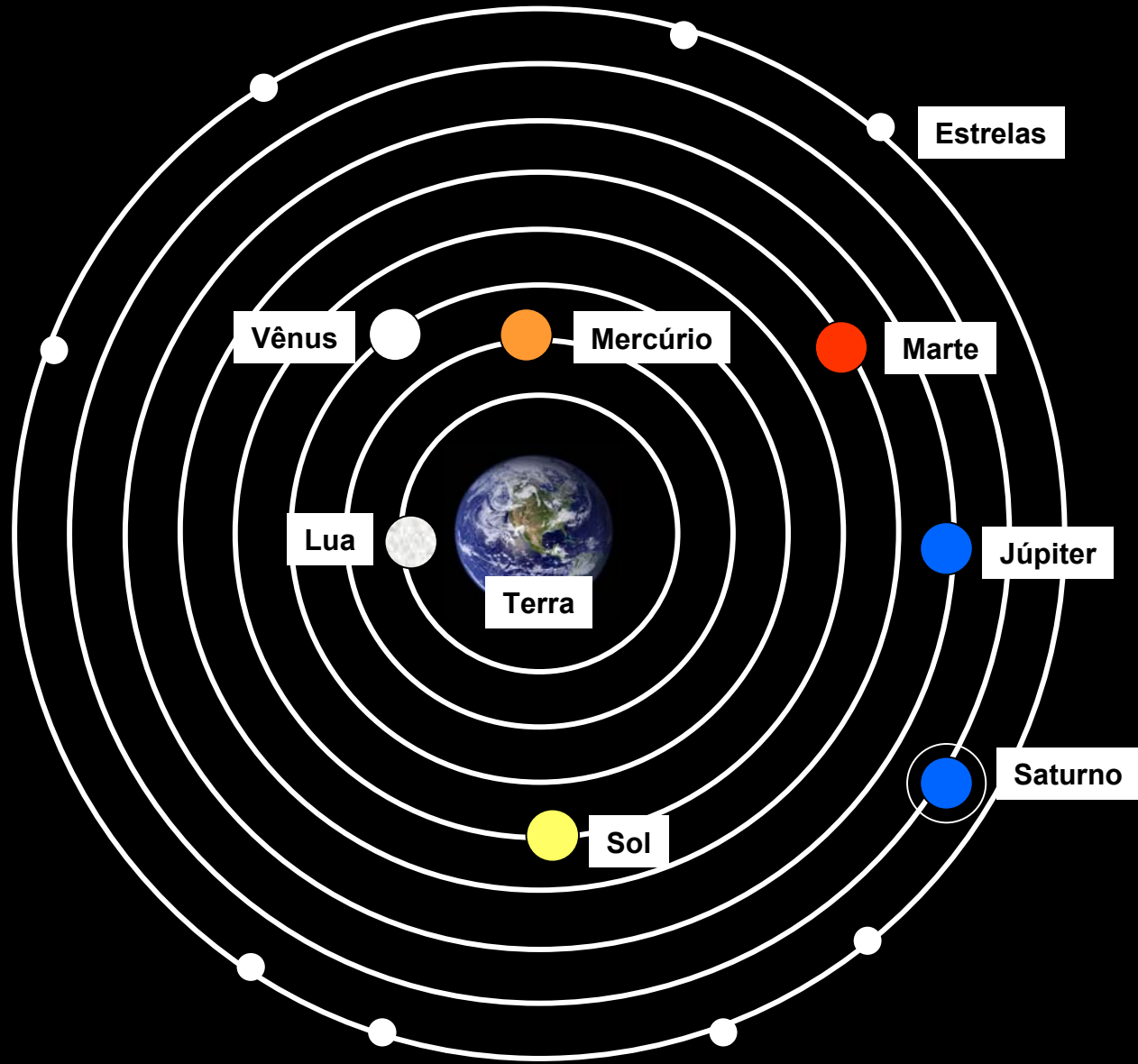
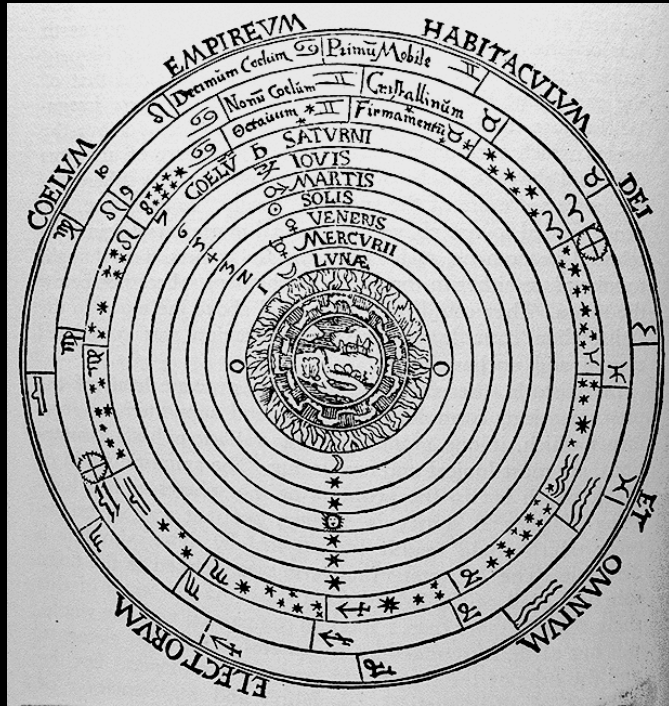
Cláudio Ptolomeu nasceu no início do século II da era cristã em Ptolemaida, Hérmia. Com base em certas observações astronômicas por ele anotadas, sabe-se que trabalhou em Alexandria, no Egito, entre os anos 120 e 145 da era cristã. Personalidade das mais célebres da época do imperador Marco Aurélio, Ptolomeu foi o último dos grandes sábios gregos e procurou sintetizar o trabalho de seus predecessores. Por meio de suas obras de astronomia, matemática, geometria, física e geografia, a civilização medieval teve seu primeiro contato com a ciência grega.

Cronistas antigos mencionam várias obras de Ptolomeu hoje desaparecidas, como *Peri diastáseos* (Sobre a dimensão), na qual tenta provar que só pode existir espaço tridimensional, e *Peri ropon* (Sobre o equilíbrio), em que trata de física mecânica. *Geographike hyphegesis* (Introdução à geografia) apresenta as idéias de que a Ásia se estendia muito mais a leste, o que levou Colombo a acreditar ser possível alcançar este continente se viajasse sempre para oeste, e da existência de um continente ao sul do oceano Índico, afinal confirmada em 1775, quando o capitão James Cook retornou de sua viagem pelo hemisfério sul. O tratado geográfico apresenta, no entanto, algumas falhas, como contradições entre mapas e textos, e omite informações sobre clima, habitantes e aspectos naturais das terras que descreve. Ptolomeu também escreveu um tratado de três volumes sobre música, conhecido como Harmônica.

A principal obra do autor, contudo, foi *He mathematike syntaxis* (A coleção matemática), que se tornou conhecida como *Ho megas astronomos* (O grande astrônomo) ou ainda **Almagesto**, título da tradução árabe do século IX. Dividida em 13 livros, constitui a síntese dos resultados obtidos pelos astrônomos gregos da antiguidade e é a principal fonte de conhecimento a respeito do trabalho de Hiparco, considerado o maior astrônomo da antiga Grécia. Hiparco elaborou o primeiro catálogo estelar, com as posições de 850 estrelas. Ptolomeu deu continuidade a esse trabalho e registrou em seu catálogo 1.022 estrelas, das quais 172 ele próprio descobriu. A obra explica também a construção do astrolábio, instrumento inventado por Ptolomeu para calcular a altura de um corpo celeste acima da linha do horizonte. A parte final, dedicada aos planetas, é a contribuição mais original do autor à astronomia.

Baseado nas idéias de Hiparco, Ptolomeu adotou o sistema geocêntrico, que situa a **Terra** no centro do universo e, girando em torno dela a **Lua**, **Mercúrio**, **Vênus**, o **Sol**, **Marte**, **Júpiter**, **Saturno** e as **estrelas**. Todos esses astros descreveriam, em suas órbitas, círculos perfeitos, conforme ensinavam Platão e Aristóteles. Essa concepção foi adotada pelos teólogos medievais, que rejeitavam qualquer teoria que não colocasse a Terra em lugar privilegiado. Segundo a tradição islâmica, Ptolomeu morreu aos 78 anos.

2.2.1 – Órbitas: O Sistema Solar de acordo com Ptolomeu



2.2.1 – Órbitas: Nicolau Copérnico (1473–1543) (*)

Ao propor a teoria segundo a qual a Terra dá uma volta diária completa em torno de seu eixo e uma volta anual em torno do Sol, Copérnico desencadeou uma revolução na ciência, na filosofia e na religião.

Nicolau Copérnico (em polonês Mikolaj Kopernik), nasceu em Torun, Polônia, em 19 de fevereiro de 1473, numa família de ricos negociantes. Aos 18 anos entrou para a Universidade de Cracóvia, famosa na época por empreender o estudo da matemática como fundamento da astronomia. Ao completar 24 anos de idade, mudou-se para Bolonha e mais tarde para Pádua, onde aprofundou seus conhecimentos matemáticos e estudou a língua e a cultura da Grécia clássica.

Em 1497, Copérnico regressou à Polônia para assumir o cargo de cônego da catedral de Frauenburg, que lhe garantia emprego vitalício. O desejo de aprender o levou de volta à Itália, onde integrou-se à agitação cultural da época. Estudou medicina e leis em Pádua e iniciou as pesquisas astronômicas que o levaram a duvidar da teoria geocêntrica, então de aceitação geral, segundo a qual a Terra é o centro do universo.

O novo sistema planetário imaginado por Copérnico contradizia as idéias geocêntricas de Ptolomeu, astrônomo alexandrino do século II, adotadas pelos teólogos medievais que rejeitavam qualquer teoria que não conferisse à Terra o lugar central do universo. A teoria geocêntrica atribuía aos planetas órbitas perfeitamente circulares em torno da Terra, descritas dentro de um complicado sistema de percursos denominados epiciclos.

Copérnico relutou antes de tornar públicas suas idéias sobre o sistema solar e tratou de fazê-lo da maneira mais respeitosa possível em relação à ordem estabelecida. Na verdade, seu raciocínio básico firmava-se também em critérios teológicos: perguntava em que lugar, melhor do que o centro do sistema solar, poderia o Criador ter situado a lâmpada que ilumina o mundo. Assim, suas relações com a igreja nunca chegaram ao declarado antagonismo que caracterizaria a posição dos teólogos frente a Galileu. Em todas suas obras e anotações sobre a estrutura do universo, Copérnico considerava sua própria hipótese como um mero exercício geométrico, talvez pela necessidade de evitar acusações de heresia.

As teorias de Copérnico se complicaram desnecessariamente com a tentativa de explicar as irregularidades dos epiciclos ptolomaicos. Por esse motivo, o sistema copernicano só ganhou coerência irrefutável depois que Kepler demonstrou a forma elíptica das órbitas e Galileu comprovou esse fato com observações telescópicas.

O compêndio que guarda as teorias de Copérnico é o ***De revolutionibus orbium caelestium*** (Sobre as revoluções dos orbes celestes), obra concluída em 1530 mas cuja publicação só se iniciou em 1540, após a aprovação do autor. Conta-se que o primeiro exemplar impresso do trabalho chegou às mãos de Copérnico no último dia de vida do astrônomo, que morreu em 24 de maio de 1543 em Frauenburg.

2.2.1 – Órbitas: Tycho Brahe (1546–1601) (*)

Com uma contribuição que abriu caminho para a astronomia moderna, Tycho Brahe aprimorou instrumentos e técnicas de observação, além de reunir dados precisos sobre grande parte dos astros conhecidos, quando ainda não existia o telescópio.

Brahe nasceu em 14 de dezembro de 1546, em Knudstrup, Dinamarca, numa família nobre. Apesar de revelar aptidão para a astronomia, seguiu o desejo paterno e, aos 14 anos, foi estudar direito na Universidade Luterana de Copenhague. Sua formação humanística completou-se entre 1562 e 1565, em Leipzig. Neste mesmo período consolidou seus conhecimentos astronômicos com a leitura assídua do *Almagesto*, de Ptolomeu. Em 1563, quando registrou sua primeira observação - uma conjunção de Júpiter e Saturno - , verificou que tanto as tábuas afonsinas, baseadas no antigo sistema de Ptolomeu, como as tábuas prutênicas, baseadas no sistema de Copérnico, continham erros e imprecisões. Brahe passou então a se dedicar à correção dos registros existentes.

Entre 1565 e 1570 ou 1572, Tycho Brahe viajou pela Europa, estudando em Wittenberg, Rostock, Basileia e Augsburg. Voltando à pátria, passou a dedicar-se integralmente à astronomia e em 1571 construiu um pequeno observatório. Foi ali que, no ano seguinte, descobriu uma "nova estrela" muito brilhante, em um ponto do céu onde não havia antes nenhum astro. Em 1573, publicou o resultado de suas pesquisas no opúsculo *De nova stella* (Sobre a nova estrela) e mostrou que esta se encontrava além da Lua.

Tal descoberta consolidou sua reputação como pesquisador e iniciou uma mudança nas concepções astronômicas e filosóficas. Até então, as estrelas eram tidas como representantes da harmonia e estabilidade cósmicas, ao passo que a irregularidade era uma característica restrita ao mundo "sublunar". Um fenômeno como o da "nova estrela" mostrava que a imprevisibilidade e a desordem também podiam reinar nas esferas celestes.

Em 1576, o rei Frederico II da Dinamarca cedeu a Tycho Brahe a ilha de Ven (ou Hven) para que aí, com total apoio financeiro da coroa, criasse e dirigisse um grande observatório, que foi denominado Uraniborg. O local logo se tornou um centro internacional, visitado por sábios de vários países. Nele, Brahe e seus assistentes corrigiram de maneira sistemática os registros das posições de praticamente todos os corpos celestes conhecidos, realizaram importantes estudos sobre o sistema solar e determinaram a posição exata de mais de 777 estrelas fixas. Mais tarde esses trabalhos levaram a um sistema capaz de descrever com exatidão os movimentos dos planetas.

Entre outras contribuições, Brahe provou que a órbita do cometa observado em 1577 passava além da Lua e elaborou um detalhado modelo descritivo do sistema solar. Segundo tal modelo - um engenhoso meio-termo entre a concepção heliocêntrica de Copérnico e o antigo sistema geocêntrico ptolomaico -, os planetas giravam em torno do Sol, enquanto este e a Lua orbitavam ao redor da Terra estacionária.

Após a morte de Frederico II em 1588, houve uma drástica redução do apoio financeiro ao observatório de Brahe. Desgastado perante a coroa, a nobreza e o clero, em 1597 ele deixou a Dinamarca. Após curto período em Rostock e Wandsbeck, fixou-se em Praga, sob a proteção do imperador Rodolfo II da Boêmia. Assistido por Johannes Kepler e com alguns instrumentos trazidos de Uraniborg, retomou por algum tempo sua atividade. Com as anotações e registros que Brahe lhe transmitiu, Kepler publicou a obra-prima póstuma *Tychonis Brahe astronomiae instauratae progymnasmatae* (Novos conceitos astronômicos de Tycho Brahe). Tycho Brahe morreu em Praga, em 24 de outubro de 1601.

2.2.1 – Órbitas: Galileo Galilei (1564–1642) (*)

Galileu inaugurou uma nova fase na história da ciência, ao defender o racionalismo matemático como base do pensamento científico - "o universo é um texto escrito em caracteres matemáticos", afirmou - e ao criar a idéia moderna da experimentação científica, combinando a indução experimental e o cálculo dedutivo.

Galileu Galilei nasceu em Pisa, Itália, em 15 de fevereiro de 1564, de família nobre, filho de Vincenzo Galilei, matemático competente e músico famoso. Em criança, o futuro físico e astrônomo impressionou os professores do mosteiro de Vallombrosa pela capacidade intelectual, habilidade manual e criatividade, sobretudo para invenções mecânicas. Sempre avesso ao ensino tradicional, interrompeu o curso de medicina na Universidade de Pisa para dedicar-se ao estudo da matemática e das ciências. Nessa época, ao observar o movimento oscilatório de um dos lustres da catedral de Pisa, enquanto contava as próprias pulsações, constatou que o movimento do pêndulo era periódico e que as pequenas oscilações eram isócronas, isto é, ocorriam a intervalos regulares. Constatou também que o período de um pêndulo independe da natureza e da massa da substância, ponto de partida para algumas de suas mais importantes pesquisas.

De volta à universidade, doutorou-se em 1585. Passou então a ensinar na Academia Florentina e logo ficou conhecido nos círculos científicos devido a um de seus inventos, a balança hidrostática. Depois de publicar, em 1589, um estudo sobre a gravidade, foi convidado a ensinar na Universidade de Pisa, onde realizou experiências de máxima importância sobre o movimento físico, em especial os movimentos que se registram na superfície terrestre. Numa dessas experiências, que se tornaria famosa, comprovou que objetos de diferentes massas em queda livre, desde o mesmo ponto e ao mesmo tempo, chegam juntos ao solo, ou seja, caem com a mesma aceleração. Com isso, além de surpreender os cientistas da época, presos aos preconceitos da física aristotélica, abalou os alicerces de toda uma falsa concepção dos fenômenos naturais e lançou a noção de gravidade, posteriormente desenvolvida por Newton.

Logo que surgiram as lentes ópticas, criadas por pesquisadores holandeses, Galileu aperfeiçoou o invento e criou um telescópio capaz de aumentar a imagem 32 vezes. Fez com ele importantes descobertas astronômicas, reunidas no livro *Sidereus nuncius* (1610; O mensageiro celeste), entre as quais se destacam as manchas solares, as montanhas da Lua, os satélites de Júpiter, os anéis de Saturno e as fases de Vênus. Muito bem recebido em Roma ao exibir seu telescópio, em 1611, Galileu publicou dois anos mais tarde *Istoria i dimostrazioni intorno alle macchie solari* (História e demonstração em torno das manchas solares), em que defendeu as idéias heliocêntricas de Copérnico.

Galileu acreditou, desde a mocidade, na tese do heliocentrismo. Suas importantes pesquisas e brilhante argumentação chamaram a atenção das autoridades para as divergências entre sua concepção do universo e a posição da Igreja Católica, que preconizava o geocentrismo. Suas obras se tornavam ainda mais perigosas porque, ao contrário dos outros sábios, não escrevia em latim, mas na própria língua falada pelo povo, o que o tornou muito popular. Ainda em 1613, reafirmou a validade do sistema heliocêntrico e declarou que as Escrituras são alegóricas e, assim, não podiam servir de base para conclusões científicas. A polêmica provocada pelo tema levou a Igreja Católica a proibir o livro de Copérnico e a condenar Galileu, submetido a julgamento pelo tribunal da Inquisição.

Impedido de prosseguir os estudos sobre o sistema de Copérnico, Galileu recolheu-se a seu castelo, na localidade de Arcetri, nos arredores de Florença, onde se dedicou a estabelecer e comprovar novos métodos de pesquisa científica baseados na experimentação. Solicitou ao papa Urbano VIII, seu protetor, permissão para escrever uma obra em que os dois sistemas seriam comparados. Em 1632, publicou o que se tornaria seu principal trabalho, *Diálogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* (Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo, ptolomaico e copernicano), com sólida argumentação contra as razões que então se alegavam para refutar a possibilidade do movimento terrestre. A obra provocou acirrada polêmica e as idéias de Galileu foram consideradas por muitos mais perigosas que as de Lutero e Calvino. De novo julgado pela Inquisição, concordou em abjurar para evitar condenação maior. Conta-se, porém, que ao fim da declaração em que renunciava a suas opiniões científicas e declarava sua adesão à ortodoxia, murmurou, referindo-se à Terra: "Eppur, si muove" ("Apesar de tudo, se move"). Dedicou-se a partir de então à publicação de suas pesquisas sobre o movimento, reunidas na obra *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638; Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências).

Galileu não mais abandonou o castelo de Arcetri e lá prosseguiu os trabalhos que o tornariam o pesquisador mais produtivo de seu tempo. Criador da ciência do movimento, estabeleceu os fundamentos da dinâmica e lançou as bases de uma nova metodologia científica. O físico, astrônomo e inventor mereceu ser também lembrado como escritor: inovou ao expor suas teorias em língua vulgar e o fez em estilo ágil e irônico. Deu aulas sobre o "Inferno" de Dante, foi leitor apaixonado de Ariosto e escreveu *Considerazioni sulla Gerusalemme liberata* (1586-1588; Considerações sobre Jerusalém libertada), crítica da obra de Tasso. A cegueira pôs fim às pesquisas de Galileu, cinco anos antes de sua morte, ocorrida em 8 de janeiro de 1642, em Arcetri, perto de Florença.

2.2.1 – Órbitas: Johannes Kepler (1571–1630) (*)

A revolução que se produziu na astronomia à época do Renascimento e estabeleceu o Sol como centro do universo teve três protagonistas: Copérnico, o autor das hipóteses; Galileu, que as confirmou experimentalmente; e Kepler, seu mais importante teórico e precursor da teoria da gravitação universal de Newton.

Johannes Kepler nasceu na cidade alemã de Weil der Stadt em 27 de dezembro de 1571. De origem humilde, teve ampla e esmerada educação, graças a sua prodigiosa inteligência e ao apoio econômico dos duques de Württemberg. Graduou-se em astronomia em 1591 pela Universidade de Tübingen e desistiu de seguir a carreira eclesiástica ao ser nomeado professor de matemática na cidade austríaca de Graz, três anos depois.

Inspirado nos modelos geométricos gregos e na teoria heliocêntrica de Copérnico, Kepler demonstrou as três leis básicas do movimento planetário. A primeira afirma que os planetas do sistema solar giram ao redor do Sol e descrevem órbitas elípticas, aproximadamente circulares. Pela segunda lei, a velocidade do movimento se adapta à posição do planeta na curva elíptica de modo uniforme, ainda que não constante.

A terceira lei estabelece uma proporção fixa entre o raio da órbita e o tempo que o planeta leva para descrevê-la.

Kepler publicou seus cálculos na obra *Prodomus dissertationum mathematicarum continens mysterium cosmographicum* (1596; Primeiras dissertações matemáticas sobre o mistério do cosmo), da qual enviou um exemplar a Tycho Brahe, matemático oficial do Sacro Império Romano-Germânico. Tornou-se então seu assistente e sucedeu-lhe após sua morte, em 1601. De posse da excelente documentação recolhida por Brahe durante décadas, Kepler aperfeiçoou seus três princípios e fez notáveis observações referentes à órbita de Marte, aos fenômenos ópticos da atmosfera e às estrelas distantes.

Após longa permanência em Praga, Kepler mudou-se, em 1620, para a cidade austríaca de Linz e, graças à condição de matemático imperial, livrou sua mãe da acusação de bruxaria. Publicou outras obras, entre elas *Harmonices mundi* (1619; As harmonias do mundo) e *Tabulae rudolphinae* (1627; Tábuas rudolfinas), usados por mais de um século no cálculo das posições planetárias. Kepler morreu na cidade alemã de Regensburg, em 15 de novembro de 1630.

2.2.1 – Órbitas: O Sistema Solar, [3]

- Mercúrio
- Vênus
- Terra
- Marte
- Júpiter
- Saturno
- Urano
- Netuno
- Plutão

General direction of revolution about sun – counterclockwise viewed from point north of ecliptic

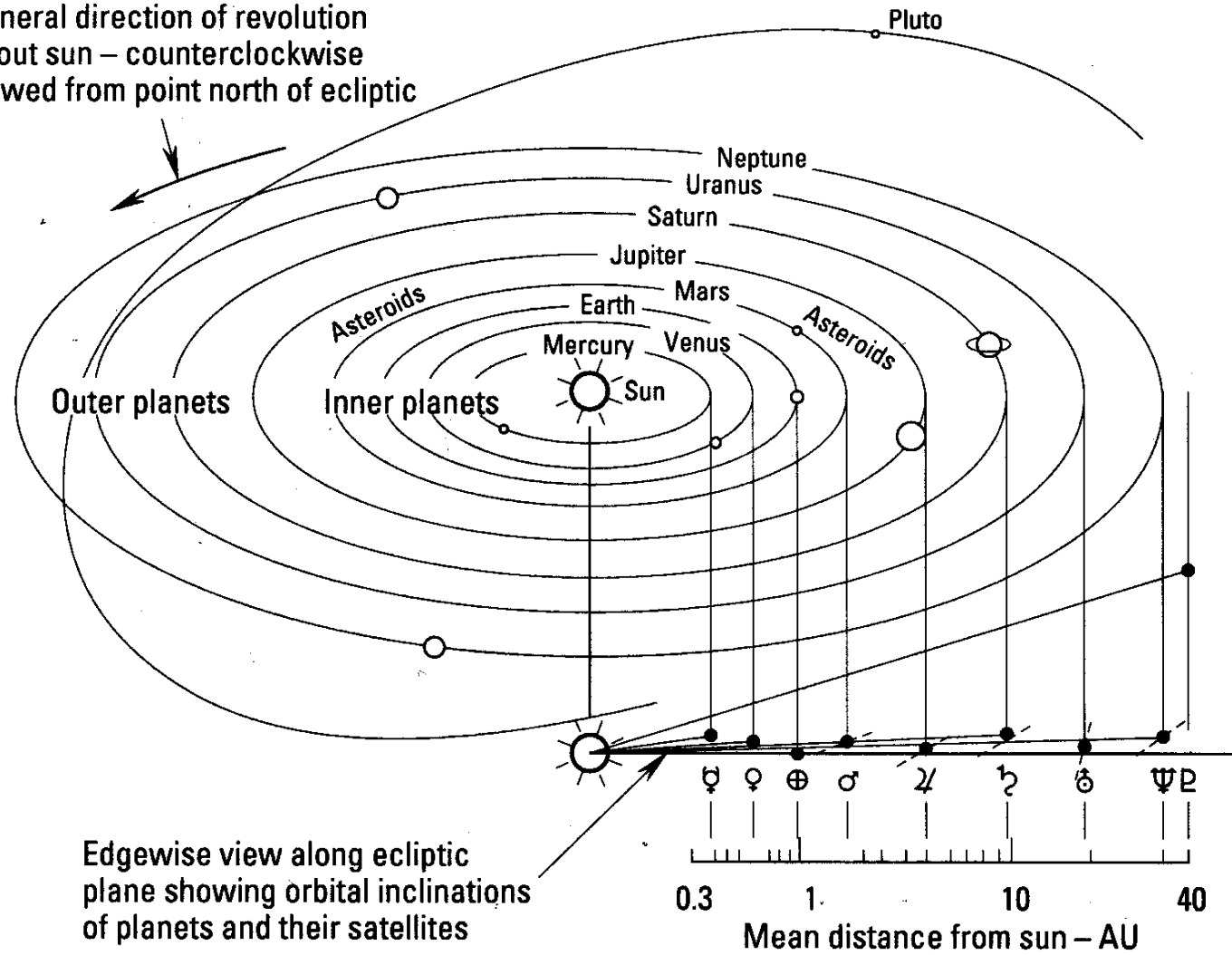


Fig.: The Solar System

1 AU = 149.600.000 km
 AU = Astronomical Unity ou Unidade Astronômica

2.2.1 – Órbitas: Isaac Newton (1642–1727) (*)

Poucos homens contribuíram tanto para o progresso da ciência como Newton, físico, astrônomo e matemático inglês. Suas descobertas no campo da astronomia, da física e da matemática foram de tal importância que se pode falar numa "revolução newtoniana". Seus trabalhos sobre a composição da luz branca conduziram à moderna física óptica; a formulação das três leis do movimento levou à lei da gravitação universal; na matemática, ele lançou os fundamentos do cálculo infinitesimal.

Isaac Newton nasceu em 4 de janeiro de 1643, em Woolsthorpe, Lincolnshire. Estudou no Trinity College, de Cambridge, onde encontrou um ambiente de efervescência no campo científico, a partir das obras de Copérnico, Kepler e Descartes. Em seu caderno de notas de 1664, intitulado "*Quaestiones quaedam philosophicae*" ("Certas questões filosóficas"), o jovem Newton já revelava a nova concepção da natureza que seria a base da chamada revolução científica. Graduou-se em 1665 e, com o fechamento da universidade devido a uma epidemia de peste, recolheu-se a sua aldeia natal, onde reviu tudo quanto havia estudado e formulou a maior parte de suas teorias.

Principais descobertas

Até 1667, durante o longo período de ociosidade forçada, Newton concebeu seus mais importantes princípios, entre eles a lei da gravitação, a decomposição da luz solar no espectro e os anéis coloridos das lâminas delgadas. Embora só tenham se tornado conhecidas anos depois, as descobertas dessa fase inauguraram uma nova era, a da ciência moderna, e suas profundas consequências se estenderam a todas as áreas do conhecimento humano. Ao formular, por exemplo, o princípio da gravitação universal, Newton eliminou a dependência da ação divina e influenciou decisivamente em todo o pensamento filosófico do século XVIII, além de fundar a mecânica clássica.

Ao retornar a Cambridge, em 1667, não relatou imediatamente suas descobertas, mas apresentou a seu mestre Isaac Barrow cinco memórias sobre o cálculo infinitesimal, que chamou de método matemático dos fluxos, e tornou-se membro da congregação do Trinity College. Em 1669, Barrow renunciou à cátedra de matemática e indicou Newton para ocupar seu lugar.

A solução dos problemas da mecânica celeste continuou a constituir a preocupação maior do novo catedrático. Ao descobrir a aceleração circular uniforme, a que deu o nome de "centrípeta", concluiu que o princípio determinante da gravitação terrestre era o mesmo que governava a rotação da Lua ao redor da Terra. Para comprovar essa teoria, porém, seria preciso conhecer o tamanho exato do raio terrestre e, assim, Newton abandonou por vinte anos o trabalho nesse terreno e passou a dedicar-se especialmente à óptica. Com base nas palestras feitas sobre o tema entre 1670 e 1672, redigiu um trabalho sobre as cores que contém a maior parte das idéias do primeiro volume de *Opticks* (Óptica), que seria publicado em 1704.

Convencido da pouca eficácia das lentes usadas nas lunetas astronômicas, Newton construiu o primeiro telescópio de reflexão, no qual empregou um espelho côncavo em lugar da objetiva. Em 1671, apresentou seu novo modelo à Royal Society. No ano seguinte, foi eleito membro da instituição. Apresentou uma memória sobre a teoria das cores e revelou suas experiências sobre a decomposição da luz branca no prisma. Em 1675, expôs outro trabalho fundamental de óptica, em que tratava das propriedades da luz, com uma explicação sobre a produção das cores por lâminas delgadas e o resultado da medição dos anéis coloridos, que passaram a ser conhecidos como "anéis de Newton". Sua teoria corpuscular da luz foi mais tarde substituída pela teoria ondulatória, de Huygens. Séculos depois, porém, Einstein, ao descobrir o efeito fotoelétrico (1905), mostrou que havia pontos de concordância entre as duas teorias aparentemente contraditórias: a energia elétrica se concentraria em corpúsculos, ou fótons, enquanto outros fenômenos somente poderiam ser explicados pelas ondas luminosas.

Desde 1672 tornara-se conhecido, em Londres, o valor exato do raio terrestre, obtido um ano antes pelo astrônomo francês Jean Picard. Instado pelo astrônomo Edmond Halley, em 1684, para que divulgasse suas descobertas sobre gravitação, Newton dedicou-se, então, a escrever *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1686-1687; Princípios matemáticos da filosofia natural), em que, com base na lei de gravitação, explica a mecânica de Galileu. Mais que o principal trabalho de Newton, essa é a obra fundamental de toda a ciência moderna.

2.2.1 – Órbitas: Isaac Newton (cont.) (*)

Dividida em três partes, a obra trata inicialmente da mecânica racional. No primeiro tomo, intitulado *De motu corporum* (Do movimento dos corpos), apresentado à Royal Society em 1686, formula definições e axiomas, expõe a lei da inércia, introduz a noção de massa (excluindo a possibilidade de reduzir-se a mecânica à cinemática pura), formula uma nova noção de força, o princípio da igualdade entre ação e reação e as regras da aceleração no vácuo. O segundo tomo, terminado em 1687, é uma extensão do primeiro; trata do movimento dos corpos num meio resistente e delinea a hidrodinâmica. O terceiro, terminado no mesmo ano e intitulado *De sistemate mundi* (Do sistema do mundo), apresenta a mecânica do sistema universal. Os movimentos dos planetas, dos cometas e das marés são examinados à luz de princípios matemáticos. As exposições são precedidas de considerações filosóficas sobre as regras do raciocínio, dos fenômenos e das proposições. A obra teve imediata repercussão internacional, apesar da reduzida tiragem de 300 exemplares.

Contribuições à matemática

Depois de viver alguns anos em Londres, onde exerceu um cargo público, Newton regressou a Cambridge para retomar seus estudos matemáticos. Colocava a matemática numa posição secundária, instrumental, que merecia sua atenção apenas enquanto se revelasse fecunda para a solução de problemas da mecânica celeste. Contudo, embora só pesquisasse novos métodos matemáticos na medida em que os já conhecidos se revelassem insuficientes, foi profunda a revolução que introduziu no campo dessa ciência.

Antes de Newton, não se tinha conhecimento do cálculo integral e foi a partir dele que o cálculo diferencial assumiu feição precisa, embora não se possa deixar de mencionar a valiosa contribuição de Fermat e Descartes. Newton estudou as relações entre o cálculo diferencial e o integral, e fez surgir o cálculo infinitesimal, que, em sua obra, assume duas formas, uma das quais (o método dos fluxos) decorre da outra (o método das primeiras e últimas razões).

A célebre polêmica entre os seguidores de Newton e os de Leibniz em torno da prioridade da descoberta do cálculo infinitesimal teve início em 1705. Está historicamente provado que houve coincidência de conclusões, alcançadas de forma independente pelos dois cientistas. Cronologicamente, Newton pode ter chegado em primeiro lugar ao resultado, mas também é certo que Leibniz foi mais bem-sucedido no capítulo das notações, no qual criou símbolos usados até hoje.

Ainda no campo da matemática, deve-se a Newton a descoberta da fórmula de desenvolvimento do binômio, notável avanço para essa ciência. Por meio do método de interpolação, Newton conseguiu ainda resolver por aproximação certos problemas relativos a curvas complexas, ao aplicar resultados conhecidos e atinentes a curvas mais simples. No campo da álgebra, seus trabalhos beneficiaram a teoria das equações, com a criação de procedimentos para cálculos de raízes e formulação de regras para determinação do número de raízes de certa espécie.

Outras contribuições às ciências










Em 1696, devido a uma depressão nervosa, Newton afastou-se do trabalho científico e mudou-se definitivamente para Londres, onde, em 1701, assumiu novo cargo público. Apresentou à Royal Society seu único trabalho sobre química, ao qual pouco depois acrescentou observações sobre as temperaturas de ebulição e fusão, assim como um enunciado da lei de resfriamento por condução. Em 1703, foi eleito presidente da Royal Society, cargo para o qual se reelegeria sucessivamente.

Em 1705, foi feito cavaleiro (Sir) pela rainha Ana. A primeira edição inglesa de *Opticks, or A Treatise on the Reflections, Refractions and Colours of Light* (1704; Óptica, ou Um tratado sobre a reflexão, refração e cores da luz) traz importantes complementos, entre eles uma prefiguração da noção de comprimento de onda, sob o nome de "teoria dos acessos de fácil transmissão". A edição em latim apresenta, como apêndice, um verdadeiro tratado de cálculo integral, o primeiro a tornar-se público. Além disso, a segunda edição de *Opticks*, em inglês, inclui 31 Questions, que abordam especialmente o problema da matéria e da luz. Em *Arithmetica universalis sive De compositione et resolutione arithmetica* (1707; Aritmética universal ou Sobre a composição e resolução aritméticas), Newton exprime em fórmulas matemáticas a lei da gravitação e suas aplicações, e estabelece os fundamentos do cálculo infinitesimal.

Sir Isaac Newton viveu seus últimos anos como verdadeira glória nacional da Inglaterra e passou a dedicar-se sobretudo a estudos filosóficos e históricos. Morreu em Londres em 31 de março de 1727.

2.2.1 – Órbitas: O Sistema Solar (cont.), [3]

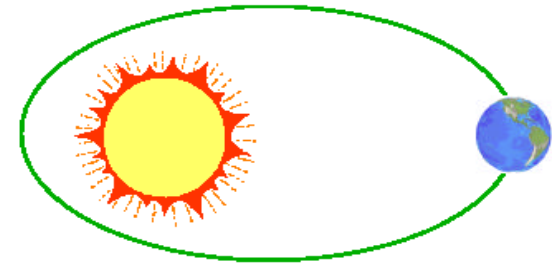
Tabela: Physical Characteristics of the Planets

Symbol Planet	 Mercury	 Venus	 Earth	 Mars	 Jupiter	 Saturn	 Uranus	 Neptune	 Pluto
No. of Natural Satellites	0	0	1	2	16	17	15	8	1
Equatorial Radius ($\oplus = 1$)	0.38	0.95	1.00	0.53	11.20	9.47	4.06	3.87	0.5
km	2.43 ³	6.05 ³	6.38 ³	3.40 ³	7.16 ⁴	6.00 ⁴	2.59 ⁴	2.47 ⁴	3.2 ³
miles	1.51 ³	3.76 ³	3.96 ³	2.11 ³	4.45 ⁴	3.73 ⁴	1.61 ⁴	1.53 ⁴	2.0 ³
Ellipticity	0	0	0.0034	0.009	0.064	0.102	0.01	0.03	?
Volume ($\oplus = 1$)	0.055	0.870	1.000	0.150	1317.00	762.00	67.00	58.00	0.12
Mean Density ($\oplus = 1$)	1.01	0.94	1.00	0.72	0.24	0.13	0.22	0.30	0.15
gm/cm ³	5.60	5.20	5.52	3.95	1.33	0.69	1.20	1.64	0.80
lb/ft ³	349.6	324.6	344.6	246.6	83.0	43.1	74.9	102.4	49.9
Mass ($\oplus = 1$)	0.053	0.815	1.000	0.107	317.89	95.15	14.54	17.23	0.002
Escape Velocity									
Km/sec	4.2	10.3	11.2	5.0	59.5	35.6	21.2	23.6	8.0
Mi/sec	2.6	6.4	7.0	3.1	37.0	22.1	13.2	14.7	5.0
Equatorial Surface Gravity ($\oplus = 1$)	0.38	0.90	1.00	0.38	2.37	1.32	0.93	1.23	0.002
Gravitational Parameter									
$\mu = \frac{aVe^2}{2} - \text{km}^3/\text{sec}^2$	2.18 ⁴	3.249 ⁵	3.986 ⁵	4.293 ⁴	1.267 ⁸	3.792 ⁷	5.788 ⁶	6.8 ⁶	3.2 ⁵
Albedo	0.12	0.59	0.37	0.15	0.45	0.46	0.48	0.50	0.40
Surface Temperature	415/0	440/140	60/1	22/006	-130/1	-130/1	-190/1	-220/1	-200/1
-°C/pressure - bar									

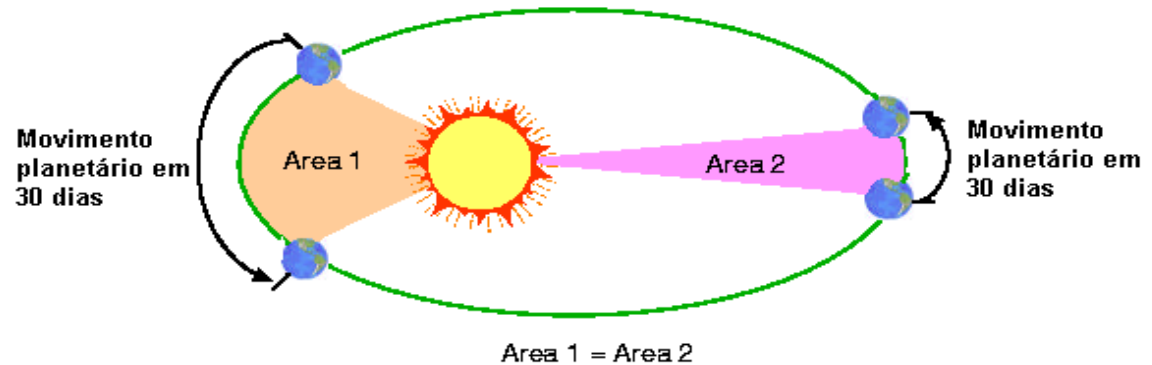
Note: Superscripts denote exponents of 10; e.g., 3.2³ = 3.2 x 10³

Leis de Kepler

1a. Lei: “*Lei das órbitas elípticas*”.
As órbitas dos planetas são elipses com o Sol no foco.

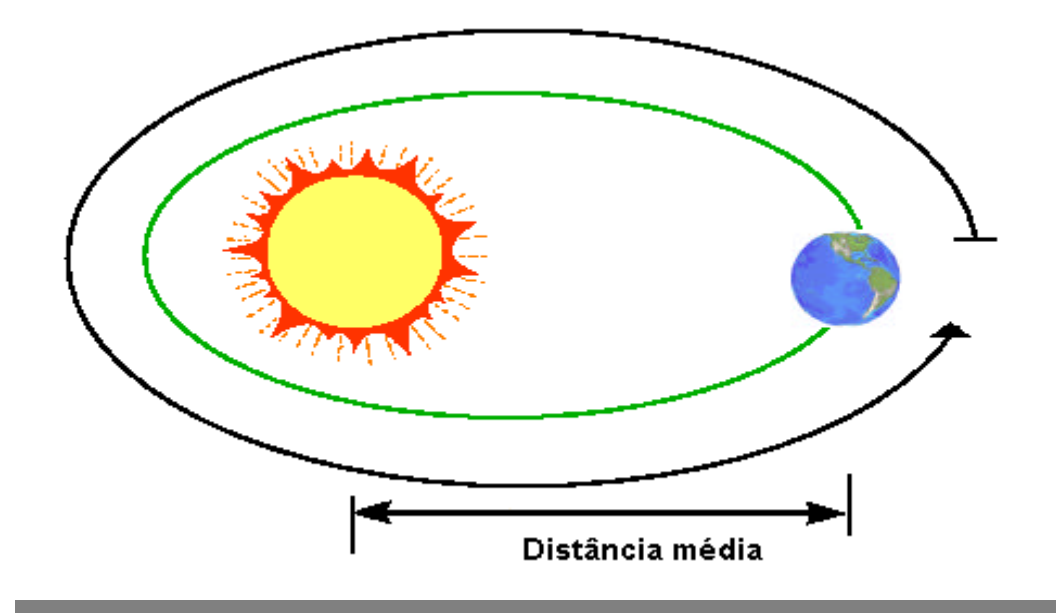


2a. Lei: “*Lei das áreas*”. As órbitas dos planetas varrem áreas iguais em tempos iguais.

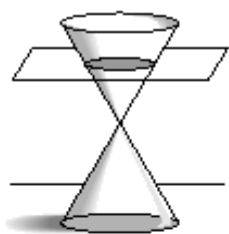


Leis de Kepler

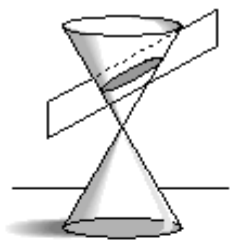
3a. Lei: “*Lei harmônica*”. O quadrado do período da órbita de cada planeta é proporcional ao cubo da distância média ao Sol (semi-eixo maior da elipse).



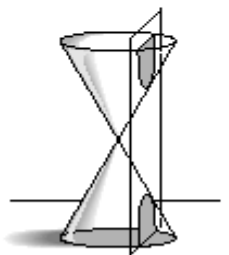
Órbitas pertencem à família das **cônicas**:



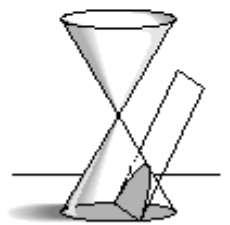
círculo



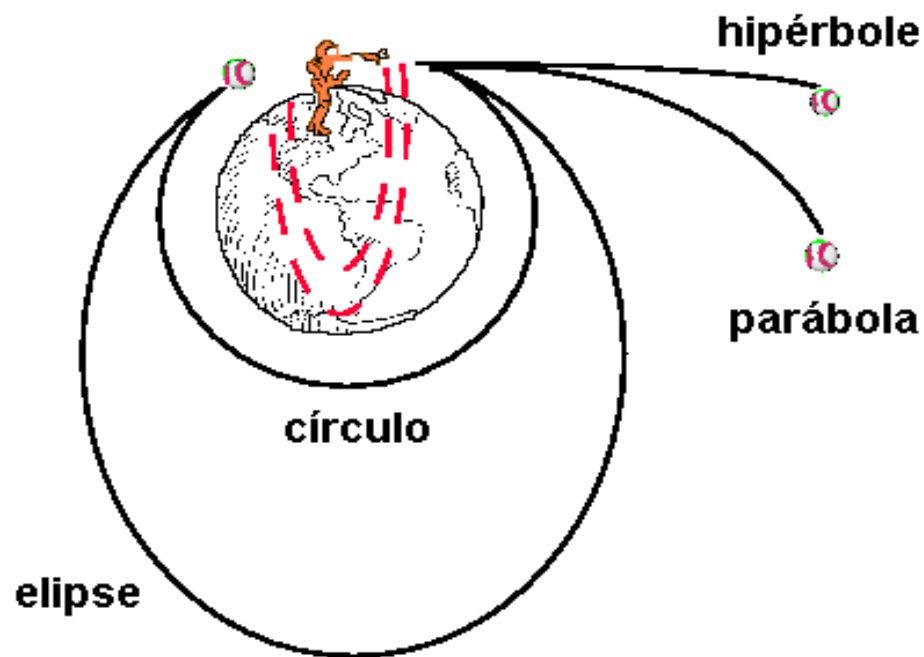
elipse



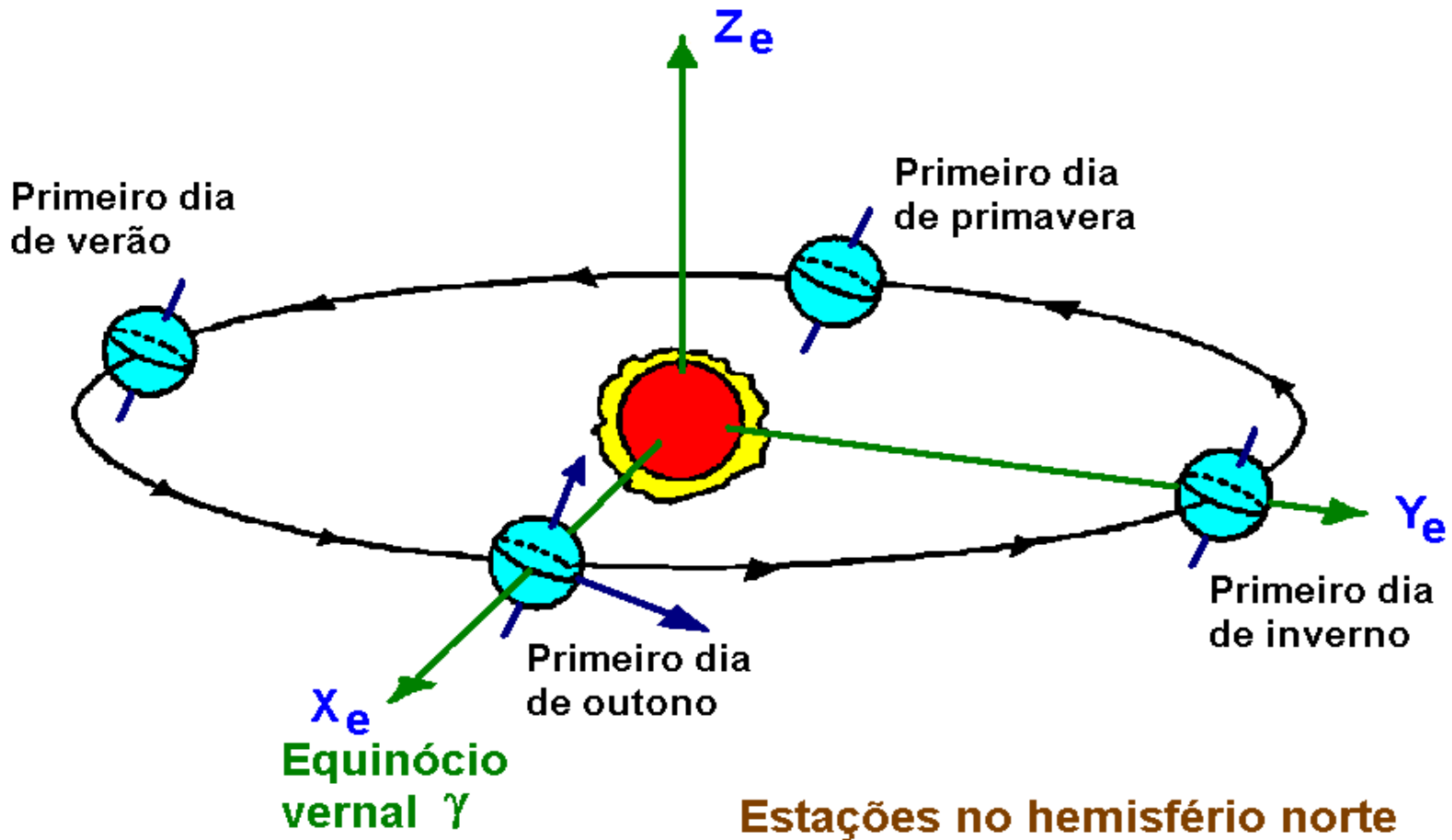
hipérbole



parábola

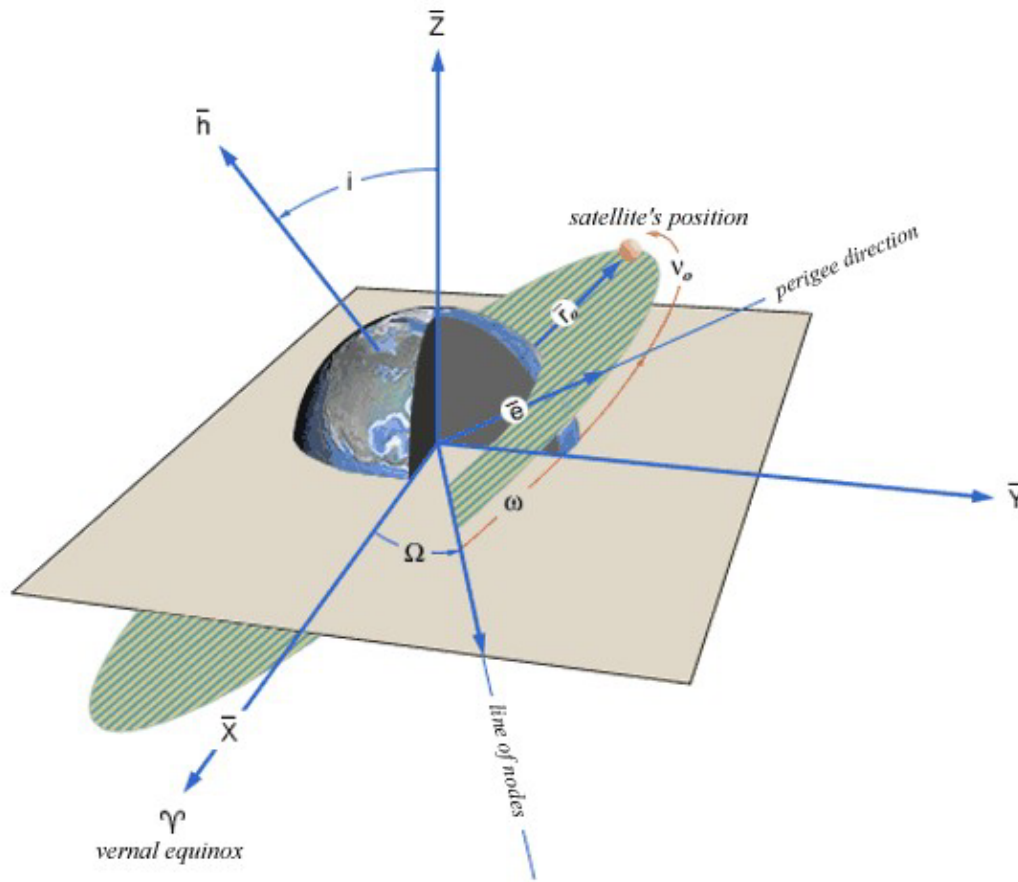


2.2.1 – Órbitas: Sistema de Coordenadas Eclíptico

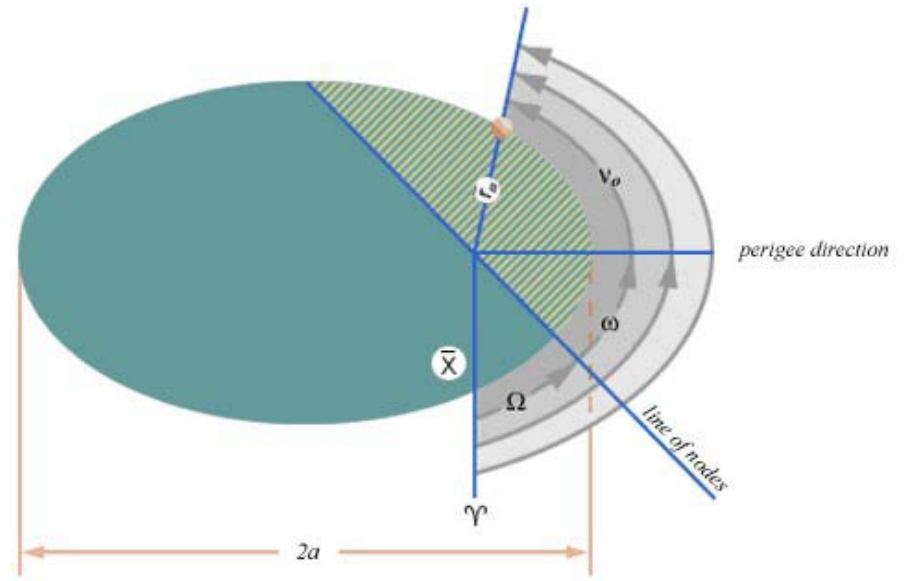


Obs: A direção do Equinócio Vernal é a da Terra ao Sol no primeiro dia da primavera no hemisfério norte (dia em que o movimento aparente do Sol cruza o plano do Equador terrestre).

2.2.1 – Órbitas: Elementos orbitais

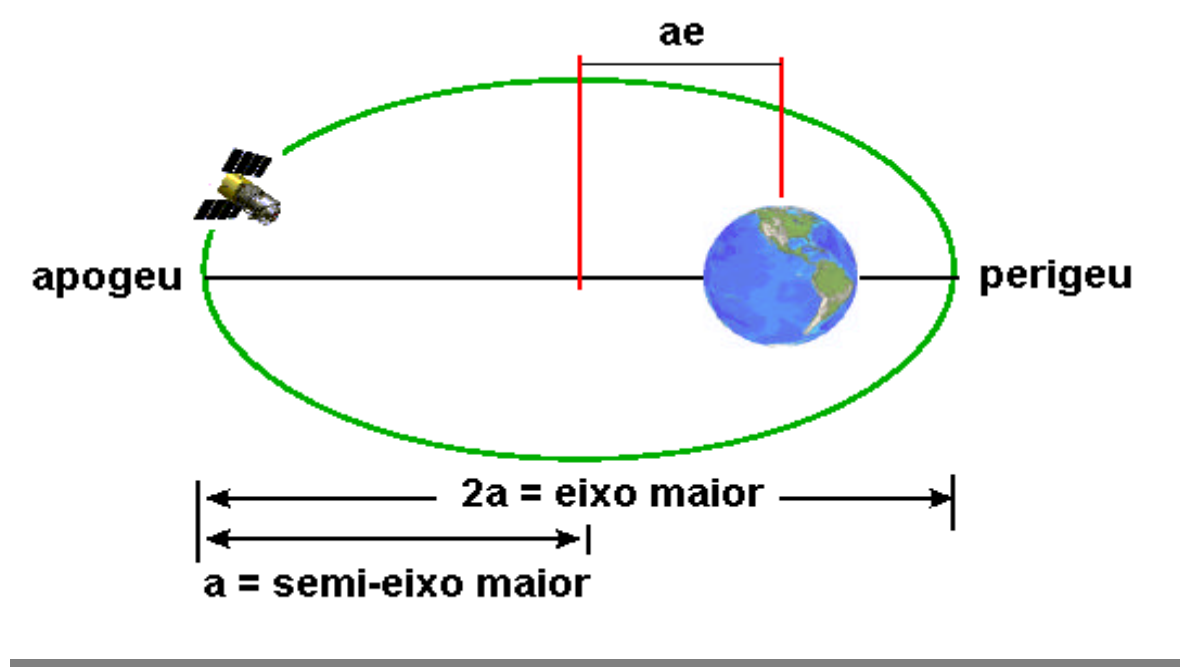


- a - defines the size of the orbit
- e - defines the shape of the orbit
- i - defines the orientation of the orbit with respect to the Earth's equator.
- ω - defines where the low point, perigee, of the orbit is with respect to the Earth's surface.
- Ω - defines the location of the ascending and descending orbit locations with respect to the Earth's equatorial plane.
- ν - defines where the satellite is within the orbit with respect to perigee.

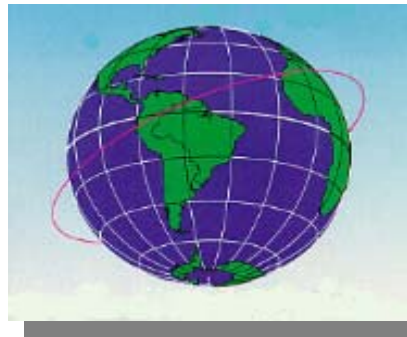


2.2.1 – Órbitas: Elementos orbitais

1. **Semi-eixo maior (“ a ”)**: Descreve a dimensão da elipse.
2. **Excentricidade (“ e ”)**: Descreve a forma da elipse.



3. Inclinação (“ i ”): Ângulo entre o vetor momento angular da órbita e o vetor Z do sistema de coordenadas fixo à Terra.



$$i = 25^\circ$$

$$i = 82^\circ$$

$$i = 0^\circ$$

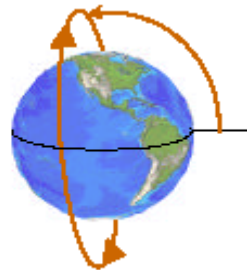
$$i = 90^\circ$$

$$0^\circ < i < 90^\circ$$

$$90^\circ < i < 180^\circ$$



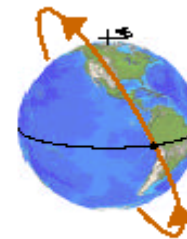
Equatorial



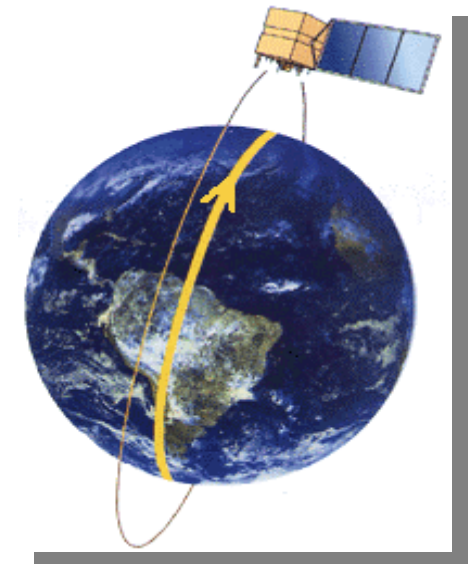
Polar



Direta

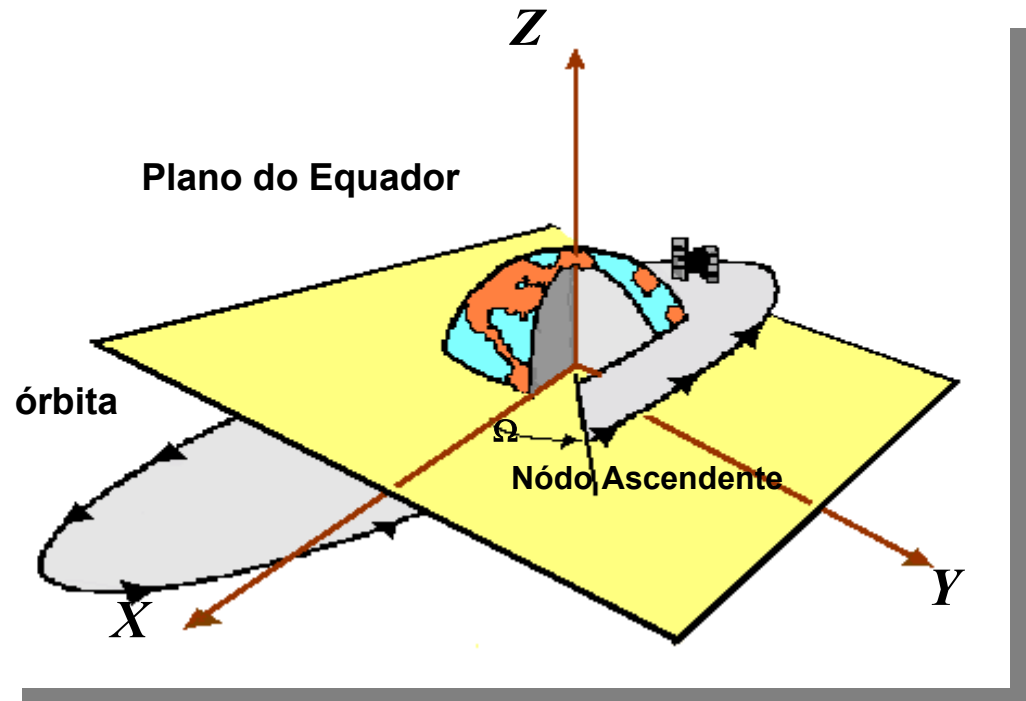


Retrógrada



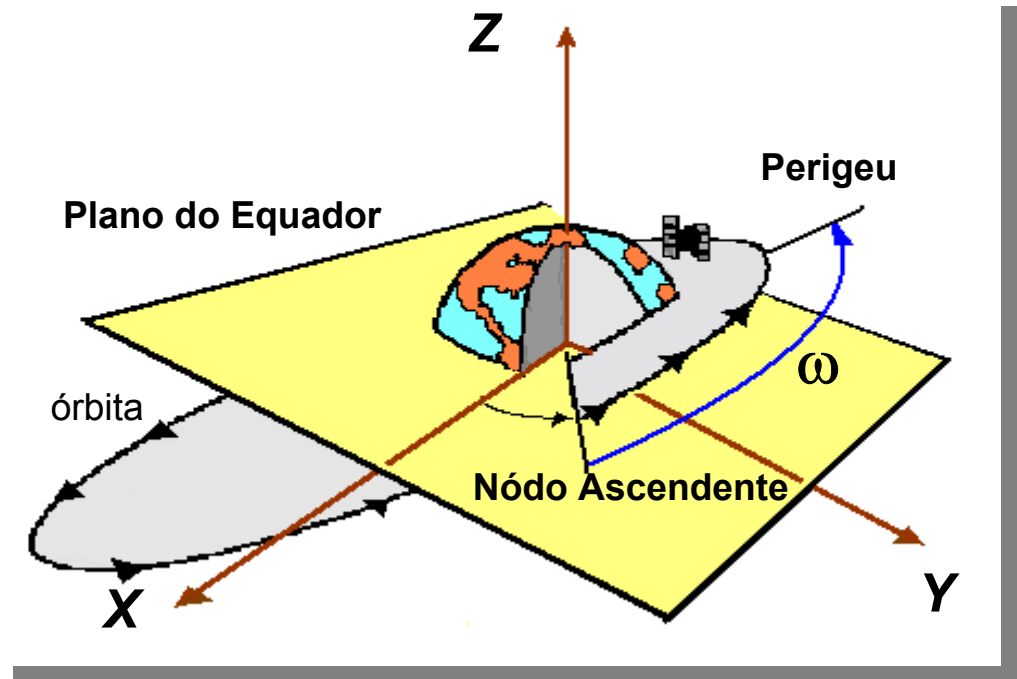
4. Ascensão reta do nó ascendente (“ Ω ”): Ângulo do Equinócio Vernal ao Nódo Ascendente. Nódo Ascendente é o ponto onde o satélite cruza o plano do Equador do sul para o norte.

$$0^\circ < \Omega < 360^\circ$$



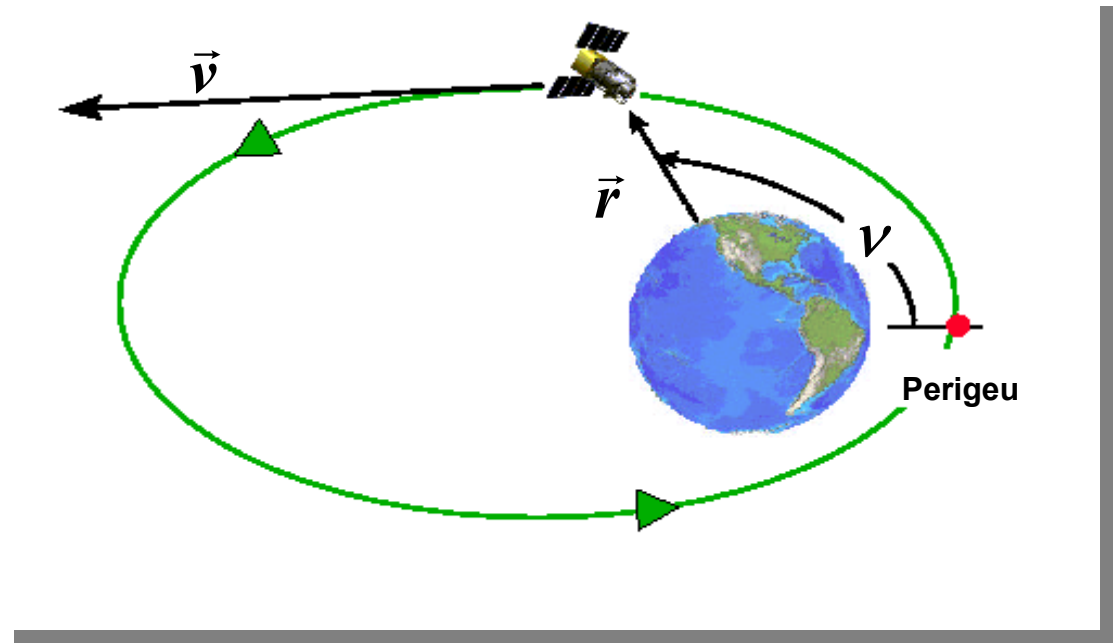
5. Argumento do perigeu (“ ω ”): Ângulo ente o Nódo Ascendente e o Perigeu.

$$0^\circ < \omega < 360^\circ$$

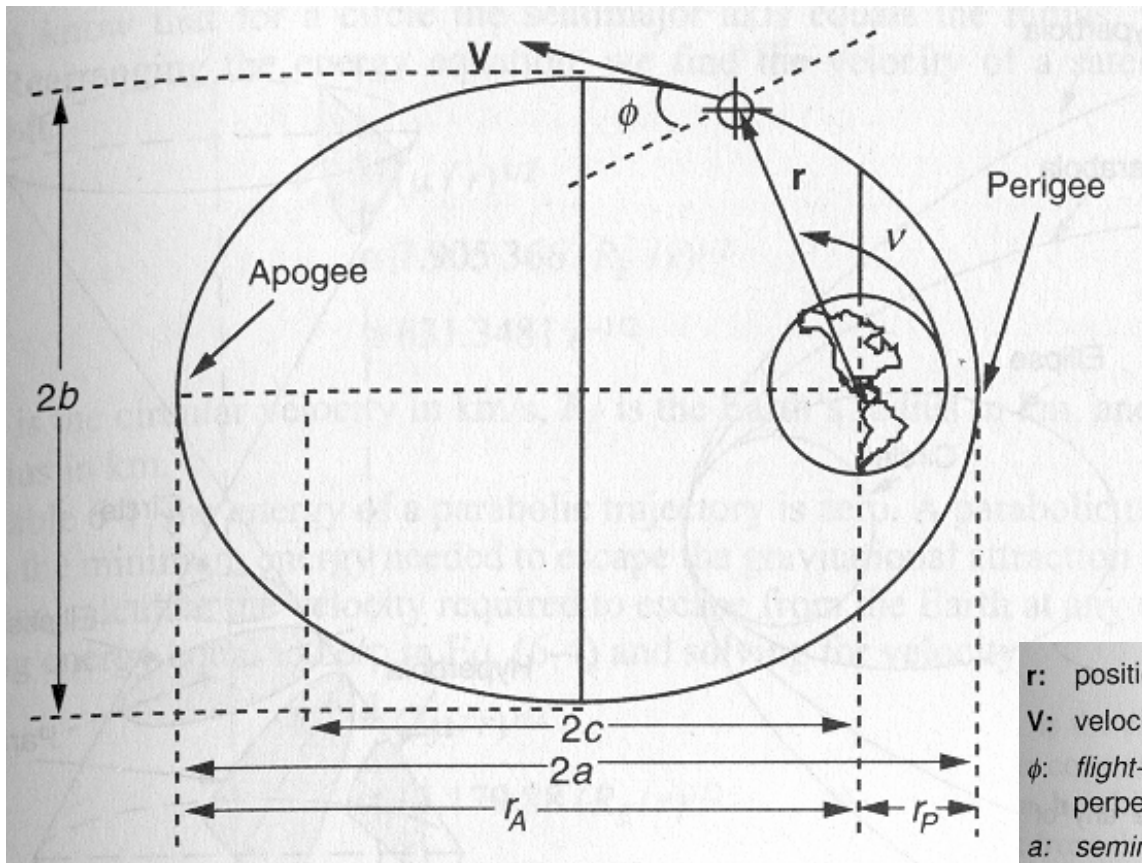


6. Anomalia verdadeira (“ v ”): Ângulo entre o Perigeu e a posição do satélite medida na direção de seu movimento.

$$0^\circ < v < 360^\circ$$



2.2.1 – Órbitas: Geometria de uma elipse e parâmetros orbitais, [4]



- r : position vector of the satellite relative to Earth's center
- v : velocity vector of the satellite relative to Earth's center
- ϕ : *flight-path-angle*, the angle between the velocity vector and a line perpendicular to the position vector
- a : *semimajor axis* of the ellipse
- b : *semiminor axis* of the ellipse
- c : the distance from the center of the orbit to one of the focii
- v : the *polar angle* of the ellipse, also called the *true anomaly*, measured in the direction of motion from the direction of perigee to the position vector
- r_A : *radius of apogee*, the distance from Earth's center to the farthest point on the ellipse
- r_P : *radius of perigee*, the distance from Earth's center to the point of closest approach to the Earth

2.2.1 – Lei da Gravitação Universal de Newton

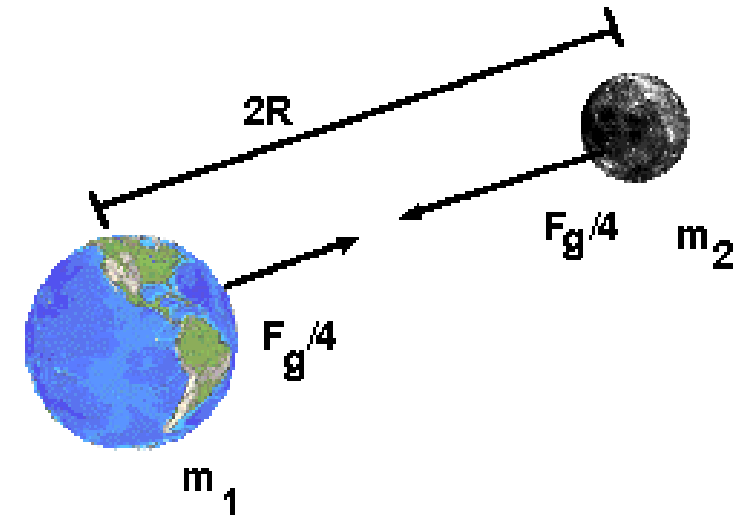
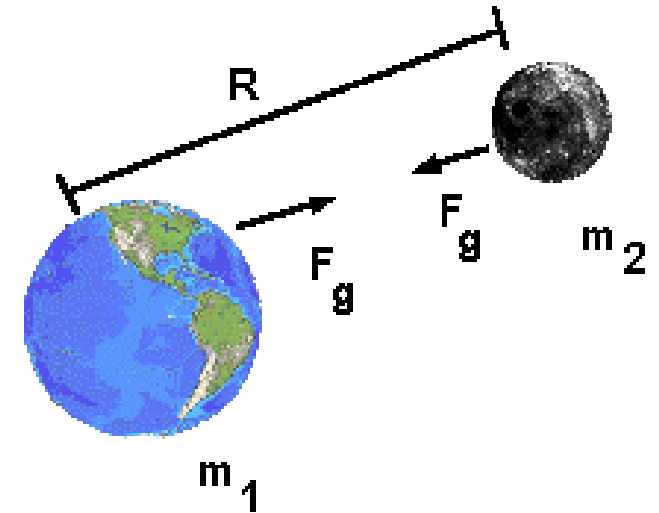
$$F_g = -G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

G = Constante de Gravitação Universal

$$Gm_{Terra} = \mu = 398.600,441 \times 10^9 \frac{m^3}{s^2}$$

$$F_g = \mu \frac{m}{R^2}$$



2.2.1 – Órbitas: Formulação simplificada para os elementos orbitais, [4]

Raio do Apogeu [km] $r_a = a(1 + e)$

Raio do Perigeu [km] $r_p = a(1 - e)$

Excentricidade $e = \left(\frac{r_a}{a} \right) - 1$

Semi-eixo maior [km] $a = \frac{(r_a + r_p)}{2}$

Período [minutos] $P = 0,00016587\sqrt{a^3}$

Velocidade na órbita circular [km/segundo] $V_{cir} = 631,3481\sqrt{\frac{1}{r}}$

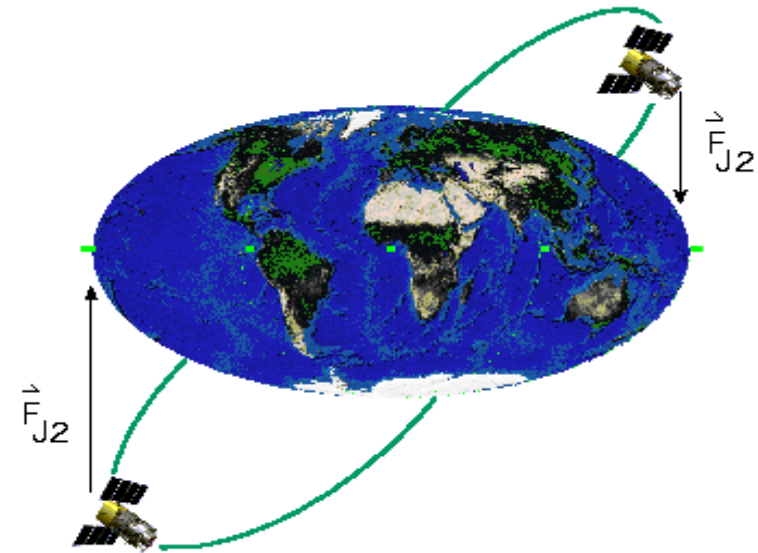
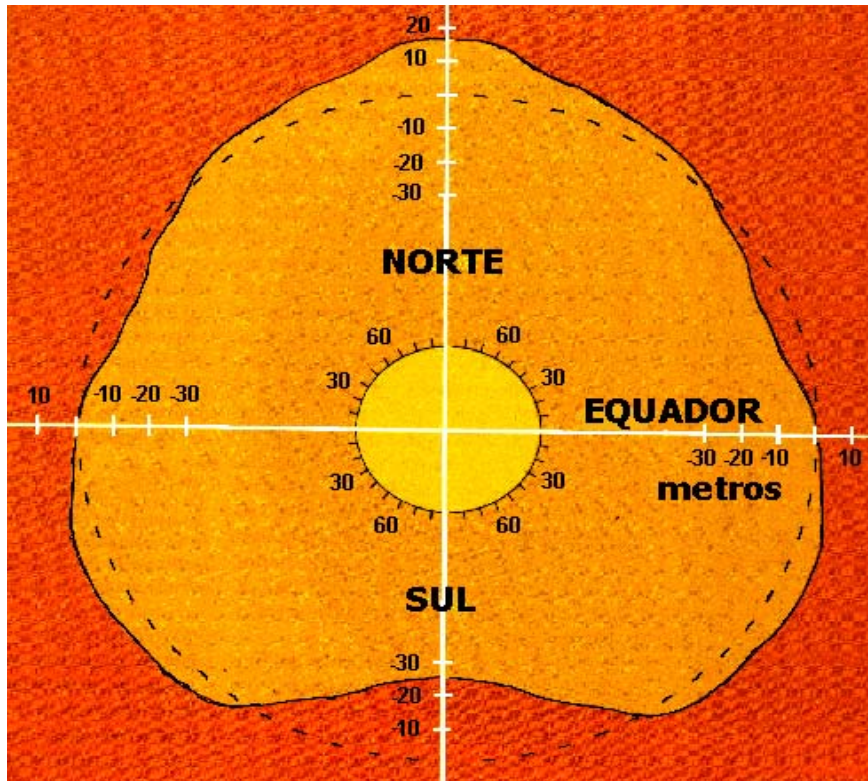
$$\text{Rev}_{\text{por dia}} = \frac{24 \times 60}{P}$$

(fórmulas genéricas válidas para qualquer tipo de órbita)

(fórmula válida para órbitas circulares e elípticas)

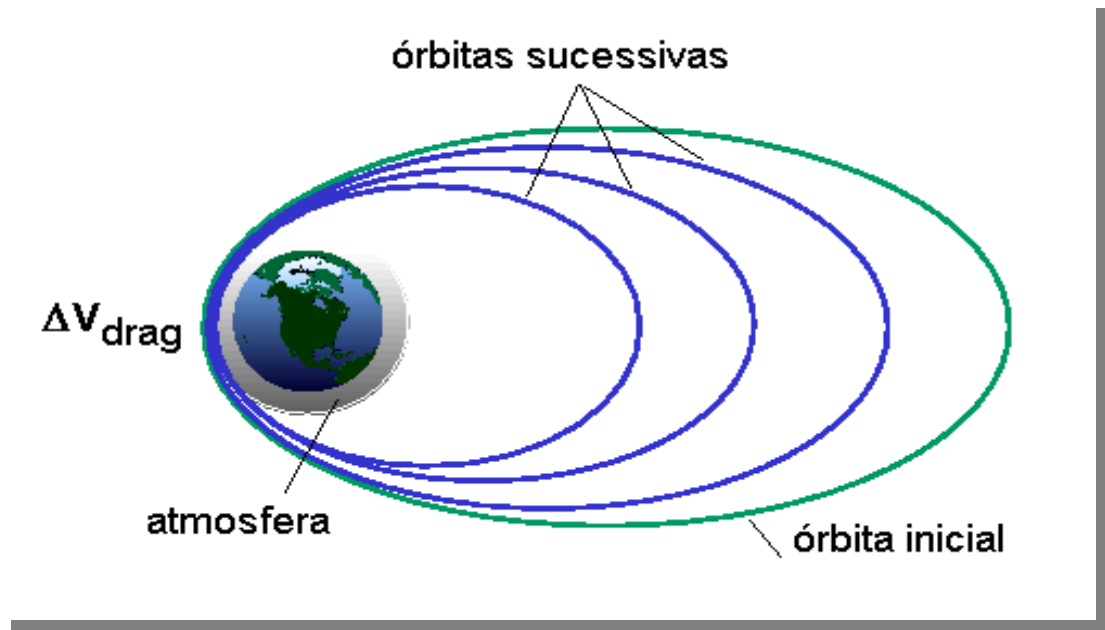
(fórmula válida somente para órbitas circulares)

Geopotencial

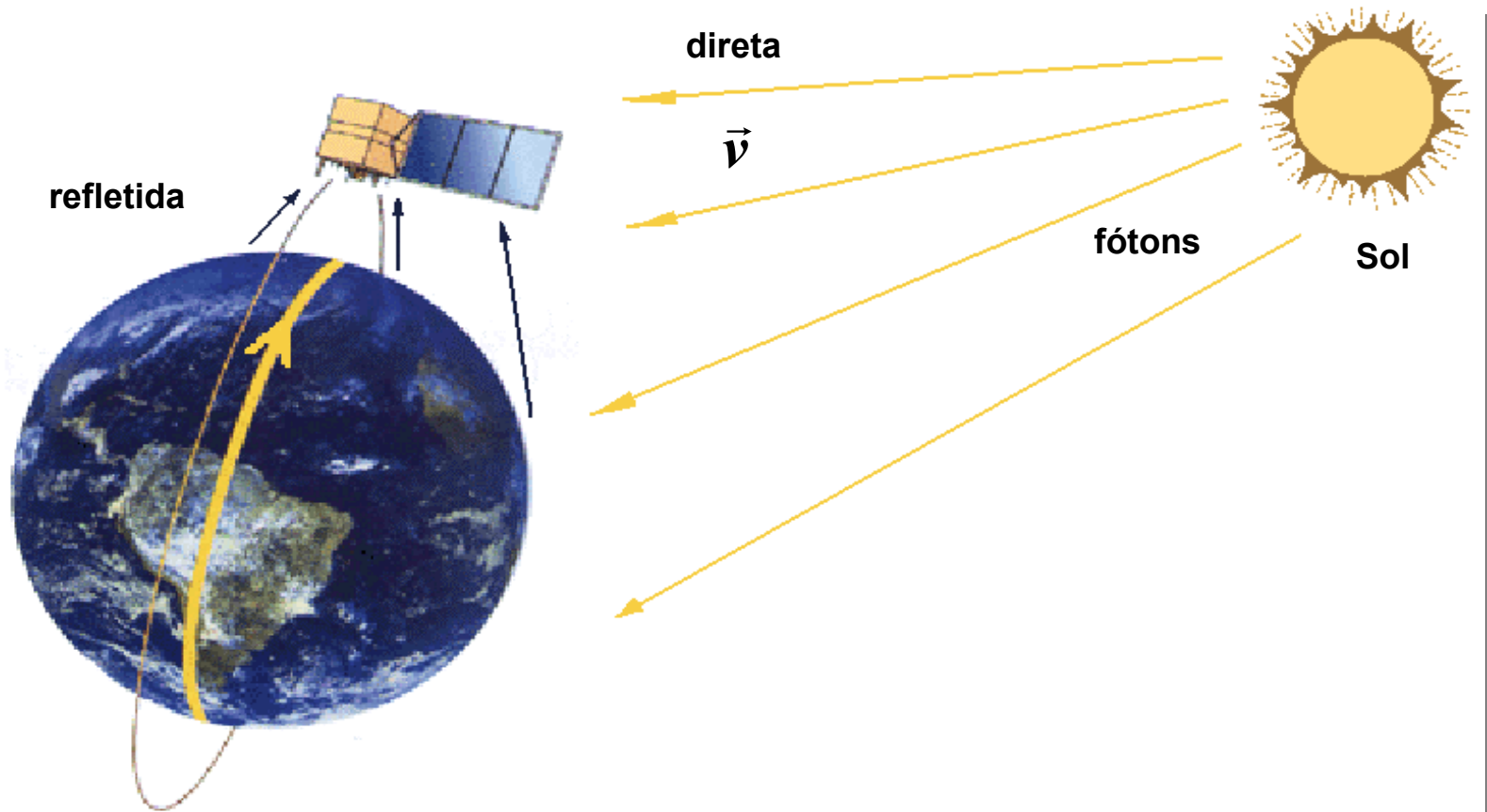


Arrasto atmosférico

- Circulariza a órbita em passagens pela atmosfera da Terra até sua queda.

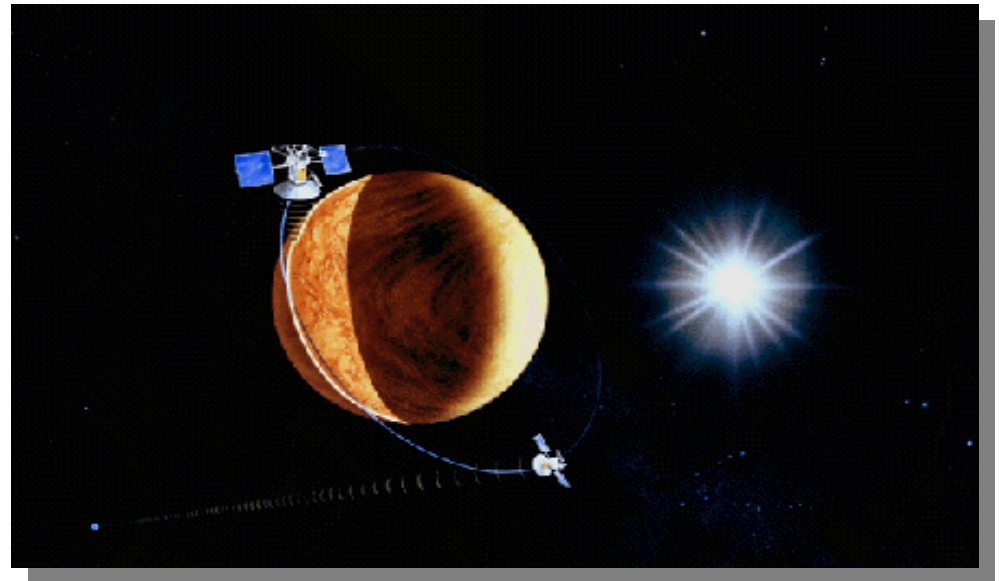


Pressão de radiação solar (direta e albedo)

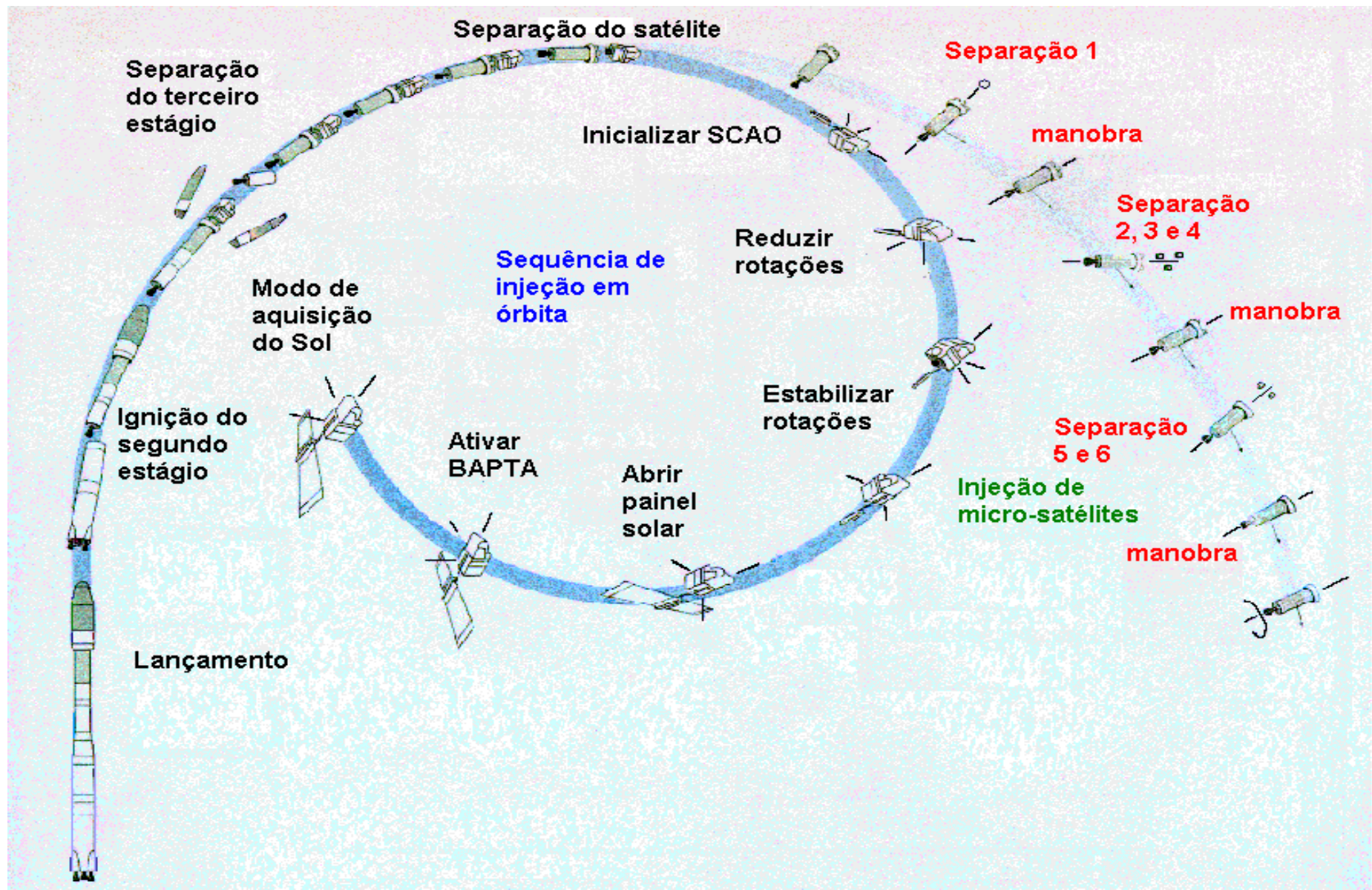


Gravitacional do Sol e Lua

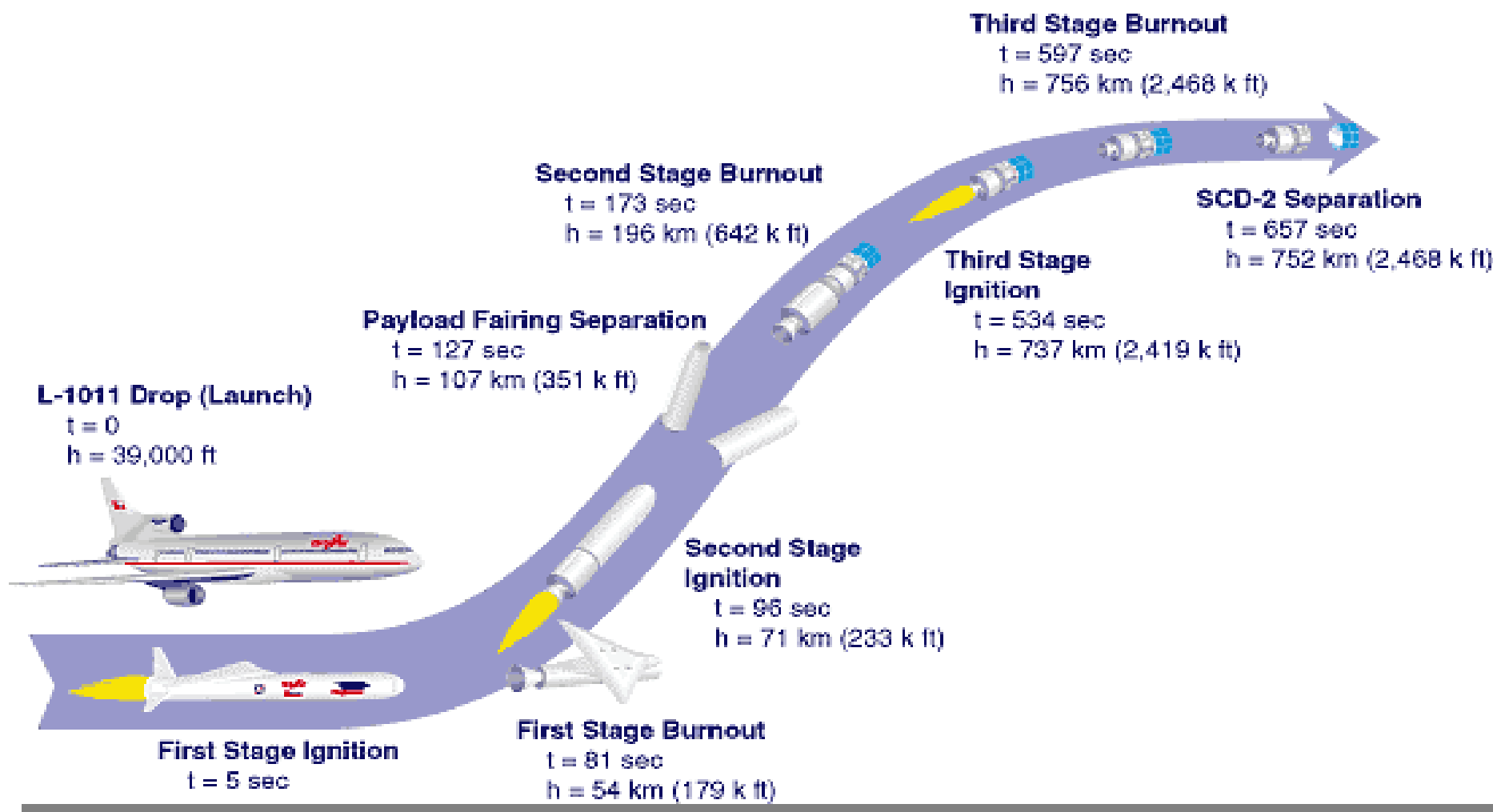
- Potencial gravitacional é perturbado devido à proximidade de outros corpos massivos, por exemplo Sol e Lua.

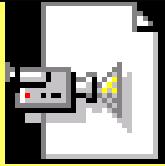


2.2.1 – Órbitas: Inserção orbital convencional, [8]



2.2.1 – Órbitas: Inserção orbital via Pegasus, [8]





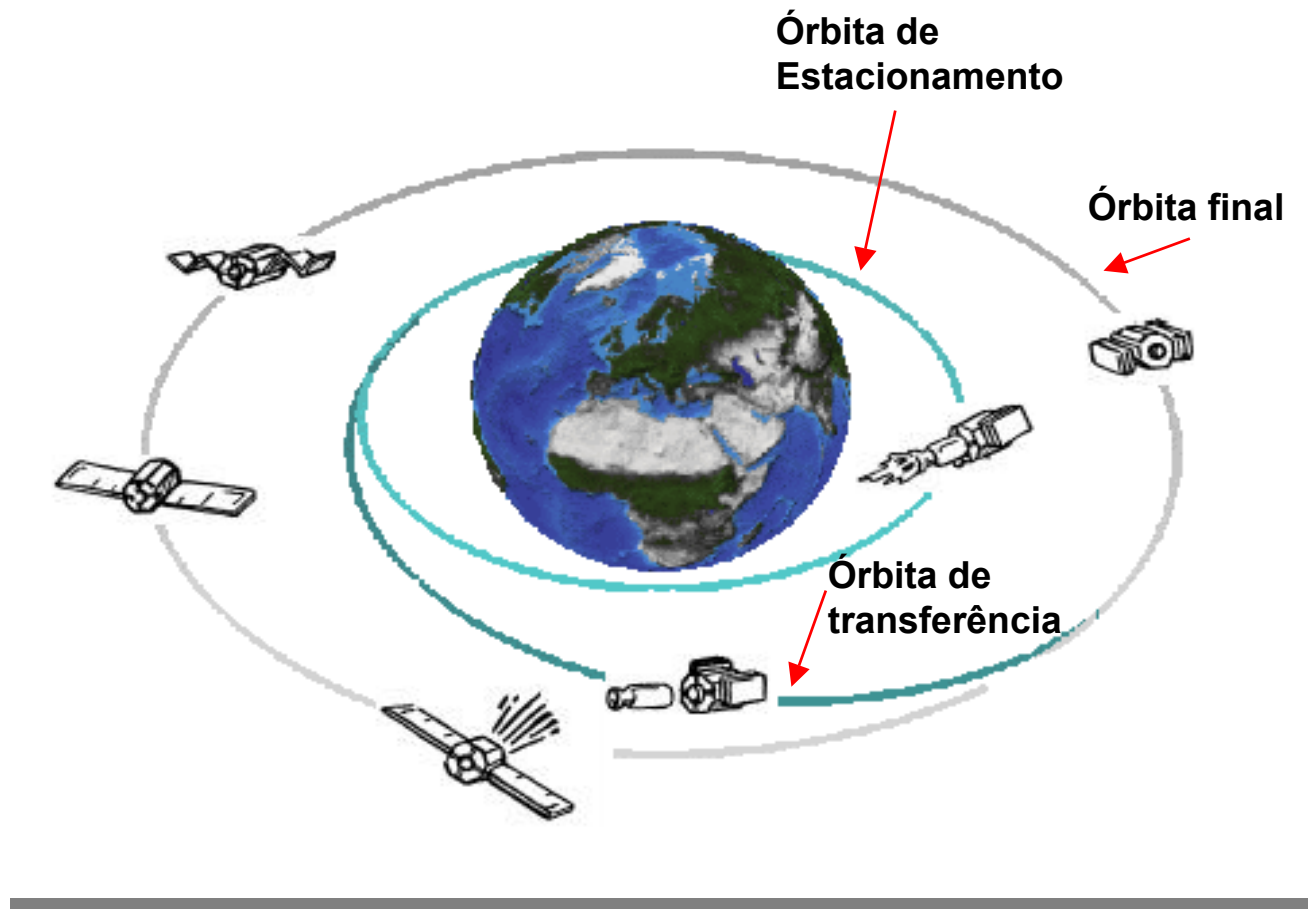
Lançamento de satélite DSP, [32]



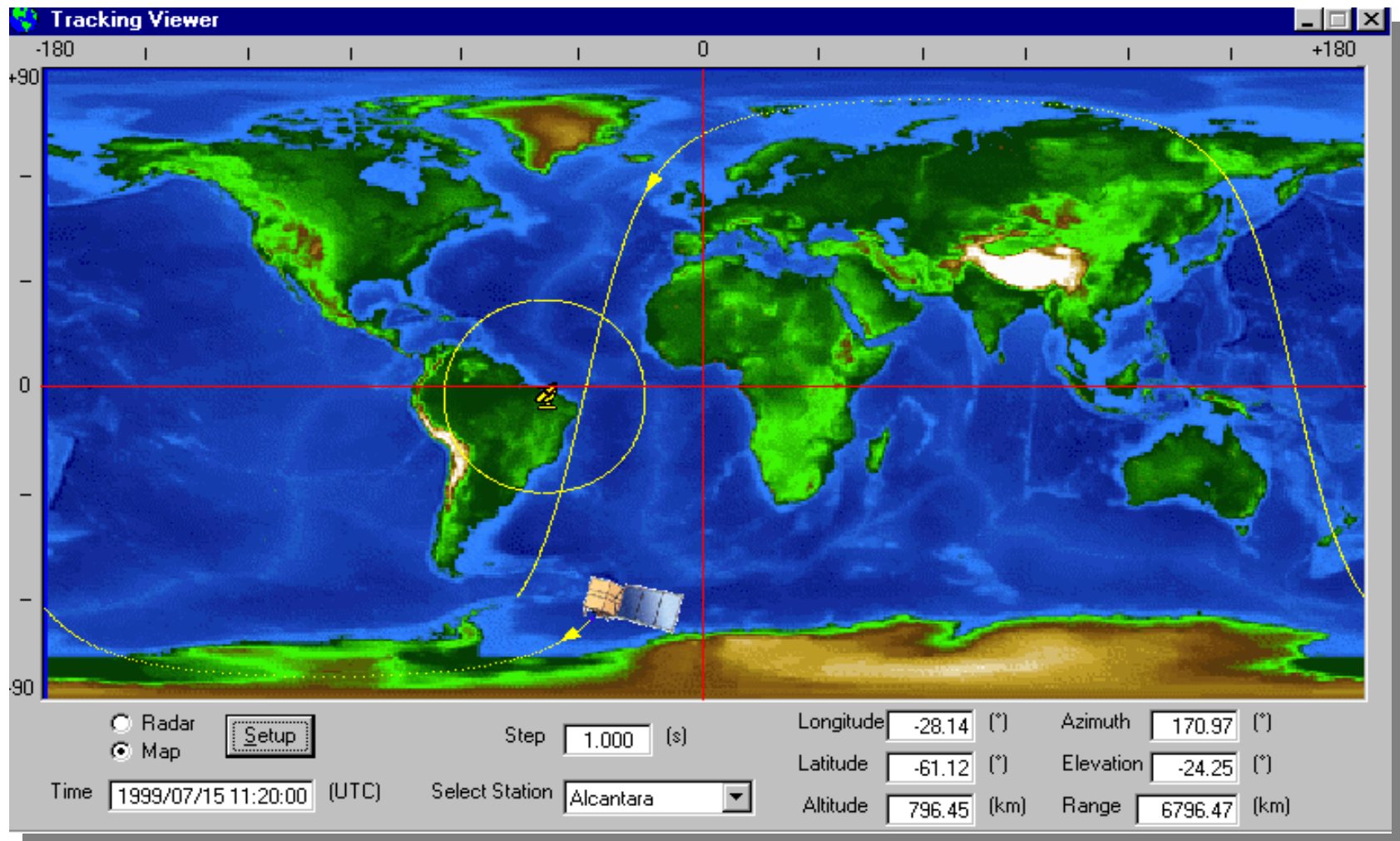
Lançamento do Ônibus Espacial

2.2.1 – Órbitas: Órbitas especiais

- **GTO:** Órbita de Transferência Geoestacionária
- **GEO:** Órbita Geoestacionária

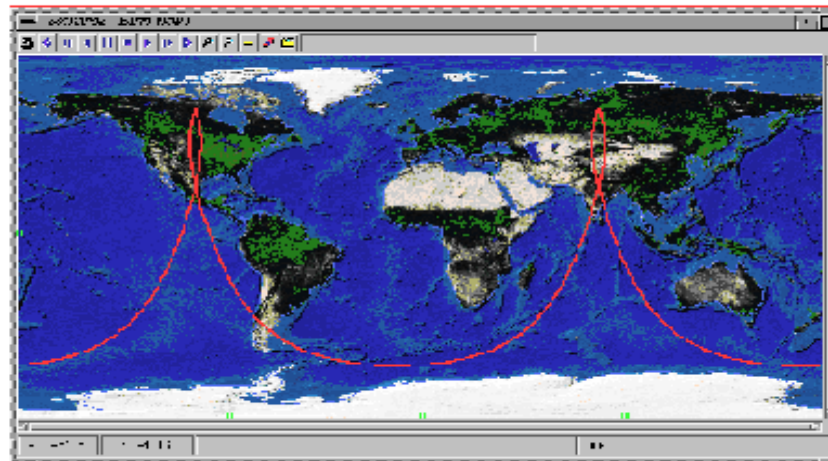
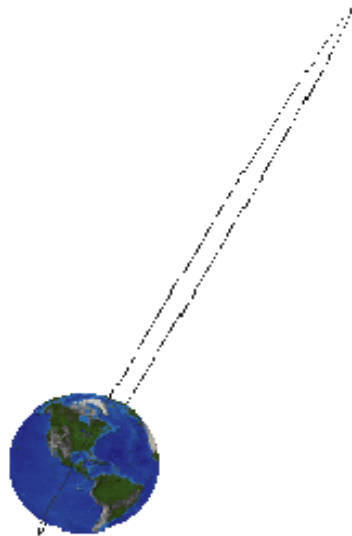


LEO, Sol-síncrona (ex.: CBERS)



Molniya

Devido ao J2, órbita com inclinação de 63.4° implica perigeu congelado no hemisfério sul. Para período de 12 horas, a órbita permanece 11 horas no norte.



2.2.1 – Órbitas: Tabela de parâmetros relativos à velocidade, [4]

Explanation of Earth Satellite Parameters

	41	42	43	44	45	46	47	48
	VELOCITY-RELATED PARAMETERS							
Alt (km)	Circular Velocity (km/s)	Orbit Angular Velocity (deg/min)	Escape Velocity (km/s)	ΔV Req'd to Deorbit (m/s)	Plane Change ΔV (m/s)/deg	ΔV Req'd for a 1 km Alt Chg (m/s)	Max Ang Rate from Gnd Stn (deg/s)	Sun Synchronous Inclination (deg)
0	7.905	4.261	11.180	—	137.97	0.62	—	95.68
100	7.844	4.163	11.093	-15.2	136.90	0.61	4.49	96.00
150	7.814	4.115	11.051	-30.2	136.38	0.60	2.98	96.16
200	7.784	4.068	11.009	-45.0	135.86	0.59	2.23	96.33
250	7.755	4.022	10.967	-59.6	135.35	0.58	1.78	96.50
300	7.726	3.977	10.926	-74.0	134.84	0.58	1.48	96.67
350	7.697	3.933	10.885	-88.3	134.34	0.57	1.26	96.85
400	7.669	3.889	10.845	-102.3	133.84	0.57	1.10	97.03
450	7.640	3.847	10.805	-116.2	133.35	0.56	0.97	97.21
500	7.613	3.805	10.766	-129.8	132.86	0.55	0.87	97.40
550	7.585	3.764	10.727	-143.3	132.38	0.55	0.79	97.59
600	7.558	3.723	10.688	-156.7	131.91	0.54	0.72	97.79
650	7.531	3.684	10.650	-169.8	131.44	0.54	0.66	97.99
700	7.504	3.645	10.613	-182.8	130.97	0.53	0.61	98.19
750	7.478	3.606	10.575	-195.6	130.51	0.52	0.57	98.39
800	7.452	3.569	10.538	-208.3	130.06	0.52	0.53	98.60
850	7.426	3.532	10.502	-220.8	129.61	0.51	0.50	98.82
900	7.400	3.496	10.466	-233.1	129.16	0.51	0.47	99.03
950	7.375	3.460	10.430	-245.3	128.72	0.50	0.44	99.25
1,000	7.350	3.425	10.395	-257.4	128.28	0.50	0.42	99.48
1,250	7.229	3.258	10.223	-315.4	126.16	0.47	0.33	100.66
1,500	7.113	3.104	10.059	-370.1	124.14	0.45	0.27	101.96
2,000	6.898	2.830	9.755	-470.2	120.38	0.41	0.20	104.89
2,500	6.701	2.595	9.476	-559.6	116.94	0.38	0.15	108.35
3,000	6.519	2.390	9.220	-639.8	113.78	0.35	0.12	112.41
3,500	6.352	2.211	8.984	-711.9	110.87	0.32	0.10	117.21
4,000	6.197	2.053	8.764	-777.0	108.16	0.30	0.09	122.93
4,500	6.053	1.913	8.561	-836.0	105.65	0.28	0.08	129.86
5,000	5.919	1.788	8.370	-889.5	103.30	0.26	0.07	138.59
6,000	5.675	1.576	8.025	-982.8	99.04	0.23	0.05	—
7,000	5.458	1.403	7.719	-1,060.8	95.27	0.20	0.04	—
8,000	5.265	1.259	7.446	-1,126.4	91.89	0.18	0.04	—
9,000	5.091	1.138	7.200	-1,182.0	88.86	0.17	0.03	—
10,000	4.933	1.035	6.977	-1,229.3	86.10	0.15	0.03	—
15,000	4.318	0.694	6.107	-1,381.9	75.36	0.10	0.02	—
20,000	3.887	0.507	5.497	-1,453.8	67.85	0.07	0.01	—
20,184	3.874	0.501	5.478	-1,455.5	67.61	0.07	0.01	—
25,000	3.564	0.390	5.040	-1,485.7	62.21	0.06	0.01	—
30,000	3.310	0.313	4.681	-1,496.1	57.77	0.05	0.01	—
35,000	3.104	0.258	4.389	-1,494.2	54.17	0.04	0.01	—
35,786	3.075	0.251	4.348	-1,493.2	53.66	0.04	0.00	—

See Front of Table for Formulas and Sources.

2.2.1 – Órbitas: Tabela de parâmetros gerais, [4]

Explanation of Earth Satellite Parameters

	49	50	51	52	53	54	55	56
GENERAL PARAMETERS								
Alt (km)	Angular Radius of the Earth (deg)	1 deg FOV on Earth's Surface (km)	Range to Horizon (km)	Period (min)	Max Eclipse (min)	Revolutions per Day (#)	Node Spacing (deg)	Node Precession / Day (deg/day)
0	90.00	0.00	0	84.49	42.24	17.00	21.18	-9.96 cos i
100	79.92	1.75	1,134	86.48	38.40	16.61	21.68	-9.44 cos i
150	77.69	2.62	1,391	87.49	37.76	16.41	21.93	-9.19 cos i
200	75.84	3.49	1,610	88.49	37.28	16.23	22.18	-8.94 cos i
250	74.21	4.36	1,803	89.50	36.90	16.04	22.44	-8.71 cos i
300	72.76	5.24	1,979	90.52	36.59	15.86	22.69	-8.48 cos i
350	71.44	6.11	2,142	91.54	36.33	15.69	22.95	-8.26 cos i
400	70.22	6.98	2,294	92.56	36.11	15.51	23.20	-8.05 cos i
450	69.08	7.85	2,438	93.59	35.92	15.34	23.46	-7.85 cos i
500	68.02	8.73	2,575	94.62	35.75	15.18	23.72	-7.65 cos i
550	67.02	9.60	2,705	95.65	35.61	15.01	23.98	-7.46 cos i
600	66.07	10.47	2,831	96.69	35.49	14.85	24.24	-7.27 cos i
650	65.16	11.34	2,952	97.73	35.38	14.69	24.50	-7.09 cos i
700	64.30	12.22	3,069	98.77	35.29	14.54	24.76	-6.92 cos i
750	63.48	13.09	3,183	99.82	35.20	14.39	25.02	-6.75 cos i
800	62.69	13.96	3,293	100.87	35.13	14.24	25.29	-6.59 cos i
850	61.93	14.84	3,401	101.93	35.07	14.09	25.55	-6.43 cos i
900	61.20	15.71	3,506	102.99	35.02	13.94	25.82	-6.28 cos i
950	60.50	16.58	3,608	104.05	34.97	13.80	26.08	-6.13 cos i
1,000	59.82	17.45	3,709	105.12	34.94	13.66	26.35	-5.98 cos i
1,250	56.73	21.82	4,184	110.51	34.83	13.00	27.70	-5.33 cos i
1,500	54.06	26.18	4,624	115.98	34.83	12.38	29.08	-4.76 cos i
2,000	49.58	34.91	5,433	127.20	35.03	11.29	31.89	-3.84 cos i
2,500	45.92	43.64	6,176	138.75	35.40	10.35	34.78	-3.13 cos i
3,000	42.85	52.36	6,875	150.64	35.86	9.53	37.76	-2.58 cos i
3,500	40.22	61.09	7,543	162.84	36.38	8.82	40.82	-2.16 cos i
4,000	37.92	69.82	8,187	175.36	36.94	8.19	43.96	-1.81 cos i
4,500	35.90	78.54	8,812	188.19	37.53	7.63	47.18	-1.54 cos i
5,000	34.09	87.27	9,422	201.31	38.13	7.13	50.47	-1.31 cos i
6,000	31.02	104.73	10,608	228.42	39.36	6.29	57.26	-0.98 cos i
7,000	28.47	122.18	11,760	256.66	40.60	5.60	64.34	-0.75 cos i
8,000	26.33	139.64	12,886	285.97	41.84	5.02	71.69	-0.58 cos i
9,000	24.50	157.10	13,993	316.31	43.06	4.54	79.29	-0.46 cos i
10,000	22.92	174.55	15,085	347.66	44.27	4.13	87.15	-0.37 cos i
15,000	17.36	261.85	20,405	518.46	50.00	2.77	129.97	-0.14 cos i
20,000	13.99	349.16	25,595	710.60	55.24	2.02	178.14	-0.07 cos i
20,184	13.89	352.37	25,785	718.05	55.42	2.00	180.00	-0.07 cos i
25,000	11.73	436.49	30,723	921.94	60.07	1.56	231.11	-0.04 cos i
30,000	10.10	523.85	35,815	1,150.85	64.56	1.25	288.50	-0.02 cos i
35,000	8.87	611.24	40,884	1,396.10	68.77	1.03	349.98	-0.01 cos i
35,786	8.70	624.98	41,679	1,436.07	69.41	1.00	360.00	-0.01 cos i

See Front of Table for Formulas and Sources.

2.2.1 – Lei da Gravitação Universal de Newton: Exemplos

- Qual a força de atração gravitacional entre dois corpos de 100 kg a 1 metro de distância um do outro?

$$m_1 = m_2 = 100\text{kg}$$

$$R = 1\text{m}$$

$$F = 6,67 \times 10^{-11} \cdot \frac{100^2}{1}$$

$$F = 6,67 \times 10^{-7} \text{ N}$$

- Qual a força de atração gravitacional entre a Terra e a Lua?

$$m_{Terra} = 10^{25} \text{ kg}$$

$$m_{Lua} = 10^{23} \text{ kg}$$

$$R = 10^8 \text{ m}$$

$$F = 6,67 \times 10^{-11} \frac{10^{25} \cdot 10^{23}}{(10^8)^2}$$

$$F = 6,67 \times 10^{21} \text{ N}$$

2.2.1 – Lei da Gravitação Universal de Newton: Exemplos (cont.)

- A que velocidade um corpo na superfície da Terra será capaz de equilibrar a aceleração da gravidade (aceleração centrípeta = aceleração da gravidade)?
- Qual é a relação entre a velocidade de um satélite em órbita circular e sua altitude?

$$g = 9,807 \frac{m}{s^2}$$

$$R = 6.378.136,49m$$

$$mg = \frac{mV^2}{R} \Rightarrow V = \sqrt{gR}$$

$$V = 7,9 \times 10^3 \frac{m}{s}$$

$$R = 6.378.136,49m + h$$

$h =$ Altitude

$$\frac{\mu m}{R^2} = \frac{mV^2}{R} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{\mu}{R}}$$

2.2.1 – Órbitas: Exemplos e simulações STK (*)

- **Exemplo 1:** Determinação do período e velocidade tangencial de órbita circular geoestacionária.
- **Exemplo 2:** Determinação do período e velocidade tangencial de órbita circular baixa.

- **Simulação STK 1:** Órbita Sol-síncrona
- **Simulação STK 2:** Órbita Molniya
- **Simulação STK 3:** Órbita Circular com $i = 0^\circ$
- **Simulação STK 4:** Órbita Circular com $i = 52^\circ$
- **Simulação STK 5:** Órbita Circular com $i = 90^\circ$