

## **CAPÍTULO 4**

# **COMO MANTER UM SATÉLITE EM ÓRBITA?**

**Walkiria Schulz<sup>1</sup>**

**Marcelo Lopes de Oliveira e Souza<sup>2</sup>**

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

---

<sup>1</sup> walkiria@dem.inpe.br

<sup>2</sup> mlos@dem.inpe.br



## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>4 - 5</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4 - 7</b>
<b>2 HISTÓRIA .....</b>	<b>4 - 8</b>
<b>3 COMO LOCALIZAR UM SATÉLITE NO ESPAÇO? .....</b>	<b>4 - 14</b>
<b>4 MANOBRAS ORBITAIS .....</b>	<b>4 - 17</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1 – POR QUE OS ASTROS NÃO CAEM DO CÉU? .....</b>	<b>4 - 7</b>
<b>FIGURA 2 – A ELIPSE .....</b>	<b>4 - 10</b>
<b>FIGURA 3 – ISAAC NEWTON .....</b>	<b>4 - 11</b>
<b>FIGURA 4 – A GRAVIDADE DO SOL EM RELAÇÃO À TERRA .....</b>	<b>4 - 12</b>
<b>FIGURA 5 – TIRO DE CANHÃO .....</b>	<b>4 - 13</b>
<b>FIGURA 6 – ELIPSES:O CÍRCULO É UM CASO ESPECIAL DE ELIPSE</b>	<b>4 - 15</b>
<b>FIGURA 7 – SEMI-EIXO MAIOR <math>a</math>, PERIGEUE APOGEU .....</b>	<b>4 - 15</b>
<b>FIGURA 8 – INCLINAÇÃO <math>i</math>, LONGITUDE DO NODO ASCENDENTE <math>\Omega</math>, ARGUMENTO DO PERIGEUE ANOMALIA VERDADEIRA <math>f</math> .....</b>	<b>4 - 15</b>
<b>FIGURA 9 – ATITUDE DO SATÉLITE CBERS .....</b>	<b>4 - 16</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Olhe para cima! Você vai ver o teto, ou o céu. Olhe para baixo! Aí está o chão, ou a Terra. “Para cima” e “para baixo”, nós utilizamos estas expressões o tempo todo sem pensar muito sobre elas.

Diz-se que “tudo que sobe, uma hora desce”. Uma bola jogada para cima, mais cedo ou mais tarde cai. Mas nós vemos também a Lua, o Sol e as estrelas no céu... Por que estes astros não caem como a bola?

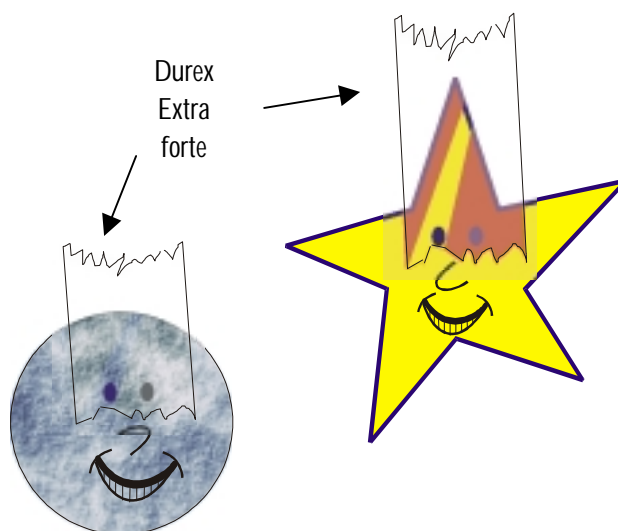


Fig. 1 - Por que os astros não caem do céu?

FONTE:

Um momento! “Para cima” e “para baixo” realmente significa o que parece? Não importa para onde nós viajarmos na superfície do nosso planeta, o céu continuará acima das nossas cabeças e o chão abaixo dos nossos pés (não estamos falando de quando você planta bananeira...).

O que chamamos de “para baixo” tem muito haver com a força peso ou gravidade. As coisas caem em direção à Terra, ou seja para baixo, porque elas são atraídas pela força da gravidade terrestre. Mas quando saímos da Terra, direções como para cima e para baixo perdem muito significado. Um astronauta em um ônibus espacial pode andar pelo teto ou pelo chão, sem se preocupar com o que está acima de sua cabeça. Estas direções dependem de como as coisas estão orientadas em um campo gravitacional. Entretanto quando o astronauta se preparar para pousar, ele vai se lembrar o que “para baixo” significa, pois quanto mais próximo da superfície do planeta ele estiver, mais ele vai se sentir os efeitos da força da gravidade.

Todos os corpos celestes têm gravidade. Uns mais, outros menos, dependendo de sua massa. É esta força que mantém os planetas no Sistema Solar, a Lua ao redor da Terra e também os satélites artificiais em órbita. Mas para entender melhor sobre a manutenção dos satélites em órbita é melhor começarmos com um pouco de história.

## **2 HISTÓRIA**

Satélites artificiais, sondas e naves tripuladas são hoje uma realidade graças aos primeiros seres humanos que olharam de forma curiosa para o céu.

Desde muito cedo, o homem tem se interessado pelos movimentos dos corpos celestes. Antigamente, acreditava-se que o Sol, a Lua e os outros planetas conhecidos do Sistema Solar controlavam o destino da humanidade. O interesse pelo estudo destes movimentos foi despertado pela necessidade de se medir o TEMPO e de se utilizar objetos celestes para ORIENTAÇÃO. A história começa com os antigos observando os movimentos dos planetas entre as estrelas e, finalmente, deduzindo que eles giravam em torno do Sol. Esta descoberta, feita inicialmente pelo astrônomo grego Aristarco de Samos no século III a.C., ficou durante muitos e muitos anos desacreditada por motivos religiosos, até



que o astrônomo polonês Nicolau Copérnico a ressuscitou no século XVI, aproximadamente 2000 anos depois.

Em 1953, no discurso comemorativo do 410º aniversário da morte de Copérnico, Albert Einstein declarou:

Copérnico não só preparou o terreno para a Astronomia moderna, mas também ajudou a ocasionar uma mudança decisiva na atitude do homem perante o cosmo. Tão logo se reconheceu que a Terra não era o centro do mundo, mas apenas um dos planetas menores, as ilusões sobre a importância central do homem tornaram-se insustentáveis. Portanto, Copérnico, com sua obra e com a grandeza de sua personalidade, ensinou o homem a ser modesto.

Exatamente COMO os planetas giravam em torno do Sol, com precisamente QUE MOVIMENTO, são perguntas que demoraram um pouco mais de tempo para serem respondidas. No início do século XVI, ainda havia grandes debates sobre se eles realmente giravam em torno do Sol ou não. O astrônomo dinamarquês Tycho Brahe teve uma idéia diferente de qualquer coisa proposta pelos antigos: sua idéia foi que esses debates sobre a natureza dos movimentos dos planetas seriam mais bem resolvidos se as posições reais dos planetas no céu fossem medidas com precisão suficiente. Foi uma ótima idéia! Hoje nos parece óbvio que para descobrir algo é melhor realizar algumas experiências cuidadosas do que prosseguir com discussões filosóficas. Mas naquela época, astronomia, filosofia e religião não estavam bem separadas.

Perseguindo essa idéia, Tycho estudou as posições dos planetas durante vários anos, utilizando instrumentos considerados avançadíssimos na época. Vale lembrar que o telescópio ainda não tinha sido inventado. Seu desejo de medir com precisão o movimento dos corpos celestes coincidiu com a necessidade dinamarquesa de precisão

na navegação oceânica e com uma demanda sempre crescente por bússolas e relógios exatos em toda Europa. Tabelas volumosas com dados detalhados das posições dos planetas visíveis a olho nu foram produzidas. O matemático polonês Johannes Kepler as estudou minuciosamente, após a morte de Tycho em 1601. Kepler deduziu a partir desses dados algumas leis notáveis sobre o movimento planetário.

A primeira descoberta de Kepler foi que cada planeta gira ao redor do Sol em uma curva chamada ELIPSE, com o Sol em um dos focos da elipse. Esta ficou conhecida como a 1ª Lei de Kepler. Uma elipse não é apenas uma oval, mas uma curva muito específica e precisa que pode ser obtida usando-se duas tachinhas, uma em cada foco, um pedaço de barbante e um lápis (Figura 2).

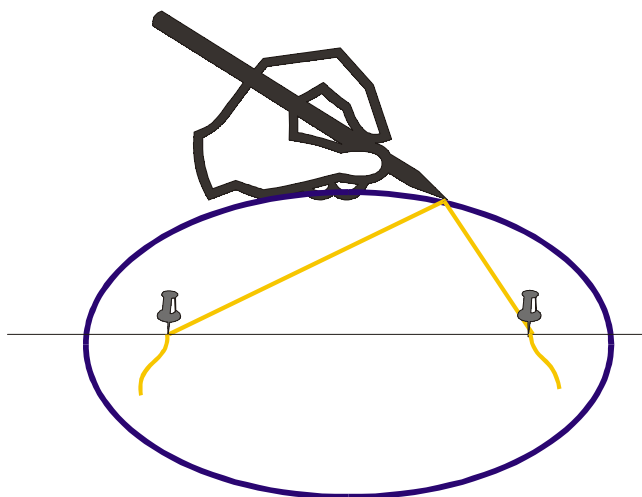


Fig. 2 - A elipse.

FONTE:

A segunda descoberta de Kepler diz respeito à velocidade de rotação dos planetas ao redor do Sol: ela não é uniforme. Os planetas andam mais rápido quando estão mais próximos do Sol e mais devagar quando estão mais afastados. Esta é a 2ª Lei de Kepler.

Finalmente, uma 3ª lei foi descoberta por Kepler muito depois e é uma lei de uma categoria diferente das outras duas, pois não lida apenas com um planeta de forma individual, mas relaciona um planeta com outro. Essa lei diz que o tempo que um planeta leva para completar uma volta em torno do Sol (período orbital) está relacionado com o tamanho de sua órbita segundo a mesma relação para todos os planetas.

Enquanto Kepler descobria essas leis, um astrônomo italiano chamado Galileu Galilei estudava as leis do movimento. O problema era: o que fazia os planetas girarem? Naquela época, uma das teorias propostas era que os planetas giravam porque anjos invisíveis atrás deles batiam asas e os empurravam para frente. Você verá que esta teoria está agora bastante modificada! Galileu descobriu um fato notável sobre o movimento, que foi essencial para a compreensão dessas leis. Trata-se do PRINCÍPIO DA INÉRCIA, que diz que se um corpo estiver se movendo, sem nada o tocando e totalmente livre de perturbações, ele prosseguirá para sempre, com velocidade uniforme e em linha reta.

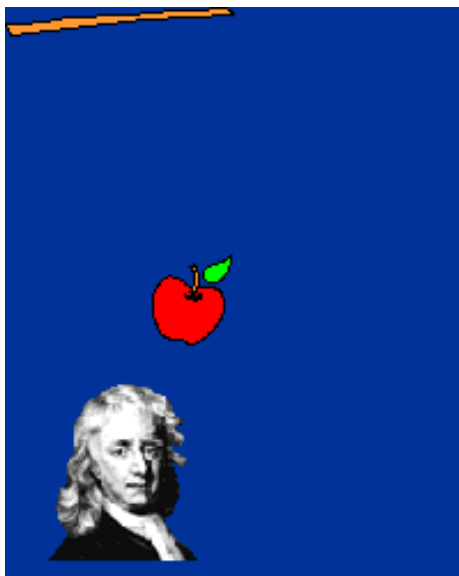


Fig. 3 - Isaac Newton.

FONTE:

O físico inglês Isaac Newton complementou esta idéia, dizendo que o único modo de mudar o movimento de um corpo é aplicar uma FORÇA sobre ele. Se o corpo se acelera, uma força foi aplicada na direção do movimento. Por outro lado, se seu movimento muda para uma nova direção, uma força foi aplicada lateralmente. Na verdade, a lei é que a aceleração produzida pela força é inversamente proporcional à massa, ou a força é igual à massa vezes a aceleração e é conhecida nos dias de hoje como a 2ª Lei de Newton. Quanto mais massa tiver o objeto, maior a força necessária para produzir dada aceleração. A idéia brilhante resultante dessas considerações é que não é necessária nenhuma força tangencial para manter um planeta em órbita. Se nada o perturbasse, o planeta prosseguiria em linha reta. Em outras palavras, devido ao Princípio da Inércia, a força necessária para controlar o movimento de um planeta ao redor do Sol não é uma força ao redor do Sol, mas em direção a ele.

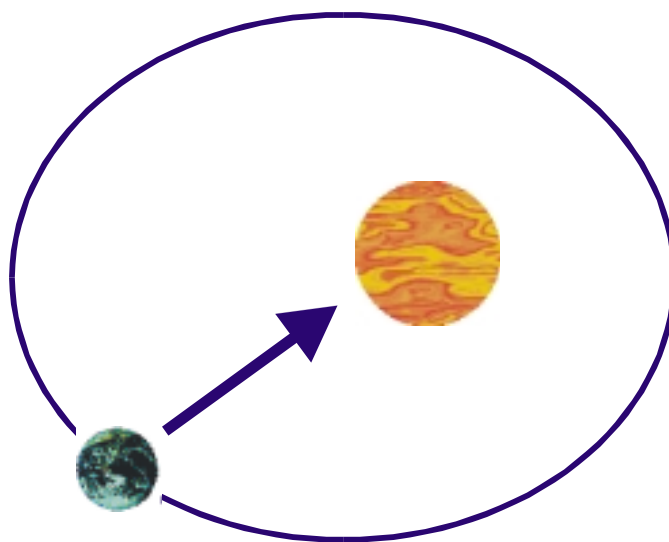


Fig. 4 - A gravidade do Sol em relação à Terra.

FONTE:

A partir dessa melhor compreensão da teoria do movimento, Newton reconheceu que o Sol poderia ser a sede ou a organização das forças que governam o movimento dos planetas. Sendo um homem com pendor especial para generalidades, Newton deduziu a partir de suas descobertas e das leis de Kepler que esta teoria tinha aplicação mais geral

do que apenas ao Sol prendendo os planetas. Já se sabia, por exemplo, que o planeta Júpiter tinha luas girando à sua volta como a Lua da Terra gira em volta dela, e Newton teve certeza de que cada planeta prendia suas luas com uma força. Já conhecia a força que nos prende sobre a Terra, de modo que propôs que era uma força UNIVERSAL, que tudo atrai todo o resto.

Conhecendo-se a Lei da Gravitação, segundo a qual todos os corpos se atraem na razão direta das massas e na razão inversa do quadrado das distâncias, o passo seguinte era colocar corpos construídos pelo homem orbitando em torno da Terra: os satélites artificiais. Como isto seria possível? Tomemos um exemplo na superfície da Terra. Um objeto solto perto da superfície da Terra cairá verticalmente em direção ao solo. Um objeto atirado horizontalmente (uma bala de canhão, por exemplo) também cairá em direção ao solo, entretanto sua trajetória será curva antes de atingir a superfície. O que acontece se dispararmos uma bala cada vez mais rápido? Não se esqueça de que a superfície da Terra também é curva. Se a dispararmos com rapidez suficiente, ela continua caindo, mas a Terra abaixo dela se afasta (devido à curvatura) fazendo com que a bala caia “em torno dela”. O problema é: que velocidade deve ser lançada a bala para que ela nunca caia? Esta conta já foi feita, e é sabendo deste valor que os pesquisadores conseguiram colocar os primeiros satélites em órbita.

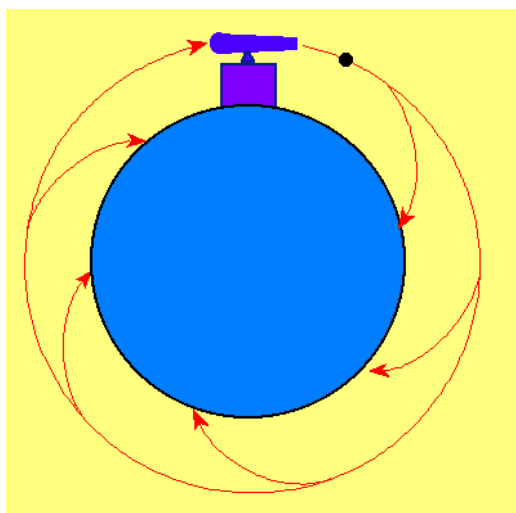


Fig. 5 - Tiro de canhão.

FONTE:

### 3 COMO LOCALIZAR UM SATÉLITE NO ESPAÇO?

Uma vez colocados no espaço como sabemos onde o satélite estará nos próximos, dias, meses, anos, etc? A resposta é simples: conhecendo-se a sua órbita. O movimento que um satélite descreve no espaço pode ser traduzido através de sua órbita.

Órbitas elípticas são o tipo de órbitas mais comum. Todos os planetas e a maioria dos veículos espaciais se movem em órbitas elípticas. Não podemos esquecer que um círculo é um caso especial de elipse.

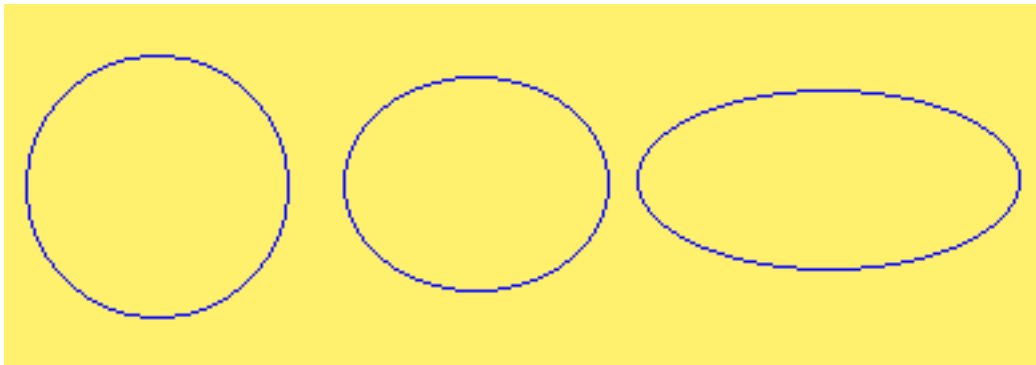


Fig. 6 - Elipses. O círculo é um caso especial de elipse.

FONTE:

Procuramos por coordenadas que posicionam completamente um satélite e sua órbita. Estas coordenadas são medidas em relação a um sistema de referência que, no nosso caso, está centrado no centro da Terra.

Para descrever o tamanho e a forma da órbita de um satélite define-se o **semi-eixo maior** e a **excentricidade** da elipse. Conhecendo-se estas duas coordenadas é possível definir qual é o ponto mais próximo (perigeu) e o mais afastado (apogeu) da Terra (Figura 7).

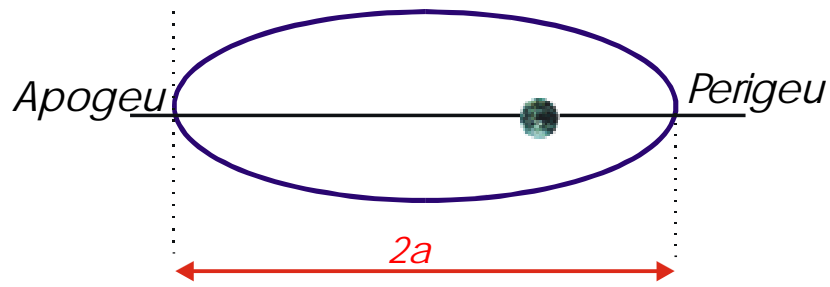


Fig. 7 - Semi-eixo maior  $a$ , perigeu e apogeu.

FONTE:

Para orientar esta órbita no espaço, é preciso conhecer sua **inclinação** em relação a um plano de referência, a **longitude do nodo ascendente** e o ângulo entre o nodo ascendente e o perigeu conhecido como **argumento do perigeu**. Uma vez conhecida a órbita do nosso satélite, precisamos saber em que lugar desta órbita ele está. Para isto utilizamos um ângulo chamado de **anomalia verdadeira**, que é medido a partir do perigeu (Figura 8).

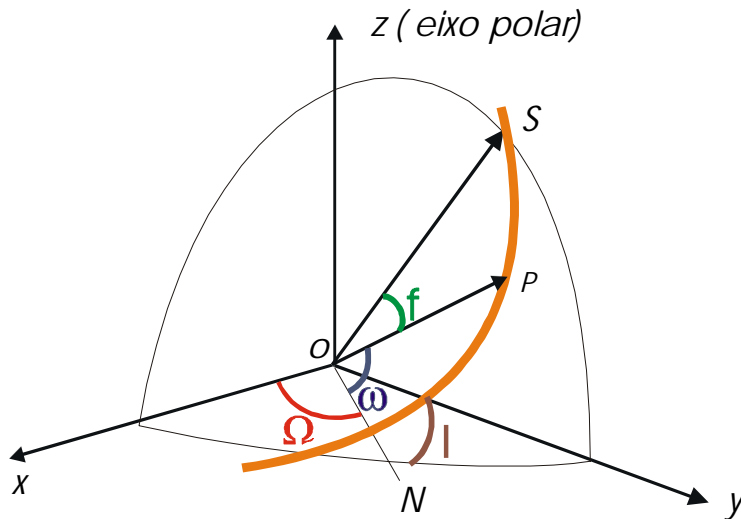


Fig. 8 - Inclinação  $i$ , longitude do nodo ascendente  $\Omega$ , argumento do perigeu  $\omega$  e anomalia verdadeira  $f$ .

FONTE:

Conhecendo-se esses seis valores, chamados de **elementos orbitais**, é possível localizar um satélite no espaço e, mais importante ainda, prever onde ele estará em algumas horas ou muitos dias. Isto é muito importante para a manutenção do satélite pois, por ele sofrer continuamente perturbações, pode ser preciso realizar manobras de correção orbital para garantir a segurança e a continuidade de seus serviços.

Precisamos lembrar ainda, que um satélite não é apenas um ponto no espaço. Ele tem forma, tamanho e uma utilidade que pode obriga-lo a estar sempre com um mesmo lado voltado para nós. Com esta preocupação, estudamos a ATITUDE deste satélite, ou seja, a orientação deste em relação ao sistema de referência (Figura 9).

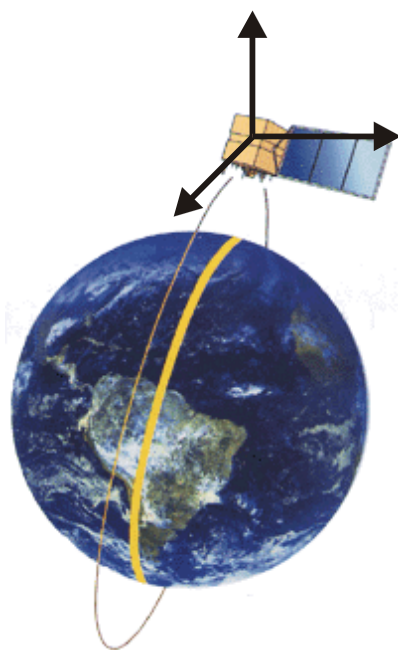


Fig. 9 - Atitude do satélite CBERS.

FONTE:

Conhecendo-se a posição e a atitude do satélite, podemos prever onde e como ele estará daqui a quanto tempo quisermos. Outros sistemas de referência e de coordenadas podem ser utilizados dependendo das características e da função do satélite.



## 4 MANOBRAS ORBITAIS

Tudo seria muito tranquilo se bastasse colocarmos um satélite em órbita e deixássemos que ele fizesse seu trabalho para sempre sem nos preocuparmos se ele vai mudar de lugar ou de atitude. Entretanto, um satélite pode estar sujeito a perturbações causadas pela gravidade de outros corpos (a Lua e o Sol, principalmente), pela própria gravidade da Terra que não é uniforme, pelo atrito com a atmosfera terrestre, entre outras, que tendem a tirá-lo de sua posição e atitude nominais (aquelas que se gostariam que ele sempre tivesse).

A manutenção de um satélite em órbita envolve a preocupação de realizar manobras nos satélites que sofrem estas perturbações e são desviados de suas órbitas originais. As manobras orbitais são realizadas através de jatos, que são acionados para modificar a velocidade (magnitude e/ou direção) dos veículos espaciais. Elas podem corrigir elementos orbitais como o semi-eixo maior, a excentricidade e a inclinação, ou apenas a atitude do satélite.

Isto acontece mais ou menos assim: um satélite sofre uma perturbação (ou um conjunto de perturbações) e é desviado de sua órbita normal. Estes desvios normalmente são muito pequenos e não chegam a comprometer o trabalho dos satélites. No entanto, se não forem corrigidos a tempo, podem causar danos irreparáveis e até a perda do satélite. Os operadores em terra detectam o desvio, ou em alguns casos até podem prever que desvio irá ocorrer. Eles realizam cálculos e acionam jatos na medida suficiente e na direção certa para corrigir exatamente aquele desvio que estamos falando.

Pronto! O satélite volta para a sua posição ideal e o trabalho segue tranquilo. Até a próxima manobra.