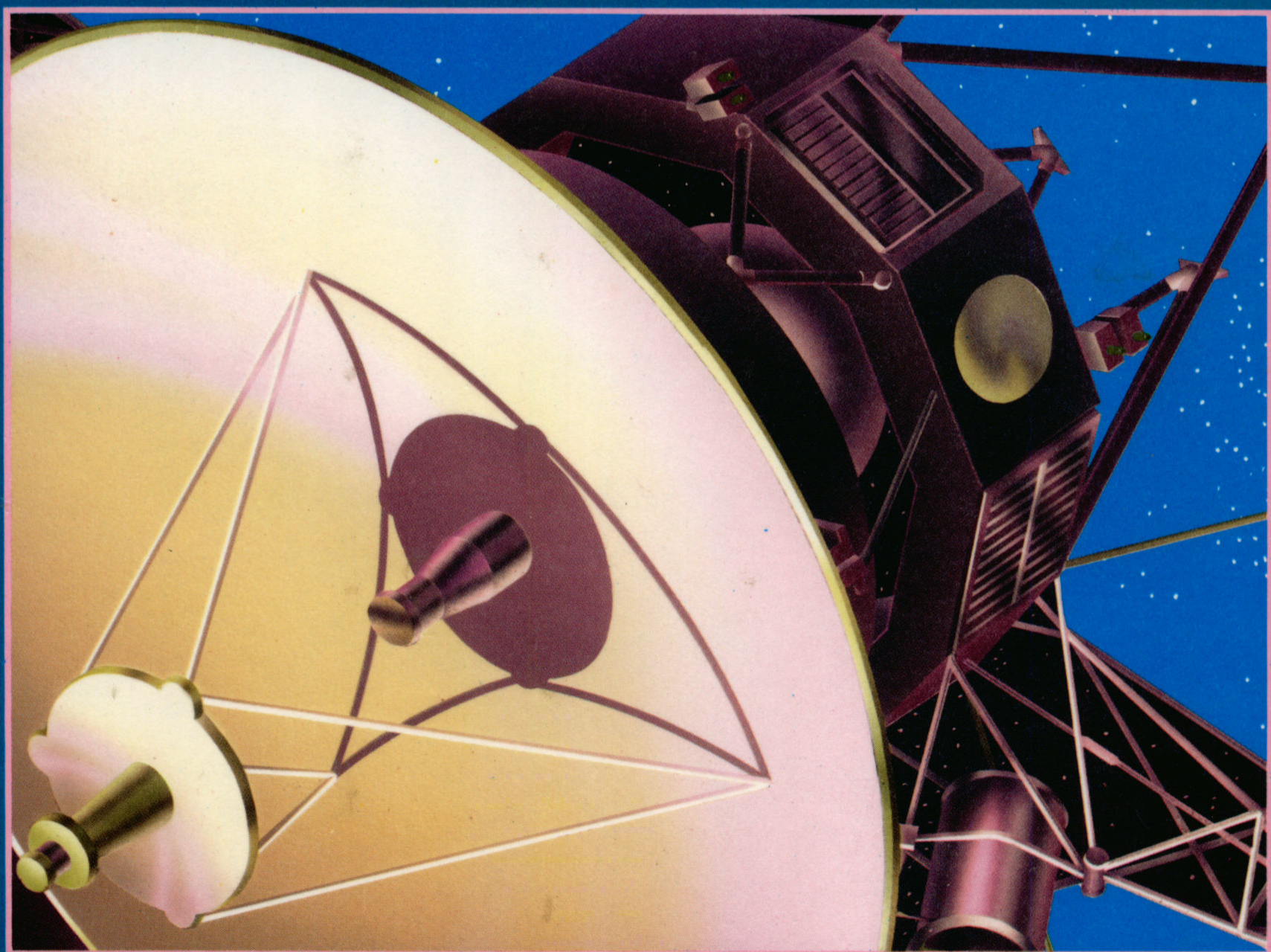


E N T E N D A O

COMPUTADOR

SONDAS E VEÍCULOS ESPACIAIS



NOVA CULTURAL

E N T E N D A O

COMPUTADOR

SONDAS E VEÍCULOS ESPACIAIS



NOVA CULTURAL

Authorized Portuguese Edition © 1988, Editora
Nova Cultural S.A. Original edition © 1985
Time-Life Books Inc. All rights reserved.

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida
por qualquer meio, seja eletrônico ou mecânico,
inclusive por equipamentos ou sistemas de classificação
de informações e pesquisa, sem a prévia autorização da
editora, exceto curtos trechos para resenhas, desde que
com o devido crédito.

Time-Life is a trademark of Time Inc., U.S.A.

Edição organizada pela Editora Nova Cultural Ltda.
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2000 — 3º andar
CEP 01452 — São Paulo — SP — Brasil
(Artigo 15 da lei 5988, de 14/12/1973)

Esta obra foi composta na AM Produções Gráficas Ltda.
e impressa na Divisão Gráfica da Editora Abril S.A.

ISBN 85-13-00104-X

5

Hóspedes do espaço
Uma artilharia de reservas

1

31

Reconhecimento por procuração
A odisséia da Voyager


2

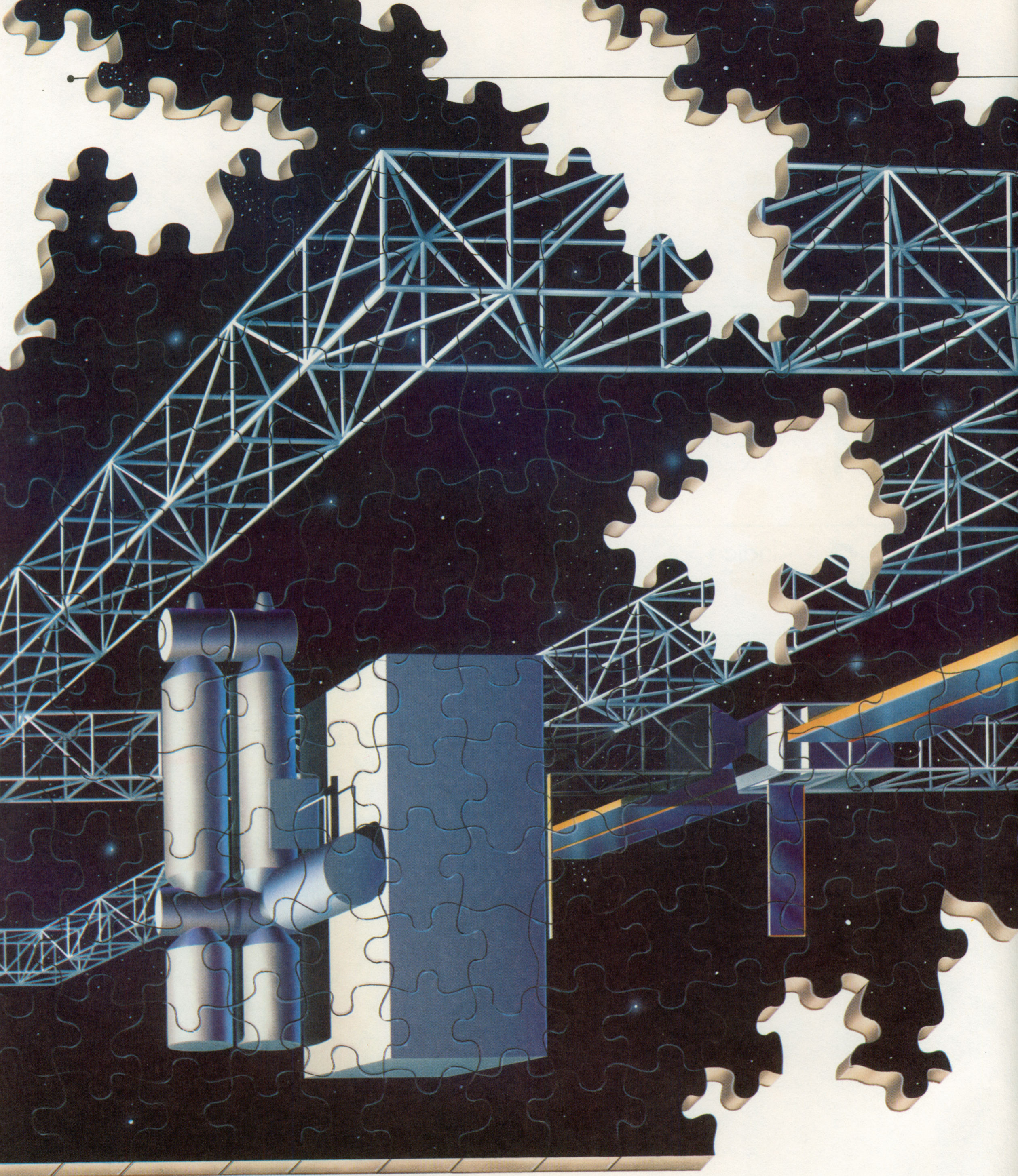
63

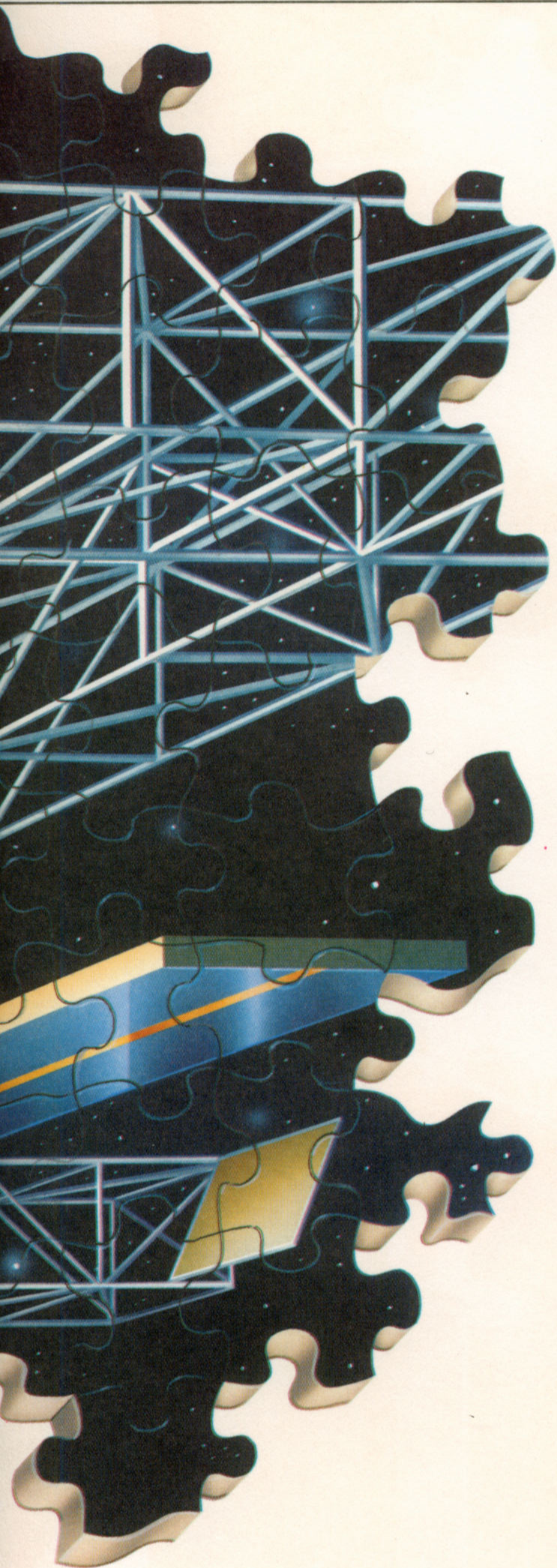
Índice

64

Créditos das fotos







Hóspedes do espaço

Antes mesmo de a primeira nave tripulada *Apolo* ser lançada, a NASA já começara a desenvolver um laboratório orbital que se comunicaria com a Terra através da mesma nave transportadora que levaria os astronautas à Lua e os traria de volta: o módulo de comando *Apolo*. As metas do projeto, conhecido como Skylab, englobavam tanto a utilização do espaço quanto a sua exploração.

Esses temas viriam a tornar-se bastante familiares à NASA. Na década de 80, as naves de transporte reutilizáveis, ou ônibus espaciais, foram designadas sempre para missões desse mesmo tipo, e os planos prevêem que, nos anos 90, tais atividades sejam realizadas a bordo de uma estação espacial. Mas o Skylab foi, sem sombra de dúvida, um pioneiro nesse trabalho de conquista do espaço. Mesmo em terra o Skylab era impressionante: instalado em um foguete *Saturno IV-B*, o laboratório — totalmente equipado para pesquisas — ocupava uma área superior a 10 000 metros cúbicos. As áreas de trabalho e alojamentos distribuíam-se em dois depósitos cilíndricos. Em uma das extremidades — além do módulo da câmara pneumática que permitiria a acoplagem da nave transportadora — estava instalado o suporte do telescópio, um observatório pesando 12 toneladas, com instrumentos. Um verdadeiro triunfo do progresso científico até mesmo na utilização de computadores que realizavam estudos detalhados sobre o Sol. Além de objeto de estudo, o Sol seria também a fonte de energia para as operações científicas e domésticas do Skylab. Uma vez em órbita, a 430 quilômetros da Terra, o Skylab estenderia uma série de painéis solares: dois grandes painéis laterais formariam as asas solares e quatro painéis menores, na parte superior do suporte do telescópio, se desdobriam como pétalas de uma flor.

Aproximadamente 10% da energia gerada pelos painéis era reservada para o sistema computadorizado que transpunha o espaço, o APCS (*attitude and pointing control system*, ou sistema de controle da posição e da atitude), responsável basicamente pela regulação da atitude da nave, isto é, sua posição ao longo dos três eixos em relação à Terra. O APCS representava a primeira oportunidade da NASA para utilizar um sistema de computação — com funções plenas e redundância dupla — a bordo de uma espaçonave tripulada. Enquanto as naves *Gemini* e *Apolo* utilizavam como backup para seus sistemas de comando de bordo computadores com base terrestre em Houston e soluções calculadas a mão pelos próprios astronautas, o APCS do Skylab incluía dois computadores de bordo idênticos. Um deles funcionava como unidade principal e o outro como reserva ou backup, mas cada uma das máquinas estava apta para realizar todas as funções necessárias. Caso o software de apoio do sistema detectasse desvios na orientação determinada para a nave, ele automaticamente enviaria ordens para que o computador principal transferisse o controle para o backup. Essa transferência também poderia ser realizada pela tripulação ou pelos controladores em terra. O controle meticuloso da atitude era de tal importância para a precisão das observações solares da missão que o computador do sistema foi denominado computador digital (ATMDC).

Ao contrário dos computadores especiais planejados para os estreitos comparti-

mentos da *Gemini* e da *Apolo*, o ATMDC não fora fabricado sob medida para o Skylab. A unidade central de processamento (CPU) em cada computador procedia da série de processadores 4Pi da IBM. O modelo 4Pi escolhido para o Skylab foi o TC-1, adaptado para a missão por meio do acréscimo de um conjunto de input/output — a unidade da interface do computador do laboratório — que lhe permitia comunicar-se com os sensores solares e outros instrumentos do laboratório, assim como com diversos giroscópios e empuxadores de controle.

Se a utilização de uma tecnologia nova e testada foi coroada de êxito e tornou-se exigência básica da NASA para os programas subseqüentes, sob outros aspectos, entretanto, essa escolha revelou-se um tanto problemática. No caso do Projeto *Apolo*, as decisões sobre o hardware precederam a determinação das especificações sobre o software. Da mesma forma, as escolhas de hardware do Skylab foram paralisadas em outubro de 1969 e o documento explicativo das necessidades do programa só foi publicado em julho do ano seguinte. Para tentar satisfazer às especificações do programa, a IBM produziu software que variava de 9 000 a quase 20 000 palavras. A capacidade da memória de núcleo dos computadores escolhidos para a missão, contudo, era limitada a 16 000 palavras. Como resultado, os engenheiros da IBM viram-se obrigados a exigir alterações nas especificações do programa da NASA, a fim de reconfigurar o software, para ajustá-lo sem que houvesse perda das funções críticas. Apesar disso, a IBM entregou a versão final do software no dia 20 de março de 1973, dois meses antes do previsto para o lançamento. Exigências de maior segurança fizeram com que um sistema auxiliar denominado unidade de carregamento de memória (MLU, ou *memory load unit*) fosse acrescentado para servir de reserva ou backup. No caso do software ser inadvertidamente apagado da memória do núcleo, todo o pacote — ou uma versão de 8 000 palavras — seria recarregado a partir de uma fita de leitura única.

SKYLAB, UM SOLITÁRIO NO ESPAÇO

Esse sistema de computação enfrentou formidáveis desafios tanto no início quanto no final da permanência do Skylab em órbita. O primeiro deles ocorreu apenas 63 segundos após o foguete *Saturno V* lançar o laboratório para o espaço, em 14 de maio de 1973. A 840 quilômetros de distância da Terra, a falta de resistência à pressão atmosférica causou uma rachadura do escudo termal de alumínio que revestia o laboratório. Quando o escudo protetor se rompeu provocou a abertura de uma das asas solares, mantendo a outra fechada. Poucos minutos após, a pressão do foguete arremessou no espaço a asa prematuramente aberta. O laboratório entrou em órbita, mas, desprovido do seu escudo protetor, começou a queimar ao Sol. A temperatura atingiu rapidamente 74°C — alta demais para receber os três astronautas, no dia seguinte. O calor ameaçava o estoque de remédios, alimentos, filme e equipamento sensível, e os controladores da missão temiam que agisse sobre o sistema de isolamento e produzisse um gás mortífero. Ainda que o problema do calor pudesse ser superado, o Skylab não teria meios para energizar seus sistemas, a menos que a asa solar restante fosse aberta. Conforme anteriormente planejado, os quatro painéis solares no suporte do telescópio haviam-se aberto quando a nave entrou em órbita, mas eram insuficientes para fornecer a corrente necessária a todas as funções do laboratório.

Os controladores baseados no Centro de Controle Johnson, em Houston, e os engenheiros do Centro de Vôo Espacial Marshall, em Huntsville, no Alabama, pre-

viam que seriam necessários vários dias — e até semanas — para que um grupo de astronautas efetuasse os consertos de emergência necessários. Os sistemas do Skylab, no entanto, precisavam de urgentes injeções de energia solar, caso contrário o programa de 2,6 bilhões de dólares seria reduzido a uma pilha de sucata orbital. Inicialmente a NASA suspendeu o lançamento da nave tripulada, planejado para o dia seguinte, e conclamou todos os envolvidos com a missão a descobrirem um modo de esfriar a nave e liberar a asa solar. Felizmente para o pessoal em terra, nem tudo ia mal no Skylab. Em contraste com os danos exteriores, o sistema de computação de bordo funcionava perfeitamente e podia auxiliá-los. Enquanto um grupo encarregava-se de elaborar planos para consertar a nave, William Chubb e os controladores de atitude do Skylab convocavam o APCS para a tarefa de reconciliar duas necessidades divergentes: posicionar os quatro pequenos painéis solares de forma que recebessem o máximo de luz solar e pudessem gerar eletricidade para a nave danificada, e, ao mesmo tempo, girar o desprotegido laboratório em torno de seu eixo, a fim de proteger o equipamento do calor excessivo.

Afortunadamente, o sistema de computação havia sido programado para receber ordens diretas da Terra. Durante onze dias consecutivos, trabalhando em turnos contínuos, a equipe de Chubb enviou um fluxo constante de novas ordens via telemetria radiofônica, através de um receptor no módulo da câmara pneumática, para o computador principal do Skylab. O êxito compensou o esforço. Enquanto a equipe de controle de atitude acionava o serviço de emergência para manter o Skylab alinhado até que os astronautas pudessem efetuar os reparos necessários, outros membros da equipe trabalhavam em consertos mais permanentes.

Finalmente, em 25 de maio, os astronautas Charles Conrad Jr., Joseph P. Kerwin e Paul J. Weitz — munidos de ferramentas improvisadas e dispostos a “consertar qualquer coisa” — partiram para seu encontro atrasado com o laboratório em órbita. Após uma caçada de sete horas e meia, os astronautas encontraram o Skylab e efetuaram a acoplagem. Depois de uma noite nos exíguos compartimentos da nave *Apolo*, Conrad e sua tripulação entraram no laboratório e realizaram testes cuidadosos para detectar gases tóxicos. Nada foi encontrado: o trabalho rápido realizado pela equipe de controle de atitude evitara danos no sistema de isolamento. A tarefa seguinte consistia em armar um guarda-sol gigante, de modo a compensar a falta do escudo de proteção solar. Usando um mastro extensível, Conrad e Weitz introduziram o guarda-sol retangular dobrável através da pequena comporta de ar do laboratório e abriram-no para sombrear o lado exposto ao sol. Imediatamente, a temperatura do revestimento do laboratório caiu cerca de 60°C. Na quinta noite a temperatura caíra para 27°C, e a tripulação finalmente transferiu-se para seus aposentos.

A asa solar obstruída era um problema mais recalcitrante. No dia 7 de junho, quase duas semanas após sua chegada, Conrad e Kerwin envergaram roupas espaciais e aventuraram-se no espaço equipados com tesouras montadas na extremidade de uma longa haste. Durante quatro horas eles lutaram para cortar a correia de alumínio que prendia a asa e, quando a energia afinal fluiu através das células solares em direção aos sistemas do laboratório, ouviu-se pelo rádio o grito de júbilo dos que, da Terra, controlavam a missão.

O Skylab voltava a funcionar. A primeira tripulação passou um total de 28 dias em órbita e regressou à Terra no dia 22 de junho. Pouco antes, a equipe de controle da missão pôs à prova a teoria do sistema de segurança contra falhas. A um

sinal transmitido da Terra, o controle operacional transferiu-se do ATMDC principal para o backup. A transferência ocorreu sem problemas e, durante os restantes 272 dias da missão, o backup anterior assumiu o controle. Nos oito meses seguintes ocupariam o Skylab mais duas tripulações, por 59 e 84 dias, respectivamente. Em todo seu tempo de vida ativa, o Skylab superou as expectativas da NASA à medida que as tripulações recolhiam grandes quantidades de dados valiosos, como, por exemplo, seguir o curso do cometa Kohoutek, fazer um levantamento topográfico do planeta Terra, fotografar as erupções solares e monitorar suas próprias reações físicas à vida no espaço. Em 8 de fevereiro de 1974, a tripulação do Skylab 3 amerissou no Pacífico depois de viajar 55 milhões de quilômetros e quebrar os recordes existentes em distância percorrida e em tempo de permanência e quantidade de passeios no espaço.

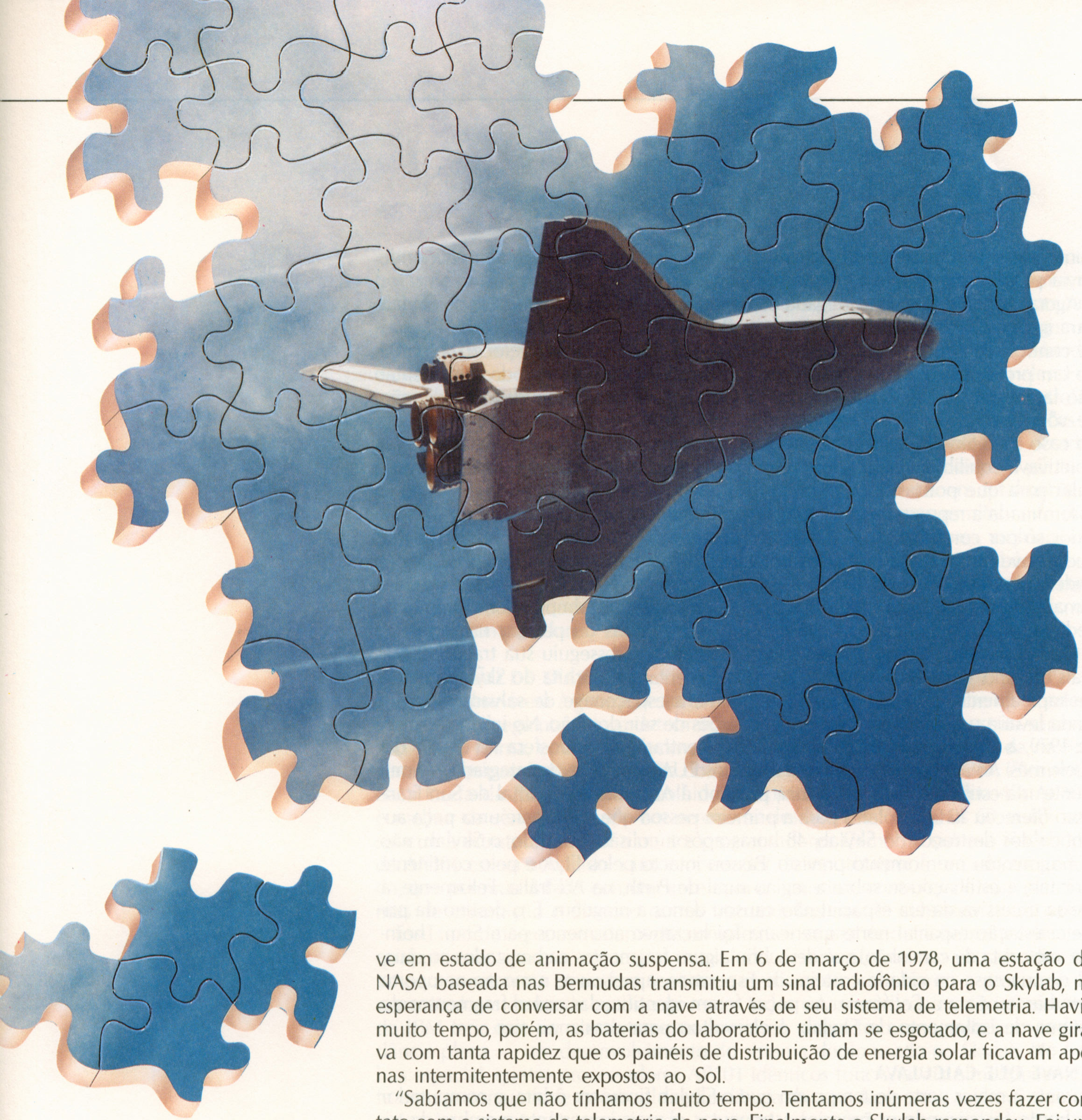
No dia seguinte ao retorno dos astronautas, os controladores baseados em solo abriram os respiradouros do Skylab e manobram-no para a posição de hibernação espacial, com o adaptador de acoplamento voltado para o espaço e os painéis solares suspensos. Em seguida, desativaram todos os sistemas, exceto o receptor de comando do módulo da câmara pneumática. O Skylab estava pronto para seu sono hibernar. Antes, porém, a equipe da Missão de Controle decidiu realizar um último teste: verificar se a unidade de carregamento da memória de bordo, ou MLU, ainda funcionava. Enviaram, então, ordens para que a MLU carregasse a memória com o programa de reserva gravado em fita. Depois, fizeram uma pausa e observaram se o programa funcionava de modo adequado. Finalmente, foram recompensados com o espetáculo que revelava a eficácia do controle a longa distância: o recarregamento de todo o pacote de 16 000 palavras. Esse exercício — a primeira vez que um computador em vôo era totalmente carregado por radiofrequência — provaria ser o ensaio geral de acontecimentos que teriam lugar quase meia década depois.

PLANOS FRUSTRADOS

A NASA sabia que a órbita do Skylab declinaria com o correr dos anos, o que faria o laboratório mergulhar na Terra, a menos que uma missão de resgate o alcançasse a tempo. De acordo com os cálculos efetuados em 1974, o Skylab deveria permanecer em órbita até março de 1983, quando então a NASA teria um novo projeto em funcionamento: o Sistema de Transporte Espacial, ou ônibus espacial, a ser lançado no final dos anos 70. Os astronautas a bordo do ônibus espacial fixariam um módulo de propulsão ao Skylab, que o impulsionaria para uma órbita mais elevada. Caso tal solução — ou qualquer outra — falhasse, o Skylab se desintegraria ao reentrar na atmosfera terrestre, e seus estilhaços se espalhariam sobre a superfície da Terra.

Nove anos pareciam suficientes para decidir o que fazer com o gigantesco aparato de 100 toneladas antes que ele reaparecesse sob forma de chuva metálica. Entretanto, em 1977, uma atividade solar anormalmente intensa aumentou a densidade da atmosfera na altitude da órbita do Skylab. O Skylab rolava no espaço como um barril de cerveja, e perdia altura rapidamente. Sua reentrada, segundo os cálculos, seria antecipada para o início de 1979, ou até 1978, e urgia descobrir um meio de prolongar a vida orbital do laboratório.

Para a NASA a solução dependia de dois fatores: condições de computação a bordo do Skylab e capacidade de estabelecer comunicações com uma espaçonave



ve em estado de animação suspensa. Em 6 de março de 1978, uma estação da NASA baseada nas Bermudas transmitiu um sinal radiofônico para o Skylab, na esperança de conversar com a nave através de seu sistema de telemetria. Havia muito tempo, porém, as baterias do laboratório tinham se esgotado, e a nave girava com tanta rapidez que os painéis de distribuição de energia solar ficavam apenas intermitentemente expostos ao Sol.

“Sabíamos que não tínhamos muito tempo. Tentamos inúmeras vezes fazer contato com o sistema de telemetria da nave. Finalmente o Skylab respondeu. Foi um momento de muita emoção para nós”, comentaria mais tarde William Chubb. Por dois breves minutos o Skylab transmitiu informações. Então, a nave estonteada girou seus painéis solares em direção à sombra e as transmissões cessaram.

Estava claro que a primeira coisa a fazer seria recarregar as baterias do Skylab, o que exigiria quase uma semana de passagens orbitais através de efêmeros períodos de luz solar. Em seguida, os engenheiros da NASA precisavam tentar recrutar o auxílio do ATMDc para estabilizar a nave. O hardware ou o software — ou ambos — poderiam estar danificados. Em 11 de março a equipe da NASA chamou o sistema do Skylab, esperando obter uma confirmação telemétrica de que o ATMDc ainda possuía um certo nível de controle. A resposta foi positiva. Durante cinco

minutos o sistema funcionou, reassumindo o ciclo do programa exatamente onde havia parado quatro anos e trinta dias antes.

Agora cabia à equipe encarregada da reentrada orientar o computador do Skylab para iniciar as operações de salvamento. Para essa finalidade dois novos sistemas de controle foram desenvolvidos. O primeiro, chamado vetor de velocidade enfiado em proa, ou EOVV (*end-on-velocity vector*), deslocaria a nave de sua orientação lateral por resistência aerodinâmica e apontaria sua extremidade na direção de vôo. O segundo sistema — atitude de equilíbrio de torque — seria ativado no caso de o Skylab começar a mergulhar em direção à Terra. O novo programa objetivava equilibrar o laboratório espacial durante a queda, e depois fazê-lo bascular para que pousasse no mar.

Terminada a reprogramação, os movimentos do Skylab foram novamente orientados só por computador. Nada restava aos engenheiros da NASA senão esperar que a nave permanecesse no espaço tempo suficiente para que o ônibus espacial pudesse impulsioná-la em direção a órbitas mais elevadas. E se o Skylab caísse, a manobra de volteadura, de última hora, realizada por computador, deveria impedir que os fragmentos da nave caíssem sobre coisas ou pessoas na Terra.

Com o sistema de bordo reativado, o laboratório prosseguiu sua trajetória por mais um ano. Perto do final desse período, no entanto, a órbita do Skylab decrescia rapidamente. O laboratório não esperaria a espaçonave de salvamento, que ainda levaria um ano para estar em condições de sair do chão. No início de julho de 1979, a NASA previu que o laboratório reentraria na atmosfera no dia 11 daquele mês. Ao aproximar-se da costa leste dos EUA, a nave se desintegraria e, finalmente, iria estilhaçar-se em alto mar, próximo à Austrália. Um jornal de San Francisco ofereceu 10 000 dólares para a primeira pessoa que entregasse uma peça autêntica dos destroços do Skylab, 48 horas após a colisão. Contudo, o Skylab não se fragmentou no momento previsto. Passou intacto pelos EUA e pelo continente africano, e estilhaçou-se sobre a região rural de Perth, na Austrália. Felizmente, a pressa excessiva da era espacial não causou danos a ninguém. E o destino da primeira estação espacial norte-americana foi lucrativo ao menos para Stan Thornton, motorista de caminhão, que descobriu alguns fragmentos carbonizados no quintal de sua casa na cidade costeira de Esperance, apressou-se rumo ao aeroporto e embarcou para a Califórnia. As peças foram identificadas como fragmentos do sistema de isolamento do Skylab, e ele voltou para casa mais rico.

A NAVE QUE CALCULAVA

Durante a maior parte do tempo em que o Skylab ficou em órbita, o computador de bordo foi, segundo os próprios astronautas, o mais importante membro da tripulação. E, de inúmeras maneiras, preparou o cenário para a expansão do papel do computador em vôos espaciais tripulados. O ônibus espacial, cujo sistema baseava-se no software de apoio e nos computadores duplos do Skylab, viria a ser a nave mais automatizada da história.

Apontado como uma alternativa reutilizável para as espaçonaves descartáveis dos programas anteriores, o ônibus espacial foi um produto dos tempos difíceis da NASA — no início da década de 70 —, quando a maior parte do dinheiro da agência foi aplicada no financiamento de programas sociais e na Guerra do Vietnã. Para poder continuar exeqüível, o programa espacial deveria evoluir no sentido de encontrar uma solução que pudesse se autofinanciar.

A nova orientação presumia um veículo que não precisasse ser recuperado por frotas de navios e aviões. O ônibus espacial fora projetado para executar cem missões antes de ser recolhido para revisão. Além disso, seu convés de vôo e compartimento de carga poderiam ser arrendados até mesmo para governos estrangeiros.

Apesar do orçamento modesto, no entanto, o papel dos computadores de bordo da espaçonave era bastante ambicioso. De fato, a nave não voaria sem eles. Em aeronaves convencionais o piloto manipula um joystick e pedais para controlar o movimento das superfícies aerodinâmicas por meio de conexões mecânicas e hidráulicas. Quando a superfície responde, o piloto ajusta os controles de acordo, e o ciclo recomeça. No ônibus espacial, os computadores ficam entre o piloto e os controles de superfícies, e, na maior parte do tempo, substituem totalmente o piloto. Os sensores, localizados em diversos pontos da nave, retransmitem informações — atitude e velocidade, por exemplo — para os computadores, ao longo de cabos elétricos. Os computadores emitem ordens programadas — também sob a forma de sinais elétricos — para os atuadores hidráulicos nas superfícies de controle. Quando os atuadores respondem, os sensores enviam a nova informação de volta aos computadores.

UMA DIVISÃO DE TRABALHO

A NASA sobrevivera à guerra de software do Projeto Apolo e, percebendo a extensão da tarefa seguinte, estava determinada a manter o processo sob estrita supervisão. Dessa forma, embora a Rockwell International fosse encarregada da montagem do equipamento, a produção do software ficaria a cargo da IBM. Completada a tarefa da Rockwell, foi escolhido um processador IBM do tipo 4Pi AP-101, o melhor da série 4Pi. Usado em aeronaves desde o final dos anos 60, o 4Pi possuía uma estrutura familiar a muitos programadores. Como no sistema Skylab, cada AP-101 estava acoplado a um processador de input/output fabricado sob medida, que permitia à CPU comunicar-se com os sensores, controles de vôo, plataformas de orientação e diversos outros instrumentos nos 38 subsistemas da nave.

Esse tipo de aeronave altamente complexa — capaz de manobrar em órbita tal qual uma espaçonave, e que, por outro lado, deveria efetuar um vôo aerodinâmico para reentrar na atmosfera terrestre e aterrissar em solo firme — precisaria de computadores de bordo aptos a governar todos os aspectos da missão. O sistema da IBM teria que ser absolutamente confiável, o que foi conseguido com redundância plena — um desenvolvimento do sistema duplo usado no Skylab. No ônibus espacial, quatro processadores AP-101 idênticos funcionavam simultaneamente em um conjunto de quádrupla redundância durante fases críticas de vôo, como ascensão e reentrada, processando a mesma informação em perfeita sincronização. Caso surgisse um conflito entre os quatro, a decisão ficaria a cargo da maioria e o mecanismo em desacordo seria destituído. Nenhum dos computadores — isoladamente ou em grupo — poderia desligar qualquer outro: tal decisão caberia à tripulação. Uma máquina desnorteada emitiria sinais de áudio, acenderia luzes de aviso e mensagens na tela, alertando a tripulação, que a desativaria.

A possibilidade de um erro no software principal, que, duplicado em todos os computadores principais, tornar-se-ia não detectável e incorrigível, seria contornada com a utilização de um quinto AP-101, que serviria como reserva de segurança contra falhas. Embora seu software possuísse menos funções, ele poderia realizar com segurança uma escalada ou reentrada simples, caso o conjunto de redundân-

cia quádrupla falhasse. Fora escrito pela Rockwell — e não pela IBM —, com a finalidade de minimizar a possibilidade de um erro comum. As previsões relativas à confiabilidade do sistema indicavam apenas uma remota possibilidade de falha no quarteto de computadores, tão ínfima que apenas quatro aeronaves se perderiam em centenas de milhares de vôos. Além de tornar as missões mais seguras, a redundância aliviava o controle baseado em terra.

FLUÊNCIA EM UMA NOVA LINGUAGEM

Estabelecido o princípio da redundância, o próximo desafio seria escrever o software da espaçonave. As grandes despesas e os problemas ocorridos durante o desenvolvimento do software da Apollo levaram a NASA a tomar medidas enérgicas relativas à linguagem em que os programas seriam escritos. A maior parte do software da Apollo havia sido meticulosamente codificada em linguagem Assembly, que exigia do programador atenção redobrada ao conjunto de instruções do computador e às seqüências dos endereços na memória. Para dar maior flexibilidade aos programadores envolvidos no projeto do ônibus espacial, a NASA apressou a criação de uma nova linguagem de computação. Conceitualmente semelhante à ATOLL do Projeto Apollo, a nova linguagem permitiria que os programadores se concentrassem na solução do problema existente — nesse caso, planejar um sistema de controle de vôo para o ônibus espacial — sem se atolar nos mecanismos de tradução das instruções do programa para uma linguagem que o computador pudesse entender.

A linguagem HAL/S, especialmente criada para a nave pelo Intermetrics, Inc., uma empresa de Massachusetts fundada em 1969 por cinco programadores do MIT que haviam trabalhado no desenvolvimento do software para a *Apollo*, foi escolhida. Seu nome era um tributo ao pioneiro da computação J. Halcombe Laning, que, em 1952, inventou o primeiro registro algébrico para ser usado no Whirlwind do MIT, o primeiro computador capaz de funcionar em tempo real. Laning também colaborou no desenvolvimento de uma linguagem chamada MAC, que contribuiu substancialmente para a HAL/S.

O que diferenciava a HAL/S de outras linguagens de computação disponíveis na década de 70 era sua capacidade de programar tarefas de acordo com os níveis de prioridade definidos pelos programadores. Butilada a partir das melhores técnicas de programação existentes, a HAL/S definiu regras de acesso rigorosas que permitiam aos segmentos de um programa interagirem apenas se essa fosse a vontade do autor do programa. Entretanto, traçar características específicas para um processamento em tempo real parece ter sido o grande mérito dessa linguagem. Inúmeros programas dividiam simultaneamente o processamento do computador, permitindo que tanto a tripulação quanto os vários sistemas automáticos controlados pelo computador respondessem às mudanças freqüentes e rápidas que ocorriam no interior e no exterior da espaçonave.

Na manhã do dia 10 de abril de 1981, na plataforma de lançamento do Centro Espacial Kennedy, o ônibus espacial, beneficiário de uma década de intensivos estudos de engenharia de computação, aguardava. Mas todo o esforço não estava à vista. A nave mais parecia um edifício grotesco, cuja torre era um tanque com 46 metros de altura, contendo propelente líquido para os três principais motores da nave espacial orbital. Ladeavam a torre dois foguetes auxiliares reutilizáveis, contendo o primeiro combustível sólido a impulsionar uma nave tripulada da NASA.

Montada sobre o tanque principal, a *Columbia* — uma nave orbital com asas triangulares — assemelhava-se a um avião e transportava, no seu vôo inaugural, não somente os mísseis mas também — graças à confiabilidade dos computadores — uma tripulação humana. A bordo da *Columbia* estava o comandante da missão, John Young, e o piloto Robert Crippen. Aos 50 anos, Young era um veterano no espaço. Fora piloto da *Gemini 3* em 1965, e passara no espaço por ocasião da missão *Apolo 16*. Crippen, de 43 anos, esperava havia doze anos seu primeiro vôo espacial e tinha sido escolhido para a viagem inaugural devido a sua familiaridade com o sistema de processamento de dados da nave.

O time dos computadores incluía cinco AP-101 para todas as finalidades, além de uma legião de máquinas de apoio, com funções mais específicas. Duas delas, por exemplo, controlavam cada um dos três motores principais. Os outros processadores dedicavam-se a tarefas rotineiras, como orientar o tráfego de condutores de dados, acompanhar programas entrando e saindo da memória de massa e expor informações nas três telas da cabina do piloto. As informações ali apresentadas substituíram quase totalmente as comunicações provenientes do controle da Terra.

Entretanto, 20 minutos antes do horário previsto para o lançamento da *Columbia*, naquela manhã de abril, o computador de reserva emitiu sinais indicativos de que algo estava errado. A contagem regressiva foi interrompida e o lançamento suspenso enquanto engenheiros e controladores do vôo procuravam o defeito.

No início da tarde detectaram o problema: um minúsculo erro de sincronização, que resistira a milhares de horas de testes. Por causa disso, os quatro computadores principais começaram a funcionar 40 milissegundos antes do tempo determinado. Como o computador de reserva estava sempre atento aos demais para obter informações de última hora e assumir as funções, se necessário, sua tentativa de sincronizar o software da trajetória principal em T-menos-20 foi recusada. Interpretando a disparidade de cronometragem como erro de sincronização, o computador de reserva prontamente cortou a ligação.

Em parte, o problema originava-se de uma diferença de filosofia entre os sistemas operacionais escritos pela Rockwell e pela IBM. O software de reserva de autoria da Rockwell era síncronico, isto é, dedicava uma porção específica de tempo para cada tarefa de processamento e executava tais tarefas em ordem fixa. O software da IBM para os computadores principais, por outro lado, era acionado por interrupção de prioridades, ou seja, era assíncronico: efetuava os processamentos, observando com rigor sua importância previamente definida.

Durante dois anos a Rockwell e a IBM discordaram sobre os méritos comparativos de cada sistema. A disputa, no entanto, revelou-se desnecessária. Os engenheiros da NASA concluíram que a falta ocorreria apenas uma vez em cada 67 lançamentos. Assim, os computadores foram reacionados e, em menos de 48 horas, a *Columbia* estava novamente pronta para partir. Quaisquer que fossem suas origens, o problema nunca chegou a interromper o funcionamento do software principal. E tampouco ameaçaria o desempenho do software de reserva, caso o backup tivesse permissão para unir-se ao sistema. Além do mais, no decorrer das missões seguintes, ambos os sistemas funcionaram perfeitamente.

Às 7 horas da manhã do dia 12 de abril de 1981 — quase seis anos após o último vôo tripulado da NASA, e vinte anos depois da primeira viagem espacial de um ser humano, o soviético Lúri Gagárin — a *Columbia* subiu aos céus com uma

A plataforma para observação da Terra é constituída por módulos substituíveis — chamados unidades de substituição orbital, ou ORUs —, cada um deles contendo um conjunto diferente de instrumentos científicos ou componentes do sistema. Uma antena parabólica permite à plataforma transmitir dados para o sistema baseado na Terra, via um satélite de retransmissão localizado em órbita mais alta. Planejada para ser erguida da Terra pelo ônibus espacial, a plataforma também possui um módulo de propulsão para ajudar a colocá-la em órbita.

antena parabólica

cortina solar

ORU

instrumentos

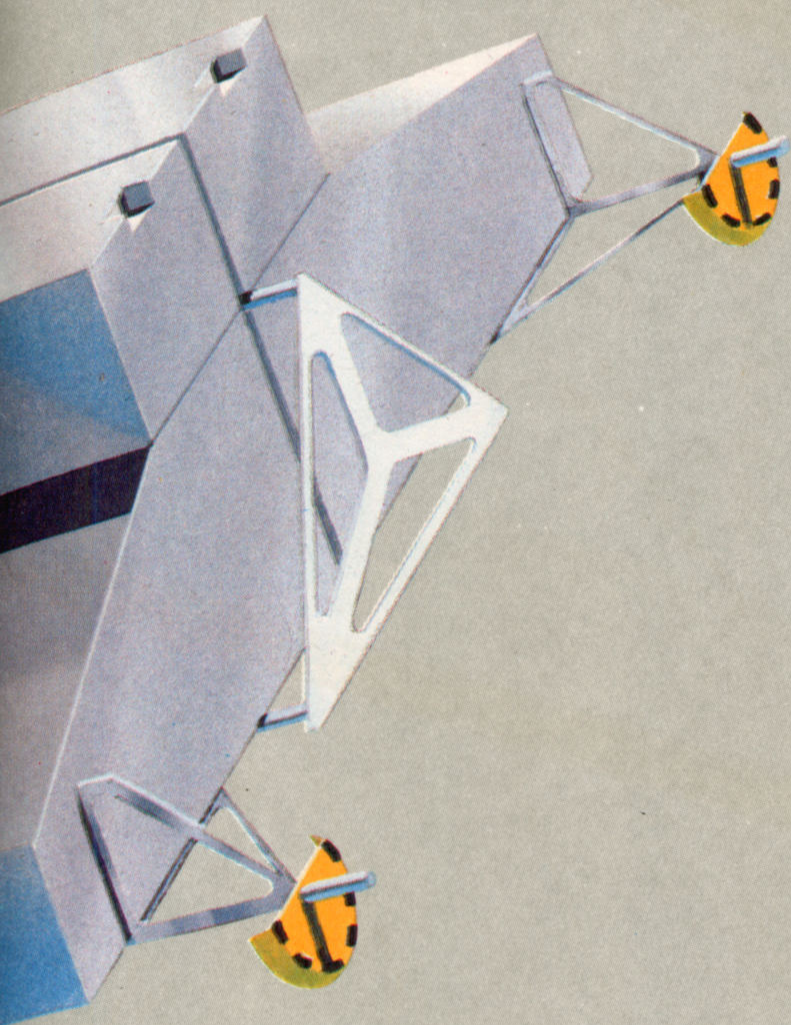
módulo de propulsão

Um observador para várias finalidades

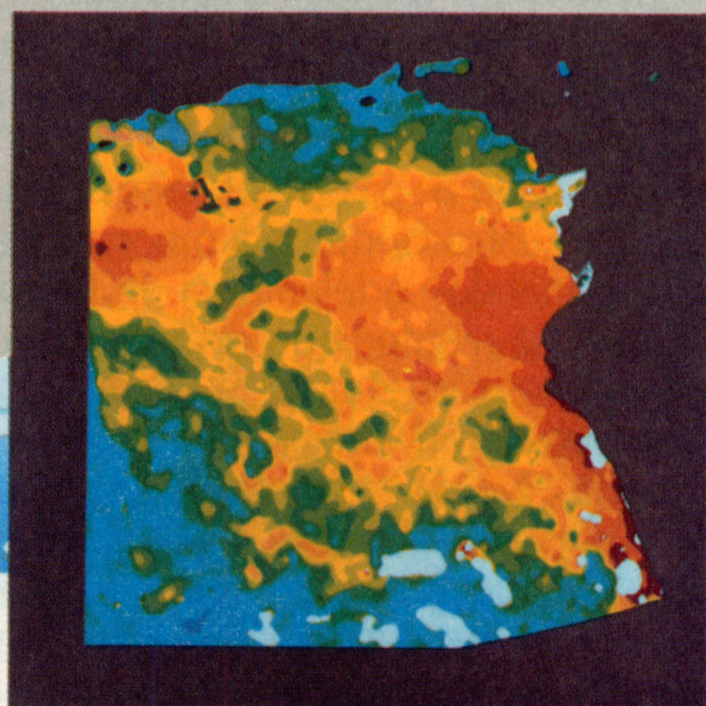
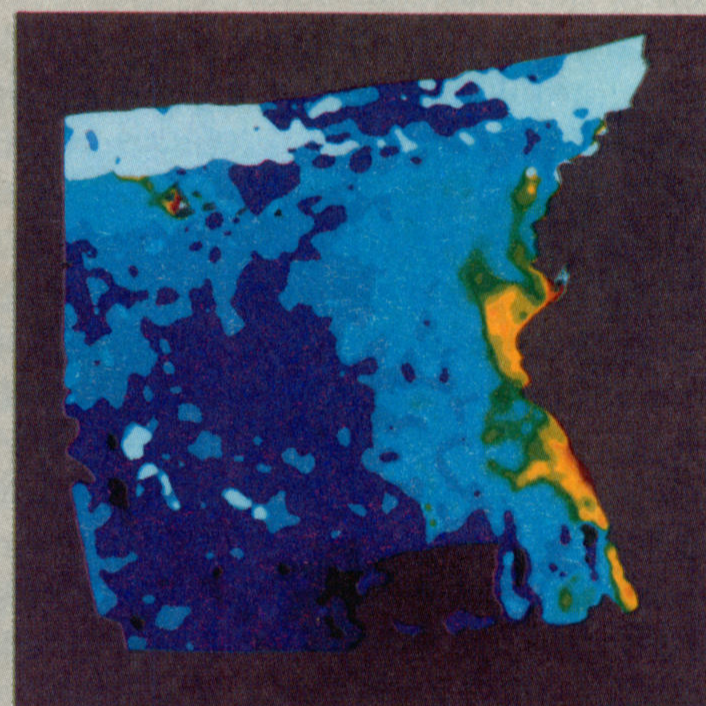
Os planos da NASA para estações espaciais em órbita terrestre baixa pressupõe não apenas uma estrutura para tripulação — onde astronautas e cientistas possam realizar experiências e fazer observações —, mas também inúmeras estruturas não tripuladas. Plataformas coorbitantes, por exemplo — cujo plano orbital geralmente forma com o equador o mesmo ângulo que a estação tripulada —, funcionarão como observatórios de astrofísica ou laboratórios com gravidade zero para processamento de materiais sensíveis.

Planejada para circular o globo em uma órbita polar de sentido norte/sul a uma altitude de 800 quilômetros, a plataforma

de observação da Terra, aqui ilustrada, será colocada em órbita por um ônibus espacial, e astronautas, quer em missão extraveicular, quer com o auxílio de manipuladores remotos, se encarregarão dos serviços de manutenção e consertos. O projeto modular da plataforma dará aos cientistas a oportunidade de reconfigurar o conjunto de instrumentos no desenrolar da missão, cujo objetivo é fornecer uma fonte de informações completas sobre a Terra. Ao transportar uma série de sensores em uma só estrutura numa órbita que permite ao sistema mapear a Terra uma vez a cada um ou dois dias, os cientistas podem combinar dados, de outro modo difíceis de serem relacionados, pois provêm de diversos satélites com diferentes períodos de tempo para observação e para os ciclos de mapeamento. Juntamente com os estudos baseados em Terra, os dados a longo prazo coletados por esse tipo de missão ajudarão os cientistas a estabelecer as tendências do clima mundial, ou a entender o comportamento dos oceanos (*abaixo*).



Estas imagens produzidas por computador (à direita), baseadas em dados recolhidos por um satélite experimental da NASA em órbita polar, revelam alterações na distribuição de plantas microscópicas — chamadas plânctons — no oceano, ao largo da costa oeste da América do Sul. Em um ano, a concentração de plânctons, anteriormente baixa (*em cima, em azul escuro*), cresceu e se espalhou (*embaixo, em laranja*). Uma plataforma espacial, segundo os cientistas, fornecerá dados completos, preciosos auxiliares na compreensão do ritmo e da dimensão dos processos oceanográficos que influem no crescimento e distribuição dessas minúsculas plantas — o primeiro elo da cadeia alimentar do oceano.



explosão cuja potência achatou centenas de metros de cercas de arame e fez vibrar um edifício situado a quilômetros de distância. Conforme o esperado, a viagem prosseguiu normalmente e os astronautas não tiveram dificuldades em pôr à prova as qualidades computadorizadas da nave. No entanto, apesar do planejamento e dos testes intensivos, o software da nave não estava totalmente imunizado contra erros e ocorreram algumas falhas durante as missões. Dada essa possibilidade, os astronautas sempre levavam consigo um manual denominado *Notas e cancelamentos do programa*. As notas detalhavam as idiosincrasias do software que o usuário poderia ter dificuldade em compreender; os cancelamentos descreviam as anomalias que não poderiam ser reparadas, os defeitos mecânicos.

O RESGATE

Apesar desses obstáculos, os computadores espaciais, funcionando dentro ou fora do ônibus espacial, iriam em breve enfrentar dificuldades. Em fevereiro de 1980, a NASA lançou o satélite Solar Maximum — Solar Max, para abreviar — com a finalidade de estudar as erupções solares durante o clímax do ciclo, de onze anos, das manchas solares. Após dez meses de perfeito desempenho, três fusíveis estouraram na caixa de controle de atitude do satélite. A maioria dos instrumentos ficou inutilizada e o Solar Max, totalmente incapaz de manter sua orientação no espaço. Os engenheiros lotados no Centro de Vão Espacial Goddard — a estação de rastreamento do satélite em Greenbelt, no Estado de Maryland — tentaram impedir a paralisação completa do Solar Max, transferindo o comando para o backup de controle de atitude e conseguiram comandar a rotação do satélite, com os painéis solares voltados para o Sol. Depois, deixaram-no à deriva por três anos até que uma missão fosse enviada para resgatá-lo.

Na manhã do dia 8 de abril de 1984, um cientista da missão de resgate, George Nelson, usando um jato de propulsão, realizou uma caminhada livre no espaço a fim de atravessar os 3 metros que separavam o ônibus espacial *Challenger* do satélite Solar Max. O objetivo era equilibrar o satélite e mantê-lo imóvel tempo suficiente para que o braço manipulador da nave conseguisse colocá-lo dentro do compartimento de carga. O dispositivo de torque utilizado por Nelson, no entanto, recusava-se a prender o satélite e, a cada tentativa de acoplagem, empurrava-o, fazendo bascular desordenadamente. Os painéis solares perderam contato com o Sol, e a energia começou a fluir das baterias. Novas táticas precisavam ser adotadas — e rapidamente.

Repetindo os passos adotados para reassumir o controle do Skylab, os engenheiros do Centro Goddard temporariamente tomaram as rédeas da situação. Usando um comando de telemetria de longo alcance, eles reprogramaram o controle de atitude na memória do computador do satélite, com um método diferente de sensor de posição. Quase de imediato o Solar Max começou a se reequilibrar. Logo ele estava praticamente imóvel, e seus painéis solares começaram a recarregar as baterias. No dia seguinte, os engenheiros baseados no Centro Goddard recarregaram para os computadores do Solar Max o programa original de controle de atitude. A *Challenger* aproximou-se furtivamente do satélite, e os astronautas puxaram-no com o braço manipulador. Em seguida, trabalhando no compartimento de carga, conseguiram consertar o Solar Max em menos de duas horas. Novamente em órbita, o Solar Max reassumiu suas tarefas.

A recuperação do satélite demonstrou que astronautas e computadores — além

de simplesmente salvar um observatório valioso — poderiam trabalhar em conjunto, com êxito, e provou a utilidade do ônibus espacial na realização de serviços no espaço.

DA CORRIDA ESPACIAL À BASE ESPACIAL

Escritores de ficção fabricam estações espaciais habitadas há muito tempo. Um dos primeiros a fazê-lo foi um clérigo de Boston, Edward Everett Halle, que, em 1869, imaginou uma enorme esfera oca, construída com tijolos normais e lançada aos céus por um volante gigantesco acionado por uma cascata. Desde aquela época, a fantasia tem cedido lugar a projetos mais viáveis. A estação espacial planejada nos escritórios da NASA para a década de 90 deverá ser um local de pesquisa com gravidade zero próximo a órbita terrestre e também um trampolim para futuras missões no espaço profundo.

Em meados dos anos 80, a maior parte da pesquisa prática necessária para concretizar a estação espacial fora praticamente concluída. Tanto o sistema de transporte como as ferramentas para montar a estação espacial já haviam passado por uma inspeção geral.

O projeto da estação espacial e os demais programas da NASA sofreram um grande revés como consequência do desastre ocorrido com a nave *Challenger*, a pior tragédia na história do programa espacial norte-americano. No dia 28 de janeiro de 1986, 76 segundos após o lançamento, uma explosão provocada por um vazamento de combustível sólido no foguete auxiliar destruiu a *Challenger* e seus sete tripulantes. Apesar de toda a computação e redundância embutidas nos sistemas da nave, os foguetes auxiliares, uma vez inflamados, eram elementos que fugiam totalmente ao controle dos computadores — essa foi a grande ironia e o fato mais lamentável de todo o acidente.

A NASA e a indústria espacial passaram vários meses reavaliando seus métodos, sistemas e prioridades, principalmente em relação a missões futuras. É provável que o ônibus espacial não mais possa carregar cargas comerciais. A NASA, no entanto, ainda planeja usar esse sistema de transporte na construção da estação espacial. Os ônibus espaciais deverão rebocar módulos de alumínio pré-fabricados para o espaço. Os módulos ficarão em órbita a 400 quilômetros da Terra, até que a tripulação da nave — com o auxílio do braço robótico e de outras ferramentas especialmente fabricados — possa manobrá-los em direção ao local previamente determinado e reuni-los.

Caberá então aos computadores desempenhar um papel crítico na operação e manutenção da estação concluída. Na verdade, quase todos os componentes da estação serão caracterizados por um maior ou menor grau de automação, que deverá superar até mesmo o ônibus espacial, altamente computadorizado.

Dentre os planos mais visionários que envolvem a estação espacial — certamente aqueles que exigirão maior capacidade de memória — destaca-se a aplicação da inteligência artificial, ou AI (*artificial intelligence*). A base espacial do início do século XXI seria dirigida quase integralmente pelos chamados sistemas-peritos — programas que incluem raciocínio lógico, técnicas para resolução de problemas, experiências acumuladas e dados extraídos dos especialistas humanos. Ligados em uma rede interativa, muitos desses sistemas funcionariam em comum acordo, tomando decisões individualmente e trocando informações sobre os resultados. As funções de manutenção também se incluem entre as importantes tarefas utiliza-

das por esse comitê de administração computadorizado. Sistemas-peritos ficarão encarregados de supervisionar os sistemas de controle ambiental de suporte de vida dos astronautas, assim como deverão orientar os subsistemas encarregados da energia elétrica, propulsão, comunicação e rastreamento. Com os progressos alcançados no campo da visão e da mobilidade robótica, os operários computadorizados seriam utilizados na montagem, prestação de serviços e manutenção da estação espacial, assumindo o controle dos trabalhos cotidianos dentro da estação e no vácuo do espaço e liberando a tripulação humana para se concentrar na observação celeste e nas experiências científicas.

Finalmente, os programas de inteligência artificial poderiam ser combinados a fim de criar um astronauta automatizado para completar uma tripulação de oito indivíduos. Como imaginado por Frederick J. Dickey, do Centro de Inteligência Artificial Boeing de Bellevue, em Washington, o colega eletrônico da tripulação seria uma "inteligência sem corpo" sob o comando do sistema de computação da estação espacial e estaria apto a assumir um sem-número de encarnações. Como sistema perito, ele se responsabilizaria, por exemplo, pelo bom funcionamento da base espacial, atividade que de outro modo ocuparia dois membros da tripulação.

Sem dúvida alguma, o desafio de criar um software para uma estação espacial faria os problemas ocorridos na programação da *Apollo*, do *Skylab* e do ônibus espacial parecerem irrisórios. Com todas as suas promessas, a pesquisa no campo da inteligência artificial ainda está em estado inicial. Há muito trabalho a ser realizado antes que o astronauta automatizado seja capaz de aprender a partir da experiência — um elemento crítico na tomada de decisões seguras em casos de emergência. Mesmo o desenvolvimento dos sentidos, como visão e tato, exige um tipo de programação altamente complexa — e, ainda assim, imperfeita.

No entanto, admitindo-se que a estação espacial esteja em funcionamento no ano 2000 — com ou sem a participação de um membro eletrônico na tripulação — o cenário proposto pela National Commission on Space prevê um sistema para transportar cargas e passageiros de uma base a outra e daí para mundos longínquos. A estação espacial do futuro seria um simples ponto de partida rumo a povoados na Lua ou em Marte, ou a uma cadeia de portos e colônias que se estenderia mais e mais no espaço profundo.

O plano de colonização do cosmo é apenas um pequeno passo que confirmaria a previsão, feita pelo engenheiro Wernher von Braun, de que o século XXI seria "o século da atividade científica e comercial no espaço exterior, dos vôos interplanetários tripulados, e do início da consolidação de colônias humanas fora do planeta-mãe Terra". Embora Von Braun omitisse qualquer referência aos sistemas automatizados, os computadores já haviam se antecipado, como no caso das sondas robóticas que exploraram o sistema solar durante a última década. A humanidade irá procurar seguir o caminho por eles aberto.

Uma artilharia de reservas



O que torna possível o voo de um ônibus espacial é o sistema elaborado de processamento embutido no veículo. Na ascensão rumo à órbita — um estágio crítico da missão — os computadores dirigem o espetáculo, e durante todas as demais fases eles funcionam como intermediários em um sistema de controle de voo denominado *flying by wire*. Nessa combinação, as ligações mecânicas — entre o acelerador e o motor, por exemplo — são substituídas por ligações de computador que recebem sinais dos controles localizados no convés de voo, transformando-os em comandos para os instrumentos da nave.

O ônibus espacial depende inteiramente de seus recursos eletrônicos. Uma falha total dos computadores durante a subida ou a reentrada na atmosfera terrestre reduziria a nave a um objeto inerte e incontrolável. Em vista disso, o sistema de computação deve ser absolutamente digno de confiança. O computador AP-101 da IBM — o último de uma família de máquinas já testadas em voo, no controle do sistema de armas dos bombardeiros B-52 e de outras naves de combate — foi o escolhido pela NASA, para servir como computador de uso geral (GPC, ou *general-purpose computer*) do ônibus espacial.

Entretanto, a experiência de vôos anteriores demonstrara que até o melhor computador pode, ocasionalmente, ficar desconcertado. Para compensar essa fraqueza, o ônibus espacial estava equipado com diversos GPCs. Quatro deles operavam softwares idênticos, simultânea e independentemente, dentro de um sistema de testes e comparações que reduz a possibilidade de erro. Nesse conjunto de apoio quádruplo, se um dos computadores apresentar um cálculo diferente daqueles obtidos pelos demais computadores, a maioria vence. Votos empatados alertam a tripulação para a necessidade de, eventualmente, proceder à troca para um quinto GPC, um computador de reserva operando um software diferente.

Embora tornem possíveis os vôos dos ônibus espaciais, os computadores não os fazem mais fáceis. Para se comunicar com as máquinas durante um voo de 58 horas, a tripulação deverá digitar 13 000 teclas — a mesma quantidade exigida durante a missão Apolo à Lua, cuja duração foi três vezes maior.

Cinco computadores para o trabalho de um

Sob todos os aspectos, dos sensores aos canais de comunicação, a redundância é o segredo da confiabilidade dos ônibus espaciais. E nenhum sistema de bordo beneficia-se tanto com a redundância quanto o sistema de computação.

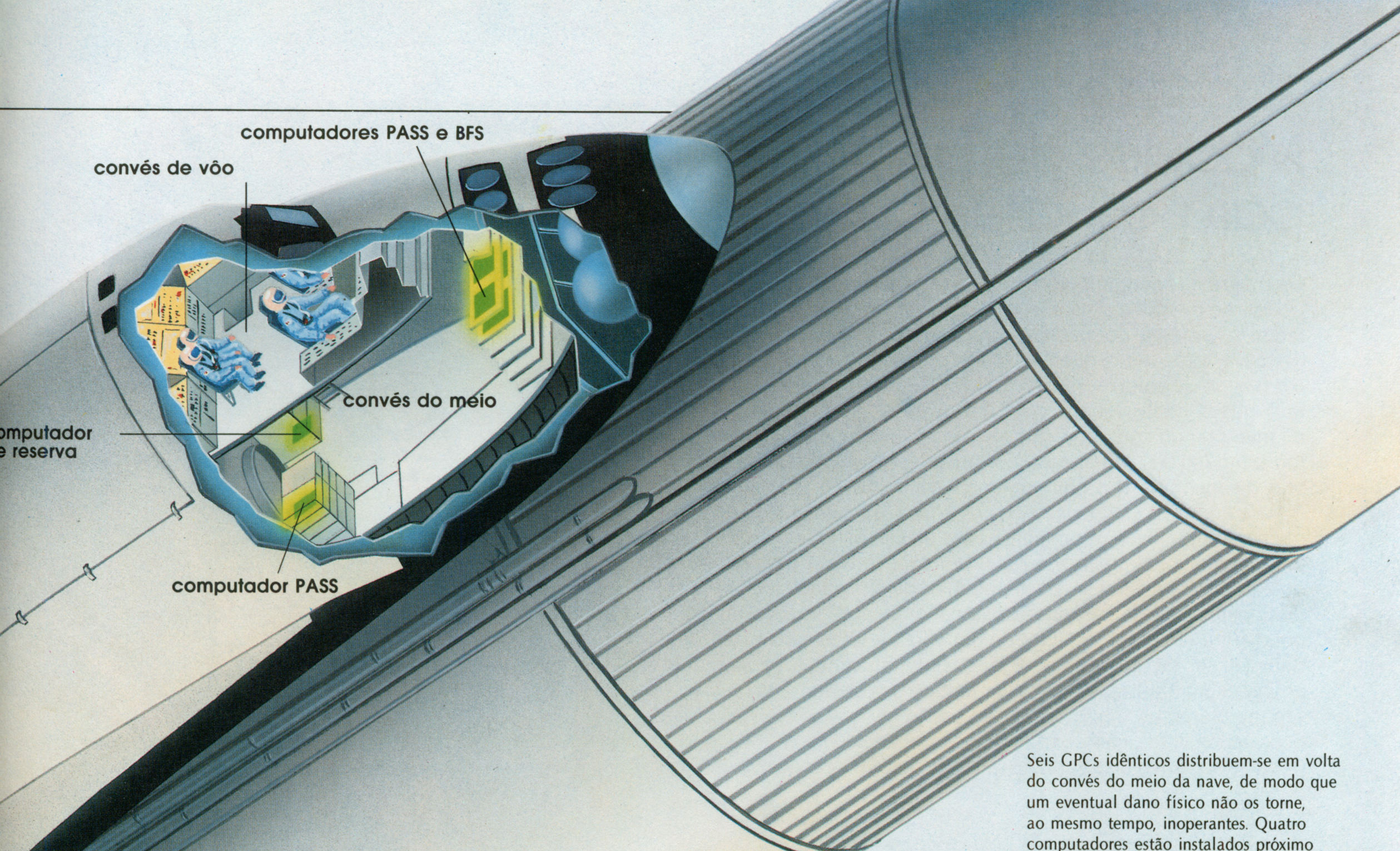
O grau de redundância dos computadores varia no desenrolar do voo. A redundância quádrupla é aplicada durante a subida e a descida, quando uma falha do computador causaria a perda da espaçonave e de seus tripulantes. Quatro GPCs ope-

ram o sistema primário de software de aviação da nave (PASS, ou *primary avionics software system*), um programa complexo, feito para cada voo do ônibus espacial. O quinto GPC opera o sistema de voo de reserva (BFS, ou *backup flight system*), desenvolvido independentemente pelos programadores da Rockwell International. Caso uma falha no PASS inabilitasse os outros quatro GPCs, os astronautas poriam em funcionamento o computador de reserva.

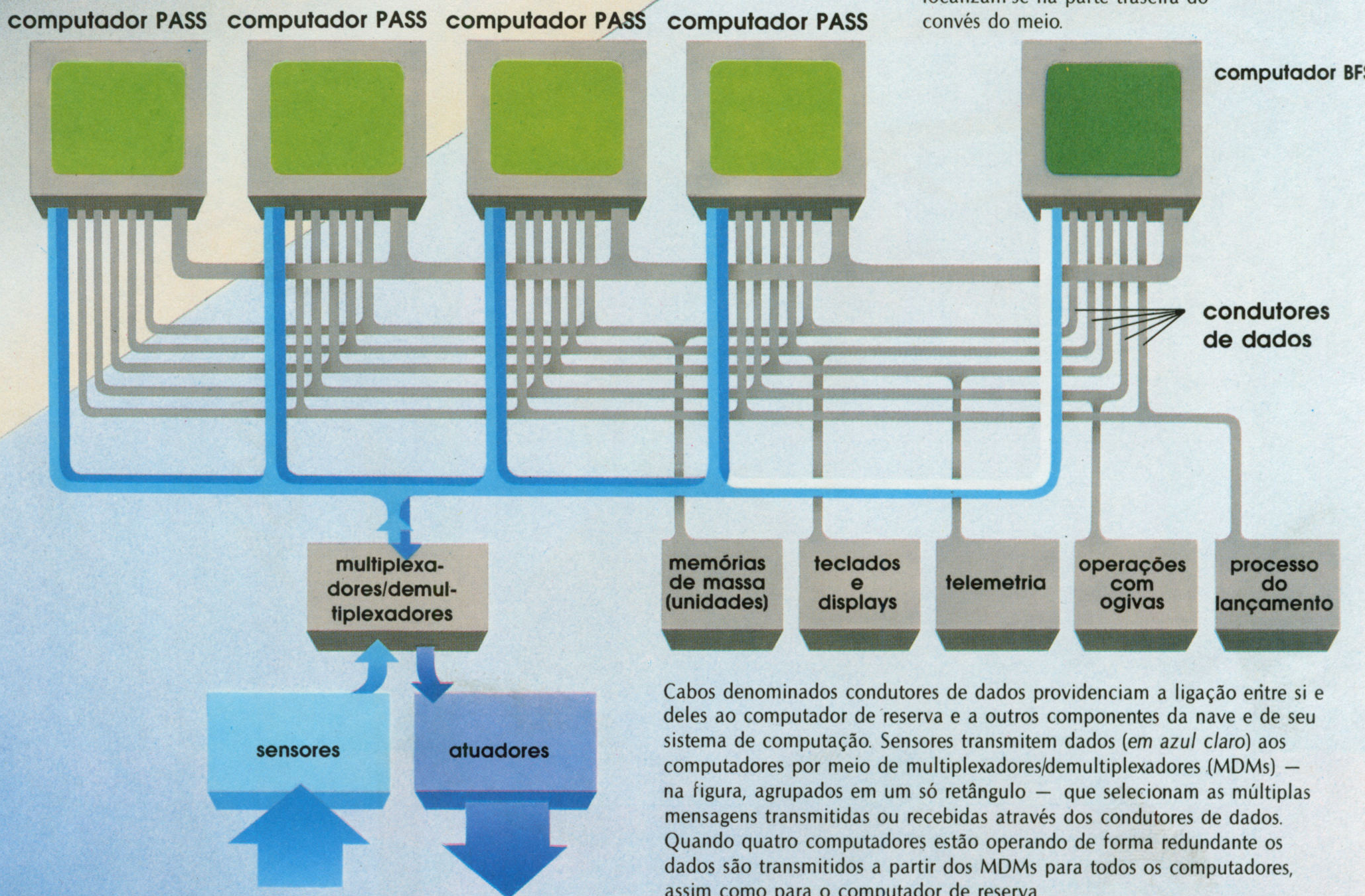
Uma vez em órbita, dois GPCs pilotam o ônibus espacial, enquanto um deles ajuda a controlar o braço manipulador e a orientar os vários sistemas de bordo da nave orbitante. Os outros dois — um dos quais carregado com uma cópia extra do software de reentrada e o outro com o BFS — são desligados para conservar energia.

Durante a ascensão da nave, quatro unidades redundantes de giroscópios, localizadas na parte traseira, dirigem as mudanças na atitude e enviam relatórios idênticos para os GPCs no convés do meio. Os computadores dirigem a nave, ordenando que atuadores hidráulicos girem os motores principais sobre seus suportes. Em órbita, a nave é dirigida por dois motores de manobra orbital, e por 44 pequenos empuxadores movidos a hidrazina.





Seis GPCs idênticos distribuem-se em volta do convés do meio da nave, de modo que um eventual dano físico não os torne, ao mesmo tempo, inoperantes. Quatro computadores estão instalados próximo ao nariz da aeronave. Os outros dois localizam-se na parte traseira do convés do meio.



Cabos denominados condutores de dados providenciam a ligação entre si e deles ao computador de reserva e a outros componentes da nave e de seu sistema de computação. Sensores transmitem dados (em azul claro) aos computadores por meio de multiplexadores/demultiplexadores (MDMs) — na figura, agrupados em um só retângulo — que selecionam as múltiplas mensagens transmitidas ou recebidas através dos condutores de dados. Quando quatro computadores estão operando de forma redundante os dados são transmitidos a partir dos MDMs para todos os computadores, assim como para o computador de reserva.

Módulos de programa para as fases de vôo

Os programas de computação comumente estouram a capacidade de memória disponível quando surgem tarefas inesperadas. O sistema de software primário de aviação da nave (PASS) — programas que transportam a nave para o espaço e a trazem de volta — não é exceção. De início a NASA esperava que o PASS se encaixasse em cerca de 33 000 palavras da memória do computador. Esse número, no entanto, aumentou para 700 000, ultrapassando largamente as 106 000 palavras da memória dos computadores de bordo.

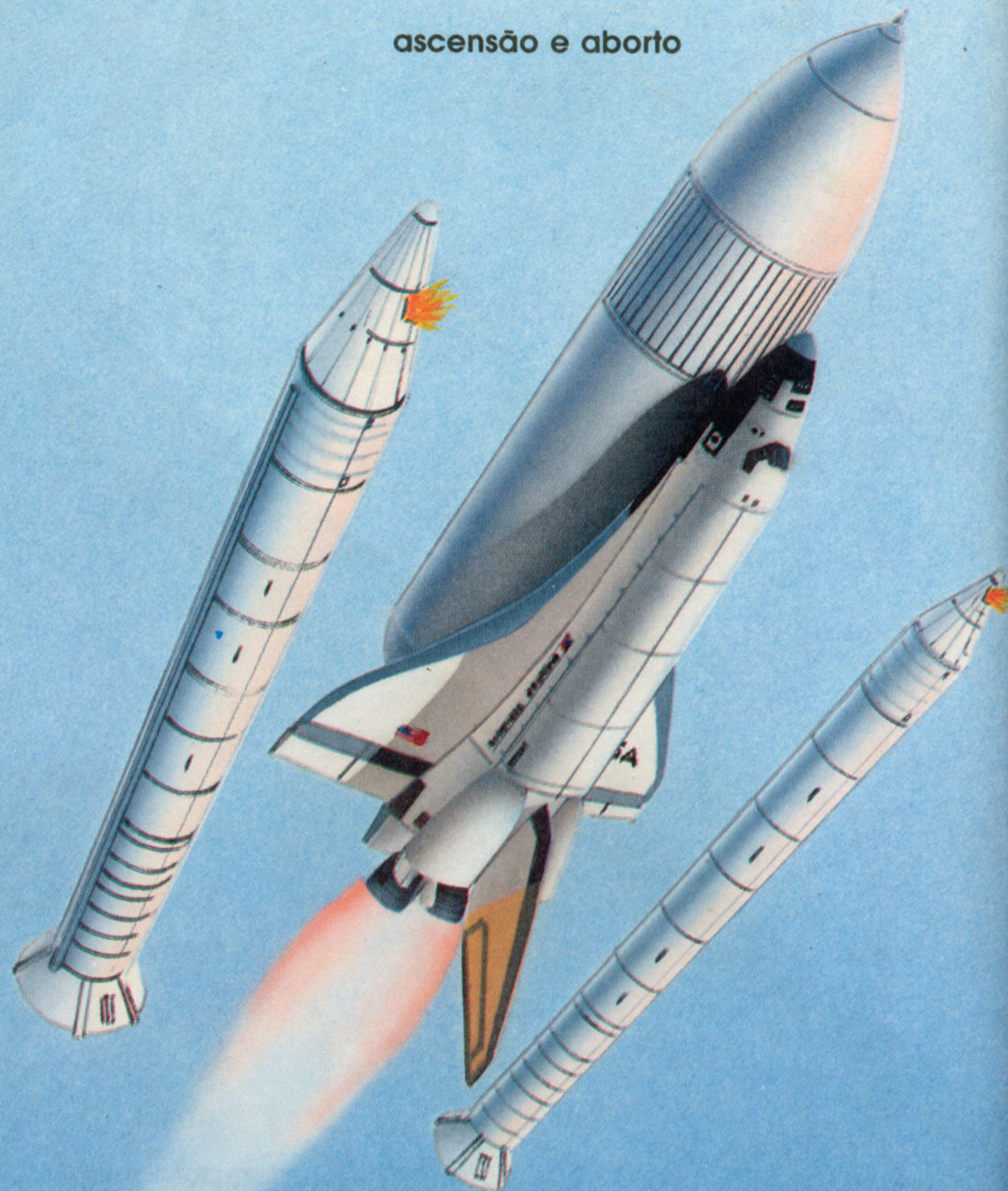
Para que o PASS funcionasse nos limites da capacidade de memória disponível, os programadores dividiram-no em um sistema operacional (*abaixo*) — que permaneceria na memória durante toda a missão — e sete módulos denominados seqüências operacionais (OPSs, ou *operational sequences*), que correspondiam a diferentes estágios de um vôo. Os OPSs não poderiam se ajustar aos computadores simultaneamente; assim, aqueles com utilização prevista em estágios posteriores da missão precisariam ser armazenados a bordo até que se fizessem necessários. A solução para o problema apareceu sob a forma de um dispositivo denominado unidade de memória de massa (MMU).

O MMU é basicamente um gravador. De acordo com a filosofia da redundância adotada pela NASA, o MMU possui dois aparelhos, cada um dos quais com um rolo de 1,8 metro de fita de 1,3 centímetro de largura. Cada rolo tem capacidade de armazenar aproximadamente 8,5 milhões de palavras de software, suficiente para conter três cópias do PASS e formando ao todo seis camadas de redundância. Além disso, o sistema guarda cópias do software que dirige o computador de reserva, os principais controladores dos motores e os displays no painel de instrumentos.

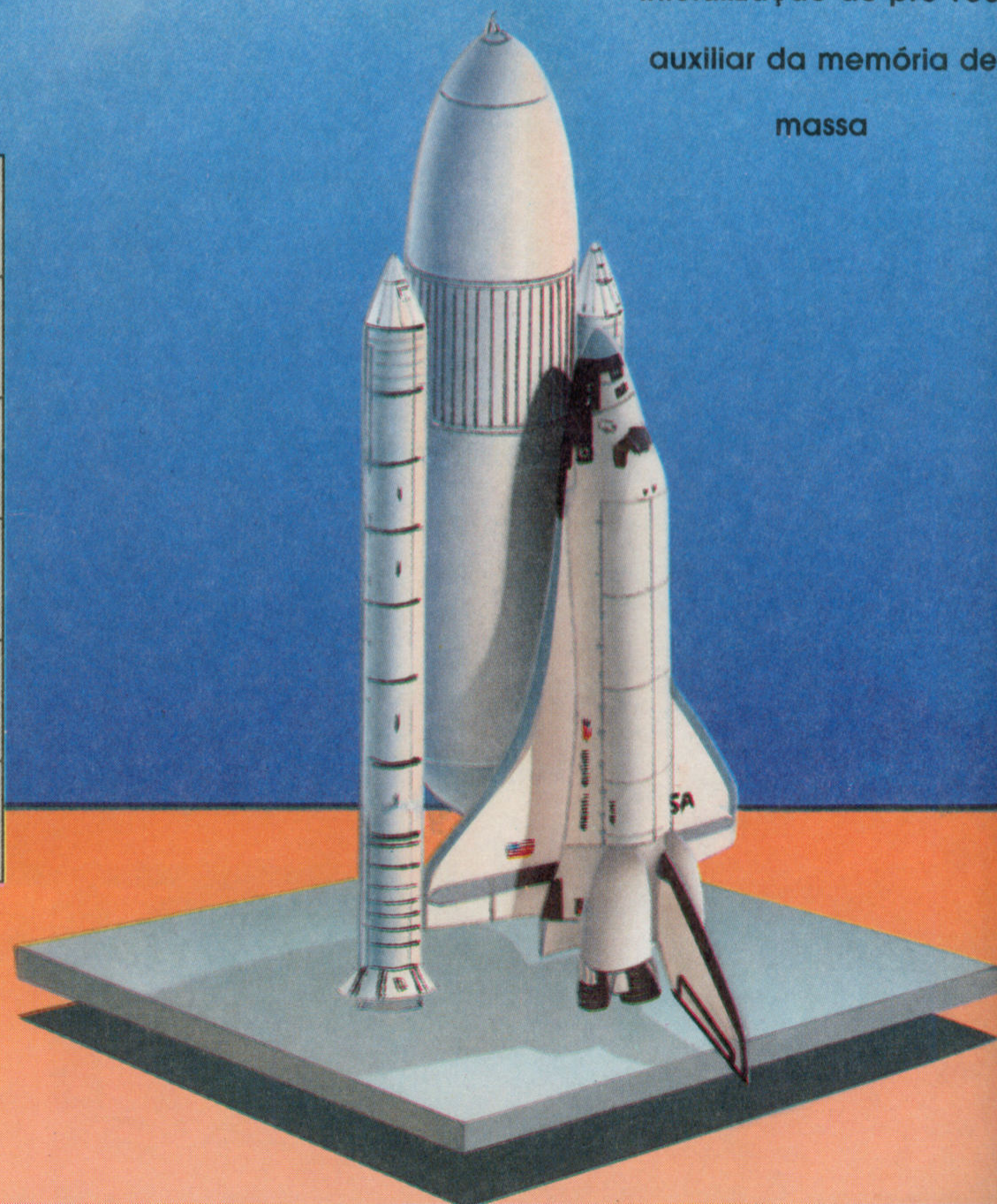
| | |
|-----------------------------|--|
| 40 milissegundos | Obter dados sensórios dos multiplexadores/demultiplexadores. Enviar ordens para os multiplexadores/demultiplexadores. Processar dados sensórios dos giroscópios de velocidade. |
| 80 milissegundos | Processar informação sobre atitude e apresentá-la à tripulação. Ler dados sobre pressão dos foguetes auxiliares. |
| 160 milissegundos | Aceitar ordens provenientes da Terra. Preparar e executar a separação dos foguetes auxiliares. Criar ordens para os atuadores. |
| 320 milissegundos | Usar o input dos sensores para dirigir o veículo em direção à órbita. Converter os dados de navegação dos sensores para apresentá-lo à tripulação. |
| 960 milissegundos | Determinar a localização do veículo. Processar dados a partir dos sistemas de radar de bordo. Detectar a existência de erros nos sensores dos giroscópios de velocidade. |
| Não programado | Processar o input a partir dos teclados na cabina da tripulação. Executar tarefas de orientação em caso de emergência. |

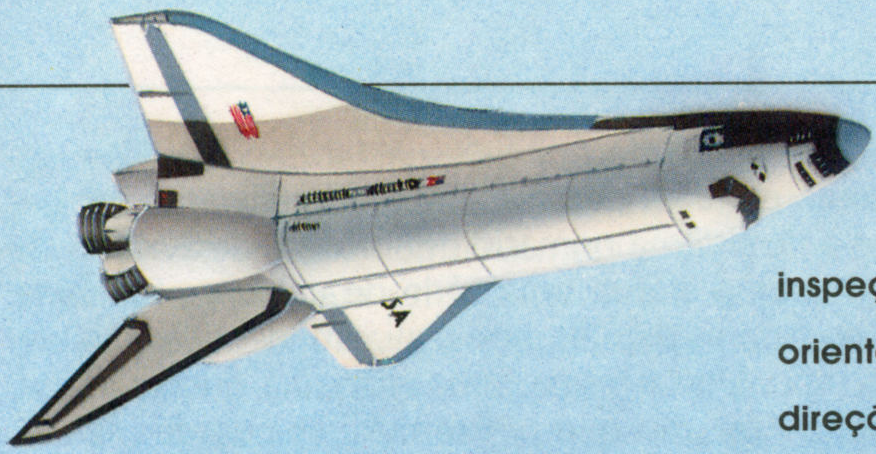
O quadro acima enumera, por ordem de prioridade, as tarefas do computador de bordo da nave. No topo da lista estão exemplos de tarefas críticas que o sistema operacional PASS deve executar a intervalos de 40 milissegundos. Funções menos frequentes, ou realizadas apenas mediante solicitação, aparecem na parte inferior do quadro. Para que as tarefas prioritárias sejam efetuadas em primeiro lugar, o computador suspende um determinado trabalho quando há uma prioridade pendente.

ascensão e aborto



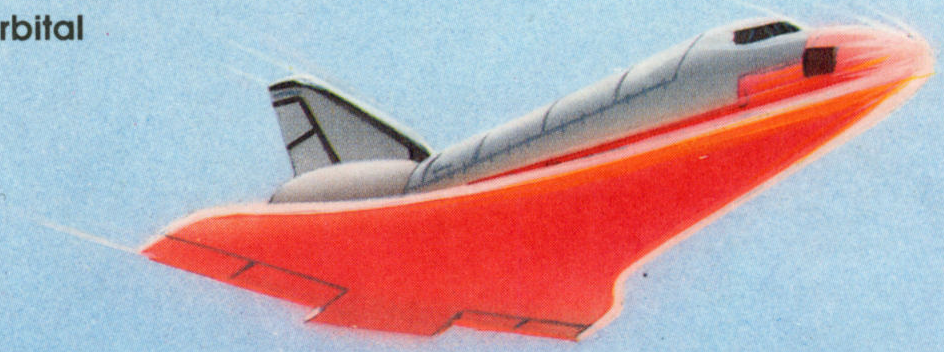
inicialização de pré-vôo
auxiliar da memória de
massa



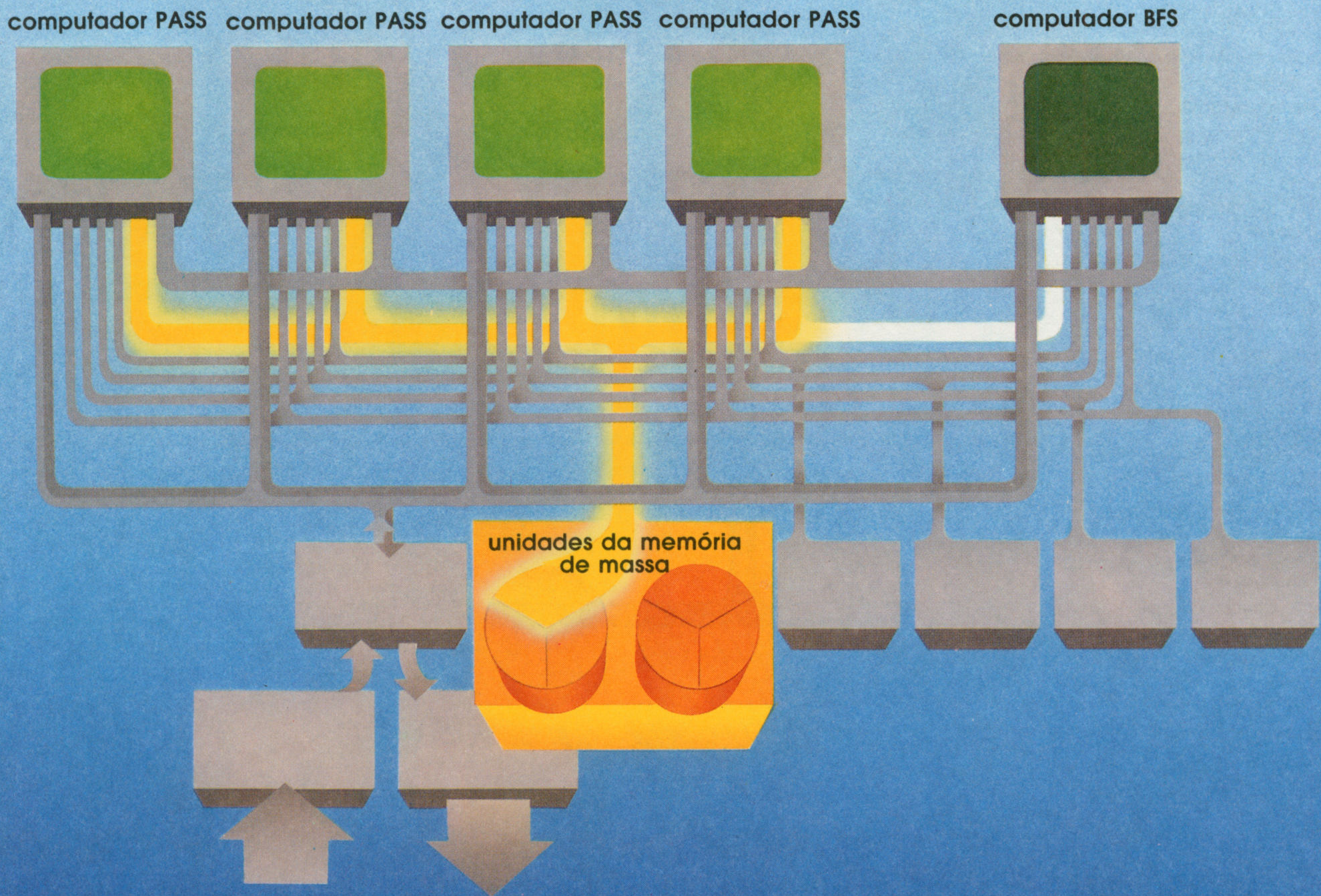


inspeção orbital
orientação, controle e navegação orbital
direção do sistema orbital

Diferentes programas de seqüência operacional (OPS), como ilustrado aqui, são carregados em quatro dos computadores de bordo a cada estágio da missão. Quando um grupo da OPS já cumpriu sua tarefa, o grupo seguinte o substitui, transferindo-se da unidade de memória de massa para a memória do computador por meio de condutores de dados reservados para tal finalidade (*em amarelo*). Nenhum OPS está carregado no quinto computador, que é controlado pelo sistema de reserva de vôo (BFS), e não pelo PASS.



reentrada, aproximação e pouso

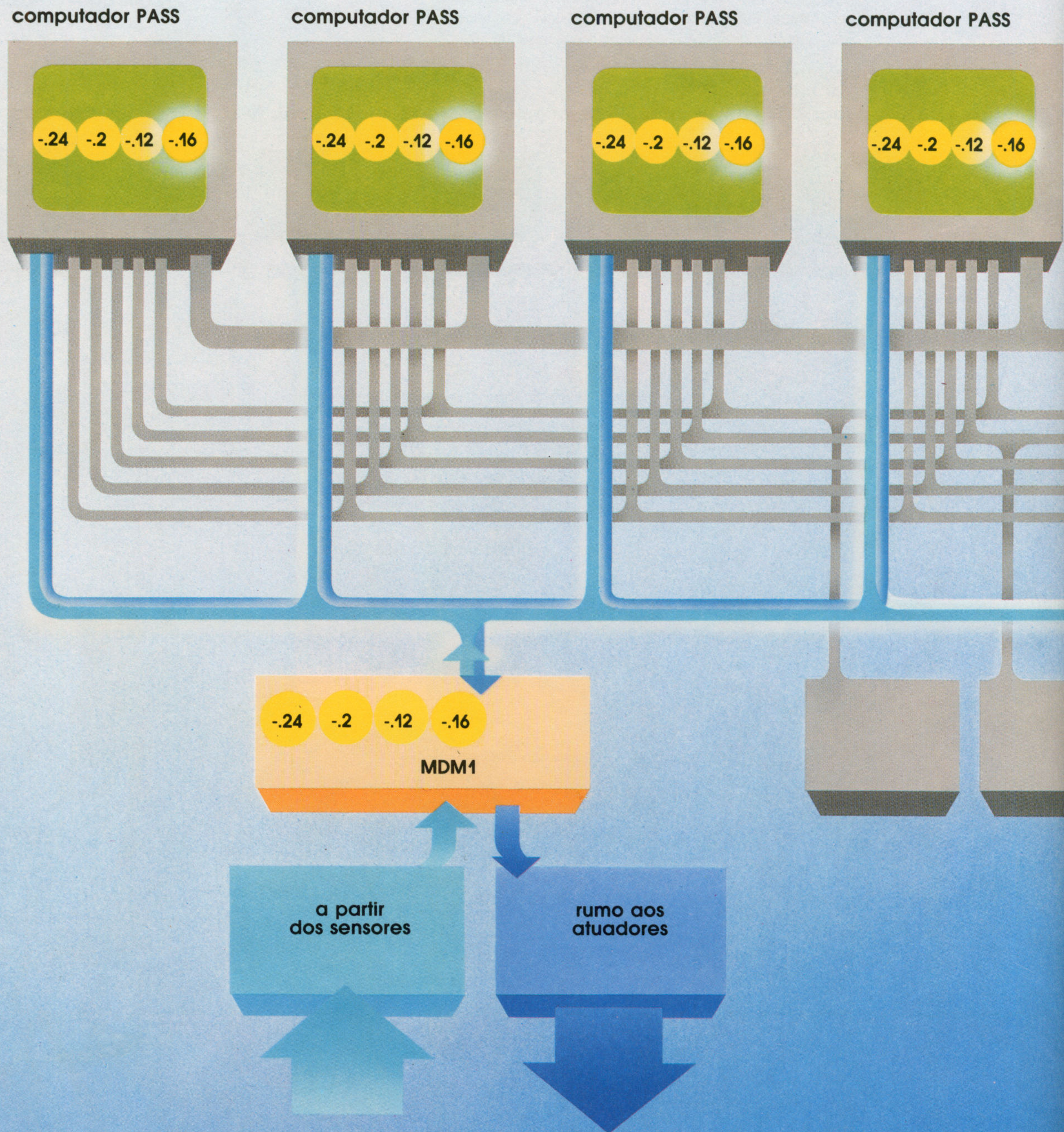


Distribuindo dados para os computadores

A redundância a bordo do ônibus espacial depende de uma perfeita sintonia entre os quatro computadores para usos gerais operados pelo sistema primário de software de aviação da nave. Cada máquina efetua uma série de cálculos, funciona como controle para as demais, que realizam idênticas tarefas, ao mesmo tempo. Dessa forma, uma máquina que se atrase ou se adiante — mesmo que por uma diferença de milissegundos — pode estar errada.

Os computadores manipulam informações transmitidas através de conectores de dados sob a forma de medidas tiradas

Durante a ascensão, quatro computadores analisam os dados provenientes de sensores de apoio a bordo da nave, com a finalidade de concordar sobre as ordens a serem enviadas aos motores principais da nave, e superfícies móveis de controle externo. Na ilustração à direita, números representando o grau de inclinação longitudinal em mudança chegam aos MDMs, provenientes de cada um dos quatro giroscópios de velocidade. A cada 40 milissegundos, em resposta a suas perguntas, os MDMs transferem as leituras — através dos condutores de dados — para os quatro computadores PASS, e também para o computador de reserva — que não mais participará do processo, a menos que a tripulação o transfira para o sistema. Os computadores PASS processam independentemente todas as leituras dos quatro sensores, de acordo com as regras que selecionam o maior dos dois valores intermediários como a melhor representação da real inclinação longitudinal em mudança. Com base nessa determinação, os quatro computadores preparam ordens idênticas para os atuadores do motor principal, a fim de corrigir a atitude da nave e mantê-la em sua trajetória.

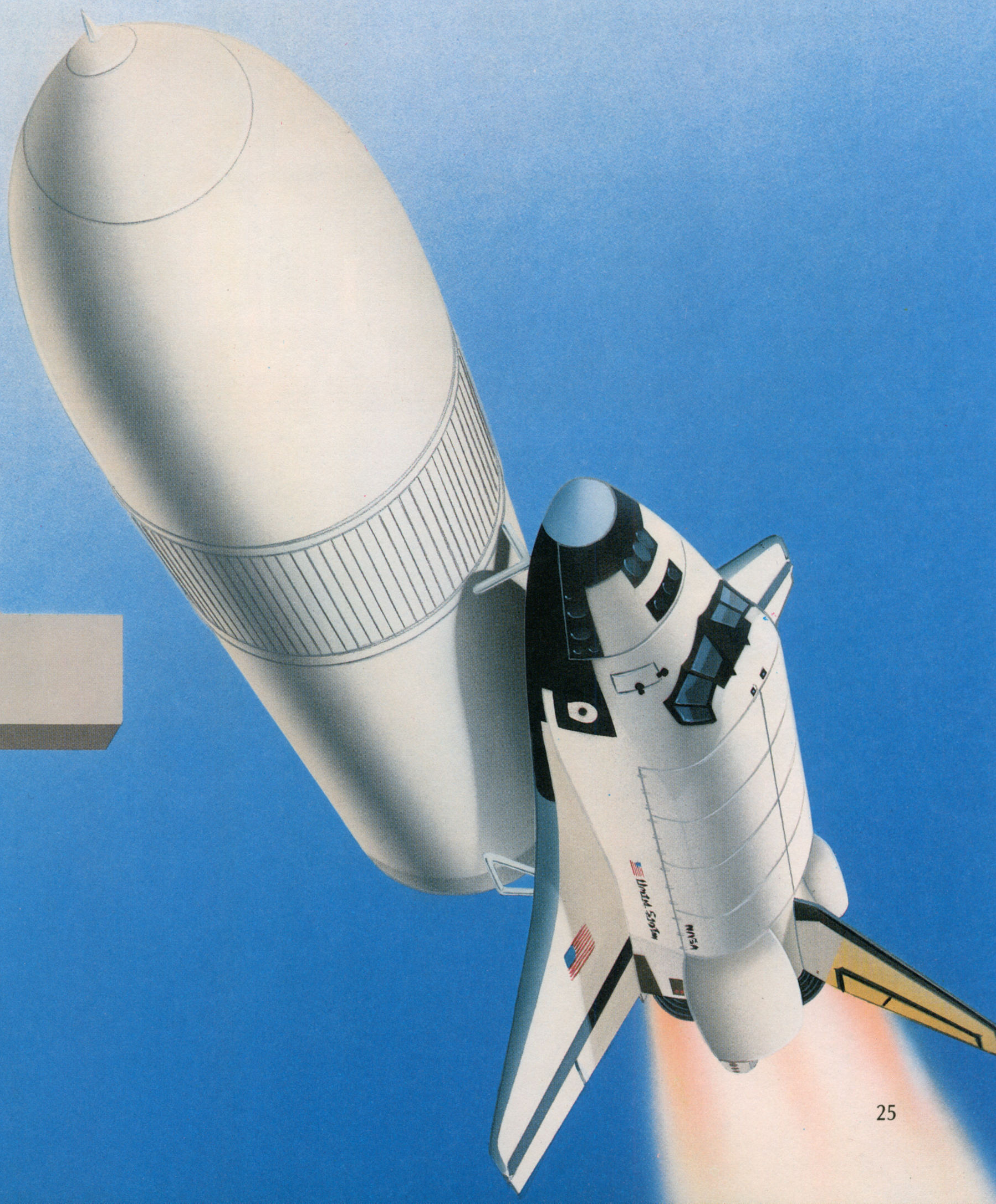
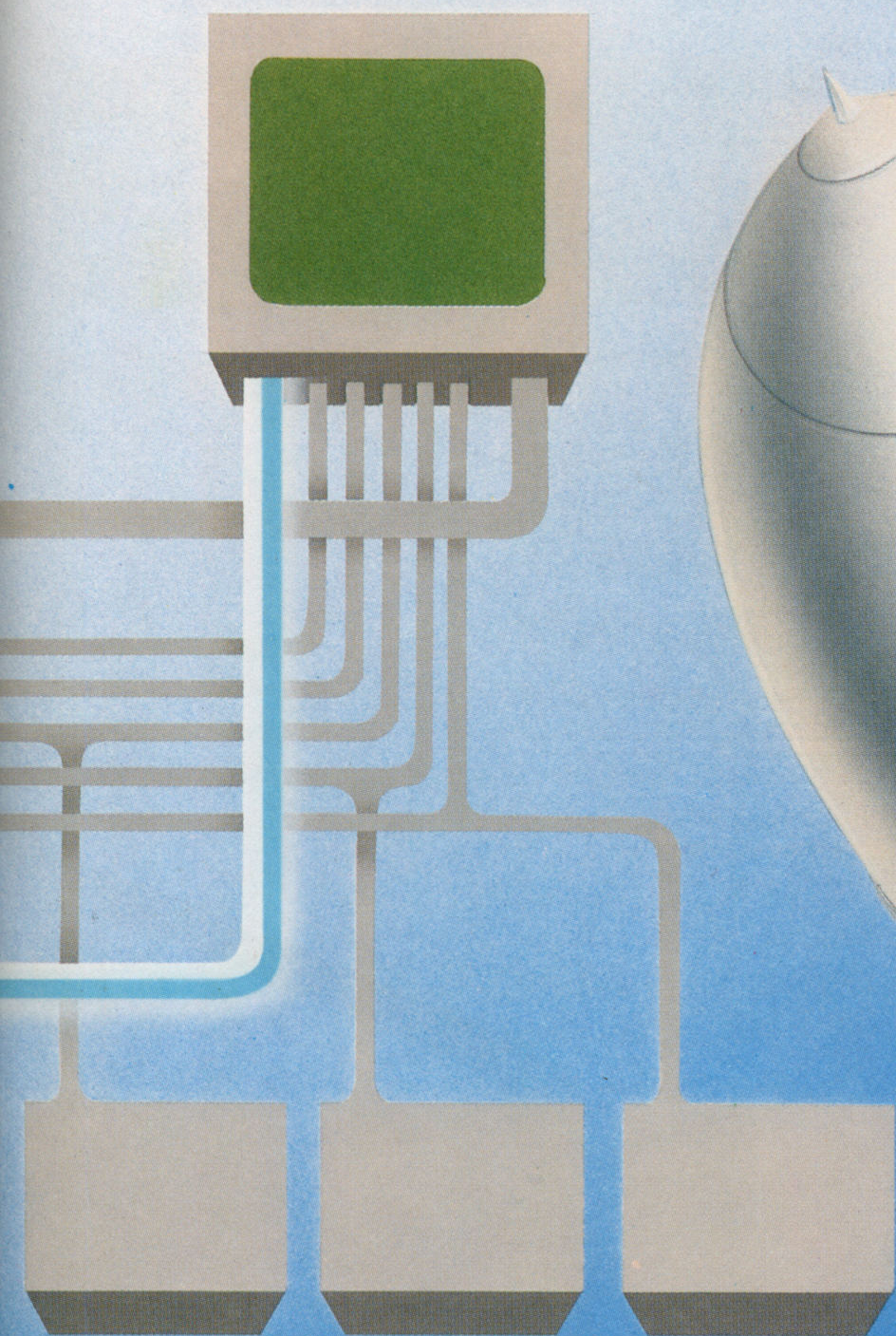


por centenas de sensores dispostos por todo o veículo. Devido a variações mínimas, ainda que inevitáveis entre os sensores, os dados raramente combinam entre si. O sistema PASS usa regras especiais para selecionar os melhores valores e, assim, garantir que os quatro computadores primários tomem como base para cálculos dados do mesmo sensor. As ordens resultantes são transmitidas de cada computador para os atuadores mecânicos correspondentes, que ajudam a controlar a nave durante o vôo.

Entre os computadores (numa das extremidades do condu-

tor de dados) e os sensores e máquinas do ônibus espacial (na outra extremidade) existe um medidor denominado multiplexador/demultiplexador (MDM), um pequeno computador independente. Existem dois MDMs para cada um dos condutores de dados de controle de vôo. (No exemplo abaixo, todos os MDMs de condutores de dados estão representados em um só box.) Os MDMs convertem os dados de sensores para a forma digital e transmitem as ordens dos computadores para o sistema eletrônico, assim como para as máquinas da nave, a fim de fazê-la funcionar.

computador BFS

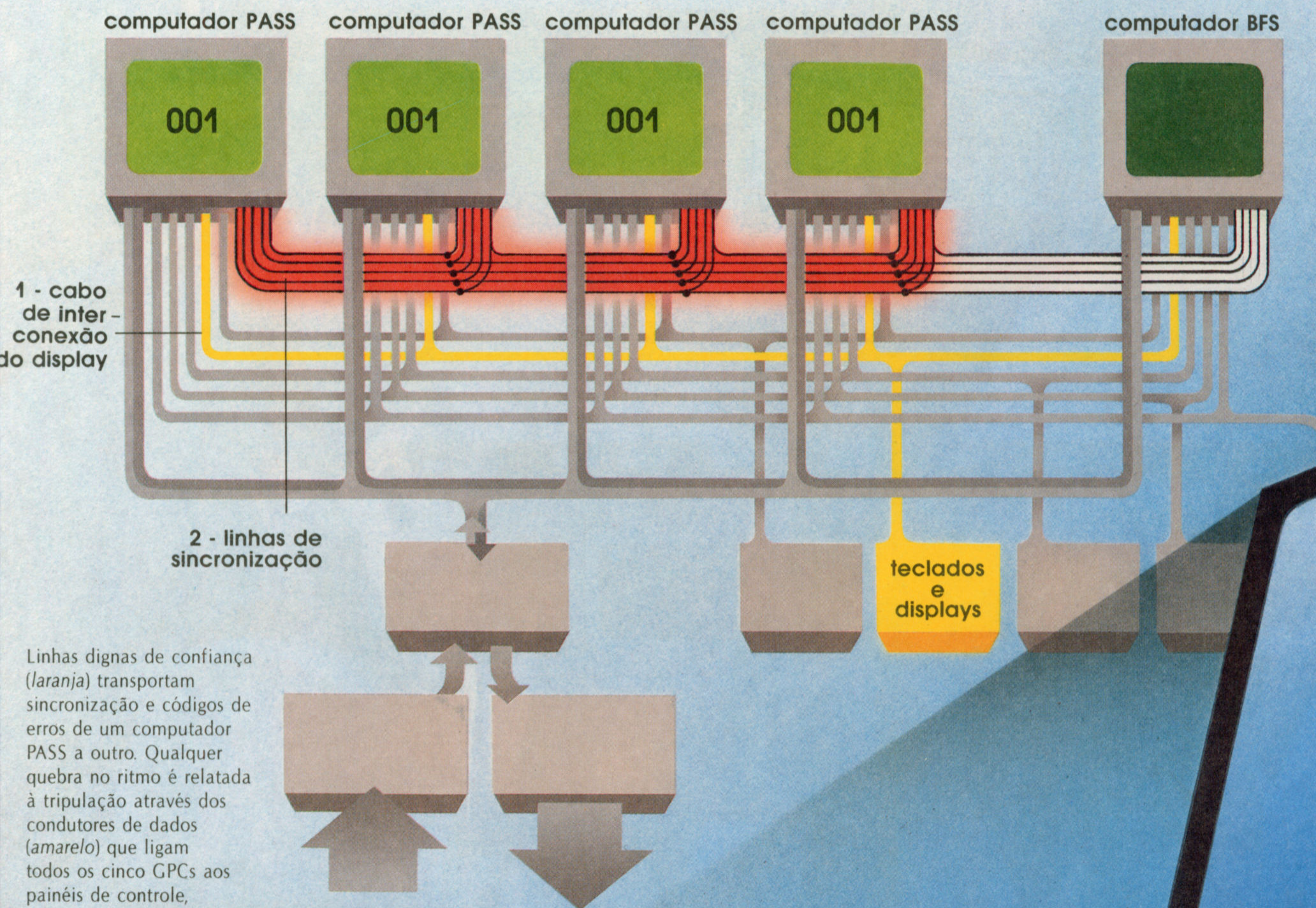


Sincronização: o segredo da harmonia

Os quatro computadores PASS não apenas devem solucionar o mesmo problema, mas também completar seus cálculos com um milissegundo de diferença de um para outro. O sistema operacional PASS é responsável por manter os quatro computadores em cadência por meio de um processo denominado sincronização. Cada GPC é equipado com um relógio cujo "pêndulo" é um cristal de vibração rápida. Por mais precisos que sejam, tais relógios funcionam em ritmos ligeiramente diferentes. A fim de superar essa divergência, o software sincroniza os quatro GPCs do sistema PASS sempre que eles enviam ou recebem dados, ou, então, no momento em que se estendem para um novo módulo de software, o que ocorre 350 vezes por segundo. Em cada uma dessas ocasiões, os GPCs fazem uma pausa para trocar códigos especiais entre si através

de linhas reservadas para tal atividade (*laranja*) e continuam o processamento em seguida.

Caso um GPC envie um código de erro com três bits — 010, neste exemplo — ou deixe de transmitir, em quatro milissegundos, um código de erro ou um código de tarefa realizada (001), os outros três GPCs administram a falha, automaticamente cortam as comunicações com o computador defeituoso e alertam a tripulação (*à direita*). (A bordo da nave, as luzes vermelhas que aparecem no desenho são, na verdade, brancas, e as luzes verdes são espaços escuros, não iluminados.) O computador com defeito continua a operar de forma independente até ser manualmente desligado — uma forma de prevenir defeitos mecânicos no software, que podem causar o desligamento automático, em cadeia, dos GPCs.



Linhas dignas de confiança (*laranja*) transportam sincronização e códigos de erros de um computador PASS a outro. Qualquer quebra no ritmo é relatada à tripulação através dos condutores de dados (*amarelo*) que ligam todos os cinco GPCs aos painéis de controle, displays de situação, e alarmes no convés do voo (*página ao lado*).

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ● | ● | ● | ● | |
| 2 | ● | ● | ● | ● | |
| 3 | ● | ● | ● | ● | |
| 4 | ● | ● | ● | ● | |
| 5 | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ● | ● | ● | ● | |
| 2 | ● | ● | ● | ● | |
| 3 | ● | ● | ● | ● | |
| 4 | ● | ● | ● | ● | |
| 5 | | | | | |

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|---|
| 001 | 001 | 010 | 001 | ● |
|-----|-----|-----|-----|---|

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|---|
| 001 | 001 | 010 | 010 | ● |
|-----|-----|-----|-----|---|

As luzes vermelhas neste painel de chamada localizado acima do assento do comandante da nave indicam uma falha de sincronização, onde os GPCs 1, 2 e 4 informam que o GPC 3 encontra-se fora de cadência. De acordo com o GPC 3, todos os demais estão errados. Na verdade, a falha é do GPC 3, como demonstra o código de erro 010, inscrito nos pequenos quadrados desenhados abaixo do painel de chamada para representar os computadores da nave.

Neste cenário improvável, o painel de chamada na cabina revela um impasse entre os GPCs 1 e 2 e os GPCs 3 e 4. Cada par informa que outro perdeu a sincronização. Se esse impasse pusesse a nave em perigo, o comandante da missão, ou o piloto, pressionaria o botão vermelho na alavanca de comando. Imediatamente, o GPC 5, computador de reserva do sistema de vôo, assumiria as funções dos computadores PASS.



A transmissão de ordens



leme

elevon

exaustores do motor principal

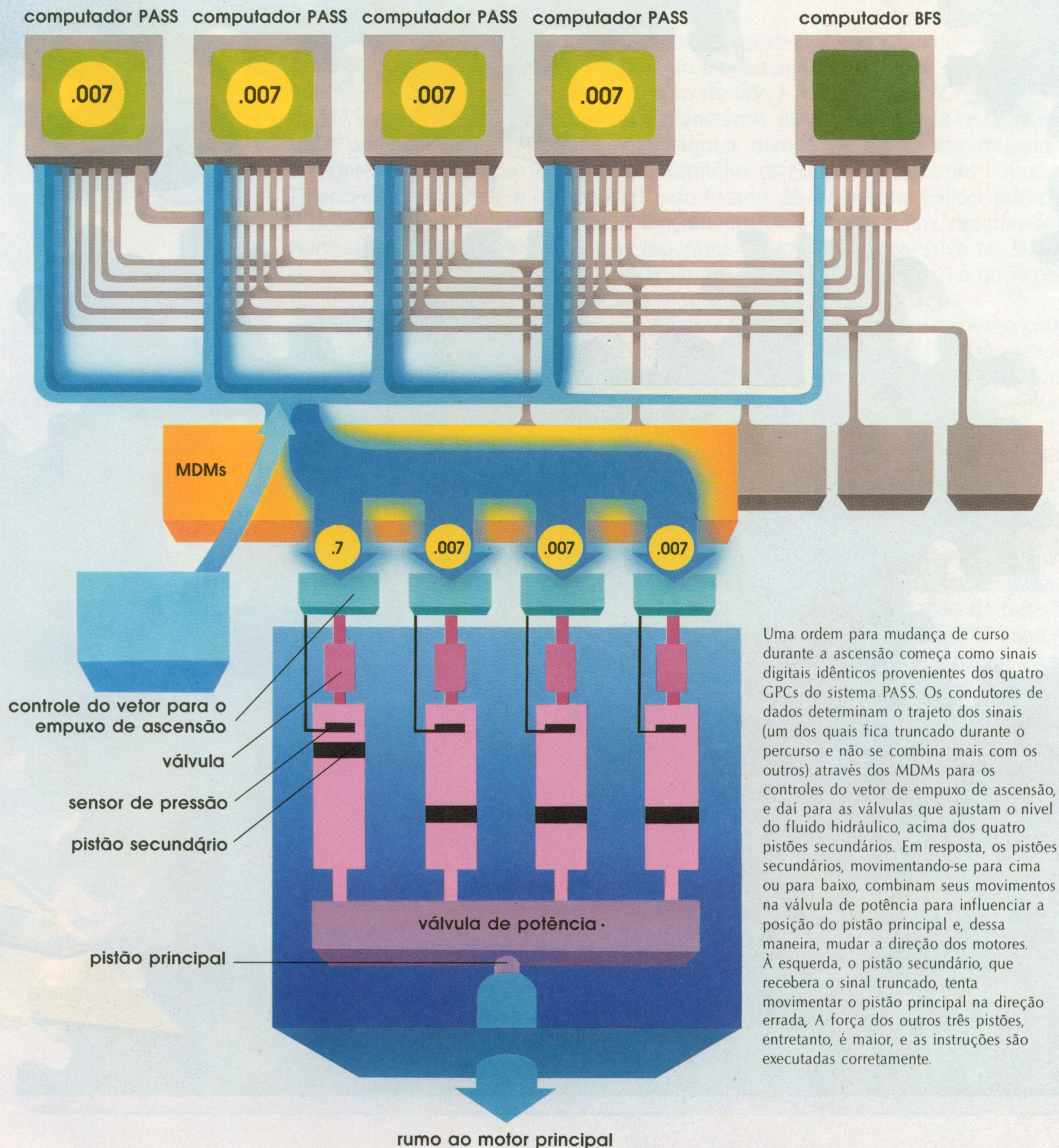
flape da fuselagem

As superfícies aerodinâmicas de controle — lemes, elevons e flapes — não dirigem a nave durante o voo no espaço. Um sistema de atuadores hidráulicos regido por computador (à direita) mantém o ônibus espacial em sua trajetória, regulando a descarga dos motores principais a fim de orientar o veículo.

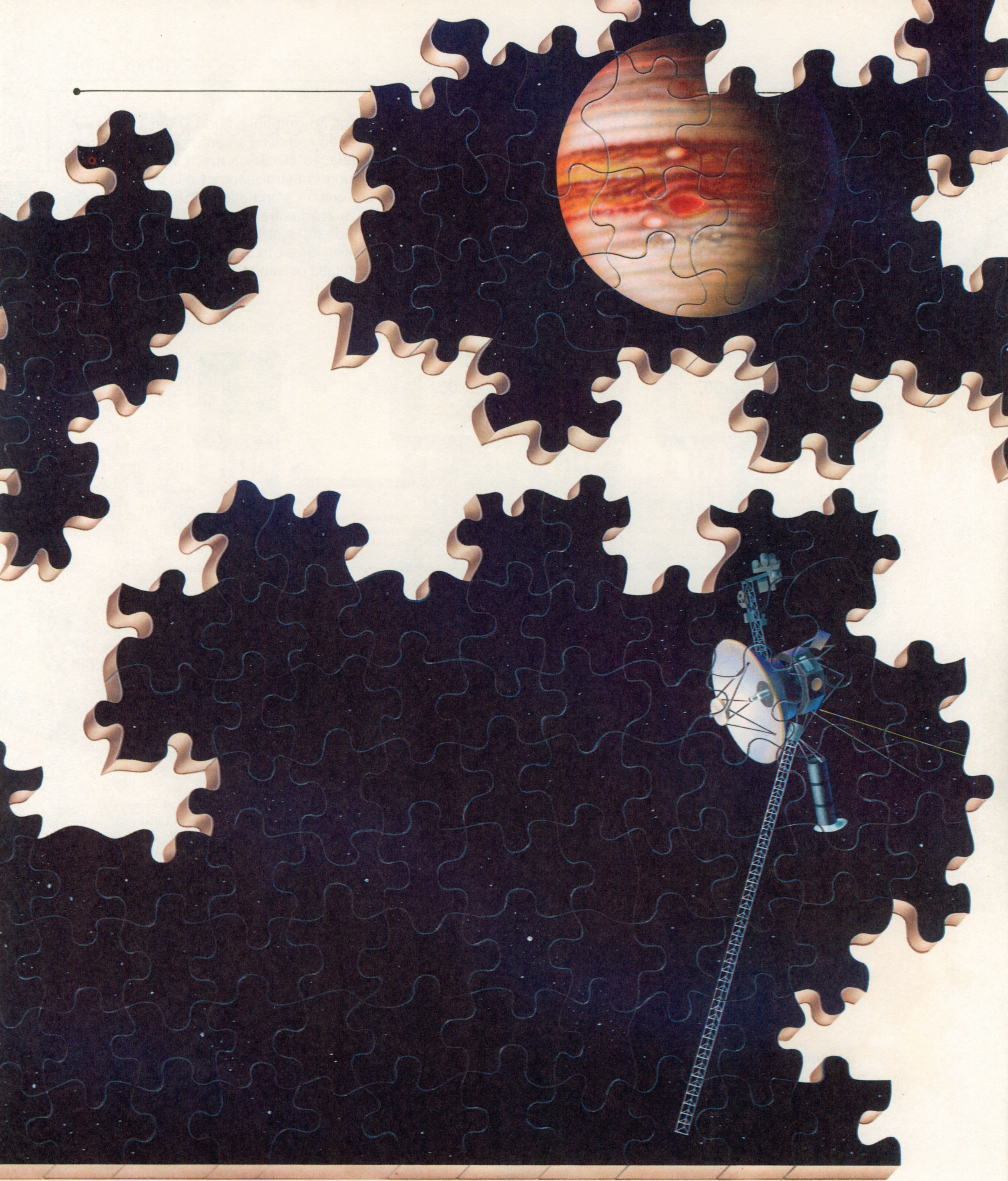
Os computadores PASS, em atividade sincronizada, transmitem ordens para as superfícies de vôo, freios e outros componentes mecânicos. Apesar de percorrerem, no máximo, algumas centenas de metros — de uma extremidade da nave a outra —, existe a possibilidade de elas chegarem ao final da viagem alteradas por alguma interferência eletrônica proveniente de uma fonte inesperada.

A fim de evitar o risco de uma interpretação errônea, as ordens de cada computador são transmitidas separadamente e combinadas apenas no último minuto. Como demonstra-

do abaixo — na ilustração simplificada do sistema que controla a nave por meio do reendereçamento da descarga dos motores —, uma instalação mecânica típica, a bordo da nave, inclui quatro atuadores intermediários. Cada um deles executa a ordem de um único computador PASS. Sensores permitem um grau de variação entre as ordens, mas descartam qualquer outro resultado diferente, desde que dentro de limites previamente estabelecidos. Um atuador principal — neste caso, um pistão — combina os esforços intermediários em uma única resposta.



Uma ordem para mudança de curso durante a ascensão começa como sinais digitais idênticos provenientes dos quatro GPCs do sistema PASS. Os condutores de dados determinam o trajeto dos sinais (um dos quais fica truncado durante o percurso e não se combina mais com os outros) através dos MDMs para os controles do vetor de empuxo de ascensão, e daí para as válvulas que ajustam o nível do fluido hidráulico, acima dos quatro pistões secundários. Em resposta, os pistões secundários, movimentando-se para cima ou para baixo, combinam seus movimentos na válvula de potência para influenciar a posição do pistão principal e, dessa maneira, mudar a direção dos motores. À esquerda, o pistão secundário, que recebera o sinal truncado, tenta movimentar o pistão principal na direção errada. A força dos outros três pistões, entretanto, é maior, e as instruções são executadas corretamente.



Reconhecimento por procuração

Local: base de lançamento 12 do Cabo Canaveral; data: 22 de julho de 1962. Aquele amanhecer quente e abafado assistiria ao lançamento da primeira sonda interplanetária norte-americana, a *Mariner I*, com destino a Vênus. Oran W. Nicks, diretor da NASA para os programas lunares e planetários, geralmente dirigia os lançamentos a partir da sala de controle. Mas naquela manhã ele estava encarregado de receber dois convidados especiais do Capitólio, os congressistas James Fulton, do Estado da Pensilvânia, e Joseph Karth, do Estado de Minnesota. Fulton, pomposo e decidido, insistira em observar o lançamento de perto. E assim, desafiando as normas de segurança, Nicks viu-se esperando a contagem regressiva no telhado da sala de controle próximo à base de lançamento 14, a menos de 1,5 quilômetro do foguete *Atlas/Agena* que lançaria a sonda *Mariner I* no espaço.

A vista era de fato impressionante. Ali estava o foguete "suspenso e ereto contra o céu escuro, um projétil magnífico, brilhante, iluminado por holofotes tão possantes que seus feixes de luz mais pareciam cordas de retenção azuladas e embranquecidas", comentaria Nicks. No instante do lançamento, às 4 horas e 22 minutos, Nicks e seus companheiros puderam sentir o ruído retumbante dos motores. Durante a impetuosa subida, eles acompanharam a trilha do escapamento à medida que o lançador descrevia um arco sobre o Atlântico. E, então, exatamente 4 minutos e 50 segundos após o lançamento, os três homens avistaram a explosão e os flamejantes despojos que iluminaram o céu.

A *Mariner I* fora destruída, vítima de um defeito causado por uma falha mínima na programação. Em primeiro lugar, uma das antenas do *Atlas* não conseguira receber sinais, e o foguete ficou impossibilitado de receber orientação da base terrestre. Tal fato em si não teria sido fatal. O *Atlas* estava equipado com um sistema de orientação de reserva programado para assumir o comando da situação, e prosseguir o lançamento. Mas justamente aí é que estava o problema: em vez de vírgula, um programador colocara um ponto final no software de orientação de reserva. De alguma forma, apesar dos vários meses de testes exaustivos, o erro havia passado despercebido e causara a virada abrupta do foguete para a esquerda, e sua queda. Por causa de um erro tipográfico o primeiro vôo espacial interplanetário dos EUA fracassara. Felizmente, a vida da *Mariner I*, ainda que breve, não foi profética. Apesar da malograda estréia, as sondas espaciais revelaram-se cada vez mais produtivas e confiáveis, o que ficou comprovado, em 1976, pelas fotografias das planícies marcianas tiradas pela nave *Viking*, e, na década de 80, pelas fantásticas vistas dos planetas Júpiter, Saturno e Urano enviadas pela nave *Voyager*. O desempenho dessas naves não tripuladas deve-se em grande parte à capacidade dos engenheiros que as planejaram e operaram.

UM NOVO NÍVEL DE EXIGÊNCIAS

As diferenças entre naves tripuladas e não tripuladas vão muito além da presença ou ausência de astronautas. Na verdade elas fazem-se muito mais evidentes nos tipos de computadores levados por cada nave. Em primeiro lugar, os computado-

res das naves não tripuladas são projetados para ter vida útil maior do que seus protótipos nos veículos tripulados: uma espaçonave não tripulada em viagem rumo às distantes regiões do sistema solar pode ter que funcionar por uma década ou mais. Como é impossível fazer reparos, os computadores de bordo precisam ser extraordinariamente dignos de confiança.

Além disso, uma sonda interplanetária é em grande parte responsável por sua própria orientação e controle. As distâncias entre os planetas tornam impossível enviar as minuciosas instruções das bases terrestres necessárias para orientar a nave em direção a um encontro planetário. Um sinal radiofônico partindo da Terra e viajando à velocidade da luz leva quase vinte minutos para percorrer os 320 milhões de quilômetros que o separam de Marte. Júpiter está a 40 minutos de Marte e Urano a 2 horas e 45 minutos. Emitir instruções de navegação a partir da Terra seria algo como fazer um técnico de futebol comunicar-se por carta com seu time. O jogo teria acabado antes mesmo de os jogadores terem sido convocados. Na verdade, caso surgisse algum problema, a nave estaria totalmente sem controle antes que seu grito por socorro chegasse à Terra. Dessa forma, cabe aos computadores de bordo manter a antena da sonda apontada para a Terra, corrigir a trajetória do veículo rumo a seu destino e apontar os instrumentos científicos em direção ao objetivo.

Os computadores das missões não tripuladas devem não somente ser auto-suficientes, mas também compactos e leves, além de consumir pouca eletricidade. A força motriz das naves interplanetárias provém de células solares ou de geradores termoelétricos de radioisótopos (RTGs, ou *radioisotope thermoelectric generators*), que transformam em eletricidade o calor dos isótopos em decomposição. Essas fontes de energia duram muitos anos, mas não produzem mais do que algumas centenas de watts.

Dessa forma, enquanto os computadores de bordo das naves tripuladas foram em geral adaptados a partir de máquinas disponíveis no mercado, as máquinas embutidas em sondas espaciais não tripuladas nasceram sob medida das pranchetas dos projetistas para enfrentar os desafios espaciais do vôo interplanetário. Uma instituição única — o JPL Jet Propulsion Laboratory, ou Laboratório de Propulsão a Jato, em Pasadena, na Califórnia — dominava o processo.

O JPL foi criado em 1936 como Guggenheim Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology (GALCIT), e era formado por uns seis estudantes interessados em balística, liderados pelo ilustre físico húngaro Theodore von Kármán. Embora jovem e inexperiente, a equipe de Von Kármán realizou pesquisas de primeira ordem. Seus avanços no campo da teoria e prática de combustíveis sólidos e líquido para foguetes — principalmente após o início da Segunda Guerra Mundial — rivalizavam-se com aqueles obtidos pela equipe sob o comando de Werner von Braun, inventor do foguete alemão V-2. Em 1944, o GALCIT já alcançara o reconhecimento e, rebatizado de Jet Propulsion Laboratory (JPL), expandiu-se, tornando-se uma organização devidamente habilitada para pesquisas, dirigida pelo Instituto de Tecnologia da Califórnia para o Corpo de Artilharia do Exército (California Institute of Technology for the Army Ordnance Corps).

Na época, as funções do laboratório praticamente se limitavam a desenvolver mísseis para uso militar. Mas a pesquisa espacial acenou mais forte. No final da década de 40, os engenheiros do JPL lançaram o foguete-sonda *WAC Corporal*, o primeiro objeto fabricado pelo homem a escapar da atmosfera terrestre. Em fins

de 1957, o laboratório construiu o *Explorer I*, lançado no espaço a bordo de um foguete *Júpiter C*, construído pela equipe de Von Braun. E, a partir do dia 1.º de janeiro de 1959, o JPL tornou-se um importante fornecedor da NASA.

Aqueles foram anos difíceis para o programa espacial norte-americano. A União Soviética ultrapassara os EUA, lançando em órbita o *Sputnik I*, em 1957 e em abril de 1961 dera um salto na corrida espacial, quando o cosmonauta Lúri Gagárin completou sua órbita pioneira em volta da Terra. Além disso, os soviéticos já haviam começado a explorar os planetas, enviando missões — naquela época sequer sonhadas pelos engenheiros do JPL — rumo a Marte e Vênus. É verdade que ambos os lançamentos soviéticos em direção a Marte falharam, em outubro de 1960, assim como um dos dois lançamentos rumo a Vênus, em fevereiro de 1961. No entanto, o segundo lançamento em direção a Vênus foi bem-sucedido: a nave soviética *Vênus I* foi a primeira a sair dos arredores da Terra e, no final de maio de 1961, passou a 100 000 quilômetros de Vênus.

CRESCENDO PARA ENFRENTAR O DESAFIO

As conquistas soviéticas desafiaram William H. Pickering, diretor do JPL. Logo após o vôo de Gagárin em 1961, Pickering autorizou um estudo interno para desenvolver uma estratégia que o ajudasse a recuperar a honra nacional. Os autores desse estudo concordaram que os esforços do laboratório deveriam ser reorientados em direção ao objetivo maior da NASA: levar o homem à Lua. Concordaram também que as metas do JPL seriam escolhidas levando em conta basicamente o prestígio nacional. Nas palavras de um membro do JPL, era “um desperdício inteligível um programa de 1 bilhão de dólares por ano cujo objetivo limitava-se a obter informações científicas sobre o espaço exterior”. Felizmente o JPL tinha dois projetos que preenchiam os requisitos: o *Ranger* e o *Surveyor*. A Lua era o objetivo de ambas as sondas: a *Ranger* deveria aproximar-se bastante para examinar a superfície do satélite e depois mergulharia rumo à destruição; a *Surveyor* pousaria suavemente na Lua para recolher amostras do solo e efetuar diversas medições, a fim de compreender as características da superfície lunar.

A *Ranger* tinha uma dupla missão. O objetivo explícito do programa era explorar locais adequados para o pouso da *Apolo*. Na época não se tinha certeza de que a superfície lunar suportaria o peso de um veículo espacial ou se os astronautas afundariam irremediavelmente em camadas de poeira. Assim, antes de colidir com a superfície da Lua, a *Ranger* mostraria o solo lunar em seus mínimos detalhes, revelando — assim se esperava — a solidez da superfície da Lua.

A segunda tarefa da *Ranger* era testar a eficácia da tecnologia indispensável para futuras missões interplanetárias, embora isso tornasse a espaçonave desnecessariamente complicada. A *Ranger*, por exemplo, receberia energia através de células solares, embora uma viagem de 66 horas rumo à Lua pudesse ser realizada utilizando-se baterias. Além disso, seria equipada com uma antena ultra-sensível, ou de alto ganho, para comunicação com os controladores da missão lotados no JPL, embora dispositivos menos sensíveis fossem igualmente adequados a uma viagem de 500 milhões de quilômetros. A dificuldade com a antena de alto ganho está em sua direcionalidade. A *Ranger* teria que manter uma atitude invariável de modo que a antena ficasse apontada diretamente para a Terra. Um mínimo desvio e as comunicações com a sonda seriam interrompidas. Por outro lado, as câmeras e outros instrumentos de observação se beneficiariam da plataforma estável.

Em virtude disso, a *Ranger* usaria uma técnica conhecida como estabilização por três eixos, que a impediria de inclinar-se em sentido longitudinal, movimentar-se em torno do eixo de rotação ou desequilibrar-se direcionalmente durante o vôo. A *Ranger* deveria orientar-se tendo como referência o Sol, uma estrela ou um planeta. Instrumentos altamente sofisticados e uma série de sensores para controle de atitude e de empuxadores seriam necessários para que a sonda encontrasse seus sinalizadores celestes sem o auxílio humano.

Como se tais complicações não fossem suficientes, a *Ranger* também transportaria seu próprio centro de comando eletrônico. Ele serviria principalmente como backup para os controladores de vôo lotados na Terra, uma vez que seus sinais radiofônicos levariam apenas 1,3 segundo para percorrer a trajetória da Terra à Lua. Esse computador e seqüenciador central pesando 5 kg foi resultado do desenvolvimento de mecanismos semelhantes usados nos projetos de foguete do JPL. Apesar do nome, o seqüenciador era mais um cronômetro digital do que um computador: não possuía unidade central de processamento (CPU), o coração de um computador. Além disso, seguia apenas um conjunto de instruções ligado previamente a sua memória. Por isso, ficou conhecido como seqüenciador fixo.

No início da década de 1960, entretanto, o seqüenciador da *Ranger* era um prodígio de automação. Algumas horas antes do lançamento, um relógio interno começaria a contagem regressiva para zero, até o momento de a nave chocar-se com o solo lunar. Durante a viagem, o seqüenciador comandaria a atividade a bordo da espaçonave de acordo com um programa previamente estabelecido. O mecanismo, por exemplo, controlaria a orientação da nave por meio do sistema de estabilização de três eixos, dirigiria os intervalos de acionamento da propulsão durante as manobras para correção de trajetória e ligaria as câmeras no momento em que a sonda se aproximasse da Lua.

A menos que o seqüenciador fosse reconstruído, a ordem dos acontecimentos não poderia ser alterada, embora os controladores da missão lotados na Terra pudessem assumir o controle da espaçonave. Além disso, os controladores poderiam passar para o seqüenciador quatro informações cruciais para realização de uma manobra chamada correção a meio curso, cuja finalidade era ajustar a trajetória da *Ranger*, fazendo-a colidir com a Lua conforme os planos. Para realizar essa manobra, os planejadores do seqüenciador deixaram em branco quatro locais na memória da máquina. Pouco antes da correção a meio curso os espaços em branco seriam preenchidos com números, transmitidos da Terra. O seqüenciador usaria a informação para acionar os foguetes da *Ranger*, ajustando sua trajetória.

No inverno de 1961, após vários meses de trabalho intensivo, o JPL estava com a *Ranger I* pronta para partir. O lançamento, em 23 de agosto, no entanto, foi decepcionante. Um foguete auxiliar com defeito impulsionou a nave incorretamente e a *Ranger I* caiu em espiral, desintegrando-se na atmosfera terrestre. Três meses mais tarde, o mesmo aconteceria com a *Ranger II*. A *Ranger III*, após um lançamento aparentemente perfeito em 26 de janeiro de 1962, começou a desviar-se de seu curso. Uma análise posterior revelou um erro de programação que distorceu a trajetória da nave, em uma imagem às avessas do curso que deveria ter sido tomado. Os engenheiros no JPL enviaram, com sucesso, correções de curso através de rádio, mas, dois dias depois — justamente quando a *Ranger III* alterava seu curso para a aproximação final com a Lua — o sinal de rádio começou a flutuar

sem controle. Uma falha no seqüenciador fez com que a nave começasse a bascular, desviando a antena da direção terrestre. Incapazes de recuperar o controle da sonda, os engenheiros do JPL assistiram, impotentes, à passagem da *Ranger III* a 37 000 quilômetros de distância da Lua, em direção à órbita solar.

A *Ranger IV* parecia mais promissora — à primeira vista. O lançamento e o vôo foram perfeitos. Nem mesmo uma correção a meio curso foi necessária. Porém o relógio principal do seqüenciador falhou quando a nave se aproximava da Lua e em 26 de abril de 1962 a *Ranger IV* chocou-se contra a superfície oculta do satélite, sem enviar sequer uma fotografia.

MARINER: FINALMENTE UM SUCESSO

A ladainha de fracassos do Projeto Ranger refletiu-se em outro projeto de exploração espacial do JPL — as sondas *Mariner* enviadas para o mais próximo vizinho da Terra, o planeta Vênus. Com desenho semelhante ao da *Ranger*, a *Mariner* fora desenvolvida mais ou menos na mesma época, por uma outra equipe do JPL, e deveria ser a primeira espaçonave interplanetária norte-americana. Seu destino era aventurar-se por espaços longínquos. E a tecnologia que causara a maior parte dos infortúnios das sondas *Ranger* agora fazia-se imprescindível.

A viagem de 72 milhões de quilômetros até Vênus exigia antenas de alto ganho. E, com um intervalo de até catorze minutos entre a transmissão e o recebimento de uma ordem proveniente da Terra, os controladores baseados nos centros terrestres funcionariam como backup para o seqüenciador de bordo. Em outras palavras, um parente próximo do seqüenciador, que já falhara duas vezes, deveria agora assumir a responsabilidade total de uma missão.

O Programa *Mariner* parecia destinado a reproduzir a série de humilhações que haviam marcado o desenvolvimento do Projeto Ranger. O vôo breve e incendiário da *Mariner I* ocorreu apenas três meses após o fracasso da *Ranger IV*. Todavia, o lançamento da *Mariner II*, em 27 de agosto de 1962, marcou a reviravolta. Após 108 dias de funcionamento quase perfeito, a *Mariner II* passou a 34 000 quilômetros da superfície de Vênus. Entre as várias descobertas, a sonda revelou que a temperatura da superfície do planeta coberta pelas nuvens atingia 430°C. Longe de ser o planeta coberto de pântanos cheios de vapor da ficção científica, Vênus era realmente um inferno fervente.

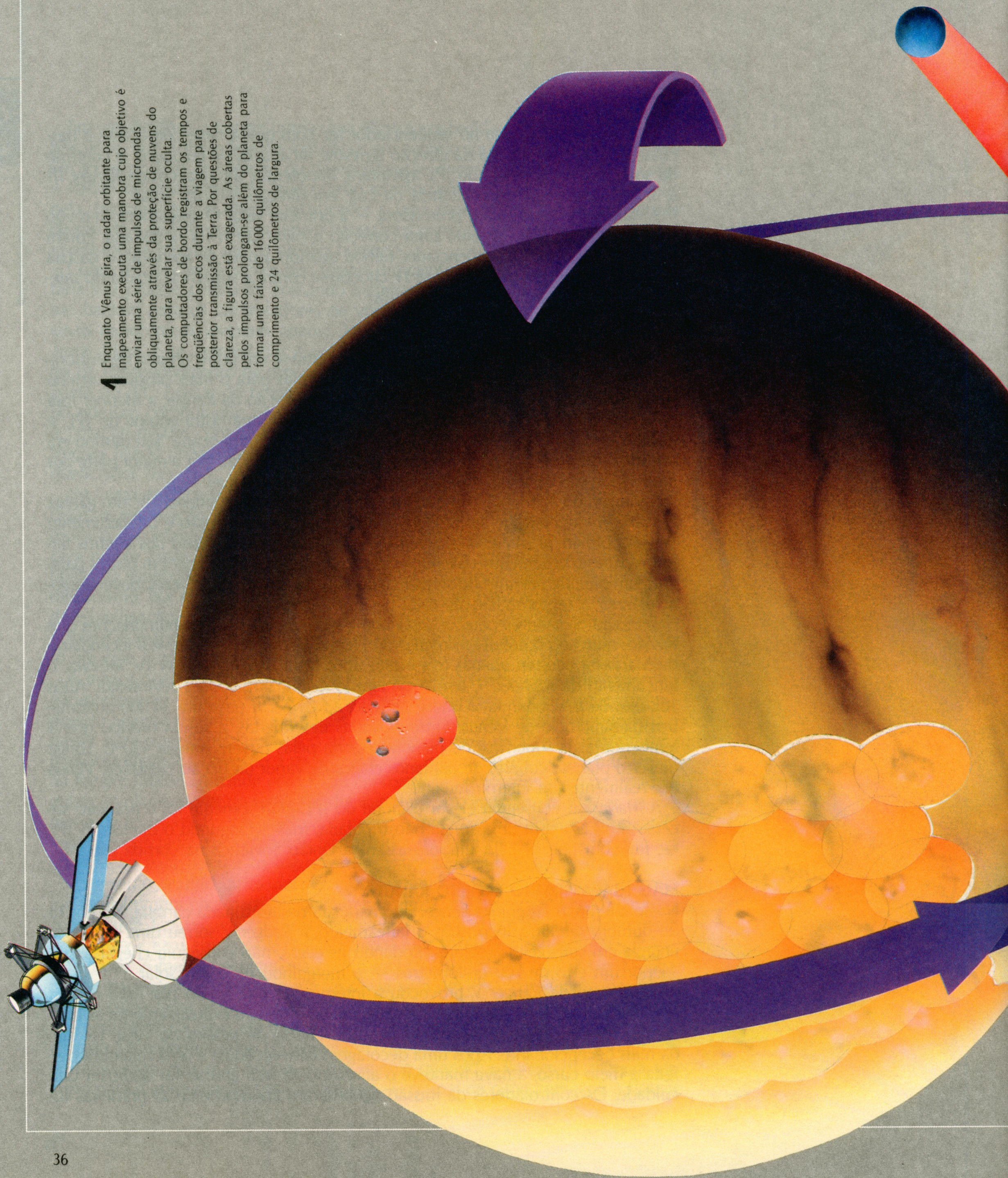
A *Mariner II* conseguiu elevar o moral do JPL. Não somente foi o primeiro sucesso dos EUA com uma sonda não tripulada, mas — segundo o diretor do JPL —, fez com que os EUA ultrapassassem a União Soviética na corrida espacial.

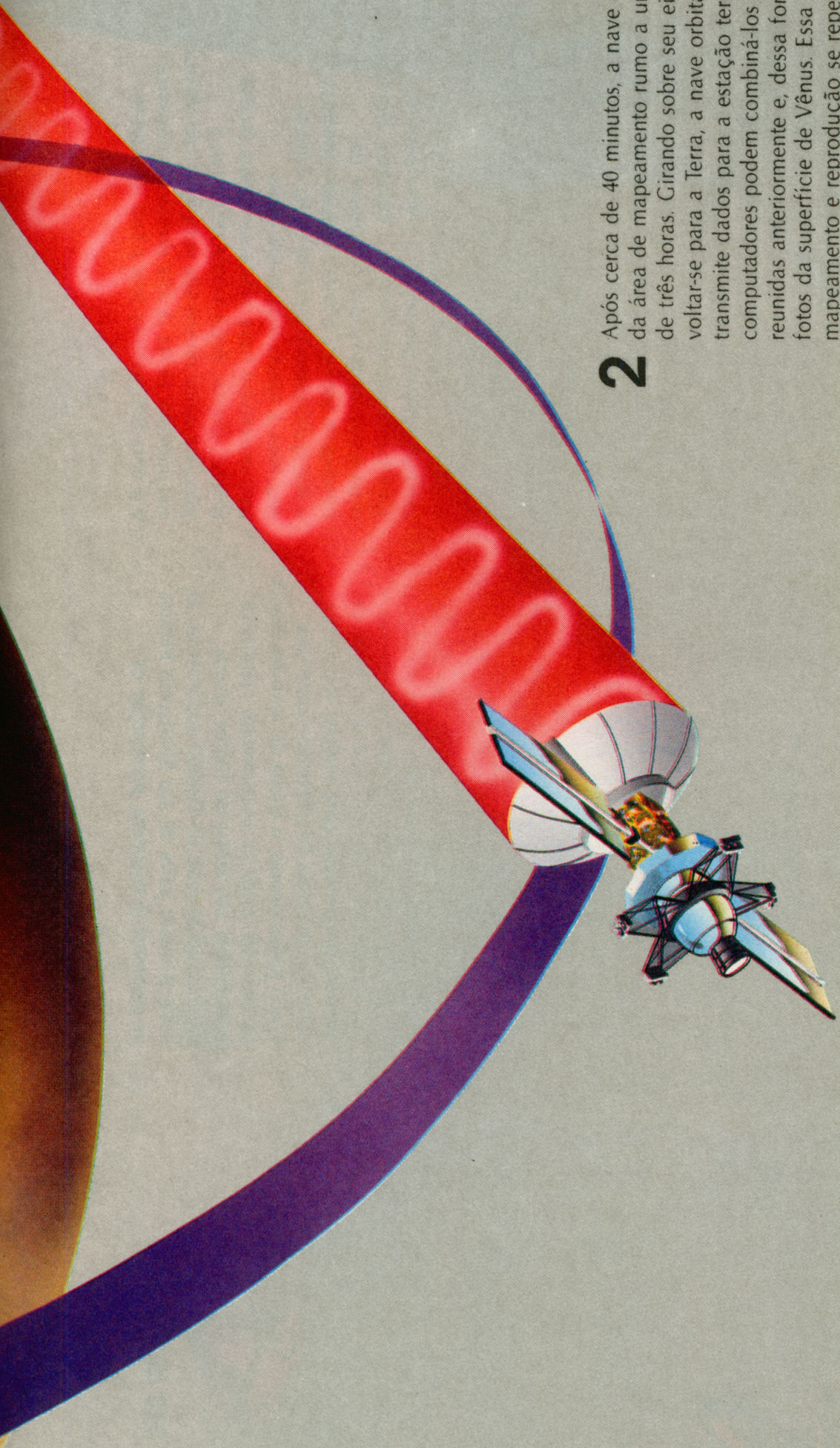
MAIS FRACASSOS NO PROJETO RANGER

Nesse ínterim, o Programa Ranger retomara sua desafortunada carreira. No dia 18 de outubro de 1962, logo após o lançamento, a *Ranger V* sofreu uma perda de energia em suas células solares. Rodando às cegas, não conseguiu chegar à Lua — por um erro de 700 quilômetros — e mergulhou na órbita solar.

O fracasso da *Ranger V* provocou a interrupção do projeto por mais de um ano enquanto o JPL redesenhava a espaçonave e testava exaustivamente as alterações. Mesmo assim, a *Ranger VI*, lançada em 30 de janeiro de 1964, foi ainda mais decepcionante. Após uma decolagem bem-sucedida e uma manobra perfeita a meio curso, a nave manteve o alinhamento sem apresentar qualquer dificuldade. Os controladores da missão aguardaram ansiosamente as primeiras fo-

1 Enquanto Vênus gira, o radar orbitante para mapeamento executa uma manobra cujo objetivo é enviar uma série de impulsos de microondas obliquamente através da proteção de nuvens do planeta, para revelar sua superfície oculta. Os computadores de bordo registram os tempos e frequências dos ecos durante a viagem para posterior transmissão à Terra. Por questões de clareza, a figura está exagerada. As áreas cobertas pelos impulsos prolongam-se além do planeta para formar uma faixa de 16.000 quilômetros de comprimento e 24 quilômetros de largura.





2 Após cerca de 40 minutos, a nave orbitante afasta-se da área de mapeamento rumo a uma órbita elíptica de três horas. Girando sobre seu eixo a fim de voltar-se para a Terra, a nave orbitante (à esquerda) transmite dados para a estação terrestre, onde os computadores podem combiná-los com informações reunidas anteriormente e, dessa forma, produzir fotos da superfície de Vênus. Essa seqüência de mapeamento e reprodução se repetirá durante 243 dias — o tempo que Vênus demora para completar uma única volta sobre seu eixo.

Impressões minuciosas de planetas distantes

Por sua própria natureza, a exploração espacial segue um curso oposto àquele adotado por muitas gerações de exploradores que se aventuraram pelo nosso planeta. Incapazes, no início, de fazer observações e medições detalhadas sobre a superfície dos corpos planetários, os cientistas espaciais conseguiram obter essas informações a partir de naves de reconhecimento, como as sondas *Mariner*, enviadas a Marte e a Vênus, e as missões *Voyager*, que tomaram o rumo de planetas mais distantes. Essas missões constituem a primeira fase dos estudos planetários.

Nestas páginas e nas seguintes, figuram sondas planejadas para executar a segunda fase da investigação: o estágio exploratório. Durante esse estágio, os cientistas tentam determinar aspectos como a dinâmica da atmosfera de um planeta e seu histórico geológico. O mapeamento da superfície de um planeta pressupõe que a sonda permaneça em órbita tempo bastante para gravar dados de pelo menos 70 por cento da superfície, e com grau de resolução suficiente para detectar características importantes como imperfeições, dobras, cones e derrames de lavas.

Instrumentos ópticos são bastante adequados para corpos celestes com pouca ou nenhuma atmosfera. Entretanto, outras tecnologias fazem-se necessárias para observar planetas ou satélites com atmosfera densa. A nave orbitante do planeta Vênus (*acima*), por exemplo, é projetada para trans-

portar um sistema de radar capaz de penetrar as espessas nuvens de dióxido de carbono e ácido sulfúrico do planeta.

Um radar normal mapearia uma parte da superfície do planeta, transmitindo um único impulso de microondas através das nuvens. Dependendo do terreno no campo de visão do radar, o impulso se espalharia em várias direções. A captação de uma quantidade suficiente desses ecos, a partir de um único impulso de radar, para fornecer um mapa detalhado exigiria uma antena com muitas centenas de metros de diâmetro. Tal estrutura evidentemente não funcionaria na sonda de Vênus ou em qualquer outra. A solução é um sistema de coleta de dados denominado radar de abertura sintética (SAR, ou *synthetic-aperture radar*).

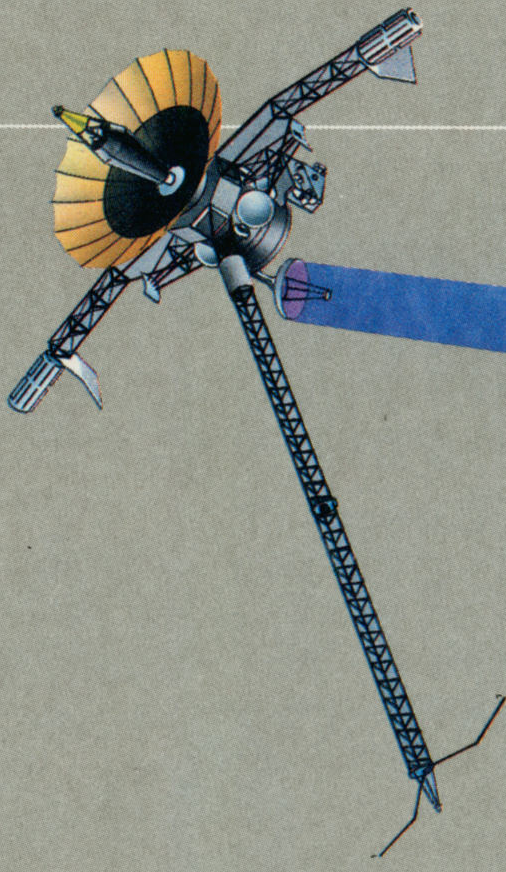
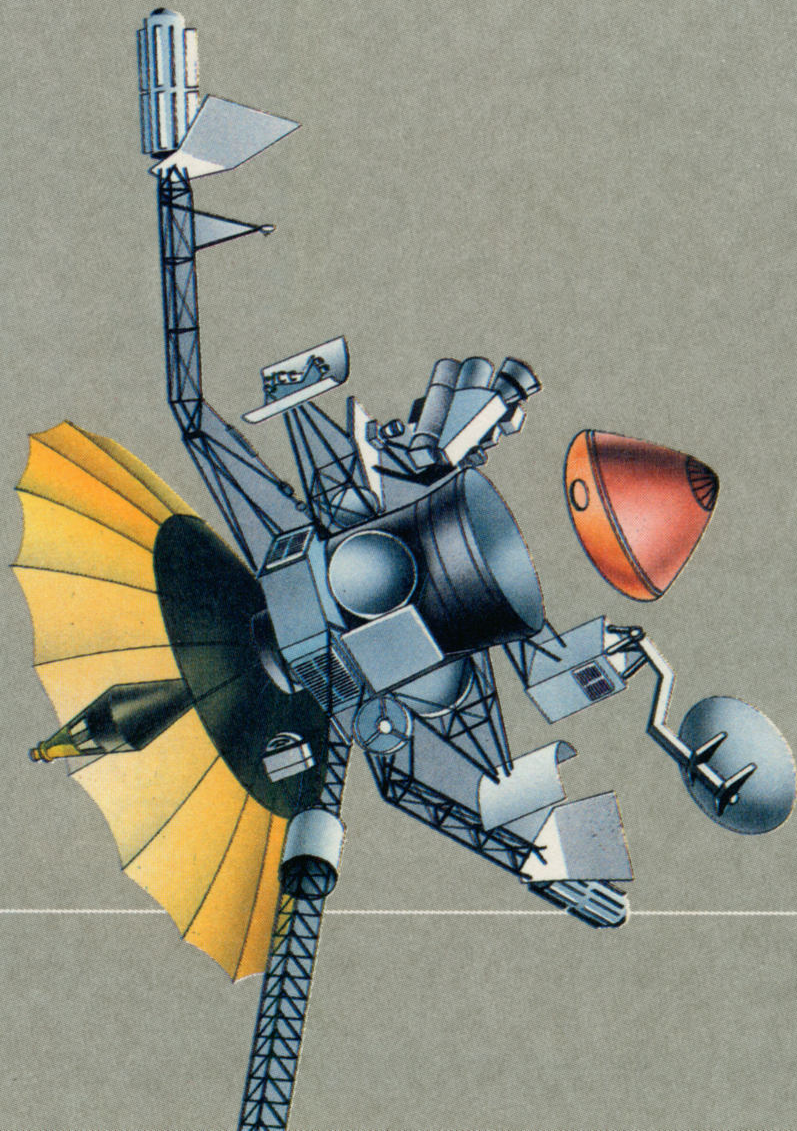
Utilizado durante anos pelos aviões militares de reconhecimento, o SAR permite que a antena da nave orbitante de Vênus — com apenas alguns metros de diâmetro — funcione como se fosse centenas de vezes maior. A antena capta apenas alguns ecos de cada impulso, que serão gravados, e um outro impulso é transmitido. Na Terra, os dados acumulados serão processados pelo computador que os transforma em imagens tão ricas em detalhes quanto as imagens fornecidas por um sistema de radar com abertura real equipado com uma antena de centenas de metros de largura.

Os planetas sem segredo

Sondas como a nave orbitante de Vênus para mapeamento de superfície demonstrada nas páginas anteriores podem recolher uma grande quantidade de informações a distância. Para os estudos sobre a composição da dinâmica da atmosfera de um planeta ou a composição de corpos menores como cometas e asteróides (box), no entanto, outros instrumentos são necessários. A observação minuciosa que esse tipo de tarefa exige será levada a cabo por uma sonda de entrada. Comparada a uma nave orbitan-

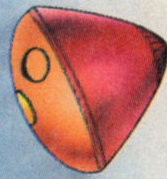
te, a sonda de entrada tem um tempo de vida bastante breve, pois pressões atmosféricas, nuvens quimicamente corrosivas e altas temperaturas podem danificá-la em apenas algumas horas.

A missão rumo a Júpiter, planejada para o início da década de 90, deverá extrair o máximo desses equipamentos, com uma nave composta de duas partes. Vários meses antes da chegada, a espaçonave irá separar-se em duas: uma nave orbitante, que rumará diretamente para o planeta. Cerca de 190 000 quilômetros acima das nuvens — a maior aproximação da nave orbitante — a sonda de entrada descerá e penetrará a atmosfera superior do planeta. Aproximadamente uma hora depois, o elo de comunicação será interrompido devido a interferências meteorológicas, radiação intensa e aumento da distância, e finalmente a pressão atmosférica — cem vezes superior à da Terra — esmagará a sonda.

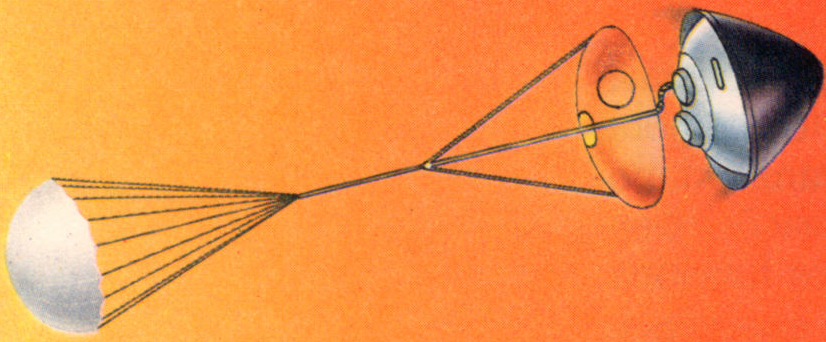


Prestes a encontrar-se com Júpiter, uma nave não tripulada (acima, à esquerda) se divide em duas partes: uma nave orbitante remota — que circundará o planeta —, e uma sonda de entrada, programada para realizar a primeira amostragem direta da atmosfera jupiteriana. Cinco meses depois, a sonda de entrada deverá calibrar sua carga de instrumentos científicos e mergulhar nas ondas de Júpiter a uma velocidade de mais de 160 000 quilômetros por hora. A maior parte de sua blindagem térmica se queimará (à esquerda, penetração de

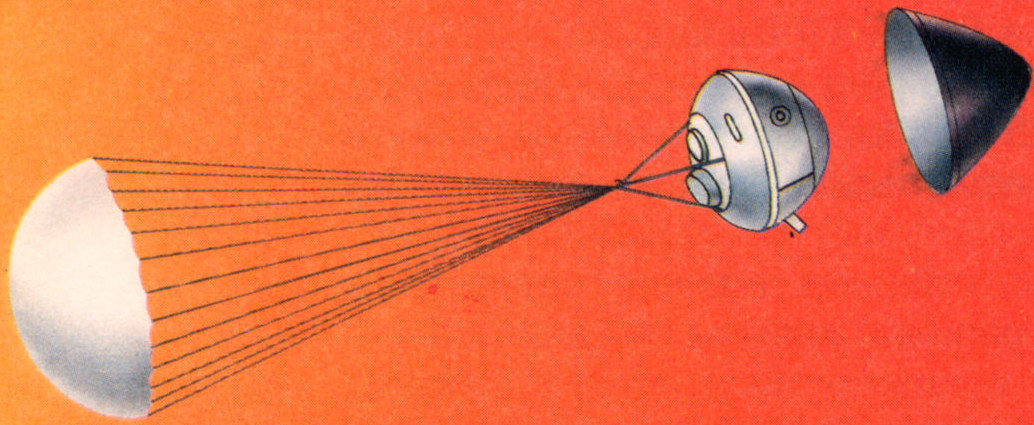
0-380 km). Enquanto a trajetória de descida predeterminada prossegue, a sonda abre seu pára-queidas-piloto, levando a capota e abrindo o pára-queidas principal. O restante da blindagem térmica é então expelido (penetração a 400 quilômetros). Durante os 60 minutos seguintes a sonda transmitirá dados instrumentais à nave orbitante remota (acima, à direita). Depois dessa coleta de dados, a pequena sonda de entrada mergulhará no silêncio, sucumbindo, enfim, à alta pressão atmosférica e a uma temperatura que a fará derreter-se.



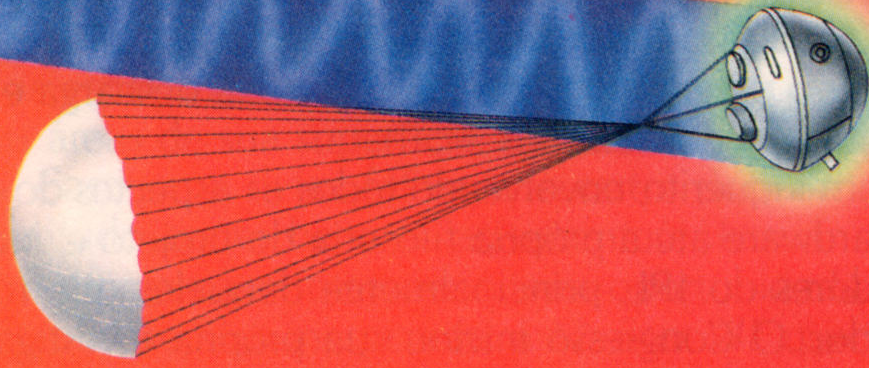
380 quilômetros



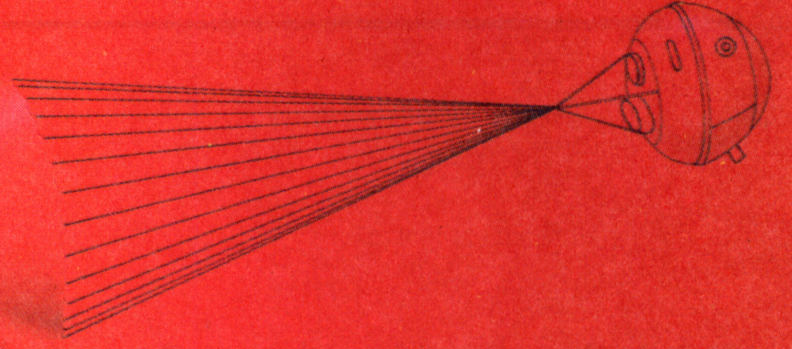
390 quilômetros



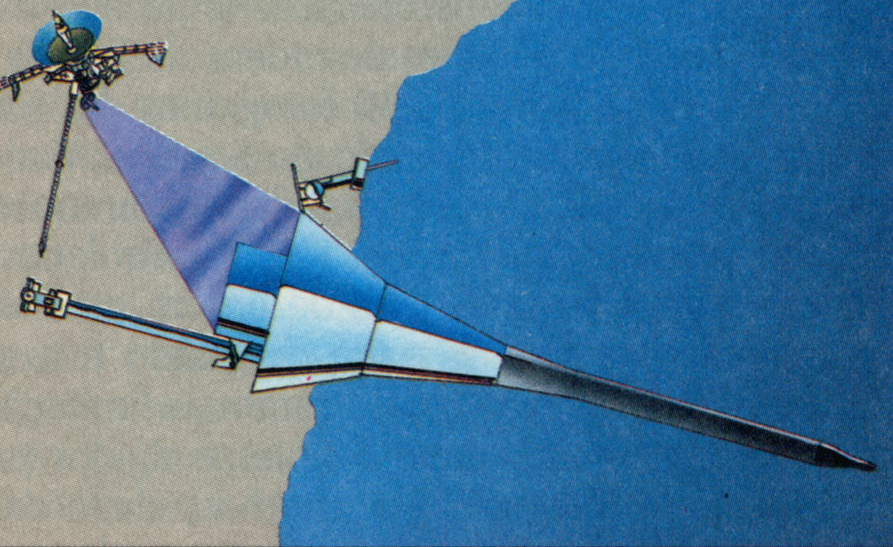
400 quilômetros



405 quilômetros



580 quilômetros



Um prego no gelo

Os cientistas estão ansiosos para determinar a composição química e as propriedades físicas do núcleo dos cometas que se classificam entre os produtos mais bem conservados dos processos que formaram o sistema solar. Para essa tarefa utilizam-se sondas de penetração. O penetrador à esquerda, equipado com diversos instrumentos, foi planejado para ser instalado por uma nave transportadora, que, em seguida, se encarregará de enviar suas descobertas para a estação terrestre. Cravado a poucos metros de profundidade, o penetrador atravessa a crosta superficial do cometa, até atingir a matéria mais profunda.

tos da Lua, no entanto as câmeras da sonda simplesmente não funcionaram.

O desastre foi o grande assunto da imprensa. O detetive de estórias em quadrinho, Dick Tracy, resolveu o mistério durante um cruzeiro para a Lua: "É fácil saber por que as câmeras falharam. Elas nunca foram ligadas", comentou. E ele tinha razão. Descobriu-se que o defeito fora causado por uma descarga elétrica que havia danificado as fontes de alta tensão.

A NASA instaurou um inquérito, envolvendo todos os aspectos do Programa Ranger, dos defeitos do hardware até a própria filosofia do projeto e, inclusive, a competência dos planejadores do JPL, principalmente daqueles que trabalhavam na equipe do seqüenciador. O Congresso iniciou sua própria investigação. O futuro do laboratório estava em perigo.

Após meses de revisão acompanhada de repetidos testes e análises, retomou-se o esforço para chegar à Lua. Em 28 de julho, a *Ranger VII* foi lançada com sucesso, realizou sua conexão a meio curso e dirigiu-se para seu alvo. O dia previsto para a chegada era 31 de julho, às 6 horas e 25 minutos. Pouco depois das 6 horas da manhã, duas das seis câmeras da espaçonave responderam ao seqüenciador e começaram a se preparar.

· Às 6 horas e 10 minutos, foi a vez das quatro câmeras restantes começarem a se preparar, e então sinais representativos das primeiras imagens chegaram à Terra. O porta-voz do vôo irradiava, passo a passo, o sucesso: "Dois minutos, todos os sistemas funcionando. Análises preliminares mostram as fotografias sendo recebidas. Um minuto para a *Ranger* chocar-se com a Lua. Excelente. Fim dos sinais. Impacto!"

A telemetria da *Ranger VII*, zumbindo nos alto-falantes, cedeu lugar ao suave sibilar da estática interplanetária enquanto os engenheiros e cientistas comemoravam. Alguns funcionários do JPL lançaram papéis ao ar. Alguns choraram. O laboratório comemoraria outros sucessos. Missões mais avançadas e investigações científicas mais proveitosas se sucederiam. Mesmo assim, para muitos dos funcionários presentes naquele dia, o triunfo da *Ranger VII* permaneceria uma experiência inigualável.

Durante os anos seguintes, os seqüenciadores realizaram trabalhos perfeitos em várias sondas *Mariner* e *Ranger*, mas o dispositivo a bordo da nave *Surveyor I*, conseguiu proezas que a tornaram famosa. No dia 1º de julho de 1966, a *Surveyor I* pousou suavemente na Lua, tocando a cratera Oceanus Procellarum. Pela primeira vez uma espaçonave havia pousado tranquilamente em outro corpo celeste. A *Surveyor I* provou que a superfície da Lua poderia de fato suportar o peso de uma espaçonave. Em 28 dias de operação impecável na cratera, o seqüenciador de bordo *Surveyor I* recebeu milhares de ordens da Terra e executou-as sem erros. Além disso, enviou para a Terra 11240 fotografias das paisagens lunares. Em setembro de 1967, o seqüenciador de bordo da *Surveyor V* ajudou a transformar um iminente desastre em sucesso. A máquina identificou um vazamento de combustível durante a fase intermediária da missão; os controladores lotados no JPL imediatamente enviaram por rádio uma série de ordens modificadas e a *Surveyor V* pousou na superfície lunar como se nada de errado tivesse acontecido.

Essas façanhas apenas enfatizaram as limitações dos seqüenciadores existentes. Os dispositivos eram muito simples e rígidos para os tipos de missões que o JPL planejava para o futuro. Neil Herman, chefe da equipe encarregada do seqüenciador para o programa *Mariner*, estava plenamente convencido de que chega-

ra o momento de adotar novas medidas: um seqüenciador com memória adicional, capaz de se reprogramar mesmo depois que a missão estivesse em curso.

Herman fez sua solicitação no momento em que o JPL planejava um vôo conjugado das naves *Mariner VI* e *VII*, programado para 1969. Conhecido como *Mariner Mars 69*, as espaçonaves gêmeas deveriam passar pelo planeta Marte e fotografar extensas áreas de sua superfície. Enviar duas espaçonaves era uma questão de segurança. Caso uma delas falhasse, a outra poderia concluir a missão. Mas na hipótese de tudo correr bem — argumentou Herman — a utilização de um seqüenciador reprogramável ofereceria uma oportunidade única. Supondo que a *Mariner VI* descobrisse algo inesperado, a *Mariner VII*, que viria atrás com poucos dias de diferença, poderia receber instruções novas para investigar o assunto. Como as *Mariner VI* e *VII* seriam de qualquer forma maiores e mais pesadas do que qualquer sonda anterior, o espaço e o peso adicionais seriam usados para instalar um seqüenciador mais potente.

A lógica de Herman era incontestável e os trabalhos com o novo seqüenciador começaram quase imediatamente. Cerca de trinta meses depois ele estava construído, testado e pronto para funcionar. O novo dispositivo recebera memória para 128 palavras e podia ser totalmente reprogramado, conforme a sugestão de Herman. Para lidar com essa habilidade adicional, o seqüenciador foi dotado de uma unidade central de processamento. Com o acréscimo da CPU o seqüenciador aproximava-se ainda mais de um computador. Entretanto, suas capacidades aritméticas e lógicas ainda eram limitadas — suficientes para separar os segundos por contagem, mas insuficientes para qualificá-lo como um verdadeiro computador.

O novo seqüenciador pesava 12 kg. Mesmo assim, ainda havia espaço a bordo de cada uma das naves gêmeas suficiente para transportar um seqüenciador fixo de 5 kg, semelhante ao da *Mariner II*, na viagem rumo a Marte.

Pela primeira vez haveria um computador de reserva a bordo de um veículo espacial não tripulado. Em determinadas manobras críticas — como correções a meio curso — os dois seqüenciadores executariam as mesmas tarefas simultaneamente, sob o comando do seqüenciador programável. Se as duas máquinas concordassem com os resultados, a espaçonave realizaria a manobra. Caso contrário, a manobra seria automaticamente adiada até que os controladores de Terra descobrissem o problema e novas diretrizes pudessem ser enviadas por rádio.

A memória reprogramável do seqüenciador revelaria seu valor em grande parte por razões inimagináveis na época que fora concebida. A exemplo do que ocorreria nos programas tripulados, aqueles que levariam a *Mariner* até o planeta Marte logo excederiam a nova memória expandida do seqüenciador. Dessa forma, tornou-se necessário dividir os programas em segmentos que os controladores da missão se incumbiriam de carregar na memória quando necessário. Essa solução teria sido virtualmente impossível sem a memória reprogramável.

A viagem rumo a Marte começou com o lançamento da *Mariner VI* em fevereiro de 1969. No mês seguinte, seria a vez da *Mariner VII*. O novo seqüenciador demonstrou sua versatilidade de uma forma bastante dramática. No momento em que a *Mariner VI* completava a passagem pelo planeta, sua companheira, a *Mariner VII*, de repente, começou a rolar sem controle pelo espaço. Posteriormente os engenheiros detectariam a causa do problema: uma pequena explosão na bateria de acumuladores da sonda. No entanto, embora a equipe técnica do JPL fosse capaz de contatar a nave e reorientá-la, as rotações haviam de-

salinhado a plataforma da câmera. O encontro da nave *Mariner VII* com Marte corria sérios riscos. A espaçonave só conseguiria produzir imagens do vácuo.

Os engenheiros do JPL começaram a trabalhar de imediato e enviaram por rádio novas ordens para o seqüenciador da *Mariner VII*: acionar a câmera grande-angular antes do tempo previsto, e depois girá-la lentamente em movimento panorâmico através do espaço. Finalmente a grande-angular captou a imagem de Marte, e os controladores puderam reorientar as câmeras para seu objetivo. Isso feito, a tripulação lotada no JPL reavaliou os sistemas de energia e de controle de atitude, os instrumentos científicos e até o próprio seqüenciador e certificou-se de que tudo estava em ordem a bordo da espaçonave.

NOVOS ÂNGULOS DE UM ANTIGO VIZINHO

As sondas envolvidas no *Mariner Mars 69* transmitiram 201 imagens do planeta vermelho, cobrindo aproximadamente 10% de sua superfície. As fotografias foram uma revelação para os cientistas. As poucas imagens nubladas enviadas quatro anos antes pela *Mariner IV* mostravam um planeta repleto de crateras, muito semelhante à Lua. As fotos das *Mariner VI* e *VII* revelaram que Marte também possuía enormes desertos, terrenos elevados, sulcos e vales, muitas vezes sem crateras. Até calotas polares de gelo seco — dióxido de carbono congelado, o componente predominante da atmosfera marciana — apareceram nas imagens.

Revelações ainda mais surpreendentes, entretanto, estavam reservadas para os próximos vôos *Mariner*, em 1971. As naves *Mariner VIII* e *IX* — conhecidas conjuntamente como *Mariner Mars 71* — entrariam na órbita de Marte e mapeariam detalhadamente sua superfície. Seriam as primeiras invenções humanas a descrever órbita em torno de outro planeta. Um motor de empuxo pesando 135 kg foi fixado à nave, a fim de reduzir a velocidade da sonda e fixá-la em órbita tão logo tivesse atingido o planeta Marte. As câmeras de televisão e o sistema de controle de atitude também foram incrementados e aumentou-se ainda mais a capacidade da memória no seqüenciador reprogramável.

Ainda uma vez, a capacidade de programação do seqüenciador da *Mariner* seria crucial para o sucesso da missão. Como um alerta para os cientistas, lembrando-os de que os foguetes ainda poderiam ser traiçoeiros, a *Mariner VIII* teve morte prematura. Em 5 de maio de 1971, um foguete auxiliar defeituoso falhou ao conduzir a nave para a órbita terrestre. A *Mariner IX*, lançada com sucesso em 30 de maio de 1971, de alguma forma teria que executar sozinha a missão. Os cientistas e programadores do JPL voltaram ao trabalho para planejar uma série de observações híbridas cujo objetivo era salvaguardar ao máximo o plano original.

TEMPESTADE DE POEIRA AMARELA

Mas os novos planos também teriam que ser abandonados. Em fins de setembro de 1971, a *Mariner IX* percorrera dois terços da trajetória rumo a Marte, quando observou-se uma nuvem amarela brilhante no hemisfério sul de Marte — a pior tempestade de poeira jamais registrada. Em dois dias ela havia se espalhado e envolvido todo o planeta. No dia 13 de novembro, a espaçonave finalmente entrou na órbita de Marte, e encontrou a superfície do planeta totalmente obscurecida. A *Mariner IX* esperou três meses para que a poeira se dissipasse. Durante esse tempo, os controladores da missão reprogramaram a nave para um modo de reconhecimento que incluía explorações globais do planeta em cada órbita,

seguidas por esforços para que pudessem ser focalizados alvos em áreas mais claras.

Dissipada a poeira, a *Mariner IX* foi reprogramada para o modo de mapeamento e durante os nove meses seguintes descreveu Marte para os seres humanos. O planeta mostrou ser uma colcha desordenada de atividade geológica, que fazia qualquer acidente da natureza na Terra parecer insignificante. O Olympus Mons, por exemplo, é um vulcão maciço, com a base de cerca de 180 000 quilômetros quadrados e 24 quilômetros de altura, quase três vezes maior do que o Monte Everest. O Valles Marineris (Vale dos Marinheiros), uma fenda com 6 quilômetros de profundidade, 640 quilômetros de largura e quase 4 800 quilômetros de comprimento, faz o Grand Canyon parecer uma pequena valeta. Mais impressionantes, porém, talvez sejam os canais sinuosos e trançados, serpenteando através da face do planeta, como vales de rio. Aparentemente, em outras épocas a água jorrava em abundância na árida superfície de Marte.

Se houvesse necessidade de confirmação adicional sobre o valor da memória programável, ela teria surgido sob a forma de uma sonda russa enviada para Marte por volta da mesma época. Conhecida como *Mars II*, possuía um seqüenciador não-programável. Antes da tempestade de poeira, as câmeras cumpriram a tarefa previamente estabelecida. A transmissão, porém, era desprovida de interesse.

A última sonda *Mariner* — número 10 da série — foi lançada no dia 3 de novembro de 1973. Na viagem, o seqüenciador programável de Neil Herman mostraria seu melhor desempenho. A *Mariner X* aproveitou-se de um raro alinhamento de planetas que lhe permitiu passar pela Lua e por Vênus e, em seguida, dar a volta por Mercúrio em uma manobra acrobática em volta do Sol que a faria passar ainda duas vezes por Mercúrio.

Como das outras vezes, as instruções para a missão estavam divididas em segmentos e eram transmitidas por rádio para a memória do seqüenciador, à medida que isso se fazia necessário. As 384 palavras acrescentadas à memória do seqüenciador criaram condições para que os controladores no JPL armazenassem um programa de reserva: caso a *Mariner X* perdesse contato com a Terra e não conseguisse receber o segmento seguinte do programa de vôo, o seqüenciador mudaria automaticamente para o programa de reserva e a sonda concluiria sua missão.

A *Mariner X* realizou seu complicado plano de vôo sem qualquer falha, e revelou muitos aspectos do planeta Mercúrio. Destituído de atmosfera para moderar a temperatura, o planeta era quente demais durante o dia — a ponto de fundir chumbo — e mais frio do que gelo seco durante a noite. Uma superfície repleta de crateras escondia um núcleo de ferro liquefeito semelhante ao da Terra.

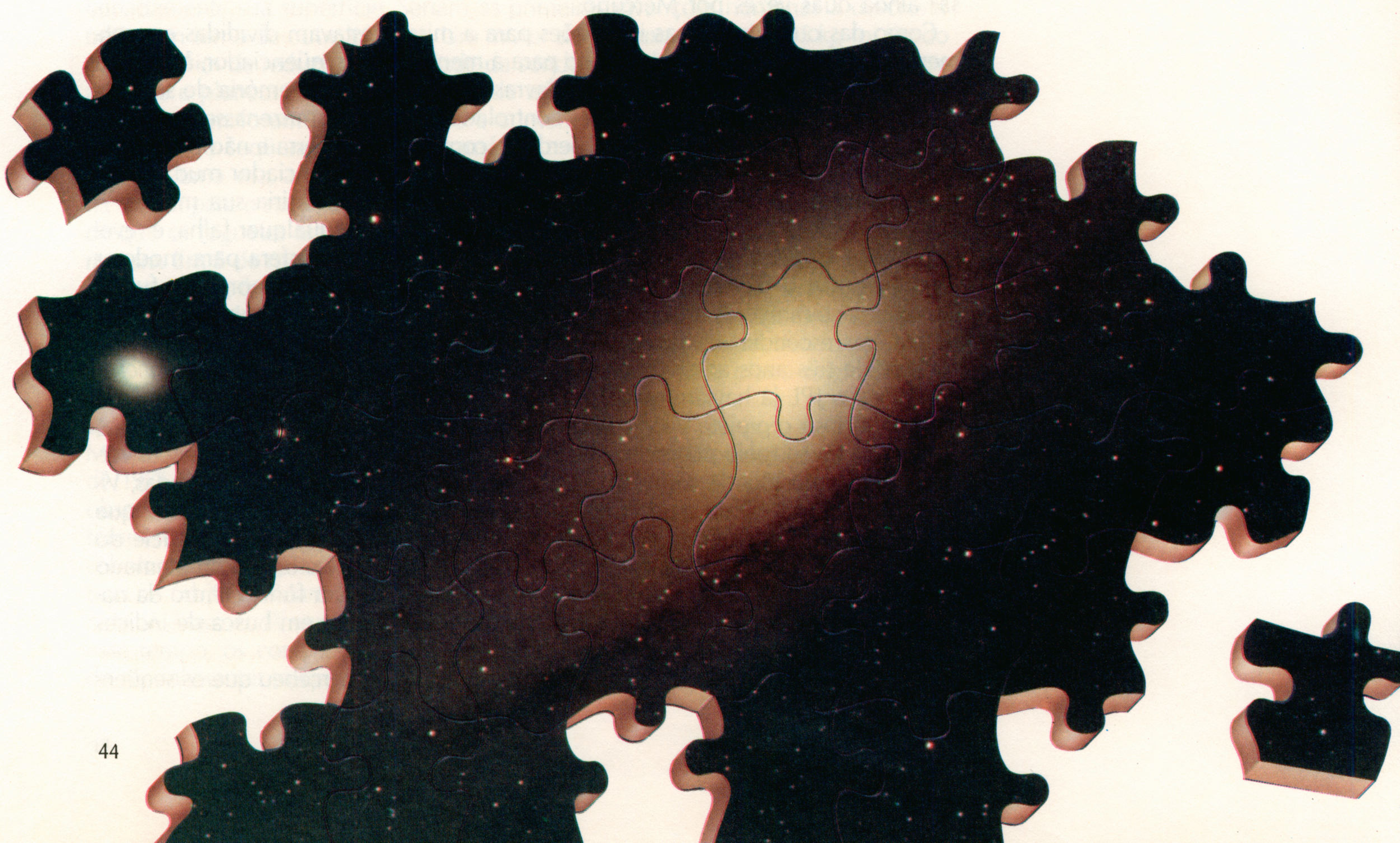
Cerca de três anos antes do reconhecimento de Mercúrio pela nave *Mariner X* a NASA e o JPL já haviam recebido sinal verde para um empreendimento ainda mais ambicioso: o projeto Viking. Essa nave exploradora revisitaria Marte, mas agora, em vez de passar pelo planeta ou de circulá-lo, ela deveria pousar no planeta vermelho. Duas missões — ao custo de 1 bilhão de dólares — seriam lançadas, *Viking I* e *Viking II*. Cada uma compunha-se de uma nave espacial orbitante que despacharia uma espaçonave com equipamento de pouso rumo à superfície do planeta. Um braço robótico em cada uma dessas espaçonaves estaria programado para escavar amostras do solo marciano e colocá-las em um funil. Dentro da nave, outra máquina pulverizaria o solo e procederia à análise em busca de índices de vida, passada ou presente.

Desde o início, a equipe encarregada do Projeto Viking percebeu que os seqüen-

ciadores utilizados nas *Mariner* seriam inadequadas para a *Viking*. As máquinas teriam de efetuar cálculos de trajetória para o pouso, dirigir os sistemas da nave, tomar decisões e, de modo geral, conduzir seqüências mais complexas de ordens. Tais tarefas não poderiam ser realizadas por um seqüenciador incapaz de efetuar contagem em conjunto. A *Viking* exigiria um computador de verdade.

Neil Herman assumira a liderança da equipe encarregada do sistema de dados de vôo, na época em que se iniciaram os trabalhos sobre o subsistema do computador de comando (VCCS — em inglês, *Viking command computer subsystem*). O mecanismo descendia em linha direta do seu seqüenciador programável. Mas, além de ser equipado com mais memória e uma unidade central de processamento, o computador da *Viking* seria o primeiro dispositivo construído no JPL a preencher totalmente o conceito de redundância. Quando fosse concluído, em 1974, o computador estaria equipado com dois suprimentos de força, dois processadores centrais, duas memórias — tudo em dobro. E, exceto durante as etapas mais ativas da missão — quando então funcionariam individualmente —, os dois computadores resolveriam os problemas de forma simultânea.

O sistema de redundância tornou o VCCS extraordinariamente digno de confiança — exatamente o que é fundamental para um sistema de controle de vôo a 700 milhões de quilômetros da base. Se qualquer um dos computadores apresentasse um defeito em um momento crítico, sua tarefa seria de imediato transferida para



o computador gêmeo que daria prosseguimento aos trabalhos, sem interrupção.

Um sistema tão confiável poderia encarregar-se de funções críticas como acionar os motores dos foguetes, por exemplo. Sempre que uma espaçonave *Ranger* ou *Mariner* precisava corrigir seu curso ou realizar outra manobra, a base de controle na Terra efetuava os cálculos e enviava as ordens por rádio ao seqüenciador: acione seus motores a tal ou tal hora durante 59 segundos e depois pare. No caso da *Viking*, o computador de bordo controlaria as correções a meio curso e a inserção em órbita em volta de Marte. Os engenheiros de vôo informariam ao VCCS apenas a velocidade extra de vôo necessária, e os computadores acionariam os motores por quanto tempo fosse preciso. Desde o instante em que o VCCS entrou em ação, pequenas variações de empuxo e outras anomalias apenas imaginadas pelos engenheiros lotados na Terra puderam enfim ser corrigidas, o que injetou maior precisão no campo da navegação espacial.

Os computadores da *Viking* orientaram as duas naves orbitantes em direção a Marte e equipamentos semelhantes ajudaram as espaçonaves a pousarem tranquilamente na superfície do planeta. A *Viking*, entretanto, não encontrou vida em Marte. A possibilidade de vida no planeta parecia ainda mais remota do que após a visita da *Mariner IX*. Nem nas Planícies do Ouro — onde a *Viking I* pousou na madrugada de 10 de julho de 1976 —, nem nas Planícies da Utopia — onde a *Viking II* pousou no dia 3 de setembro de 1976 — encontraram-se organismos vivos nas amostras de solo.

Não obstante, a missão representou um grande esforço tecnológico. As duas naves orbitantes superaram o tempo de vida — de noventa dias — programado pelo JPL. A nave orbitante *Viking II* funcionou até 1978, e a *Viking I* até meados de agosto de 1980. Como se isso não bastasse, as sondas enviaram 52 000 fotos de alta resolução que cobriam 97% da superfície marciana, muito mais do que os planejadores da missão haviam ousado imaginar. Terminado o reconhecimento inicial, as duas espaçonaves com equipamentos de pouso foram reprogramadas para uma missão prolongada e, durante os anos seguintes, transmitiram registros de inestimável valor sobre a temperatura e o clima de um outro mundo.

ALÉM DE JÚPITER

Enquanto a *Viking* completava a exploração do sistema solar interno, os planos do JPL para a realização de uma missão com duas espaçonaves no sistema solar externo estavam bastante adiantados. O programa, batizado de *Voyager*, exploraria o reino frio dos planetas gigantes: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

As duas naves *Voyager* — lançadas no final do inverno de 1977 — tinham como missão principal estudar Júpiter e Saturno. O sucesso da missão dependia do perfeito funcionamento dos computadores de bordo das naves gêmeas durante pelo menos quatro anos. Afinal, Saturno está a mais de 1,6 bilhão de quilômetros de distância da Terra. As exigências em relação à *Voyager II*, entretanto, seriam ainda maiores. Durante vários meses a segunda espaçonave seguiria a trajetória da primeira, funcionando como reserva para o caso de a *Voyager I* sofrer algum desastre. Contudo, se tudo corresse bem, a *Voyager II* tiraria partido de uma rara oportunidade. Mais ou menos uma vez a cada cem anos, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno encontram-se alinhados de tal maneira que a gravidade de um arremessaria a nave em direção ao seguinte. A partir de Saturno, a *Voyager II* seguiria viagem, completando uma grande volta em torno do sistema solar exterior, que terminaria

ao largo de Netuno em agosto de 1989, doze anos após sua partida.

Uma missão desse tipo exigia, evidentemente, sistemas de tomada de decisão a bordo da nave dotados de maior grau de auto-suficiência, flexibilidade e capacidade do que todos os utilizados até então. Para satisfazer a esses requisitos a espaçonave *Voyager* estava equipada com seis computadores dispostos em pares — para redundância e backup. Um desses conjuntos, o subsistema do computador de comando, fazia funcionar a espaçonave. Basicamente era idêntico ao sistema usado na *Viking*. Um segundo par de computadores mantinha a orientação da nave e suas câmeras apontadas em direção ao objetivo. O terceiro conjunto de computadores decodificaria os dados recolhidos pela *Voyager*, a fim de enviá-los de volta à Terra via transmissão radiofônica.

O líder da equipe responsável pelo desenvolvimento do decodificador de dados era ninguém mais, ninguém menos que Neil Herman. O sistema de dados de vôo, lembraria Herman, “era um computador maior e mais dispendioso do que os outros, e, durante o vôo, exigiria muito mais atenção dos cientistas no comando da *Voyager*”. Tal sistema incorporava a mais avançada tecnologia de semicondutores disponível em meados da década de 70 e utilizava dispositivos eletrônicos especiais, projetados para sobreviver aos violentos cinturões de radiação à volta de Júpiter.

PESOS LEVES ENTRE OS COMPUTADORES

Mesmo assim, os computadores da *Voyager* eram menos possantes do que muitas máquinas hoje encontradas em mesas de escritórios. “É impossível compará-las”, diria Herman tempos depois. “A *Voyager* foi planejada dez anos antes do IBM PC. Na época, não tínhamos sequer um microprocessador qualificado para vôo. Um computador consumia 100 000 watts de potência e pilhas de equipamento. Você poderia comprar um deles para todo o laboratório. Mas em uma espaçonave o peso e o tamanho constituem limites básicos.”

Apesar disso, segundo Herman, a “*Voyager* era um mecanismo extraordinário”. Ainda que seus computadores fossem limitados — comparados aos padrões atuais —, a nave demonstrou uma notável capacidade de adaptação a fatos novos e inesperados. Em 25 de agosto de 1981, por exemplo, quando a *Voyager II* passava velozmente à volta de Saturno rumo a Urano, uma plataforma móvel — à qual estavam fixadas as câmeras e outros instrumentos da nave — repentinamente parou de funcionar. Para a espaçonave, uma plataforma imóvel equivalia a um terrível torcicolo: a sonda não poderia olhar a sua volta o panorama que a trouxera de tão longe para ser observado. O problema, no entanto, tinha solução. Programando no computador de controle de atitude uma série de testes para detecção de erro, os engenheiros do JPL descobriram que a lubrificação insuficiente em uma das engrenagens da plataforma causara o defeito. Logo os componentes superaquecidos esfriaram o suficiente para liberar a engrenagem, e por ocasião do encontro com Urano, em janeiro de 1986, os engenheiros do JPL já haviam planejado seqüências de ordens para minimizar a pressão sobre aquela engrenagem.

O encontro com Urano forneceu múltiplos exemplos da flexibilidade do computador. Urano está tão distante que os programadores da *Voyager* precisaram inventar uma nova forma de codificar os dados científicos transmitidos de volta à Terra. Da mesma forma que um grito exige um tipo especial de articulação, quanto mais a *Voyager II* se distanciava, mais difícil se tornava para as estações de rastreamento ouvir os sinais emitidos pela sonda, e menos dados podiam ser transmi-

2

tidos em um determinado espaço de tempo. E o que era difícil em Saturno, seria inviável em Urano, situado a 3 bilhões de quilômetros de distância da Terra. Cada fotografia, em especial, exige milhões de fragmentos de dados; se nenhuma providência fosse tomada, a *Voyager II* transmitiria apenas algumas poucas imagens de Urano. Solução: condensar os dados para que a mesma quantidade pudesse ser enviada em um período de tempo mais curto.

Outras rotinas da espaçonave foram alteradas, para ajudá-la a enfrentar problemas como os baixos níveis de luminosidade em Urano — o Sol ilumina Urano com a mesma intensidade de uma lua cheia sobre a Terra. De fato, àquela altura, o cérebro da espaçonave havia sido totalmente reconstruído por controle remoto. O computador já não era mais a mesma máquina que partira da Terra rumo ao espaço, quase dez anos antes. E a *Voyager* trabalhou com eficiência, transmitindo cerca de duzentas imagens por dia de Urano, assim como uma enorme quantidade de informações científicas.

O sucesso estava próximo. No dia 20 de janeiro de 1986, quatro dias antes de sua maior aproximação com Urano, uma das células de memória de um dos computadores de dados de vôo da *Voyager II* sofreu uma pane. O computador em questão, de acordo com a Lei de Murphy, só podia ser aquele responsável pela compressão dos dados. As fotografias transmitidas para a Terra apareciam truncadas. Richard Rice, um dos dois programadores responsáveis pelo computador de dados de vôo, recordou que naquela tarde havia levado os filhos à Disneylândia e recebera a notícia muito tarde. Preocupado e sem dormir, ele e seu companheiro, Edward Blizzard, estavam trabalhando às 2 horas da manhã de segunda-feira, para tentar resolver o problema. Pediram ao computador que mandasse informações e ele enviou-lhes um verdadeiro relatório. Depois os dois homens compararam o relatório com as especificações originais. "Foi como procurar uma agulha em um palheiro", disse Rice. Em meia hora, porém, conseguiram descobrir a célula com defeito, a 453.^a dentre as 8 192 células da memória do computador. Em instantes, Rice e Blizzard enviaram uma série de ordens informando ao computador como lidar com a falha, e algumas horas depois — pouco antes do início do encontro — o problema fora solucionado.

A *Voyager* sem dúvida revelou-se a mais útil dentre as missões da NASA rumo aos planetas. Um dos engenheiros da NASA caracterizou assim o projeto: "Nossos Beethoven, Bach e Mozart". E, de fato, a espaçonave transmitiu imagens fantásticas: a formação pitoresca de nuvens psicodélicas em Júpiter, a fase vulcânica de Io, a lua vermelha do gigantesco planeta; a faixa em volta de Saturno e a vastidão gélida de seus anéis; o solo retalhado de Miranda, a lua de Urano. As maravilhas de suas descobertas dificilmente seriam ultrapassadas, ainda que a *Voyager II* tivesse explorado os planetas de uma estrela distante.

SONDAS FUTURAS

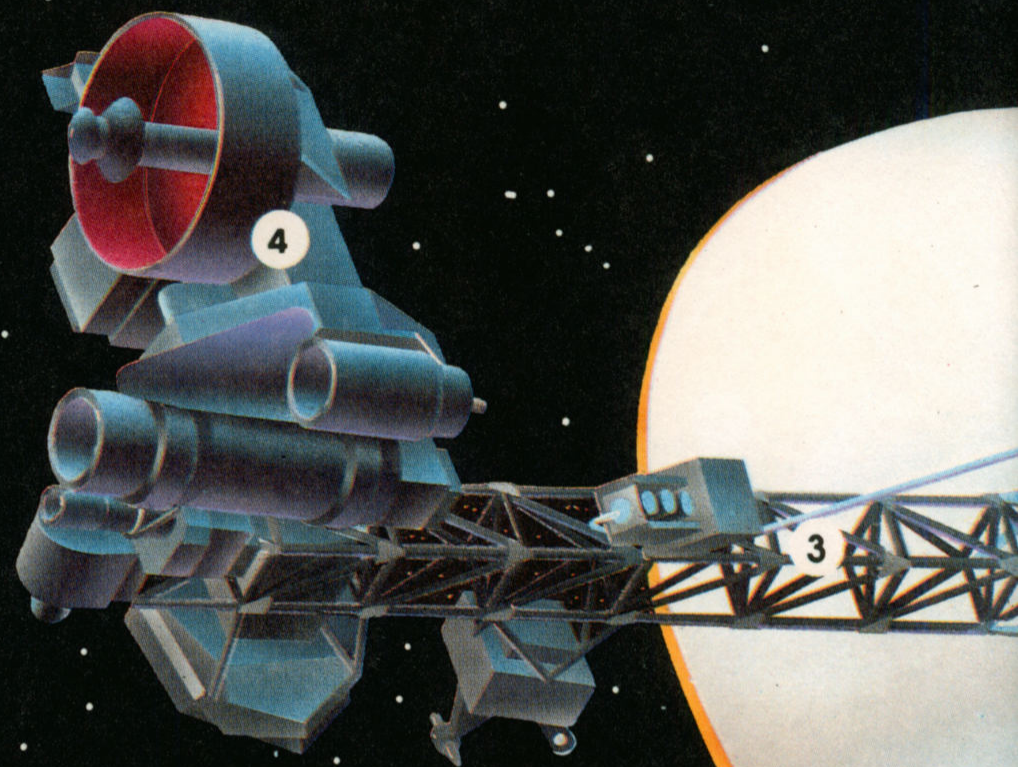
Não se sabe ao certo o que irá acontecer a seguir. A explosão do ônibus espacial *Challenger*, no dia 28 de janeiro de 1986, interrompeu a maior parte do programa espacial norte-americano, adiando alguns dos lançamentos previstos. Uma grande variedade de missões interplanetárias, porém, aguardam, prontas para partir. Dentre elas, uma nave relativamente simples, denominada *Mars Observer*, programada para orbitar em torno do planeta vermelho e acompanhar o fluxo e o refluxo do vapor da água em sua atmosfera; a Missão Ulisses, um empreendimento coopera-

Corda longa para sonda interplanetária

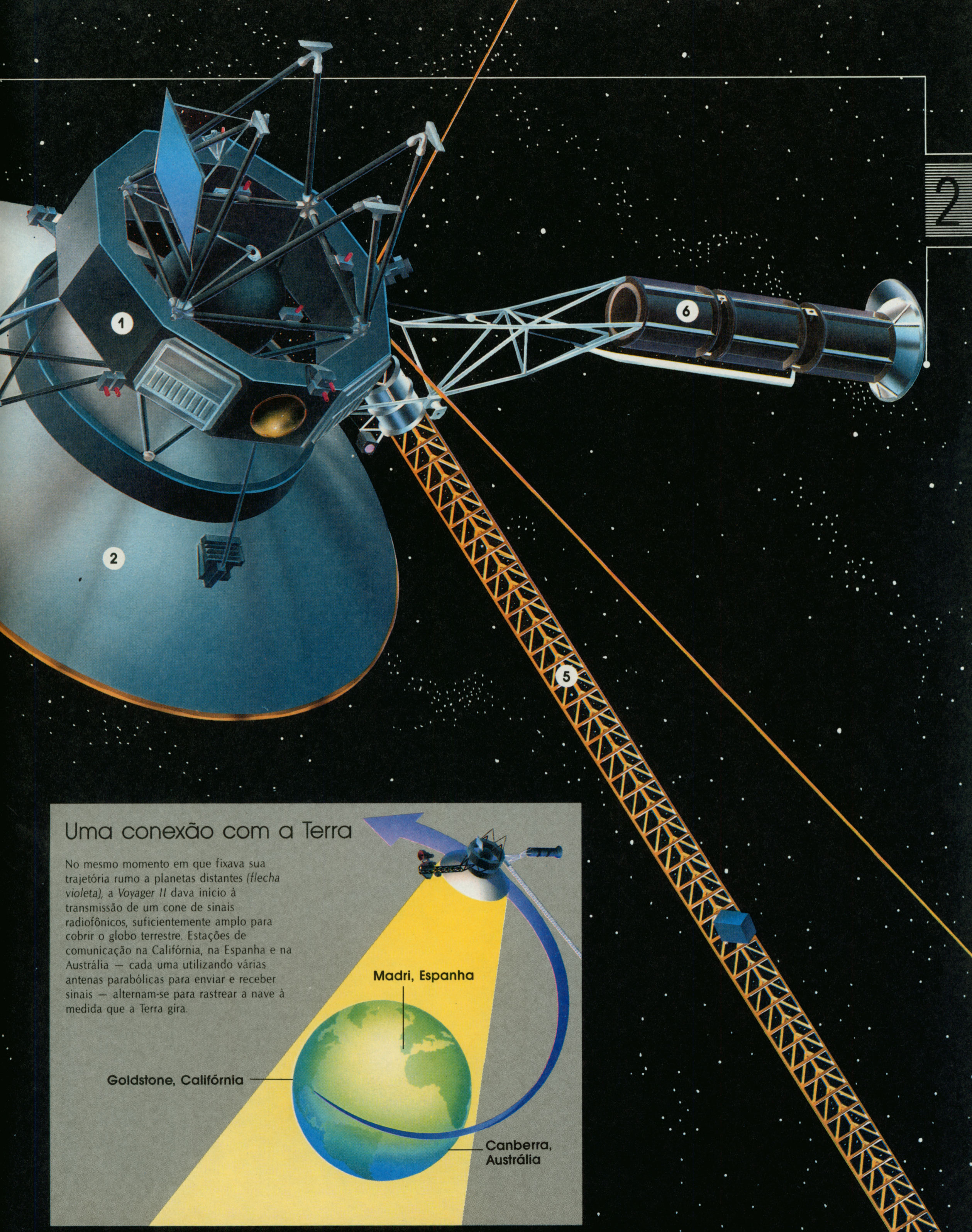
Da mesma forma que sua irmã gêmea, a *Voyager II* funciona durante a maior parte do tempo sem supervisão direta da Terra. A espaçonave é equipada com uma tripulação de computadores de bordo que realiza automaticamente tarefas de rotina. Determinados tipos de emergências — como defeitos no equipamento, que exigem mudança para os sistemas de reserva — também são controlados pela espaçonave. A nave mantém contato com a Terra apenas para relatar suas descobertas e receber novas instruções.

Como a nave *Voyager* não poderia armazenar instruções que cobrissem todas as eventualidades de sua longa missão, seus computadores são programados para executar diversos conjuntos de ordens, ou seqüências, transmitidos através de um sistema de comunicações chamado *deep space network* (embaixo, à direita). Cada seqüência cobre um período cuja duração varia de um dia — durante encontros planetários, quando os instrumentos científicos estão atarefados colhendo dados — a seis meses, quando a sonda está transitando entre os mundos. Depois que uma seqüência é recebida, os computadores de bordo executam-na, dirigindo todas as operações até a chegada de uma nova seqüência. As máquinas manobram a espaçonave, acionam os empuxadores, ligam e desligam os instrumentos e preparam dados para serem transmitidos de volta à Terra.

Embora limite a independência da *Voyager*, esse arranjo permite que os pesquisadores respondam prontamente às descobertas da sonda. Com uma nova série de ordens, os controladores baseados em Terra redirecionam experiências e, graças à flexibilidade do computador, reprogramam o sistema para corrigir ou evitar falhas.



O corpo da sonda (1) *Voyager* — com dez faces —, equipado com seis computadores e outros dispositivos eletrônicos, possui outros quatro anexos importantes. O mais saliente é uma antena de comunicação com 3,5 metros de largura (2) apontando em direção à Terra. Duas lanças de metal apóiam diversos aparelhos. Uma das lanças (3) é equipada com uma plataforma manobrável (4), que permite que a câmera da sonda e outros três instrumentos sensores de luminosidade mantenham a pontaria do alvo por ocasião da passagem da sonda. Uma lança mais longa (5) isola os instrumentos sensíveis da interferência magnética dos outros equipamentos, incluindo três geradores (6), que energizam a sonda convertendo em eletricidade o calor da energia nuclear.



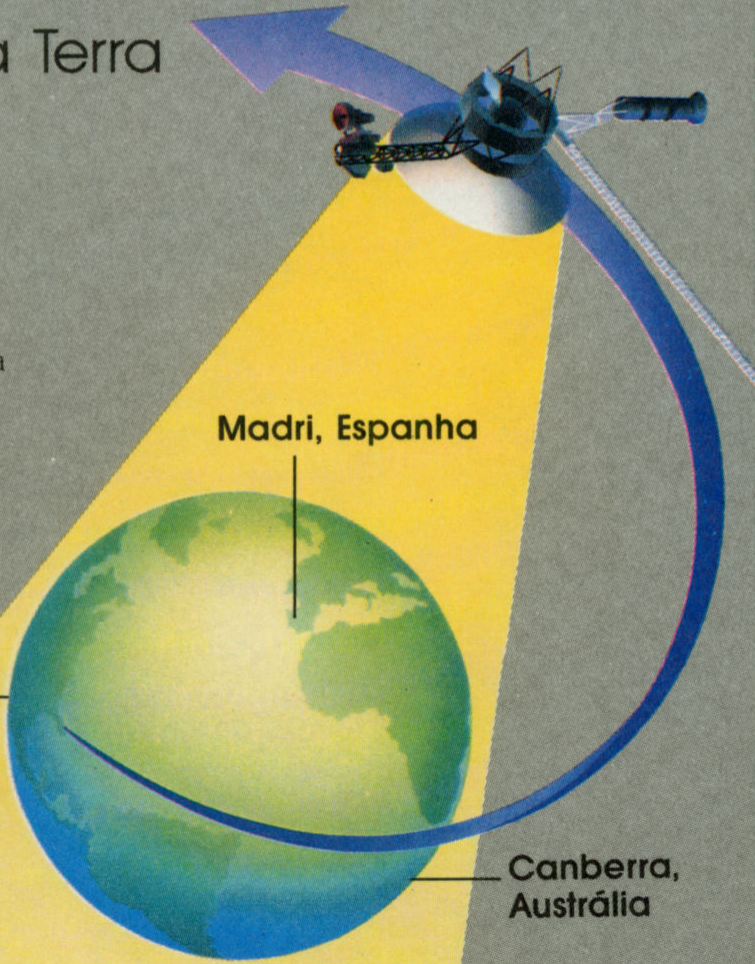
Uma conexão com a Terra

No mesmo momento em que fixava sua trajetória rumo a planetas distantes (*flecha violeta*), a *Voyager II* dava início à transmissão de um cone de sinais radiofônicos, suficientemente amplo para cobrir o globo terrestre. Estações de comunicação na Califórnia, na Espanha e na Austrália — cada uma utilizando várias antenas parabólicas para enviar e receber sinais — alternam-se para rastrear a nave à medida que a Terra gira.

Goldstone, Califórnia

Madri, Espanha

Canberra, Austrália





Todos os sistemas atacam Saturno

Depois de quatro anos de odisséia pelo sistema solar, a *Voyager II* deixara Júpiter para trás e aproximava-se dos espetaculares anéis de Saturno (*acima*). Dos seis computadores de bordo, dois dividem o papel de supervisão e dois funcionam como controladores de atitude — um para servir de reserva para o outro. A quinta máquina opera como computador de dados de vôo — orientando o recolhimento de dados. E a última serve de reserva, exceto durante o encontro com o planeta, quando resume os dados sobre as imagens para serem transmitidos.

Os planejadores da sonda atribuíram toda a direção da missão aos computadores de comando da nave, que recebem as seqüências de instruções transmitidas da Terra e emitem as ordens adequadas para os demais computadores. Além disso, estão sempre alertas para detectar defeitos no equipamento.

O computador de controle de atitude deve estar sempre aten-

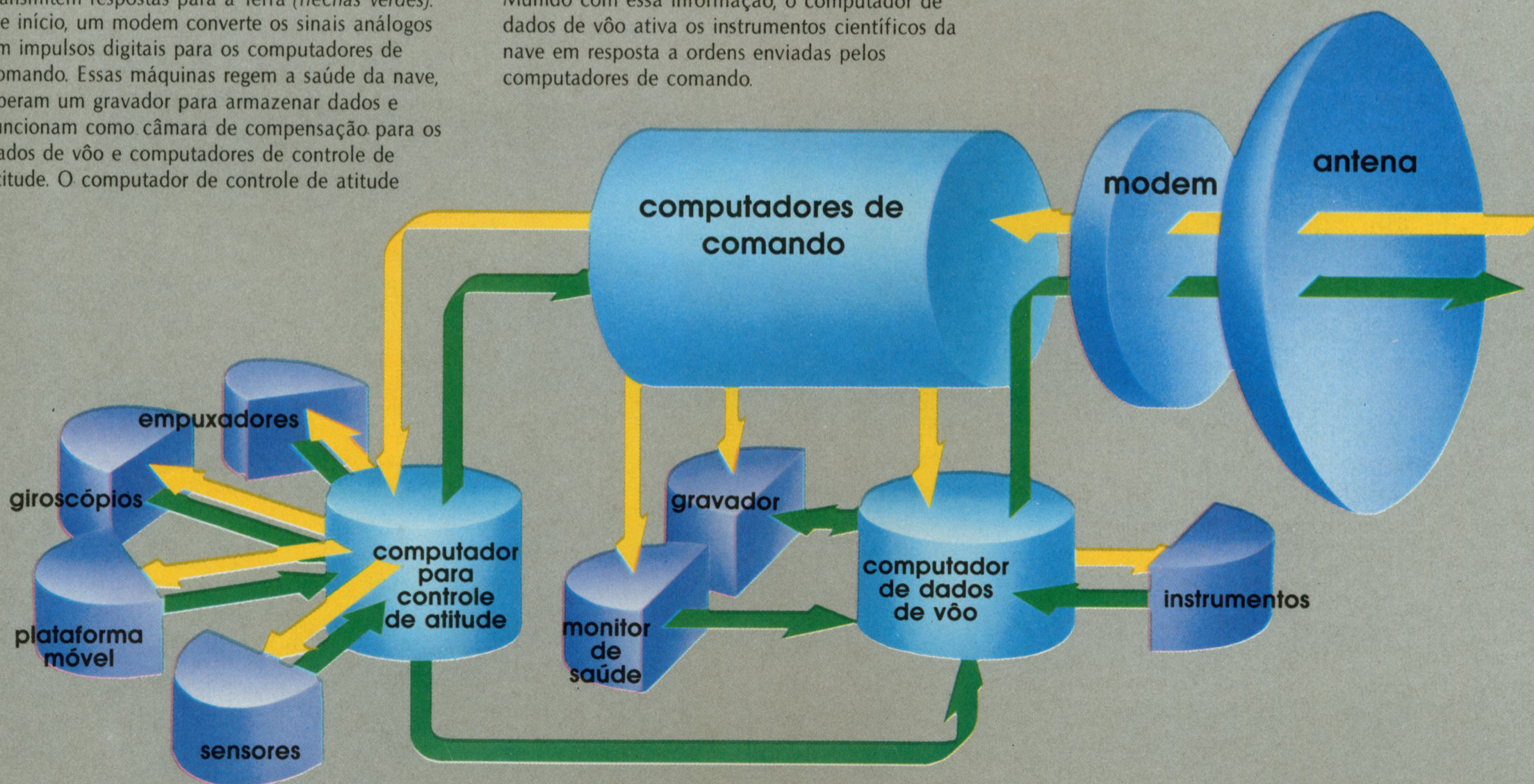
to, pois sua tarefa é manter as comunicações com a Terra. Para que a antena da sonda fique sempre apontada em direção à Terra, o computador orienta-se pela posição do Sol e das estrelas, ou — no caso de um planeta ou a Lua bloquearem os pontos de referência celestes — por dados fornecidos pelos giroscópios internos e checa a orientação da espaçonave. Se houver necessidade de ajustes, a máquina aciona os empuxadores. Ao receber instruções da Terra, o computador de controle de atitude pode movimentar a plataforma de lançamento a fim de dirigir as câmeras da nave e outros instrumentos fotosensíveis, ou, mesmo, alterar a trajetória da espaçonave em direção a um novo objetivo.

O computador de dados de vôo concentra-se no principal objetivo da *Voyager II*: reunir informações e transmiti-las fielmente à Terra. Esse computador controla todos os dez instrumentos científicos e apronta os resultados de seu trabalho para serem transmitidos. Além dos dados científicos, ele reúne e prepara dados de engenharia — relatórios demonstrativos sobre o desempenho do equipamento — para que os controladores baseados em Terra e os computadores de comando — possam acompanhar a espaçonave.

O fluxo de ordens e dados

As instruções recebidas da Terra pela antena da *Voyager II* (flechas amarelas) seguem um caminho complexo, à medida que os computadores e outros sistemas da nave executam as ordens e transmitem respostas para a Terra (flechas verdes). De início, um modem converte os sinais análogos em impulsos digitais para os computadores de comando. Essas máquinas regem a saúde da nave, operam um gravador para armazenar dados e funcionam como câmara de compensação para os dados de vôo e computadores de controle de atitude. O computador de controle de atitude

encarrega-se de operar a plataforma móvel e de manter a espaçonave devidamente orientada, além de relatar suas atividades aos computadores de comando e ao computador de dados de vôo. Munido com essa informação, o computador de dados de vôo ativa os instrumentos científicos da nave em resposta a ordens enviadas pelos computadores de comando.



Muitos instrumentos para estudar Urano

Quatro anos após sua passagem por Saturno, a *Voyager II* ainda podia utilizar toda a potência de seus mecanismos de coleta de dados para examinar Urano, um enigmático planeta, rodeado de anéis, situado a 2,8 bilhões de quilômetros da Terra. O computador de dados de vôo colocou em ação instrumentos para a realização de dez experimentos científicos orientados para dois tipos de investigação: sensores diretos investigariam os campos magnéticos de partículas encontradas pela sonda ao passar pelo planeta, e sensores a distância estavam encarregados de revelar as características distantes, como luas e a atmosfera do planeta.

Os sensores diretos da *Voyager II* solucionaram o mistério da existência ou não de um campo magnético em Urano. Magnetômetros (*abáixp*) detectaram forças magnéticas à volta do planeta, e diversos detectores de partículas confirmaram a pre-

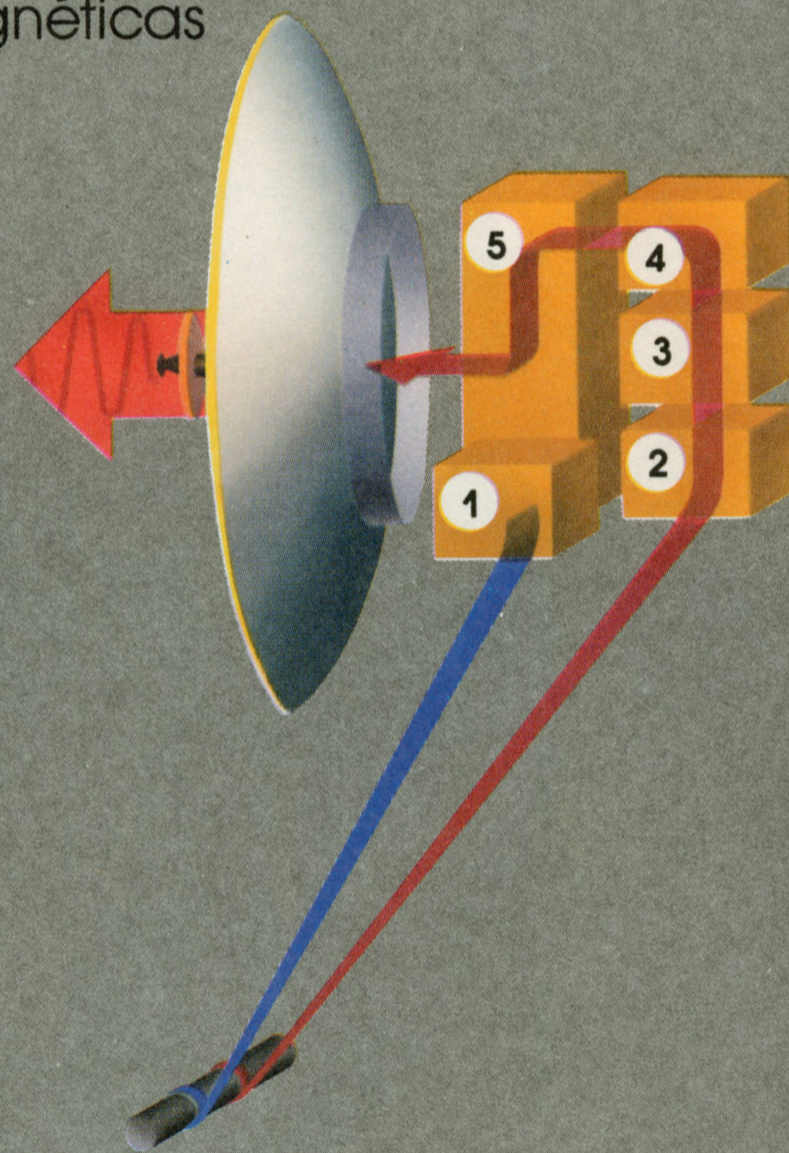
sença do campo. A partir dessas avaliações, a *Voyager* examinou a magnetosfera de Urano — a região de partículas carregadas, atraídas para a armadilha do campo magnético do planeta — a fim de determinar a força de campo (comparativamente à do campo magnético da Terra) e sua orientação.

Os resultados transmitidos pelos sensores a distância incluíam assombrosas fotos tiradas pelas duas câmeras da sonda. Fixadas sobre a plataforma móvel, a telefoto e as duas grandes-angulares (*à direita*) poderiam ser apontadas em direções específicas. Três outros instrumentos fotossensíveis, instalados na plataforma, revelaram detalhes sobre os satélites do planeta, e sobre a extensão e densidade de seus anéis — alguns deles tão tênues que nunca haviam sido detectados pelos astrônomos. Além disso, ao examinar a composição da atmosfera, os sensores remotos ajudaram a avaliar os efeitos da rara orientação de Netuno durante a visita da *Voyager II*: repousando lateralmente, com seu eixo de rotação apontado em direção ao Sol.

Sem perder um só detalhe, a *Voyager II* usou até mesmo sua antena de comunicação como ferramenta para investigações. Alterações nos sinais radiofônicos ocorridas quando a nave passou por trás de Urano produziram ainda mais dados sobre a atmosfera do planeta e a estrutura de seus anéis.

Medindo forças magnéticas

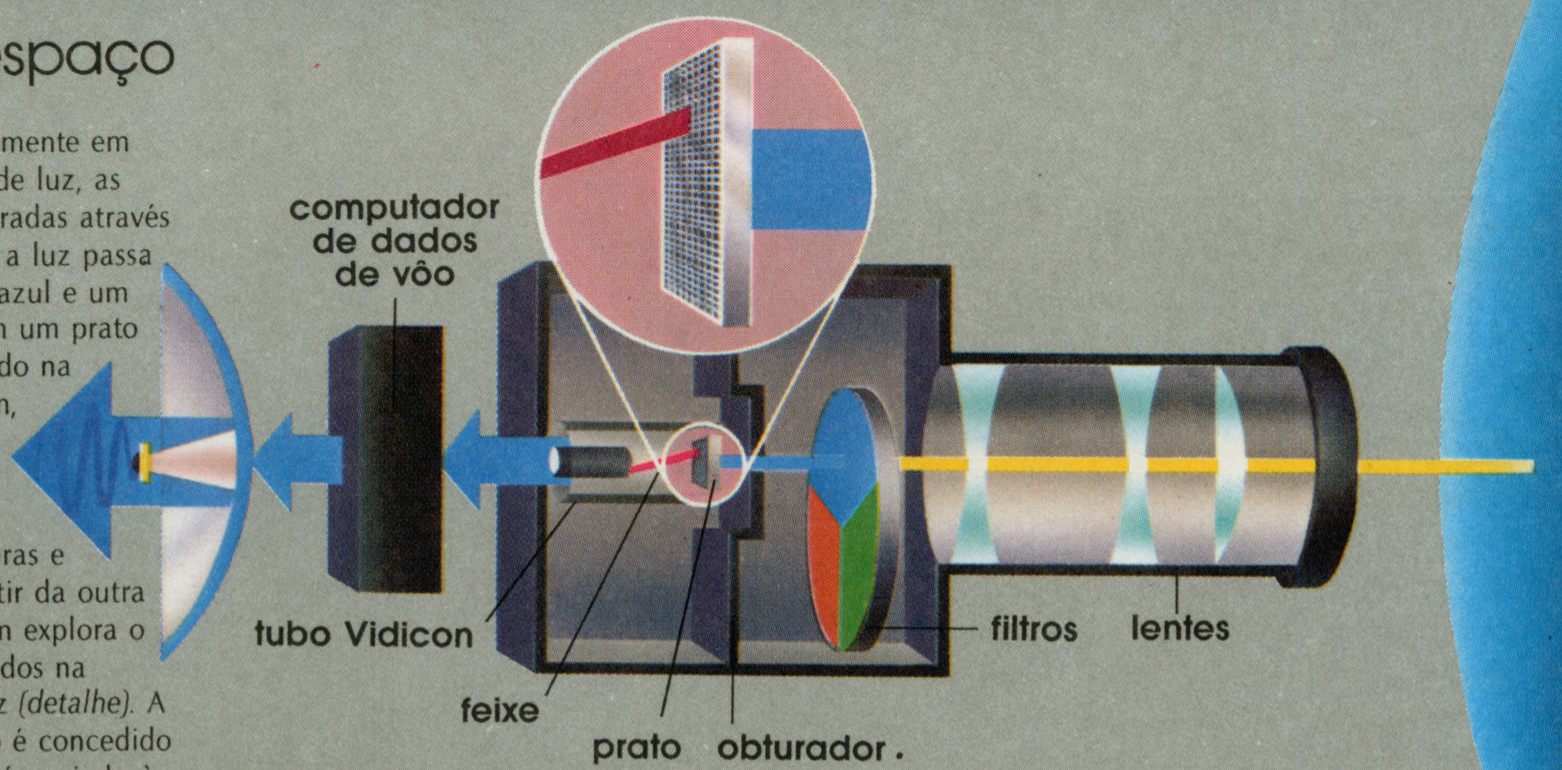
Cada um dos quatro magnetômetros da *Voyager II* combina componentes eletrônicos internos com sensores externos, a fim de detectar os campos magnéticos. Primeiramente um dispositivo gerador de corrente (1) envia um sinal (*violeta*) para um sensor, através de um fio; esse sensor devolve o sinal (*vermelho*) para um amplificador (2). Lá, ele é aumentado para análise que determina se o sinal que retornou dos sensores difere daquele que foi enviado. Sinais idênticos indicam ausência de campo magnético, enquanto sinais diferentes identificam sua presença. Medições adicionais fornecem pistas quanto à força e orientação do campo (3). Essas medidas são transformadas de ondas análogas em impulsos digitais (4), alimentados para o computador de dados de vôo (5); a informação é então enviada para o sistema de rádio e transmitida para a Terra onde sofrerá análises posteriores.

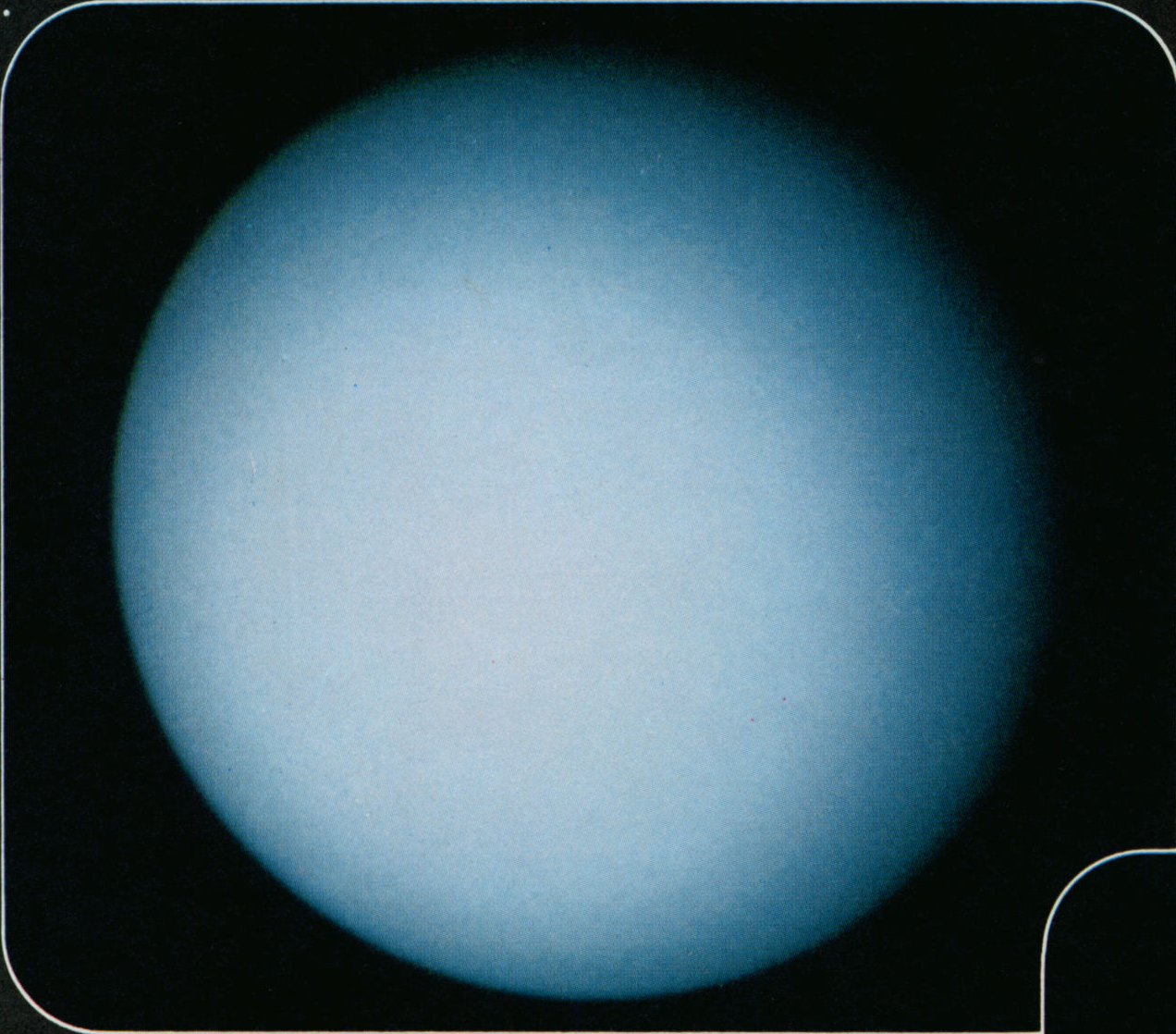


A bordo da *Voyager II* dez instrumentos registram uma grande quantidade de dados sobre o espaço. O subsistema de formação de imagens (1) inclui uma câmera com lentes de telefotografias para close-ups, e uma câmera com lentes grandes-angulares para panoramas. Um fotopolarímetro (2) estuda atmosferas, anéis e superfícies dos satélites, medindo a quantidade de luz que eles refletem. Dois espectrômetros (3) concentram-se em determinados comprimentos de ondas de luz: o espectrômetro infravermelho avalia a composição e a temperatura atmosféricas, e o espectrômetro ultravioleta examina as auroras e outros fenômenos na atmosfera. Um detector de plasma (4), um detector de raios cósmicos (5) e um detector de partículas carregadas com baixa energia (6) analisam as partículas carregadas encontradas pela sonda. Magnetômetros (7) para campos com alta ou baixa intensidade magnética medem campos magnéticos fortes e fracos, respectivamente; os sensores para campos de baixa intensidade magnética — fixados na lança do magnetômetro — ficam a salvo da interferência magnética da própria sonda. Experimentos com ondas de plasma e radioastronomia compartilham duas longas antenas (8) para detectar sinais radiofônicos emitidos por partículas carregadas presas aos cinturões de radiação dos corpos celestes.

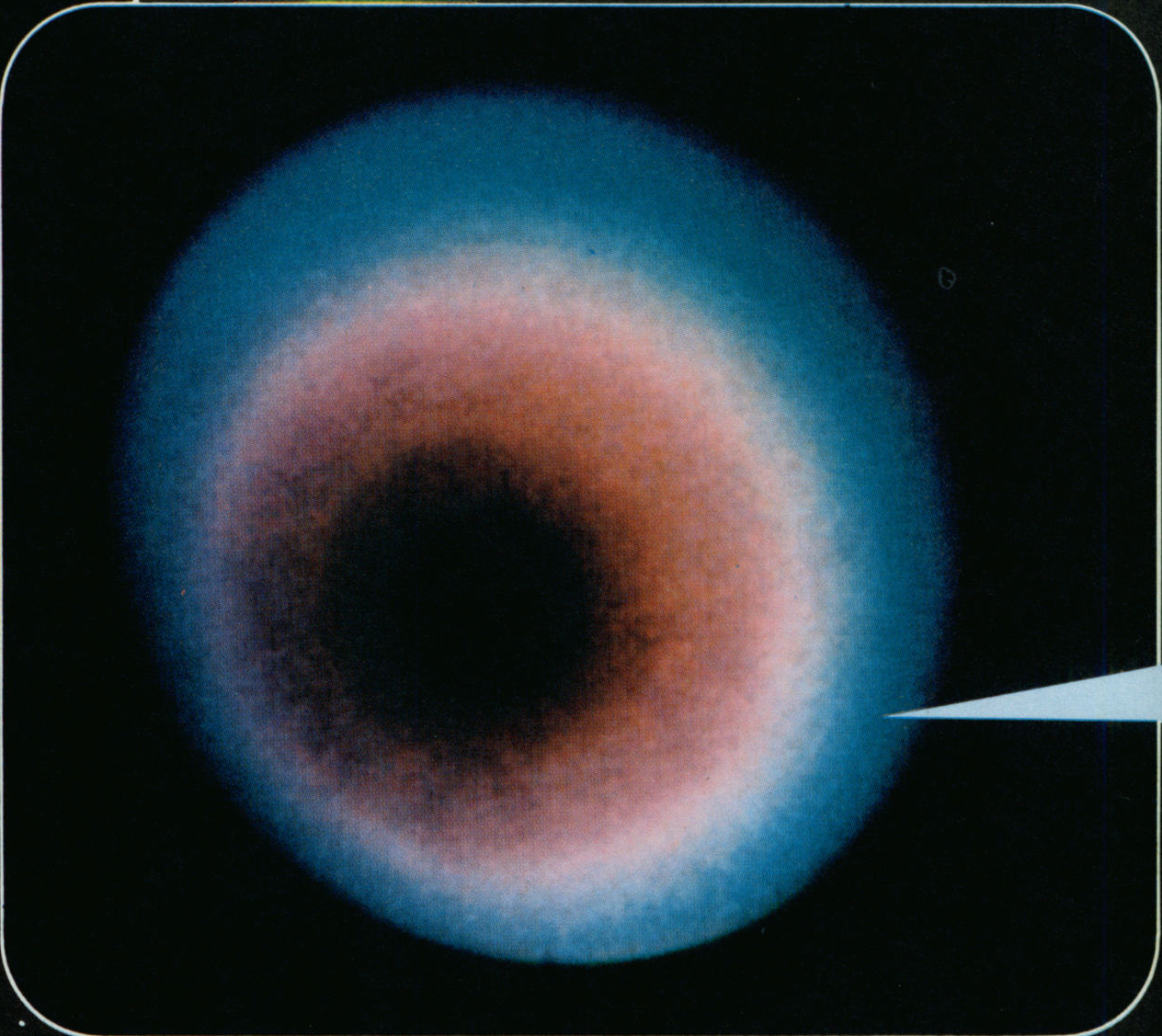
Fotografar no espaço

Para mostrar detalhes visíveis somente em alguns comprimentos de ondas de luz, as câmeras registram imagens separadas através de vários filtros coloridos. Aqui, a luz passa através de uma lente, um filtro azul e um obturador, e então choca-se com um prato carregado eletricamente, colocado na extremidade de um tubo Vidicon, fazendo com que uma imagem de elétron se forme na parte posterior do prato. Os elétrons estarão presentes nas áreas escuras e ausentes em áreas claras. A partir da outra extremidade, um feixe de elétron explora o prato, repondo os elétrons perdidos na proporção da intensidade da luz (*detalhe*). A cada elemento da foto no prato é concedido um valor de luminosidade, que é enviado à Terra através do computador de dados de vôo.





A imagem natural — sem acentuação de cor — tirada pela *Voyager II*, a uma distância de mais de 20 milhões de quilômetros mostra Urano da maneira como seria visto por olhos humanos. O metano na atmosfera dá ao planeta uma coloração azulada, pois absorve as ondas de luz vermelha



A mesma imagem de Urano, colorida artificialmente — por meio de filtros laranja, violeta e ultravioleta —, é depois processada para realçar as cores e revela uma faixa atmosférica que não aparecia na versão em cores naturais. A esfera marrom no centro pode ser uma névoa polar provocada pela radiação ultravioleta do Sol.

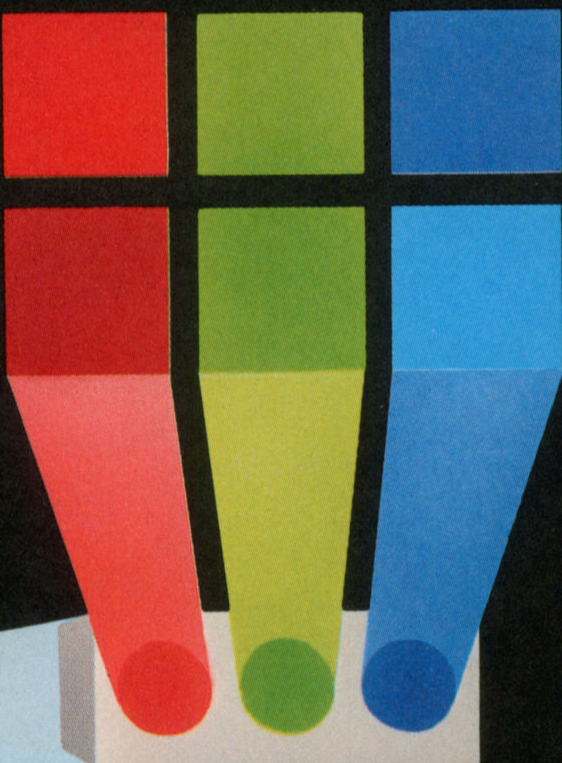
Imagens nascidas de dados brutos

As informações coletadas pelo computador de dados de vôo da *Voyager II* são transmitidas para uma estação da Deep Space Network e, em seguida, enviadas para os computadores no JPL (Laboratório de Propulsão a Jato), na Califórnia. Essas máquinas — responsáveis pelo processamento de todos os dados da *Voyager* — são mais conhecidas por sua habilidade em montar fotografias coloridas e em branco e preto a partir dos milhões de "uns" e "zeros" que constituem os dados de formação de imagens da sonda.

Para produzir uma imagem colorida, os computadores do JPL combinam imagens extraídas através de filtros azuis, ver-

des e laranja. Os valores medidos por cada filtro acendem agora um dos três fósforos — vermelho, verde e azul — que compõe cada elemento da foto, ou pixel, do monitor de cores do computador. (As câmeras da sonda são insensíveis à luz vermelha, daí o uso de um filtro laranja.) O olho humano mistura essas cores em uma variedade de matizes que dependem da luminosidade de cada fósforo do monitor de vídeo. Embora adquira uma coloração natural, a imagem pode revelar poucos detalhes. Duas técnicas cromáticas são comumente usadas para descobrir características imperceptíveis ao olho humano. Na primeira, os valores produzidos por outros filtros são transferidos para os fósforos vermelhos, verdes e azuis, a fim de criar uma imagem de falsa coloração que revela os detalhes ocultos.

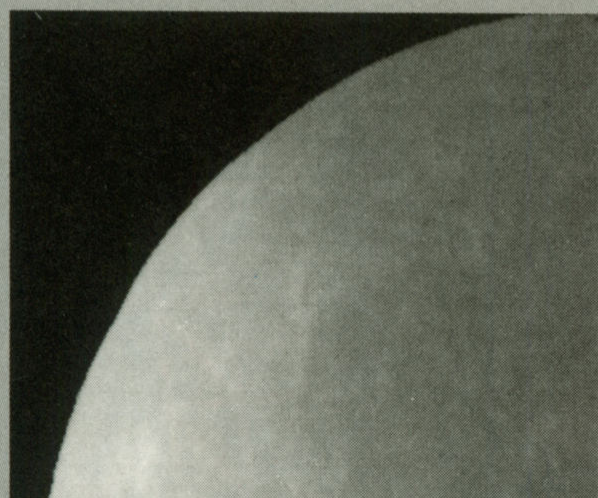
Na outra técnica, os cientistas da missão mandam os computadores manipularem os dados sobre as imagens, exagerando as mínimas variações de cor para serem apreciadas.



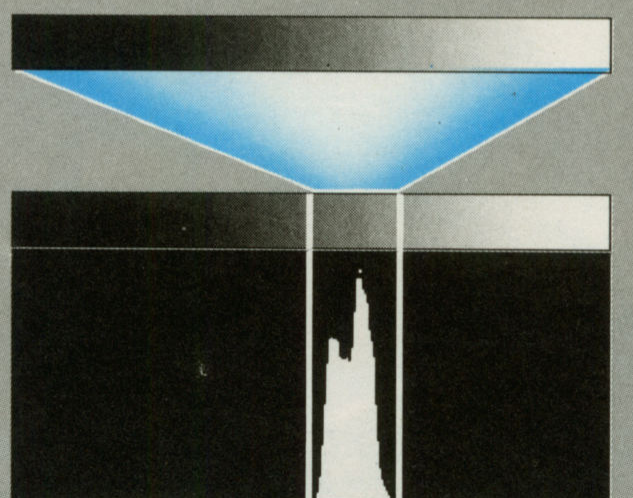
Para produzir uma imagem de Urano com coloração acentuada e artificial (*página ao lado*), os engenheiros do JPL transferiram, pixel por pixel, para os fósforos vermelhos do monitor do computador a imagem que passou pelo filtro laranja a bordo da *Voyager II*. A imagem do filtro violeta foi enviada para o fósforo verde, e a imagem do filtro ultravioleta para o fósforo azul. As colorações resultantes, demonstradas na série de quadros à esquerda, produziram imagens com variações sutis de coloração, difíceis de serem percebidas. Para acentuá-las um computador exagerou a proporção de vermelho em relação ao verde, e de azul em relação ao verde para cada pixel, produzindo vermelhos mais fortes e azuis mais brilhantes, como demonstrado na série de quadros inferiores.

Contrastes que destacam os detalhes

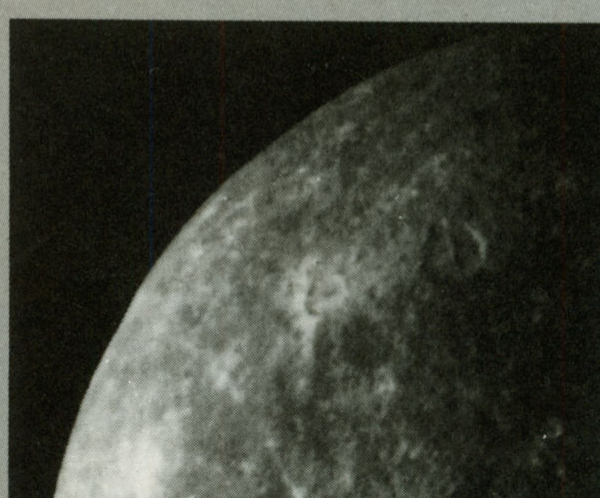
Uma imagem em branco e preto, sem acentuação de cor, de Titânia — a lua de Urano — (*abaixo, à esquerda*) revela poucos detalhes da superfície do satélite porque a maioria dos pixels situa-se dentro de uma pequena parte da gama de tons que variam



do branco ao preto, conhecida como escala cinzenta. Essa escala, no entanto, pode ser alongada. O computador divide a escala cinzenta em 256 tons, numerados de 0 a 25 (o olho humano consegue distinguir apenas 25 tons entre o preto e o branco). Se a



pequena variação de tons originais da imagem — neste caso, eles variam entre o tom 129 e o 167 — for redistribuída sobre toda a escala cinzenta (*abaixo, no centro*), um computador de processamento de imagem acentua o contraste, revelando mais detalhes.



Desafios: escuridão e distância

A Voyager defrontou-se com dois tipos de dificuldades em Urano. Exposições mais demoradas compensavam a luz fraca do Sol mas aumentavam o risco de imagens embaçadas. Além disso, as transmissões emitidas pela sonda — enfraquecidas após uma viagem duas vezes maior do que o trajeto percorrido entre a Terra e Saturno — desapareceriam gradualmente em meio aos ruídos do espaço.

A fim de conseguir fotos precisas, as câmeras teriam que rastrear seus alvos no momento em que a sonda passasse por Urano, a mais de 64 000 quilômetros por hora. A plataforma da câmera não poderia efetuar tal tarefa sem auxílio; toda a espaçonave teria que girar. Como o computador encarregado do controle de atitude rejeitaria manobras que desviassem a antena, os controladores, temporariamente, simularam uma inclinação. Então, ao acionar os empuxadores para compensar a



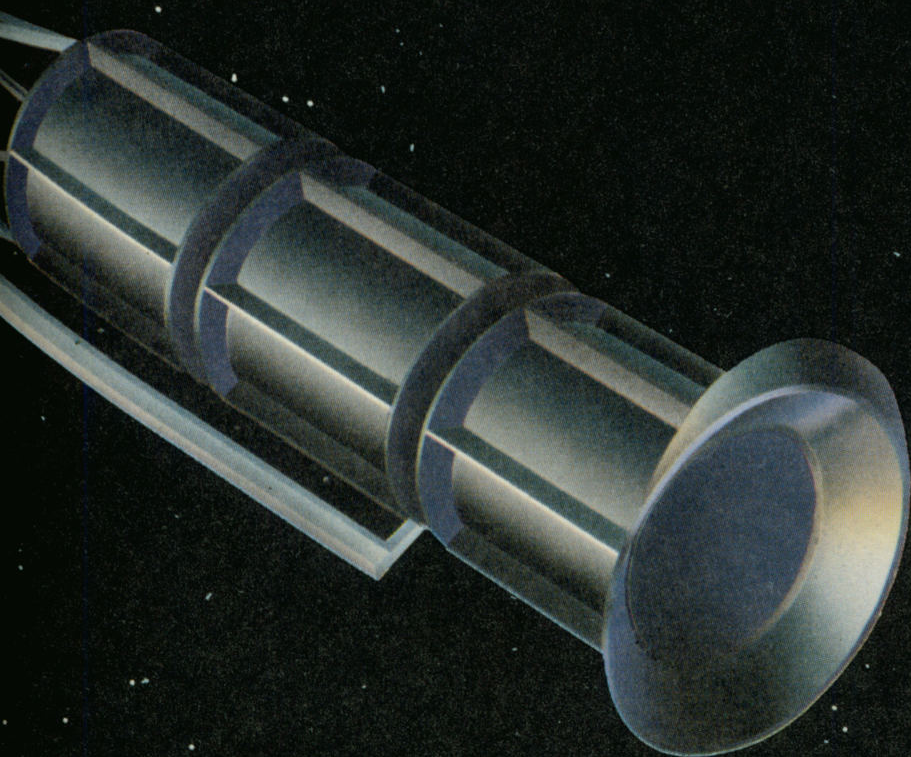
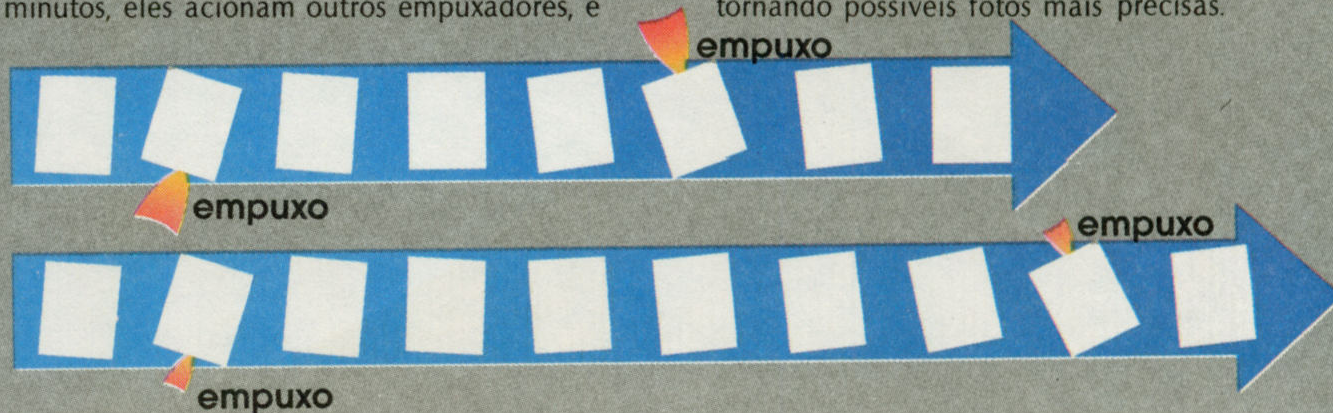
inclinação, o computador provocou o movimento panorâmico desejado. Para manter as câmeras em posição estável, os engenheiros ajustaram o controle do computador sobre a oscilação da nave.

Esses esforços teriam sido inúteis se as imagens chegassem truncadas à Terra. Uma das maneiras de reduzir os efeitos do ruído é enviar dados em ritmo mais lento. A solução, porém, era impraticável no caso, devido à quantidade de dados a serem transmitidos. Os programadores comprimiram os dados sobre formação de imagens para aproximadamente metade dos bits. Os pixels estavam separados em grupos de 800, e o valor de luminosidade do primeiro pixel estava expresso em oito bits, como de costume. Para cada um dos pixels restantes em um grupo, o computador calculava a alteração da luminosidade.

Oscilação mínima para imagens nítidas

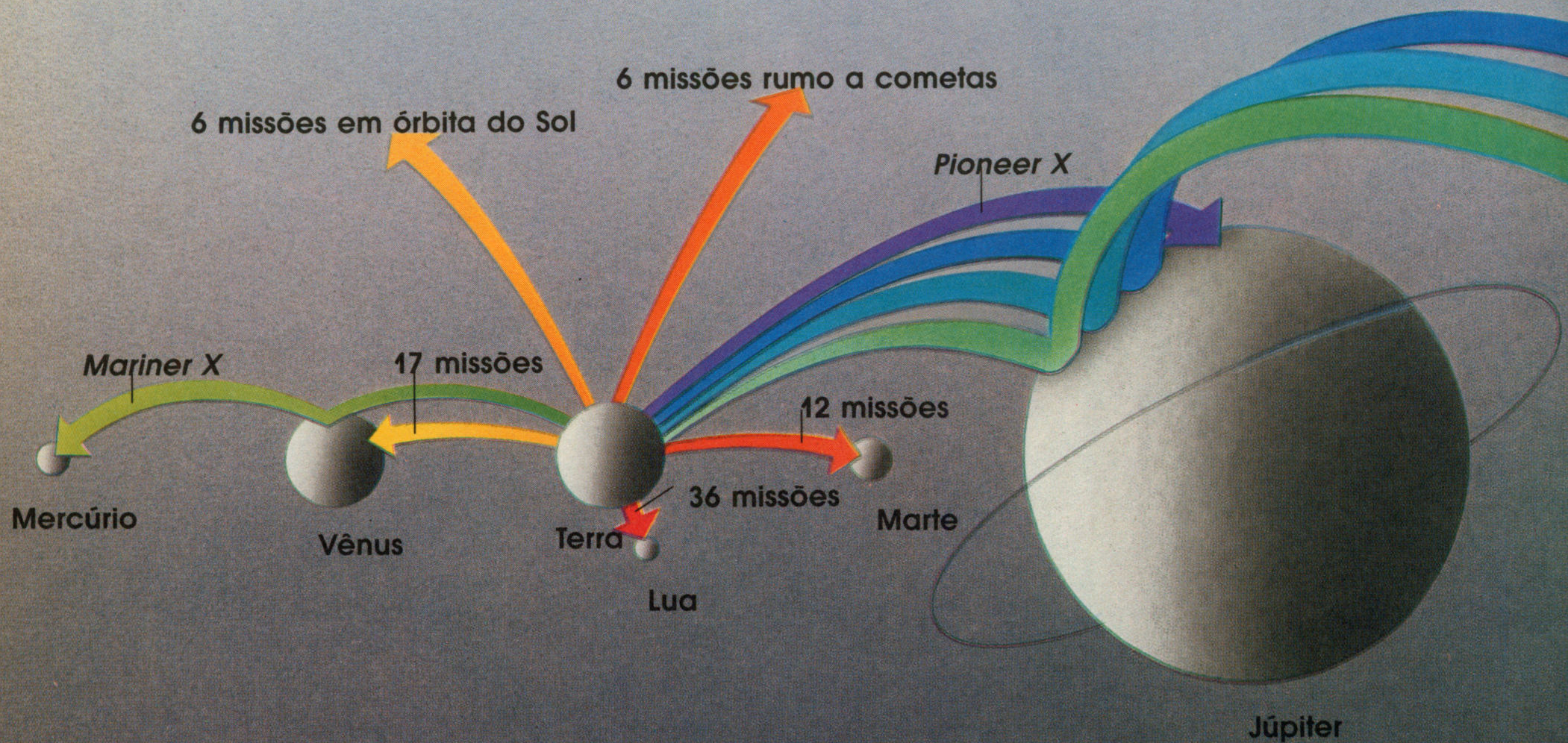
Uma alteração mínima na orientação da antena da *Voyager II* pode cortar as comunicações com a Terra. Para evitar que isso ocorra, o computador de controle de atitude deve diminuir a oscilação da espaçonave, isto é, sua tendência natural para rodopiar, girar ou inclinar-se. Como manobra de compensação, os computadores acionam os empuxadores durante cerca de dez milissegundos para reverter os movimentos indesejados. Depois de trinta minutos, eles acionam outros empuxadores, e

novamente reverter a inclinação. O resultado é uma oscilação natural que nunca ultrapassa 0,05 grau em qualquer direção. Entretanto, até o ritmo brando desse movimento poderia embaçar as fotografias de Urano, consideradas as exposições de 96 segundos necessárias na escuridão que envolve o planeta. Em vista disto, os engenheiros reprogramaram o computador de controle de atitude para acionar os empuxadores durante apenas cinco milissegundos, tornando possíveis fotos mais precisas.



A rota das sondas espaciais

Desde outubro de 1957, quando o satélite soviético *Sputnik 1* anunciou a alvorada da era espacial, mais de 3 500 mísseis foram lançados com sucesso para além da atmosfera terrestre. A maioria deles eram satélites militares, comerciais e científicos que viajam em volta da Terra. As naves tripuladas — pouco mais de 3 por cento do total — aventuraram-se apenas até a Lua. Dessa forma, a inspeção de regiões do sistema solar mais distantes ficou restrita a um número cada vez menor de exploradores robóticos. As missões das sondas não tripuladas — a maior parte das quais lançada pelos EUA ou pela URSS



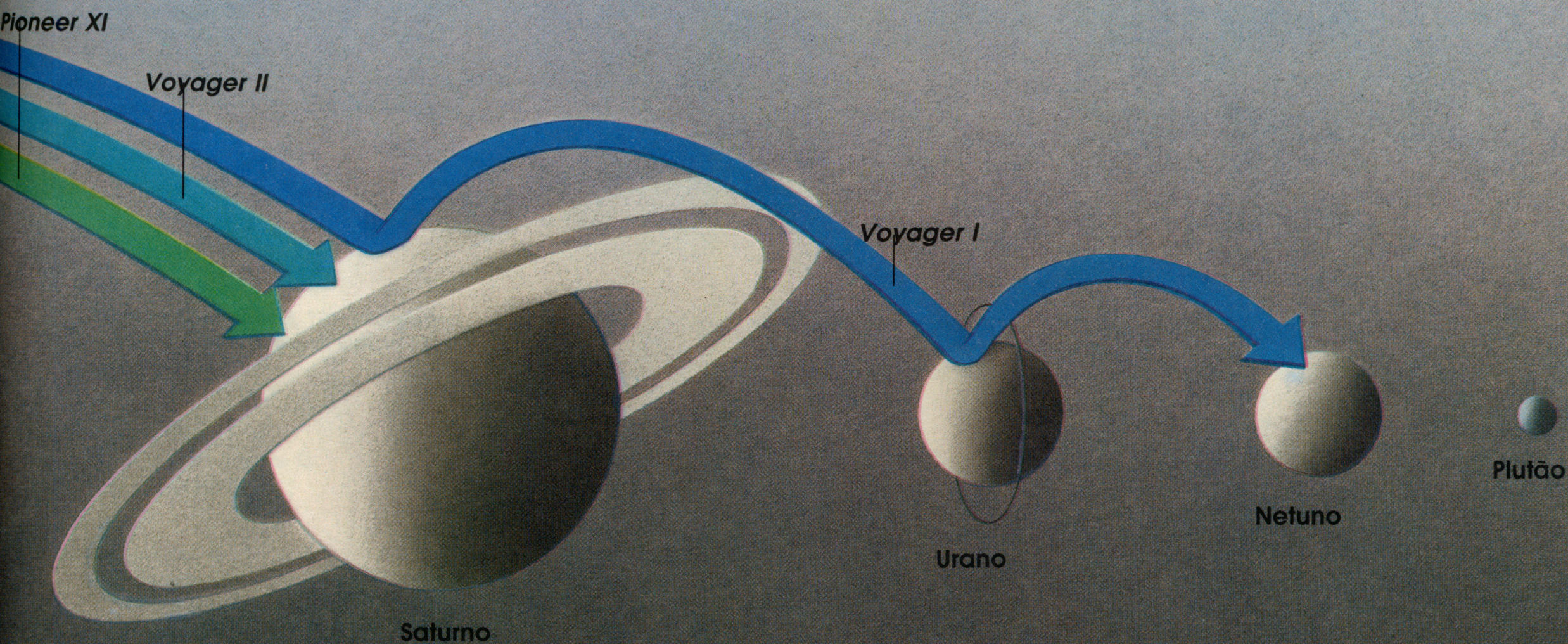
— são representadas como flechas coloridas no quadro planetário esquemático abaixo.

Durante os primeiros anos dos vôos espaciais, a Lua era o alvo mais popular. Entre 1959 e 1976, trinta e seis sondas lunares empreenderam viagens que totalizaram 500 milhões de quilômetros. Seis sondas partiram rumo a órbita solar entre 1965 e 1976; outras seis foram lançadas para observar diversos cometas entre 1978 e 1985.

Em 1962, a *Mariner II*, ao passar por Vênus — a primeira das dezessete missões bem-sucedidas partindo da Terra rumo

ao seu vizinho mais próximo — abriu caminho em direção aos planetas. Uma série de doze vôos a Marte iniciou-se em 1964, com o lançamento da *Mariner IV*. Decorridos oito anos, em 1972, a *Pioneer X* deixou a Terra para tornar-se a primeira nave a passar por Júpiter (em roxo).

Os cinco planetas restantes foram alvo de sondas com múltiplas missões: *Mariner X*, enviada em 1973 para Vênus, e, depois, para Mercúrio; a *Pioneer XI*, rumo a Júpiter e a Saturno, em 1973, seguida pela *Voyager I*, em 1977. Lançada no mesmo ano, a *Voyager II* passou por Saturno em direção a Urano e Netuno.



Índice

Os numerais em *itálico* referem-se a ilustrações sobre o assunto mencionado.

A

Aeronaves não tripuladas, computadores 32
Apolo, Projeto 33
Asteróides 48

B

Blizzard, Edward 47
Boeing, Centro de Inteligência Artificial 18

C

Cabo Canaveral (Kennedy) 31
Células solares 33
Challenger 16, 17
Chubb, William 7, 9
Cometas 39, 48
Computadores e vôo espacial: aeronaves não tripuladas 32
Conrad, Charles Jr. (Pete) 7
Crippen, Robert 13

D

Dickey, Frederic J. 18

E

Estações espaciais 14-15, 17; e inteligência artificial 17-18; e viagem espacial 18
Explorer I 33

F

Foguete *Júpiter C* 33
Foguete WAC Corporal 33
Fulton, James 31

G

Gagárin, Iúri 33
Geradores termoelétricos com radioisótopos (RTGs) 32
Gleen, John 19
Greggenheim Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology (GALCIT) 32

H

Halle, Edward Everett 17
HAL/s 12
Herman, Neil 40, 43, 44, 46

I

IBM: AP-101 11; 4Pi 19; 4Pi TC-1 6; e Skylab 6; e ônibus espacial 11
Instituto de Tecnologia da Califórnia 32, 33
Inteligência artificial e estação espacial 17-18
Intermetrics, Inc. 12

J

Júpiter 32, 38-39, 45-47, 48

K

Karth, Joseph 31
Kerwin, Joseph P. 7

L

Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) 32-33, 34; política 33
Laning, J. Halcombe 12
Linguagens, computador e tarefas de planejamento 12
Lua, missões rumo à 33-35, 40, 43; superfície 33

M

MAC 12
Mapeamento da superfície de Vênus 36-37
Mariner Mark II 48
Mariner, Projeto 35; *Mariner I* 31, 35; *Mariner II* 35, 40, 61; *Mariner IV* 42, 61; *Mariner VI e VII*, *Mariner Mars* 69 15, 41; *Mariner VIII e IX*, *Mariner Mars* 71 42-43; *Mariner X* 43, 61; seqüenciadores 35, 41-43; software 31
Mars II 43
Mars Observer 47
Marte, missões rumo a 32, 33, 41-43, 44-45, 47
Memória de bordo: unidade de carregamento da (MLU) 6, 8, 22-23; unidade da memória de massa (MMU) 22
Mercúrio 43
Missão Galileo 48
Missão Ulisses 47

N

NASA: critérios para escolha de equipamento 6; e JPL 32
Nelson, George 16
Netuno 45-47, 48
Nicks, Oran W. 31

O

Ônibus espacial 10-13, 16-17; *Challenger* 16, 17; *Columbia* 13, 16; computadores 11-12, 13, 19, 20-29; condutores de dados 21, 20-26; sensores giroscópicos 20; HAL/S 12; controles mecânicos 28-29; multiplexador/demultiplexador (MDM) 21, 24-25; sistema principal de software de aviação (PASS) 22, 24-25; reparos no Solar Maximum 16; software 11, 12, 13, 16, 19, 20, 22, 24-25; e estação espacial 17; armazenagem de software em fita 22-23; regulagem dos computadores 13, 24-25, 26-27

P

Pickering, William H. 33, 40
Pioneer X e XI 61
Plataforma para observação da Terra 14-15
Primeiras missões espaciais da União Soviética 33
Processamento de imagem, *Voyager* 55, 56-57

R

Radar com abertura sintética (SAR) 36-37
Ranger, Projeto 33; investigação 40; correção a meio curso 34; *Ranger I* 34; *Ranger II* 34; *Ranger III* 34; *Ranger IV* 35; *Ranger V* 35; *Ranger VII* 40; seqüenciador 34, 35, 41; estabilização da aeronave 34
Redundância nos computadores: no Skylab 5; no

ônibus espacial 11-12, 19, 20-29; na *Viking* 43-45

Rice, Richard 47
Rockwell International 11, 20

S

Satélite da missão Solar Maximum 16
Saturno 45-47
Seqüenciadores 34, 35, 41; reprogramáveis 41, 42
Skylab 5; computador digital da *Apolo* (ATMDC) 5-6, 8, 9, 10; sistema de controle de atitude e de pontaria (APCS) 5, 7; problemas com 6-10; software 6, 7, 9
Sondas de entrada 38-39
Sputnik 33
Surveyor, Projeto 33; seqüenciador 41; *Surveyor I* 40; *Surveyor V* 40

T

Transmissão de dados: tempos das naves interplanetárias 32, 35; de Urano 46-47, 59

U

Urano 45-47, 54-55, 56-57, 58-59

V

Vênus: mapeamento 36-37; missões rumo a 31, 33, 35, 47. *Veja também* Mariner, Projeto Vênus I 33, 49
Viagens interplanetárias: computadores 32; futuro 36-39, 47-48; Júpiter 38-39, 45-47, 48; Marte 33, 35, 41-43, 44-45, 47; Mercúrio 45-47; Ranger, Projeto 33-34; Saturno 45-47; Urano 45-47; Vênus 33, 35, 36-37, 43, 47. *Veja também* Voyager
Viking 32, 44; subsistema do computador de comando (VCCS) 44, 45; *Viking I e II* 43-44
Von Braun, Wernher 18
Von Kármán, Theodore 32
Voyager 32, 45-47; computadores 46, 47, 53; exigências para vôos rumo a Urano 46-47, 54-55; *Voyager I* 45-46, 48, 49, 61; *Voyager II* 45-47, 48, 49, 50-59, 61; atitude 52; comunicações 50, 51, 53, 59; processamento de imagens 55, 56-57; fotografias 55, 56-57, 58-59

W

Weits, Paul J. 7

Y

Young, John 13

EDITOR
RICHARD CIVITA



NOVA CULTURAL

Presidente: Flávio Barros Pinto
Diretoria: Anselmo Pecci, Pierluigi Bracco, Plácido Nicoletto, Walter Thomé

REDAÇÃO

Diretor: Carmo Chagas
Editora Executiva: Stefania Crema

COMERCIAL

Diretor: Plácido Nicoletto
Gerente Comercial: Joaquim Celestino da Silva
Gerente de Circulação: Denise Mozol
Gerente de Propaganda e Promoções: José Carlos Mádio
Gerente de Pesquisa e Análise de Mercado: Wagner M. P. Nabuco de Araújo

PRODUÇÃO EDITORIAL

Pedro Paulo Poppovic Consultores Editoriais S/C Ltda.

Diretor: Pedro Paulo Poppovic
Editora-chefe: Elzira Arantes
Editoras: Elisabeth Justino Carastan, Sandra R. F. Espilatro
Secretária editorial: Kátia de Arantes Leite
Arte: Massumi Guibu (chefe), Luciano Guimarães, Sônia Regina Aversa (diagramadores)
Projeto gráfico: OZ Desenho e Associados
Colaboradores: Mathias Mendes Wolff (consultoria), Ana Maria Rocha (tradutora), Adília T. Belotti (copidesque)

A Editora Nova Cultural Ltda. é uma empresa do Grupo CLC — Comunicações, Lazer e Cultura

Presidente: Richard Civita

Diretoria: Flávio Barros Pinto, João Gomez, Menahem M. Politi, Renê C. X. Santos, Stélio Alves Campos

TIME LIFE BOOKS INC.

DIRETOR DA SÉRIE: Roberta Conlan e Lee Hasing
Coordenador da série: Loretta Britten
Programador visual: Ellen Robling
Editores associados: Susan V. Kelly (ilustrações); Lydia Preston, Allan Fallow (texto)
Pesquisadores: Roxie France-Nuriddin, Tina S. McDowell, Pamela L. Whitney
Editores de texto: Esther Ferington, Robert M. S. Somerville
Assistente de programação visual: Sue Deal
Editor assistente: Miriam P. Newton
Coordenador de revisão: Vilasini Balakrishnan
Coordenador iconográfico: Renée DeSandies
Colaboradores especiais: Ronald H. Bailey, Marcia Bartusiak, Ken Croswell, Edward Dolnick, Carol Jean Howard, Valerie Moolman, Steve Olson, David Thiemann e M. Mitchell Waldrop (texto); Steven Feldman, Melva Holloman, Suzanne Sorrentino e Susan Stuck (pesquisa).

CONSULTOR GERAL

JAMES E. TOMAYKO, professor do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Estadual de Wichita.

OUTROS CONSULTORES

JACK BOYKIN, MARK K. BRYAN, PAUL CERUZZI, STEWART A. COLLINS, EDWARD COPPS, ROBERT FRAMPTON, FRANK E. HUGHES, PETER M. KACHMAR, R. BRAD PERRY JR., MELVIN L. RICHMOND, DONNA M. WOLFF

Créditos das fotos Os créditos das fotos e ilustrações estão separados da esquerda para a direita por ponto-e-virgula, e de cima para baixo por travessão.

Capa: 4, 5: ilustrações de Stephen Wagner. 9: ilustração de Stephen Wagner, fotos da NASA. 14, 15: ilustrações de Peter Sawyer; detalhes: Centro de Vão Espacial Goddard, da NASA. 19-29: ilustrações de Joseph Milioto. 30, 31: ilustrações de Stephen Wagner. 36-39: ilustrações de Steve Bauer/Bill Burrows Studio. 44: ilustrações de Stephen Wagner, fotografias de National Optical Astronomy Observatories. 49-55: ilustrações de Stephen Wagner. 56-57: ilustrações de Stephen Wagner, fotos Jet Propulsion Laboratory. 58, 59: ilustrações de Stephen Wagner. 60, 61: ilustrações de Matt McMullen.

