



# Veículo Espacial Programável: A Incorporação de Voos Orbitais e Suborbitais Reduz o Custo

CAP THOMAS C. CO, USAF  
DR. JONATHAN T. BLACK\*

A UTILIZAÇÃO DO espaço oferece aos Estados Unidos distinta vantagem em todo tipo de batalha. Contudo, cada vez mais, o alto custo das operações espaciais coloca tal posição em risco. Os Estados Unidos foram os pioneiros em grande parte da tecnologia espacial. Entretanto, o declínio de verbas destinadas à pesquisa, ao desenvolvimento e às operações faz com que os velhos sistemas fiquem vulneráveis a adversários em todos os pontos do globo. Outras nações, outrora incapazes de exploração espacial, rapidamente aprendem a contrabalançar a tecnologia norte-americana, a custo surpreendentemente baixo. A fim de reduzir a despesa de colocar em campo e manter uma capacidade espacial potente, o Departamento de Defesa (*DoD*) deve mudar o *status quo* acerca das operações espaciais ou correr o perigo de perder a supremacia. O Comando Estratégico dos EUA [*US Strategic Command*], a Agência Espacial Americana [*National Aeronautics and Aerospace Agency – NASA*], a Agência de Projetos e Pesquisas Avançadas em Defesa [*Defense Advanced Research and Projects Agency*] e a Força Aérea reconhecem como é difícil manter o domínio competitivo espacial com toda a redução de verbas. O Gabinete *Operationally Responsive Space – ORS*, encarregado de preencher a lacuna entre os recursos disponíveis e as necessidades operacionais, prevê progresso mar-

cante. Mesmo assim, devemos expandir o conceito. Este artigo propõe uma abordagem gradativa que multiplicará a redução de custos do programa *ORS*, aumentando a capacidade espacial. Essa abordagem aproveita o potencial dos voos orbitais e suborbitais dos satélites existentes para repetir manobras e executar diferentes missões.

O Gabinete do *ORS* estabelecido em 2007 como iniciativa conjunta de várias agências do *DoD*, procura desenvolver o acesso espacial para missões a baixo custo para satisfazer as necessidades dos combatentes. O acesso ao espaço não é barato. O desenvolvimento e lançamento de veículos constituem a maior parte das despesas espaciais. Ao mesmo tempo, o *ORS* tenta reduzir o custo de componentes para que possamos preparar e lançar um veículo espacial dentro de poucas semanas, a uma fração do presente custo (um centavo por dólar gasto em missões similares).<sup>1</sup> No entanto, o *ORS* concentra-se apenas no rápido preparo dos veículos e lançamentos a baixo custo. Não antecipa veículos espaciais manobráveis com capacidade de mudar de órbita para executar mais de uma missão durante sua vida útil. De acordo com o Dr. James Wertz, o proponente do *ORS*, não se pode chegar a um “[espaço reativo] com os meios já em órbita. É o mesmo que esperar que o adversário entre na trajetória de bala já disparada”.<sup>2</sup> O uso do mesmo satélite para diferen-

\*Capitão Co é doutorando do Instituto Tecnológico da Força Aérea [*Air Force Institute of Technology (AFIT)*], Base Aérea Wright-Patterson, Ohio. O Dr. Black é Catedrático Assistente do Departamento de Aeronáutica e Astronáutica do *AFIT*.

tes missões, com o emprego de técnicas de mudança de órbita não tradicionais, aperfeiçoaria a reação às necessidades dos combatentes, reduzindo ainda mais o custo.

A execução dessa nova abordagem de órbita reativa procederia em quatro fases. A primeira demonstra que certos satélites já em operação conseguem alterar as órbitas notável e eficientemente, com a simples mudança de conceito de operações [*concept of operations* – *CONOPS*]. Já existe equipamento bem testado e conhecido para essa tecnologia. Para isso, é necessário um sistema de propulsão elétrica (propulsores de íons isolados eletromagneticamente ou a efeito Hall) e plataforma de satélites de pequeno porte (500 kg -1.000 kg de peso)<sup>3</sup>. A segunda fase aplica ao satélite forças moderadas de arrasto aerodinâmico, como as que ocorrem na atmosfera exterior, em altitudes que variam de 150 a 700 km acima da superfície terrestre (termosfera).<sup>4</sup> Além do uso de propulsão elétrica, pequena plataforma e novo *CONOPS*, a terceira fase exige veículo que consiga manipular forças aerodinâmicas (similares às do ônibus espacial e às do X-37). Nas atuais naves espaciais, empregam-se esses três componentes de equipamento, individualmente. Portanto, necessitamos apenas de novo *CONOPS* e da combinação precisa de características do veículo para transformar um satélite em órbita em meio espacial manobrável. A quarta e última fase combina manobrabilidade com os conceitos de *ORS* em desenvolvimento. A evolução da primeira fase está em curso, demonstrando o potencial de órbitas reativas. A seguir explicamos como prosseguirão as fases posteriores.

## O Espaço Operacional Reativo

O atual uso do espaço pelos Estados Unidos direciona o programa espacial do *DoD*, que normalmente custa bilhões de dólares. As missões espaciais tradicionais são estratégicas, duráveis (projetadas para ciclos-de-vida de 10 a 20 anos), inflexíveis, onerosas (de 100 milhões a 2 bilhões de dólares), altamente capazes, complexas e de difícil substituição.<sup>5</sup> Essas ca-

racterísticas são inter-relacionadas. Devido a custo considerável de lançamento de naves espaciais, os projetistas desenvolvem sistemas extremamente capazes e confiáveis. Adquirem-se essas características a alto preço e longos ciclos-de-vida. Os sistemas altamente capacitados, confiáveis e de longa duração devem contar com redundâncias para todos os componentes de funcionamento crítico (quase todo o sistema), o que aumenta o peso, levando a maiores gastos de lançamento. Fica claro que esse ciclo auto-sustentável produz espaçonaves super-capacitadas, cada vez maiores, que custam bilhões de dólares e levam uma década em construção. Esse paradigma é a característica que define o estilo espacial. A demanda atual de meios reativos a desastres e ameaças imprevistas e de rápida reconstrução exigem novos padrões de aquisição espacial.

As missões espaciais atuais, com frequência, deixam de satisfazer as necessidades dos combatentes. Os sistemas exigem longo período de desenvolvimento para seu aperfeiçoamento e a integração da tecnologia necessária. Até o sistema estar pronto para ser colocado em operação, muitos componentes eletrônicos deixam de ser de ponta. Assim, os engenheiros devem projetar novos componentes. O *DoD* não consegue satisfazer a demanda das operações militares.<sup>6</sup> Os usuários quase sempre aguardam vários anos além da data da entrega original para conseguir, finalmente, tomar posse do novo meio cuja finalidade talvez agora seja diferente. Durante o planejamento da Operação *Desert Storm*, em setembro de 1990, os planejadores perceberam que a capacidade de comunicação via satélite existente (*SATCOM*) não seria suficiente para satisfazer a exigência. Consequentemente, tentaram, às pressas, lançar a aeronave *Defense Satellite Communications System III*. Finalmente, cumpriu-se tal missão a 11 de fevereiro de 1992, mais de um ano após o término da guerra.<sup>7</sup> Os engenheiros produziram um modelo subsequente, o *Wideband Global SATCOM* como sistema comercial *prêt-a-porter*, pois a propaganda anunciava a redução do período de espera no cronograma aquisitivo. Quando o projeto teve início em 2001, o lançamento estava programado para o 4º trimestre de 2003.

Entretanto, o satélite não atingiu órbita operacional até 2008 (após o lançamento a 07 de outubro de 2007), com cinco anos de atraso.<sup>8</sup> Isso causou séria interrupção em comunicações nos teatros dos Comandos Pacífico e Central, resultando em 80% de dependência em meios comerciais a custo mais elevado para os contribuintes.

O *ORS* deseja mudar de paradigma em operações espaciais. Em comparação com essa última metodologia, as missões de *ORS* são táticas, curtas (ciclo-de-vida de um ano), flexíveis (adaptáveis à necessidade da missão, cronograma e à região geográfica), de baixo custo (abaixo de 20 milhões de dólares), especializadas (a nave espacial possui função específica, interagindo com outras para alcançar um objetivo, em geral, tornando o sistema menos vulnerável a ataques), tecnologicamente simples e de imediata substituição.<sup>9</sup> O *ORS* coloca em destaque satélites e veículos de lançamento menores, com rapidez de envio, envio a pedido e rápida disponibilização de recursos aos usuários. Os conceitos em desenvolvimento continuarão a basear-se nas órbitas tradicionais de Kepler, onde cada meio espacial lançado serve apenas um único propósito.<sup>10</sup> Mesmo uma comparação superficial entre a missão tradicional e a *ORS* demonstra que a última é tudo o que falta à primeira.

A abordagem do *ORS* denota grande mudança no estilo espacial norteamericano. Os interessados, em geral, concordam com a vantagem em redução de custo para a missão, elevando a capacidade de reação às necessidades do usuário. Entretanto, o alcance de tais metas é difícil, pois exige persistência, disposição para mudar o equipamento existente, comando e controle, bem como normas de prova. Esperamos que as autoridades competentes reconheçam os benefícios de mudança de estilo, adotando novas regras de transação de negócios, permitindo rápidas mudanças, providenciando a flexibilidade para satisfazer as necessidades do usuário de forma mais rápida e eficiente.

O *ORS* ofereceria benefícios ainda maiores se incluísse o desenvolvimento de pequeno satélite manobrável, de 500 kg de peso, que transportaria combustível suficiente para rea-

lizar manobras múltiplas.<sup>11</sup> Queremos dizer que o veículo realizaria mudança de órbita após completar dada missão, permitindo assim a realização de nova tarefa. Com pequenas alterações em órbitas requeridas, o satélite conseguiria manobrar 15 vezes ou mais.<sup>12</sup> Uma manobra reduziria o número de lançamentos em 50% e três manobras em 75%. Apesar da redução de custo para o *ORS* em equipamento e provas, os lançamentos continuarão a ser onerosos, especialmente se utilizarem novo satélite para cada tarefa. Portanto, um satélite manobrável com capacidade de desempenhar múltiplas tarefas seria bem menos dispendioso do que a versão do *ORS*.

## O Uso de Meios Manobráveis para Satisfazer a Necessidade dos Usuários

Se tudo correr bem, o *ORS* apresenta um único veículo de baixo custo lançado sob demanda à órbita adequada, em questão de horas após receber a solicitação. Esse conceito, a longo prazo, possui a data-alvo de 2020. Supondo que tal veículo exista e que a capacidade de lançamento e o setor de controle terrestre estejam em funcionamento, a perene escassez de recursos disponíveis para satisfazer as necessidades operacionais do usuário rapidamente esgotaria qualquer capacidade de produção disponível, impossibilitando assim, um sistema verdadeiramente de pronta reação. Tal capacidade não se limita ao segmento espacial. Os lançamentos rápidos também aperfeiçoariam a prontidão em satisfazer as necessidades de qualquer novo usuário. O lançamento rápido de acréscimo ou reposição de espaçonaves seria a manutenção de habilidade específica. Atualmente, a produção de espaçonaves segue um conceito de lançamento agendado, mas veículos de pronta reação devem ficar de prontidão para lançamentos sob demanda. Uma alternativa eficaz à essa última abordagem requer a manutenção de estoque de reserva de equipamento de guerra, bem como espaçonaves e veículos de lançamento associados em seus devidos locais.<sup>13</sup>

O conceito de *ORS* baseia-se em habilidade de rápido lançamento, de inventário disponível para reagir às crises que surgem. Isso exigiria o lançamento e posicionamento de satélite, hoje, para monitorar uma área no Pacífico devastada por *tsunami* e, amanhã, para compilar dados secretos acerca de insurreição campequina na Ásia Central. Tal capacidade requer equipamento extra disponível para lançamento e operação dentro de poucos momentos. No entanto, em futuro próximo, as exigências operacionais continuarão a superar por demais a proporção em que podemos colocar em campo novos meios para satisfazer essas necessidades. Como demonstram os cenários mencionados anteriormente, a capacidade militar diminui rapidamente, devido a apoio a novos sistemas operacionais terrestres e aéreos que exigem considerável largura de banda para a transmissão de dados entre as forças destacadas à áreas de conflito e os centros de comando. A fim de estabelecer capacidade de reação (empregando o inventário disponível), necessitamos de diferente abordagem.

Ao complementarmos o projeto *ORS* com a habilidade do veículo espacial em manobrar órbitas não tradicionais (ou sem precedência) reduziríamos a pressão em manutenção de ritmo operacional acelerado, diminuindo a capacidade necessária para satisfazer os usuários. A manobrabilidade permitiria a único satélite lançado à baixa órbita terrestre mudar de perfil orbital suficientemente e com prontidão, a fim de reagir a múltiplos eventos mundiais ou de acordo com os requisitos dos usuários. Com isso, a vida útil do satélite em órbita seria menos de um ano, o atual ciclo-de-vida normal do *ORS*, dependendo do número de tarefas realizadas pelo recurso. Ao permitirmos que um só veículo satisfaça a demanda de vários usuários, diminuiríamos consideravelmente a necessidade de múltiplos lançamentos, reduzindo o custo em milhões de dólares por veículo.

Especificamente, esse tipo de órbita proposto, sem precedentes, empregaria as forças aerodinâmicas da atmosfera terrestre para alterar os parâmetros orbitais. Com o uso da tecnologia simples, desenvolvida durante a época do *Gemini*, *Mercury* e *Apollo*, projetaria-

mos um veículo espacial para reentrar a atmosfera, utilizando ascensão e arrasto para mudar de órbita, alterando a rota, velocidade e altitude de voo.<sup>14</sup> Em essência, a espaçonave orbital é semelhante à suborbital. Comportase como aeronave quando passa pela atmosfera. Baseando-nos em múltiplos perfis de reentrada simulada, utilizando as equações de movimento fornecidas pelo Ten Cel Kerry Hicks, um veículo projetado com suficiente capacidade de ascensão consegue realizar manobras semelhantes às de aeronave, como ascensão, mergulho e rotação.<sup>15</sup> Essa porção não-kepleriana do perfil de voo, não só permitiria mudança de órbita (a linha imaginária que a órbita do satélite traça na faixa terrestre [*ground tracking*] que se requer para preencher novo objetivo operacional) como também adicionaria certo grau de incerteza aos adversários interessados em rastrear esse veículo. Dessa forma, um adversário poderia ser pego de surpresa com pouco ou sequer aviso prévio anunciando a presença do veículo. A profundidade de penetração atmosférica pelo satélite determina a autoridade de controle dos mecanismos criados para modificar os parâmetros orbitais. Uma penetração profunda mudaria drasticamente a órbita, o que nem mesmo os motores de foguete de combustível líquido, de alta propulsão conseguem fazer, dada a quantidade proibitiva de combustível gasto por essa classe de motores.<sup>16</sup>

Um veículo capaz de ingressar e sair da atmosfera, sem sofrer dano causado pelas forças-G e aquecimento devido a fricção atmosférica, certamente exigiria certas alterações em projeto. Uma vez que o *ORS* tenta mudar por completo a arquitetura e o estilo de operações espaciais é a perfeita oportunidade para fazer com que a ideia dê outro passo à frente, levando em consideração abordagens inovadoras, a fim de aumentar a flexibilidade, com modificações relativamente simples, proporcionando maior retorno pelo esforço despendido. Os efeitos, controles, benefícios e perigos de reentrada são bem conhecidos desde o início do voo espacial tripulado. Com a seleção cuidadosa de características de projeto de certo veículo, podemos aumentar consideravelmente sua capacidade de ascensão e, por-

tanto, a autoridade de controle aerodinâmico para modificar sua órbita. Com isso expandiríamos os limites de voo e aumentaríamos a flexibilidade operacional.

O conceito de veículo manobrável, em grau muito menor para altitudes acima de 150 km, também aplica-se aos atuais satélites operacionais não projetados com capacidade *ORS*. As forças atmosféricas de arrasto desempenham papel em órbitas de satélites a, ou abaixo de 700 km de altitude. O ônibus espacial e a Estação Espacial Internacional sofrem essas forças constantemente e devem combatê-las para prevenir a defazagem orbital. A tecnologia que permite a manobra de satélites está disponível e em uso, mas o *CONOPS* deve mudar (primeira fase). Os motores elétricos de baixa propulsão permitem aos satélites, já em órbita, realizar manobras lentas, precisas e altamente eficientes de manutenção para a estação espacial. O *CONOPS* atual exige que a nave espacial alcance e mantenha a órbita quase que exclusivamente para o resto do ciclo-de-vida do veículo. Já que a maioria das naves espaciais é projetada dessa maneira, não se dá muita atenção ao potencial de voo via propulsão. Quando necessário, esses motores conseguem colocar grandes satélites em órbita, para atender a diferentes teatros terrestres, em caso de sistema geossíncronico, ou alterar o momento de chegada de satélite sobre certo alvo (período de tempo sobre o alvo [*time over target – TOT*]) em caso de sistemas a baixa órbita terrestre.<sup>17</sup> Para aproveitar esse potencial, o *CONOPS* deve proceder sob a suposição de que essas naves não são obrigadas, necessariamente, a operar dentro da órbita a que foram inicialmente lançadas. Além disso, quando levamos em consideração a possibilidade de que a atmosfera superior possa alterar a órbita de veículos (mesmo pequenas forças de arrasto induzem à grande mudança), um sistema já em órbita pode manobrar de forma notável para mudar o *TOT* ou localização geográfica, até mesmo sem modificar as características dos veículos (segunda fase).

## O Conceito do Projeto e os Resultados

Pequena mudança orbital afeta a linha imaginária terrestre traçada por satélite. Um meio sem equipamento *ORS* que usa propulsão contínua via motor elétrico durante sete dias consegue alterar a velocidade suficientemente dentro do mesmo plano orbital para produzir uma mudança de 24 horas no *TOT*, modificando o traçado terrestre.<sup>18</sup> A alteração do traçado terrestre é proporcional ao período de espera fornecido para o ajuste da órbita. Em simples palavras, quanto maior o tempo disponível para colocar em operação uma mudança de *TOT*, tanto maior a magnitude da mudança em potencial. A primeira e a segunda fases do programa de pesquisa podem alcançar o resultado quando se modifica um sistema existente do *CONOPS* para permitir manobras que alteram o *TOT*. No entanto, o período de tempo de reação não se compara ao reivindicado pelos sistemas *ORS* em desenvolvimento. Em última análise, um meio de *ORS* é capaz de atingir qualquer ponto terrestre dentro de 45 minutos após o lançamento e apenas nove horas após receber a solicitação inicial da tarefa.<sup>19</sup> No entanto, este objetivo de *ORS* ainda não é realidade. Um recurso espacial atual que consegue fazer manobras durante a órbita, utilizando propulsão elétrica, sem entrar na atmosfera (ou seja, permanecendo acima de altitude de 122 km), pode chegar a qualquer ponto na Terra, em qualquer *TOT* especificado, dentro de sete dias. Em comparação, as simulações demonstram que um meio manobrável projetado com características aerodinâmicas, que utiliza as forças atmosféricas e manobras fora de plano, reduziria o período de tempo necessário para alcançar a órbita desejável em cerca de 75% (ou seja, de sete para cerca de dois dias) como mencionado na terceira fase. Com um pouco de criatividade, podemos combinar as manobras atmosféricas com um satélite *ORS* para fornecer um sistema barato, altamente eficaz, capaz de reagir rapidamente às ameaças que os Estados Unidos enfrentam atualmente.

Um meio de *ORS* é concebido como pequeno e leve satélite capaz de manter a ati-

tude (orientação) e local (manter o posto). Para torná-lo manobrável (quarta fase), poderíamos projetar o satélite com pequeno motor propulsor a impulso (foguetes) ou de capacidade de propulsão elétrica, altamente eficiente (tal como um propulsor a Efeito Hall). A propulsão via impulso permite rápidas, mas, mesmo assim, pequenas mudanças em órbita. A propulsão elétrica contínua, acumulando energia para alcançar órbita estacionária estável, permitindo a repetição do processo. O conceito do projeto envolveria o lançamento de satélite em plano orbital específico para satisfazer as necessidades da tarefa inicial. Após completar a primeira missão, o veículo modificaria ligeiramente a órbita, via impulso, causando o perigeu (ponto da órbita mais próximo à superfície terrestre) para entrar ou “mergulhar” na atmosfera onde o satélite usaria forças aerodinâmicas para mudar o plano orbital e satisfazer as demandas da próxima tarefa. Toda vez que o veículo executa tal manobra, perde energia. As simulações demonstram que quando o nível de energia do satélite mal consegue sustentar o voo orbital, o sistema de propulsão elétrica contínua aumentará tal nível de forma eficiente o suficiente para manter o veículo em órbita. Pode-se repetir tal processo até o satélite ficar sem combustível para o sistema de propulsão. Uma nave espacial equipada com os dois tipos de motores descritos acima (foguetes e elétricos) conseguiria satisfazer as demandas de vários usuários, empregando a tecnologia atual. Porém, o conhecimento de como executar essas manobras eficazmente permanece ainda bem limitado. Esse conceito de projeto tentaria aumentar o número de atribuições de tarefa que o sistema conseguiria executar por um fator de seis em comparação com os meios tradicionais em baixa órbita terrestre equipados exclusivamente com propulsão química (a eficiência [ou quilometragem do combustível] de motores elétricos de baixa propulsão é de cinco a seis vezes maior do que a de motores de alta propulsão). Tal nave realizaria 15 tarefas ou mais, completando assim 15 missões de *ORS* em um só lançamento, reduzindo, de forma notável, o custo projetado da missão.

## Conclusão

O estilo espacial de se colocar em campo sistemas de satélite de grande porte, de alto custo e de capacidade desejável não é sustentável. Não satisfazem as necessidades operacionais dos combatentes norteamericanos ou protegem contra as ameaças de outras nações que exploram o espaço. Assim como a guerra convencional deve adaptar-se às exigências da contrainsurgência atual, o estilo espacial convencional deve adaptar-se ao ambiente espacial atual. As novas iniciativas, tais como *ORS* e a pesquisa mencionada neste artigo procuram fazer exatamente isso.

A fim de expandir o conceito existente de *ORS* devemos empregar uma abordagem gradativa. Na primeira fase, um novo *CONOPS* projetado ao redor de paradigma distinto para os meios espaciais já em órbita forneceria um banco de ensaio para demonstrar a viabilidade de obtenção de mudanças notáveis no *TOT*, usando propulsão elétrica, quando fora da atmosfera. A tecnologia necessária já está em uso, foi bem testada e é bem conhecida. O fato desta fase não requerer o desenvolvimento de novo equipamento, garantiria baixo custo. A segunda fase permitiria maior flexibilidade e maior capacidade de reação às necessidades dos combatentes, incorporando forças aerodinâmicas em órbitas bastante baixas (122 km) criando oportunidades antes inalcançáveis, devido às restrições de veículos e combustível. A terceira fase envolverá o projeto de novo veículo concebido para entrar na atmosfera, executar a mudança orbital desejada e ascender de volta ao espaço. A tecnologia para criar as características mais adequadas do veículo, a fim de aproveitar as forças de ascensão e arrasto também já existe e já passou por muito estudo. Mesmo assim devemos levar a efeito maiores pesquisas, devido às inúmeras possibilidades de mudança de traçados terrestres, a fim de apoiar missões múltiplas. Como proposto, a tecnologia continua pouco compreendida. Esta fase oferece ampla possibilidade para efetuar mudanças orbitais em grande escala, a custo de combustível bastante baixo, aumentando a vida útil de satélites (quando comparado ao mesmo tipo de mudança que

utiliza propulsão química tradicional), permitindo-lhe levar a cabo um número de cinco a seis vezes maior de tarefas do que os satélites operacionais atuais, que não foram projetados para grandes manobras. A fase final expandiria o alcance do *ORS* para incluir capacidade de manobra. Ao permitir que satélites eficazes e de baixo custo executem tarefas múltiplas durante seu ciclo-de-vida útil, reduziríamos o número de lançamentos, criando capacidade suficiente para fazer do *ORS* um sistema verdadeiramente reativo.

A inevitável mudança de paradigma para o programa espacial norteamericano já iniciou. As futuras operações espaciais convencionais devem incluir meios espaciais pequenos, de baixo custo, reativos e manobráveis que podemos projetar e lançar dentro de meses e não décadas.

*Base Aérea Wright-Patterson, Ohio*

#### Notas

1. James R. Wertz, *Responsive Space Mission Analysis and Design* (El Segundo, CA: Microcosm Press, 2007), 4. (Manual que acompanha curso sobre o assunto lecionado pelo Dr. Wertz.) Comparamos o custo de 20 milhões de dólares da missão reativa (lançamento, espaçonaves, carga útil e um ano de operações) aos 2 bilhões de dólares gastos em programas tradicionais (excluindo custos operacionais).

2. *Ibid.*, 5.

3. O Propulsor a Efeito Hall é um tipo de motor de propulsão iônica, na qual campo elétrico acelera o combustível. O propulsor armazena elétrons em campo magnético, usando-os para ionizar o combustível, acelerando os íons de forma eficiente para a propulsão e neutralizando os íons na coluna do gás combustível. Em propulsor Hall, um plasma de elétrons na extremidade aberta do propulsor fornece a carga negativa de atração em lugar de propulsor padrão de íons isolados eletromagneticamente. Ver *Wikipedia: The Free Encyclopedia*, s.v. "Hall effect thruster," [http://en.wikipedia.org/wiki/Hall\\_effect\\_thruster](http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_thruster); and "Hall Effect Thruster Systems," Busek, acessado em 2 de março de 2011, <http://www.busek.com/halleffect.html>.

4. A linha que separa a atmosfera terrestre do espaço sideral não é precisa. Os satélites são afetados pelo arrasto atmosférico à altitudes abaixo de 700 km da superfície terrestre. As forças existentes durante a reentrada atmosférica são marcantes a 120 km de altitude. Os satélites atuais não são projetados para suportar tais forças.

5. Wertz, *Responsive Space Mission Analysis*, 7.

6. Em uma série de apresentações de relatório e reuniões entre 2007-9, grupos de trabalho conjunto acerca de banda larga [*Joint Wideband Working Groups*] entraram em debate acerca da capacidade limitada em comunicações militares via satélite oferecida pelos sistemas do *DoD* e como utilizá-la para satisfazer a demanda militar. Os sistemas militares, como o *Global Hawk*, *Predator* e *Blue Force Tracking* necessitam de amplitude de banda de satélite de alta capacidade, flexibilidade e de fácil acesso, o que a frota de satélites da época não conseguiam fornecer. A grande preocupação era a dependência do *DoD* em meios comerciais (80%). Esses grupos de trabalho reuniram-se trimestralmente em diferentes locais, como a Califórnia, Colorado e Flórida. Ver também Greg Berlocher, "Military Continues to Influence Commercial Operators," *Satellite Today*, 1 September 2008, [http://www.satellitetoday.com/military/milsatcom/Military-Continues-To-Influence-Commercial-Operators\\_24295.html](http://www.satellitetoday.com/military/milsatcom/Military-Continues-To-Influence-Commercial-Operators_24295.html).

7. David N. Spires, *Beyond Horizons: A Half Century of Air Force Space Leadership*, rev. ed. (Peterson AFB, CO: Air Force Space Command in association with Air University Press, 1998), 268.

8. "Wideband Gapfiller System," *GlobalSecurity.org*, 10 April 2005, <http://www.globalsecurity.org/space/systems/wgs-schedule.htm>. O sistema *Wideband Gapfiller* mais tarde (aproximadamente em 2007) foi redenominado *Wideband Global SATCOM*.

9. Wertz, *Responsive Space Mission Analysis*, 7-9.

10. "Kepleriana" refere-se à órbita de satélite em torno de outro corpo governado pela força de gravidade em ausência de arrasto atmosférico ou propulsão.

11. Robert Newberry, "Powered Spaceflight for Responsive Space Systems," *High Frontier* 1, no. 4 (2005): 48.

12. *Ibid.*

13. Les Doggrell, "A Restauração Impreterível," *Air and Space Power Journal* 20. Trimestre 2009): 25.

14. Lt Col Kerry D. Hicks, *Introduction to Astrodynamic Reentry*, AFIT/EN/TR-09-03 (Wright-Patterson AFB, OH: Graduate School of Engineering and Management, 9 September 2009), 239-41.

15. *Ibid.*

16. "Mars Reconnaissance Orbiter Successfully Concludes Aerobraking," *National Aeronautics and Space Administration*, 30 August 2006, [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/MRO/news/mrof-20060830.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mrof-20060830.html).

17. Em 2008, o satélite *WGS-1* deslucou-se de sua latitude de prova de 122,8° oeste a 180° oeste durante a órbita geosincrônica. A nave espacial executou essa manobra de fase [*phasing maneuver*] usando apenas propulsores *Xenon Ion Propulsion System* (de propulsão elétrica). Para debates acerca da mudança do *TOT* para satélites à baixa órbita terrestre, ver Newberry, "Powered Spaceflight," 46-49.

18. *Ibid.*, 48.

19. Wertz, *Responsive Space Mission Analysis*, 9.