



Engenharia de sistemas de movimento para o espaço: Um guia para a confiabilidade, a escalabilidade e o sucesso da missão

A economia espacial está passando por uma profunda transformação. Da rápida comercialização da órbita terrestre baixa (LEO) às ambiciosas missões extraterrestres com o objetivo de alcançar a Lua, Marte e outros destinos, o ritmo da inovação nunca foi tão acelerado.

Atualmente, espera-se que as equipes de engenharia criem protótipos rapidamente, iterem com agilidade e escalem a produção de forma eficiente, ao mesmo tempo em que projetam sistemas capazes de sobreviver a anos de operação em alguns dos ambientes mais hostis que se pode imaginar.

Mesmo quando você conhece a cinemática e já modelou os requisitos de torque e velocidade, o desafio não é apenas construir para o espaço. Trata-se de saber quais decisões tomadas em terra criarão problemas a 386 quilômetros de altitude ou mais, ou na superfície de um planeta. Não existe resfriamento por convecção no espaço. Os sistemas de isolamento padrão degradam-se sob radiação. Materiais que apresentam desempenho impecável em laboratório podem contaminar componentes ópticos sensíveis no vácuo.

Este artigo aborda as decisões específicas que separam um protótipo terrestre de um sistema capaz de operar no espaço – e como tomá-las com antecedência suficiente para que façam a diferença.



Principais áreas de aplicação espacial

O espaço não é um ambiente monolítico. Missões diferentes expõem os sistemas de movimento a combinações drasticamente diferentes de vácuo, radiação, ciclos térmicos, risco de contaminação e vida útil operacional. Projetar um “motor espacial” universal costuma ser tecnicamente ineficiente e economicamente inviável.

A Kollmorgen divide as aplicações espaciais em seis domínios distintos com base em fatores-chave de estresse. Essa taxonomia ajuda a alinhar o projeto de movimento com a realidade da missão, evitando tanto projetos subdimensionados catastróficos quanto projetos superdimensionados caros.

Figura 1: Os seis domínios do movimento espacial

Domínio	Fatores-chave de estresse	Implicações sobre o projeto	Intensidade da receita espacial
Estações terrestres	Ambiente padrão, condições climáticas normais, ciclos de trabalho 24 horas por dia, 7 dias por semana.	Componentes comerciais prontos para uso (COTS) de nível industrial suficientes. O foco continua sendo o tempo de atividade extremo, o rastreamento preciso e a vedação ambiental.	Baixa – produto comercial padrão ou levemente modificado
Prototipagem terrestre	Carga da gravidade; sem condições ambientais extremas.	Validar os perfis de torque/velocidade e a área de contato mecânica usando servomotores padrão sem carcaça. Manter um caminho arquitetônico escalável para o espaço.	Nenhuma – mas as escolhas arquitetônicas aqui determinam a facilidade de atualização
Órbita terrestre baixa (LEO)	Vácuo rígido, ciclos térmicos rápidos (de -150 °C a +120 °C), erosão por oxigênio atômico, radiação moderada	É necessário o cumprimento integral dos requisitos de desgaseificação a vácuo. Revestimentos de oxigênio atômico. A intensidade da receita varia com a duração da missão.	Baixa a média – a duração da missão (3 a 15 anos) determina a quantidade de recursos espaciais necessários
Espaço profundo	Frio criogênico extremo, raios cósmicos intensos, missões de muitos anos (mais de 30 anos)	Conformidade total com o vácuo, lubrificação criogênica (MoS ₂), encapsulamento proprietário resistente à radiação. Tamanho do motor otimizado para desempenho térmico.	Alta – receita espacial máxima
Habitação espacial	Ambiente respirável, temperatura moderada, proximidade humana, vida útil de mais de 30 anos	A desgaseificação é fundamental para a integridade da atmosfera. Frequentemente, pode ser alcançada com motores comerciais modificados (a receita espacial completa pode não ser necessária).	Média – modificações específicas da aplicação
Superfícies extraterrestres	Regolito abrasivo, gravidade variável, grandes oscilações diurnas, radiação extrema.	Vedação mecânica, controle de poeira, extrema resistência térmica. Padrão máximo: projetado para confiabilidade absoluta sem manutenção.	A mais alta – missão de receita espacial totalmente personalizada

A tabela (Figura 1) também define a exposição ao custo. Por exemplo, um motor comercial para prototipagem terrestre pode custar uma fração do preço de um projeto criogênico totalmente personalizado e pronto para o espaço. Dimensionar a receita à missão é uma das decisões mais impactantes que uma equipe de engenharia pode tomar no início do processo de design.

Classificado para uso espacial vs. pronto para uso espacial

Existem motores classificados para uso espacial. Eles são certificados, documentados e construídos para suportar um conjunto específico de condições ambientais. Contudo, embora “classificado para uso espacial” indique que um motor pode sobreviver no espaço, isso não significa que esteja otimizado para uma aplicação espacial específica.

Um motor classificado para um satélite em LEO com duração de 4 anos tem requisitos fundamentalmente diferentes de um motor construído para um veículo de superfície lunar operando no lado oculto da Lua. Mesmo no programa Artemis da NASA, as condições de operação podem variar significativamente dependendo da localização da missão (lado iluminado ou lado escuro) e da exposição térmica. Aplicar um motor com classificação LEO a uma

missão na superfície extraterrestre pode levar a falhas prematuras, enquanto superdimensionar uma missão LEO de curta duração com especificações para o espaço profundo pode inflar os custos não recorrentes de engenharia (NRE) e outros custos.

A abordagem da Kollmorgen começa com uma arquitetura preparada para o espaço, apoiada por uma base mecânica e eletromagnética comprovada, com mais de 60 anos de experiência em projetos como o Gemini, cinco gerações de veículos exploradores de Marte e outros programas ao longo do caminho. A partir dessa base, projetamos em conjunto uma receita espacial adaptada a domínio, vida da missão, ambiente de radiação e faixa de ciclo térmico específicos. O resultado é um sistema de movimento projetado para a missão com um caminho claro e validado, desde o protótipo terrestre até a implantação em órbita ou na superfície orbital.

Considerações críticas sobre o projeto

Uma vez estabelecido o domínio, os engenheiros devem lidar com a física e a ciência dos materiais do ambiente espacial. Os projetos de motores terrestres dependem de resfriamento convectivo, ímãs de neodímio padrão e isolamentos à base de polímeros. Todos os três pressupostos falham no espaço.

Ambientes de desgaseificação e vácuo

No alto vácuo do espaço (por exemplo, 10^{-7} Torr), muitos materiais de fabricação padrão sublimam ou liberam gases. Essa liberação de gases pode condensar sobre lentes ópticas sensíveis, painéis solares e sensores, degradando severamente as capacidades da missão.

- **Padrão de desgaseificação:** a norma NASA-STD-6016A define os limites aceitáveis para a desgaseificação. Os engenheiros devem observar duas métricas principais: a perda total de massa (TML) deve ser inferior a 1,0% (frequentemente, o limite é estritamente $< 0,5\%$ para componentes ópticos sensíveis) e a quantidade de materiais condensáveis voláteis coletados (CVCM) deve ser $< 0,1\%$.
- **Risco do material:** materiais padrão à base de poliéster, filmes de Mylar, vinil, náilon, borrachas de silicone e vernizes padrão para enrolamento de motores apresentam desempenho ruim no vácuo. Os polímeros reticulados nesses materiais se degradam, comprometendo a integridade física do isolamento.

A solução reside em processos de encapsulamento patenteados e em materiais resistentes à radiação, aplicados como parte de uma receita espacial personalizada. Em muitos casos, os testes analíticos baseados na lista de materiais (BOM) real podem prever TML e CVCM sem a necessidade de meses de testes físicos a vácuo, o que acelera diretamente os cronogramas de desenvolvimento.



Um risco de emissão de gases frequentemente negligenciado é que, mesmo que um motor atenda aos padrões, outros componentes do sistema podem não atender. A Kollmorgen trabalha com os clientes para avaliar a exposição à desgaseificação em nível de sistema, incluindo encapsulamento secundário e procedimentos de tratamento térmico para componentes que não fornecemos.

Resistência à radiação

As radiações gama e de nêutrons bombardeiam continuamente as naves espaciais. Com o tempo, essa radiação ionizante destrói o isolamento elétrico padrão e os adesivos.

- O encapsulamento do motor deve utilizar materiais de encapsulamento eletrônico (e-cap) proprietários e resistentes à radiação.
- Embora os ímãs de neodímio (Neo) padrão possam ser adequados para algumas missões, outras podem exigir materiais alternativos otimizados para estabilidade ambiental a longo prazo e manutenção do desempenho.
- As decisões sobre materiais podem introduzir considerações adicionais sobre fornecimento e prazos de entrega, mas envolver um parceiro especializado em design de movimento logo no início do processo de projeto pode ajudar a avaliar as vantagens e desvantagens antes que o formato seja definido.

Dinâmica térmica e criogenia

O gerenciamento térmico é o desafio mais subestimado no projeto de movimento espacial. Com resfriamento convectivo zero, todo o calor gerado pelo motor (perdas de cobre e de ferro) e a radiação solar externa devem ser gerenciados apenas por condução e radiação.

- **Extração de calor:** as naves espaciais normalmente utilizam circuitos de refrigeração líquida para transportar o calor conduzido do motor para conjuntos de radiadores no espaço profundo. Os motores devem ser dimensionados meticulosamente de acordo com seu desempenho térmico real para evitar falhas de isolamento.
- **Mudança criogênica:** historicamente, os subsistemas eram aquecidos artificialmente para permanecerem acima de -145°C , pois a ciência dos materiais não podia garantir a sobrevivência abaixo desse limite. No entanto, a próxima geração de missões extraterrestres (como as que exploram o lado oculto da Lua) tem como alvo temperaturas ambientais de -185°C a -220°C .
- **Fadiga térmica:** a amplitude térmica é tão prejudicial quanto o frio absoluto. A alternância repetida entre o frio criogênico e o calor da radiação solar provoca fadiga térmica extrema em invólucros de alumínio, lâminas de aço e enrolamentos de cobre. Os sistemas de isolamento precisam ser altamente especializados para resistir a esses ciclos violentos de contração e expansão sem se romperem.

Otimização de choque, vibração e tamanho/peso

Os sistemas de propulsão espacial devem suportar forças de lançamento intensas e operar por longos períodos, minimizando ao mesmo tempo a massa total da carga útil. Para alcançar esse objetivo, os engenheiros devem equilibrar estrategicamente a durabilidade estrutural, o desempenho e a capacidade de fabricação.

- **Capacidade de sobrevivência no lançamento:** os impactos e vibrações durante o lançamento podem afetar a integridade do enrolamento, a retenção dos ímãs e o alinhamento mecânico antes mesmo da espaçonave atingir a órbita.
- **Redução de peso:** cada grama adicionada à carga útil aumenta os custos de lançamento e os requisitos de combustível, tornando os projetos de atuadores compactos e leves essenciais.
- **Dilemas da densidade de torque:** reduzir o tamanho e o peso não pode comprometer o desempenho nem a confiabilidade. Os sistemas de movimento ainda devem fornecer o torque, a rigidez e o desempenho térmico necessários para a missão.



Por que escolher motores sem carcaça

No espaço, todos os componentes que puderem ser eliminados devem ser. Os motores sem carcaça ajudam a simplificar as arquiteturas de movimento, eliminando carcaças, eixos e acoplamentos desnecessários, ao mesmo tempo em que permitem aos engenheiros integrar o motor diretamente no projeto do atuador.

Diferentemente dos servomotores com carcaça, os motores sem carcaça consistem apenas no estator e no rotor. Isso proporciona aos engenheiros maior flexibilidade para otimizar a estrutura circundante conforme as exigências térmicas, mecânicas e ambientais específicas da missão.

Aqui estão algumas vantagens importantes das arquiteturas de acionamento direto sem carcaça:

- Tamanho e peso reduzidos pela eliminação de componentes mecânicos redundantes e pela integração compacta do atuador
- Melhoria na gestão térmica, permitindo que a própria carcaça do atuador se torne parte do caminho de condução de calor

- Maior adaptabilidade ambiental por meio de estratégias de vedação, seleção de materiais e mitigação de contaminação específicas para cada aplicação
- Maior precisão e rigidez pela redução da folga e da flexibilidade no sistema de movimento
- Caminhos de desenvolvimento escaláveis que suportam a continuidade desde a prototipagem terrestre até projetos prontos para missão

A Kollmorgen oferece diversos modelos de motores sem carcaça que atendem a diferentes prioridades de aplicações espaciais. Os motores TBM e KBM são comumente usados em juntas robóticas compactas, cardans e sistemas de posicionamento de precisão, enquanto os motores TBM2G são otimizados para melhor desempenho térmico em projetos com restrições térmicas. Os motores RBE oferecem a gama de tamanhos e a comprovada experiência necessárias para aplicações de alto torque e baixa velocidade que exigem confiabilidade a longo prazo.



Como acelerar o tempo para o espaço

A principal lição para as equipes de engenharia que entram no mercado espacial é que o envelope mecânico validado em solo deve ser o mesmo que será enviado ao espaço. Isso exige a arquitetura correta do motor desde o primeiro dia.

1. Começar na Terra, pensar arquitetonicamente

A abordagem mais eficiente é começar com motores comerciais padrão sem carcaça (como as séries Kollmorgen TBM ou KBM) para construir protótipos físicos, mapear os perfis de torque e velocidade e finalizar o formato estrutural em questão de semanas — a uma fração do custo de um hardware espacial personalizado. A chave é selecionar uma família de motores com um caminho de atualização já estabelecido.

2. Fazer a “receita espacial” em coengenharia

Após a validação do formato e do desempenho eletromagnético em solo, especialistas em controle de movimento colaboram com as equipes de engenharia do OEM para aplicar a “receita espacial” correta. Isso pode envolver a transição para tipos específicos de ímãs, sistemas de isolamento resistentes à radiação e encapsulamentos com baixa emissão de gases, preservando a arquitetura principal do motor e o tamanho mecânico. Ao manter a geometria do atuador e os pontos de integração, as equipes de engenharia podem reduzir o esforço de redesenho e acelerar a transição da prototipagem terrestre para sistemas operacionais.

3. Mitigação em nível de sistema

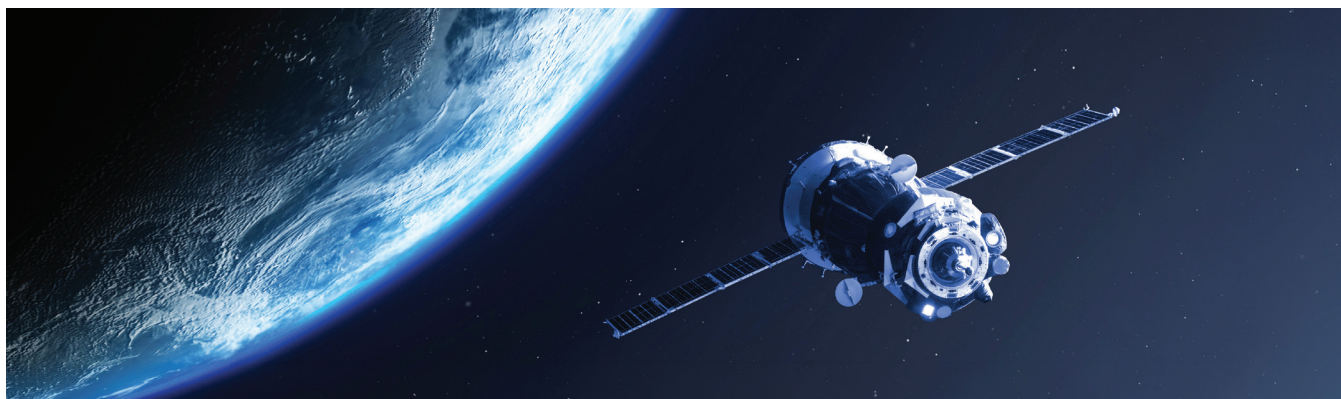
Embora possam não estar construindo a plataforma, parceiros especializados em mobilidade podem fornecer estratégias de mitigação em nível de sistema. Por exemplo, na Kollmorgen, prestamos consultoria sobre técnicas de encapsulamento secundário dentro da carcaça do atuador ou sobre o estabelecimento de procedimentos específicos de “desgaseificação” térmica para forçar a eliminação de gases na Terra antes mesmo de o sistema ser carregado em um veículo de lançamento. É aqui que um modelo entre engenheiros demonstra seu valor. O objetivo é ajudar as equipes a reduzir os riscos das decisões de projeto antes que se tornem problemas críticos para a missão.



Os prazos de entrega típicos para protótipos são de 2 a 3 semanas para motores padrão sem carcaça (50 mm a 115 mm) ou de 12 a 20 semanas para sistemas terrestres personalizados maiores.

Um modelo de coengenharia desenvolvido para o mercado espacial atual.

Duas filosofias distintas de engenharia estão se destacando no mercado espacial. Engenheiros tradicionais de OEMs com anos de experiência, que agem com cautela e compreendem o custo de uma falha na missão. E, por fim, equipes comerciais e startups que agem com rapidez, criam protótipos de forma agressiva e adotam a mentalidade de aprender com os erros. A Kollmorgen oferece um caminho rápido, desde o protótipo até a aplicação no espaço, associado a mais de 60 anos de experiência em coengenharia e em validação documentada de materiais, para atender a qualquer uma das abordagens.



Realidades e dilemas do projeto

Ao projetar movimentos para o espaço, cada decisão influencia a seguinte. A seguir, apresentamos alguns dos desafios comuns que as equipes enfrentam e as abordagens recomendadas para planejar com antecedência e implementar mais rapidamente.

Desafio	Estratégia recomendada
Busca de um motor “classificado para espaço” e pronto para usar	Busque arquiteturas capazes de operar no espaço e que possam ser aprimoradas com uma receita espacial personalizada. Os requisitos térmicos, de radiação e de vácuo de cada missão são únicos, e o sistema de movimento deve atender a essas demandas específicas da aplicação.
Subestimar o frio criogênico	Não assuma que materiais padrão resistem a ciclos térmicos dinâmicos a -200 °C sem validação. O frio criogênico profundo é o modo de falha mais frequentemente subestimado no projeto de movimento espacial.
Especificações excessivas para LEO	Aplicar padrões completos de radiação e desgasificação no espaço profundo a um satélite LEO com duração de 4 anos aumenta drasticamente os custos e o NRE. Adeque a receita à duração e ao domínio da missão.
Ignorar a gestão térmica até as fases finais do projeto.	Na ausência de resfriamento convectivo no espaço, a remoção de calor deve ser um princípio fundamental do projeto. Dimensione o motor considerando o desempenho térmico desde o início e planejar antecipadamente o circuito de refrigeração líquida.
Escolher um motor para o protótipo terrestre sem possibilidade de atualização	Escolha uma família de motores com um caminho de crescimento escalável já estabelecido. O envelope mecânico validado em solo deve ser o mesmo que será enviado ao espaço.

Construído para a missão

A economia espacial está crescendo mais rápido do que a força de trabalho que a sustenta. Os programas estão passando de ciclos de desenvolvimento de uma década para iterações rápidas. A pressão por custos é real. O intervalo entre o protótipo e a produção está diminuindo. Tomar as decisões certas sobre o sistema de movimento desde o início beneficia todo o programa, eliminando retrabalho, reduzindo o NRE e acelerando o tempo de implementação.

A Kollmorgen conta com mais de 60 anos de experiência no setor e arquiteturas de motores sem carcaça comprovadas, juntamente com um portfólio completo de soluções sustentáveis que alimentam, transmitem e controlam o movimento. Atuamos como uma extensão da sua equipe de engenharia, ajudando você a lidar com as complexidades da inovação acelerada, do gerenciamento térmico preciso e da fabricação altamente escalável. Sabemos que não há margem para erros e estamos aqui para ajudar a garantir a receita espacial correta para o sucesso da missão.

Pronto para o lançamento?

[Entre em contato com a Kollmorgen](#) para discutir suas necessidades e objetivos com um especialista em motores sem carcaça.

Sobre a Kollmorgen

A Kollmorgen, uma marca Regal Rexnord, tem mais de 100 anos de experiência em Motion, comprovada com motores, drives, soluções de controle para AGV e plataformas de controle de automação de maior desempenho e confiabilidade do setor. Oferecemos soluções inovadoras que são inigualáveis em desempenho, confiabilidade e facilidade de uso, dando aos fabricantes de máquinas uma vantagem inquestionável no mercado.