

Dinâmica e Controle de Veículos Espaciais

Aula 2

Atuadores de Controle de Atitude

Referências

- [1] Ley, W.; Wittman, K.; Hallmann, W. Handbook of Space Technology. West Sussex: Wiley, 2009.
- Seção 4.5.7

Atuadores de Controle de Atitude

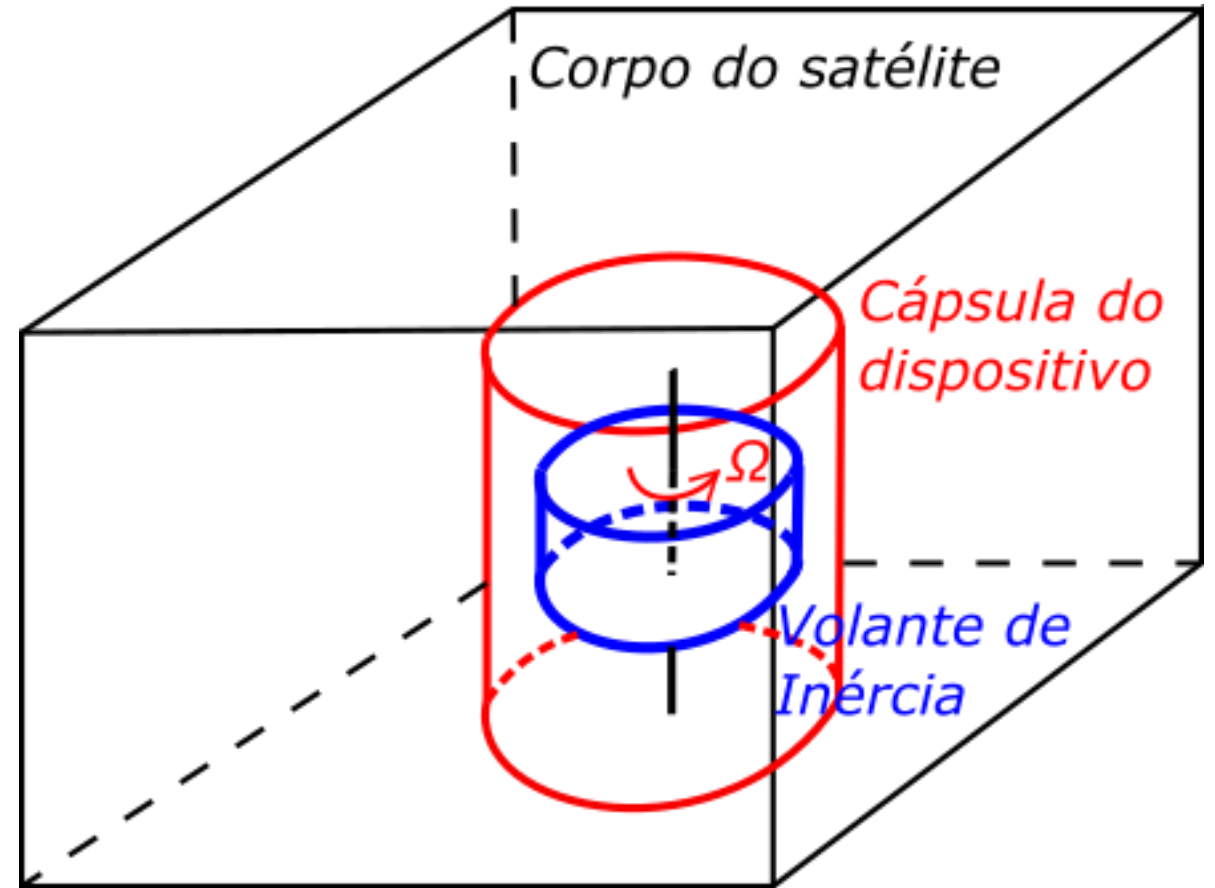
- Os atuadores de controle de atitude podem ser classificadas das seguintes formas;
- Quanto ao tipo de reação:
 - **Reação interna:** torque aplicado é proveniente da interação entre os elementos internos. Assim, a quantidade de movimento angular do conjunto corpo mais atuador é conservada;
 - **Reação externa:** o torque aplicado é proveniente da interação do corpo com o ambiente externo. Assim, a quantidade de movimento angular total do corpo pode ser alterada.

Atuadores de Controle de Atitude

- Quanto à forma de atuação:
 - Ativos: geram torque mediante a aplicação de um sinal de controle, gerado por uma lógica embarcada. Operam em malha fechada;
 - Passivos: geram torque em resposta a perturbações externas, operam em malha aberta;

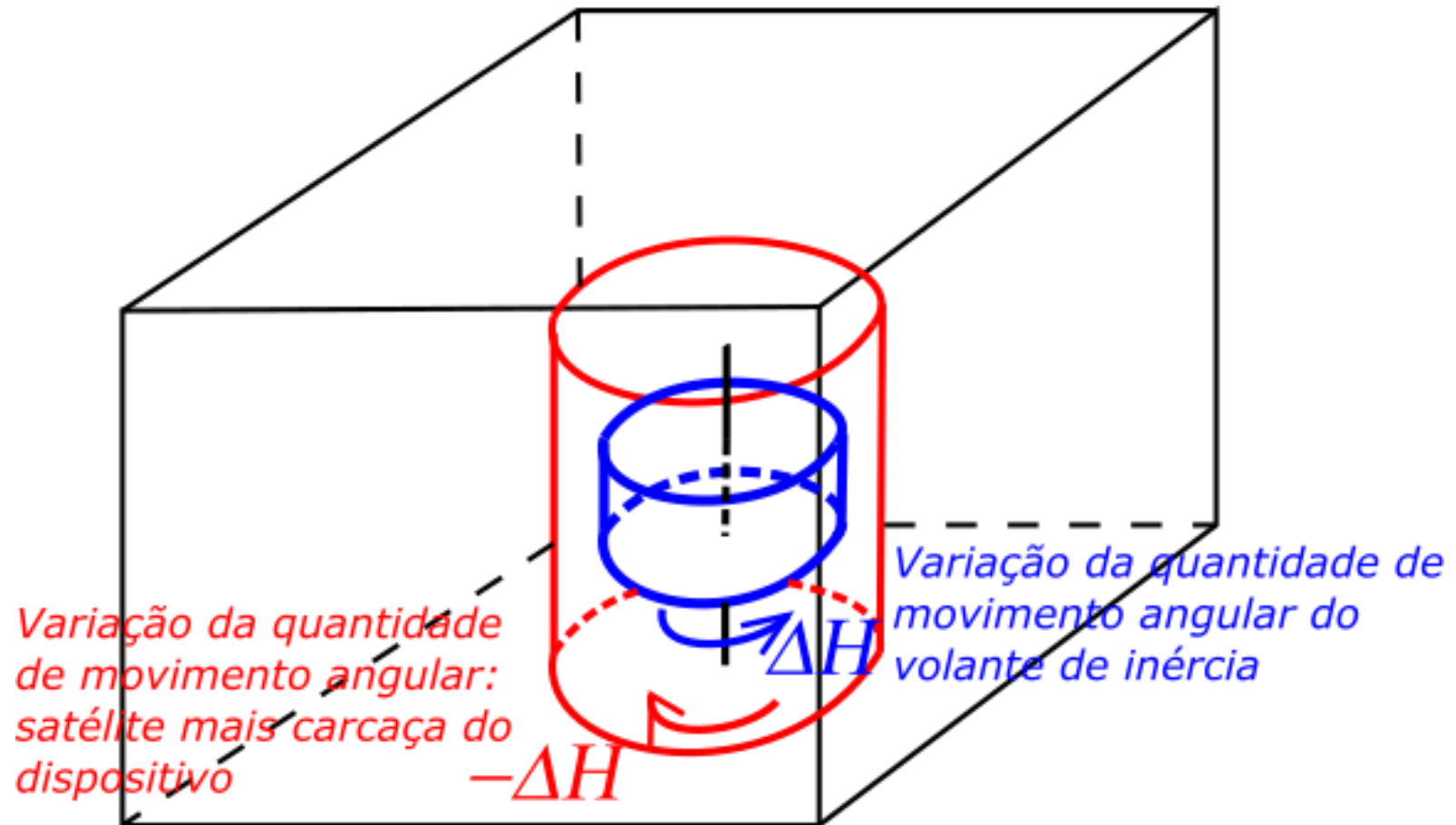
Dispositivos de Troca de Quantidade de Movimento

- Um dispositivo de troca de quantidade de movimento angular (QMA) é composto por uma cápsula e um volante de inércia;
- A cápsula é conectada rigidamente ao veículo;
- O volante de inércia tem sua velocidade angular controlada por um motor elétrico.



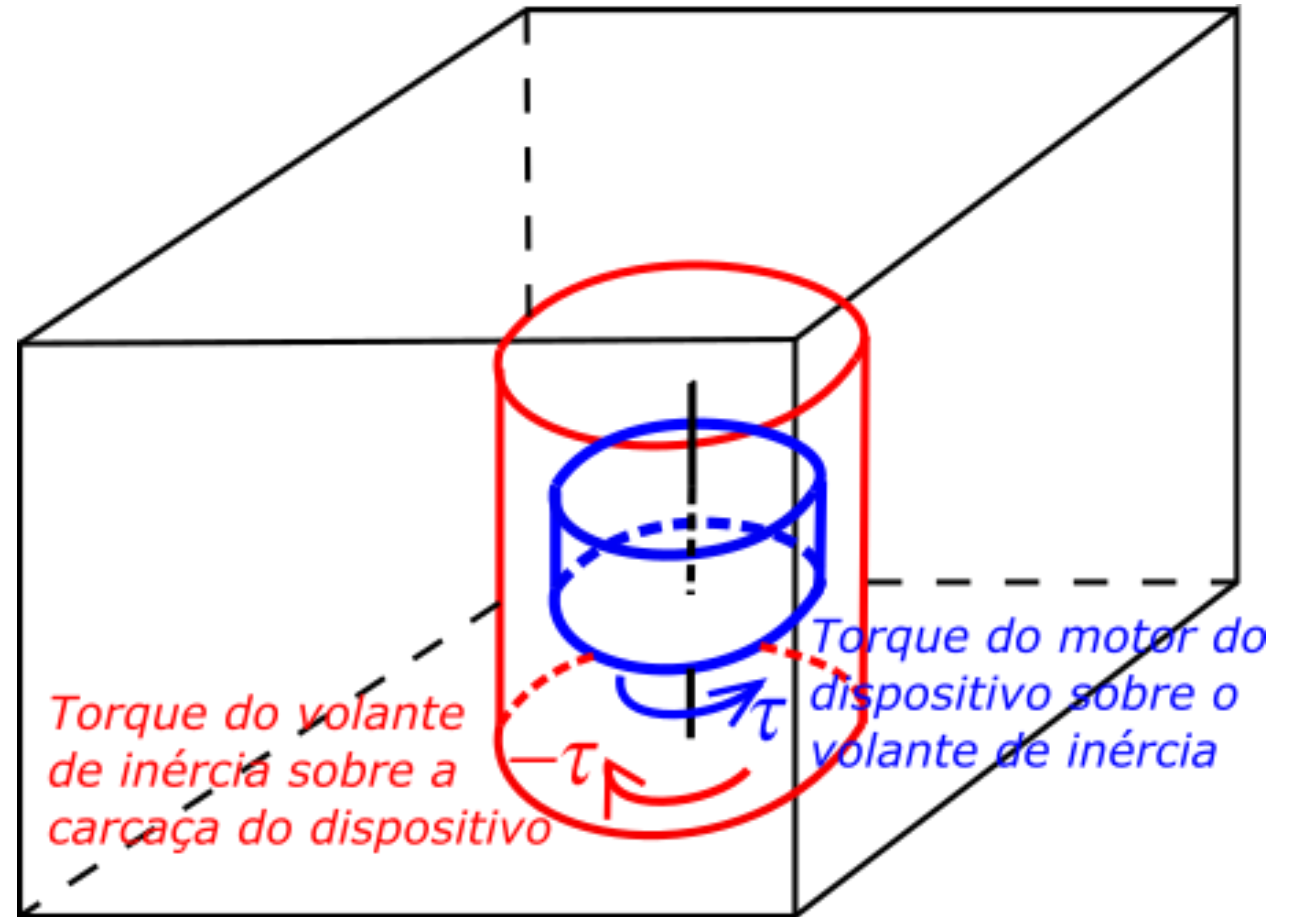
Dispositivos de Troca de Quantidade de Movimento

- São dispositivos do tipo **reação interna**. Assim, o sistema satélite mais dispositivo tem sua QMA conservada;
- Uma variação da QMA do corpo principal é absorvida com sinal contrário no dispositivo de controle e vice versa.



Dispositivos de Troca de Quantidade de Movimento

- Uma variação da QMA do volante de inércia, em módulo ou direção, é sentida com sentido contrário no veículo, gerando um momento de reação.



Dispositivos de Troca de Quantidade de Movimento

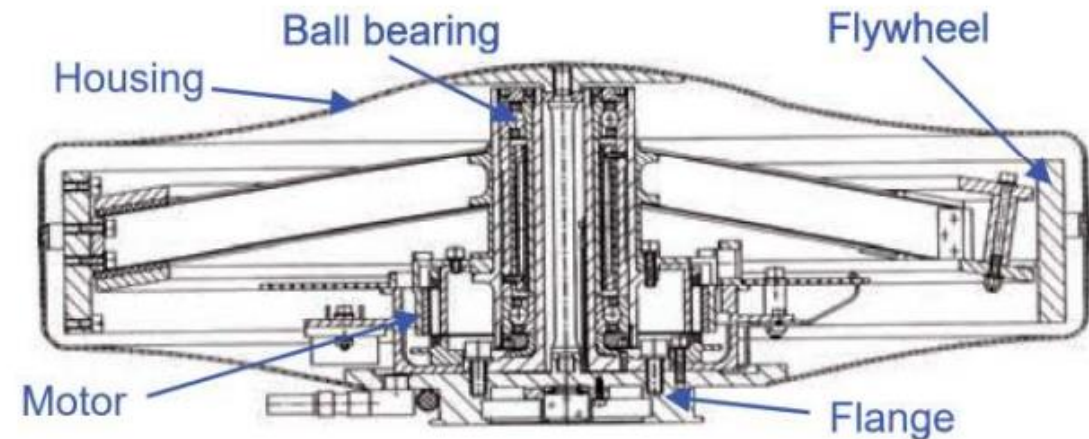
- O mesmo princípio físico é aplicado para produzir 3 dispositivos diferentes, dependendo do controle do volante de inércia;
- **Rodas de Reação**
 - Fornecem um torque ao veículo espacial, em resposta a um torque aplicado sobre seu volante de inércia. **Atuador ativo.**
- **Rodas de Momento**
 - Propiciam uma quantidade de movimento angular constante, com a finalidade de estabilização giroscópica. **Atuador passivo.**
- **Giroscópios de Controle de Momento**
 - É uma combinação entre a roda de reação e a roda de momento, fornecendo um momento de reação, a partir da mudança de direção do volante de inércia. **Atuador ativo.**

Rodas de Momento

- O objetivo de uma **roda de momento** (momentum wheel) é gerar uma QMA constante, de modo a propiciar a estabilização de um eixo do satélite em relação ao espaço inercial;
- Elas são controladas por um motor elétrico, o qual é responsável por manter a velocidade angular constante da roda com respeito à carcaça;
- A **velocidade angular** de operação é **alta**, para gerar uma elevada QMA;
- A precisão da rotação faz com que a roda de reação gere uma QMA de referência;

Rodas de Momento

- O eixo de rotação é fixo em relação à carcaça, sendo montado por meio de um mancal de rolamento;
- A roda de momento geralmente é raiada, pois isso propicia um melhor aproveitamento da massa;
- O balanceamento deve ser otimizado para a velocidade de giro de referência.



Vista superior e desenho da seção transversal de uma roda de momento. Fonte: Ref. [1].

Roda de Reação

- O objetivo de uma **roda de reação** é gerar um torque de reação oposto àquele imposto pelo motor elétrico do volante de inércia;
- Como efeito secundário, o volante de inércia será acelerado até atingir uma certa velocidade angular, que estará associada a uma QMA;
- Chama-se essa QMA de **residual**, a qual é um efeito indesejado;
- Como a QMA do satélite mais dispositivo de controle é conservada, a variação da QMA do corpo principal é absorvida com sinal contrário no dispositivo de controle.

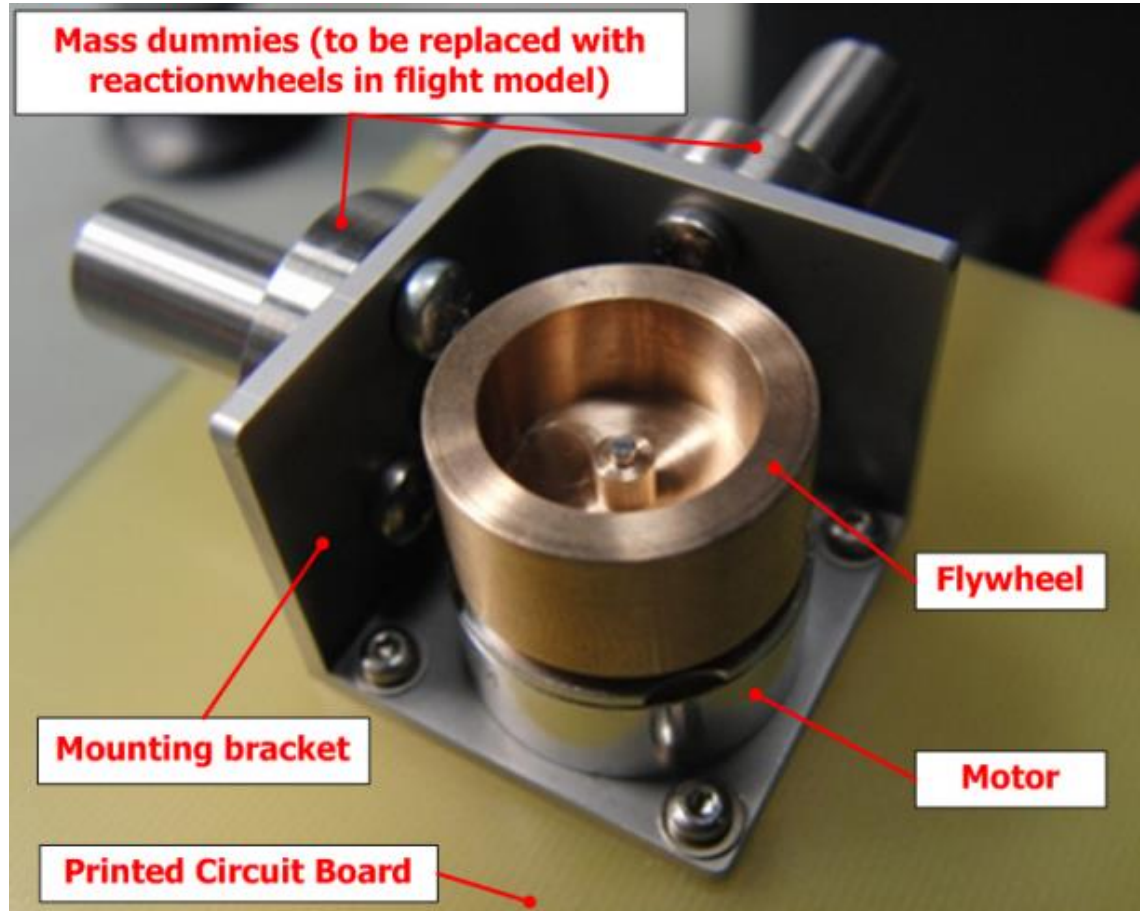
Roda de Reação

- Por causa da QMA residual, sistemas de controle de atitude com rodas de reação, no geral, precisam de um dispositivo auxiliar, de momento externo, para realizar a sua "dessaturação", ou seja, a remoção da QMA residual;
- Após a aplicação do torque, o volante de inércia interno estará girando com uma velocidade angular constante, ou seja, promovendo um *bias* de QMA.

Roda de Reação

- Problemas:
 - Após diversos acionamentos, a roda de reação pode saturar, por estar com a velocidade angular em seu limite;
 - A QMA residual no eixo da roda vai atrapalhar ações de controle com torques em eixos transversais ao mesmo;

Roda de Reação

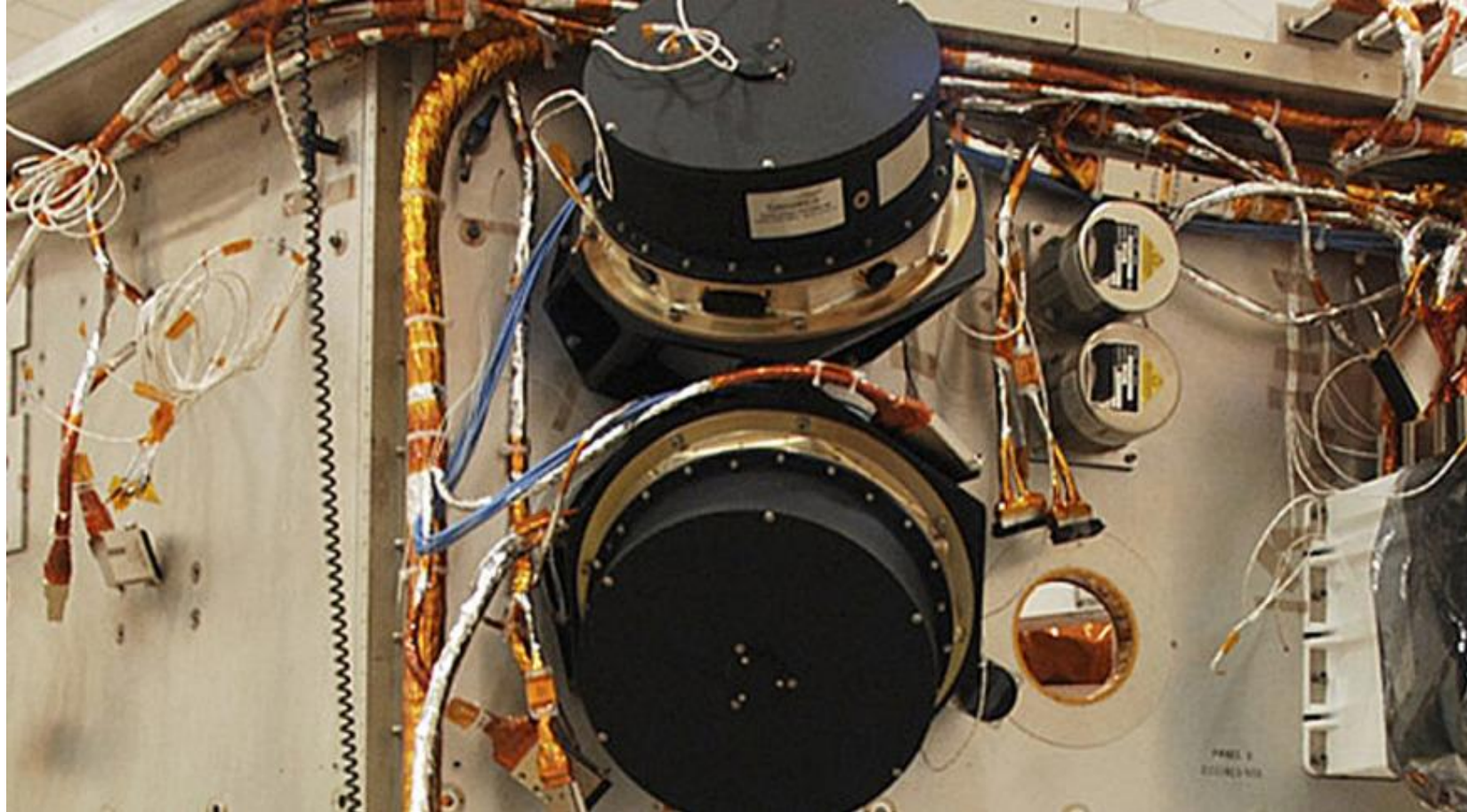


Detalhes construtivos de uma roda de reação. Fonte:
“Development of a Nano-Satellite Reaction Wheel System
with Commercial Off-The-Shelf Motors”

Características construtivas e operacionais de uma roda de reação:

- Operam em **baixa velocidade angular**;
- O maior interesse é no **torque de reação** gerado nos instantes de tempo em que o motor elétrico da mesma é acionado;
- O balanceamento do volante de inércia deve ser satisfatório em vasta gama de velocidades;
- Geralmente é maciça, pois isso a torna mais compacta.

Roda de Reação



Exemplo de montagem de rodas de reação. Fonte:
<https://spacenews.com/34692kepler-space-telescope-reaction-wheel-remains-a-concern/>

- Uma roda de reação produz torque em torno do seu eixo de rotação;
- Para aplicar torque em mais de um eixo, rodas adicionais são necessárias;
- No exemplo ao lado, constam duas rodas de reação, capazes de aplicar torque em dois eixos.

Rodas de reação

- Rodas de reação ou de momento precisam de um ótimo balanceamento de massa, pois a vibração, por menor que seja pode promover erros graves no longo prazo em veículos que operam no espaço;
- Os mancais das rodas de reação ou de momento suportam elevadas reações de apoio:
 - Eles precisam suportar as cargas do veículo lançador;
 - Os torques de reação podem ser elevados dependendo da magnitude da QMA do volante de inércia.

Giroscópio de Controle de Momento

- Um **giroscópio de controle de momento** (GCM) possui um volante de inércia que gira com velocidade constante, assim como uma roda de momento;
- No entanto, o GCM é capaz de aplicar torque de reação ao veículo espacial, assim como uma roda de reação;
- O volante de inércia é montado a um mancal de um ou mais graus de liberdade (guimbal), que é controlado de modo a alterar a direção do vetor QMA.



Giroscópio de controle de momento com guimbal de 2 graus de liberdade. Fonte: https://www.researchgate.net/figure/FIGURE-S1-Control-moment-gyroscope-CMG-A-CMG-consists-of-a-a-rotor-spinning-at-a_fig1_224594118

Giroscópio de Controle de Momento

- Ao alterar a direção do eixo de giro do volante de inércia, um momento de reação é produzido;
- Assim como as rodas de reação, os GCMs também saturam em um limite de atuação.

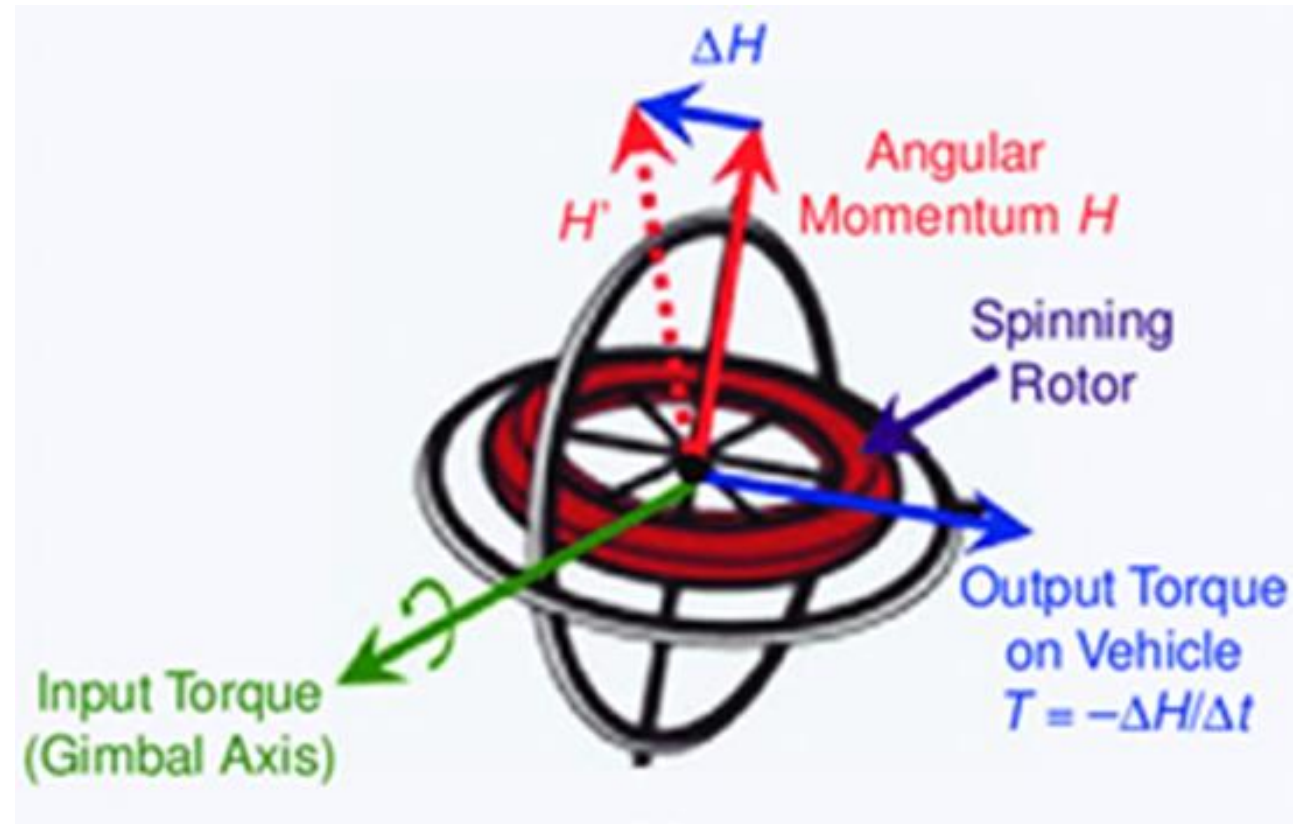
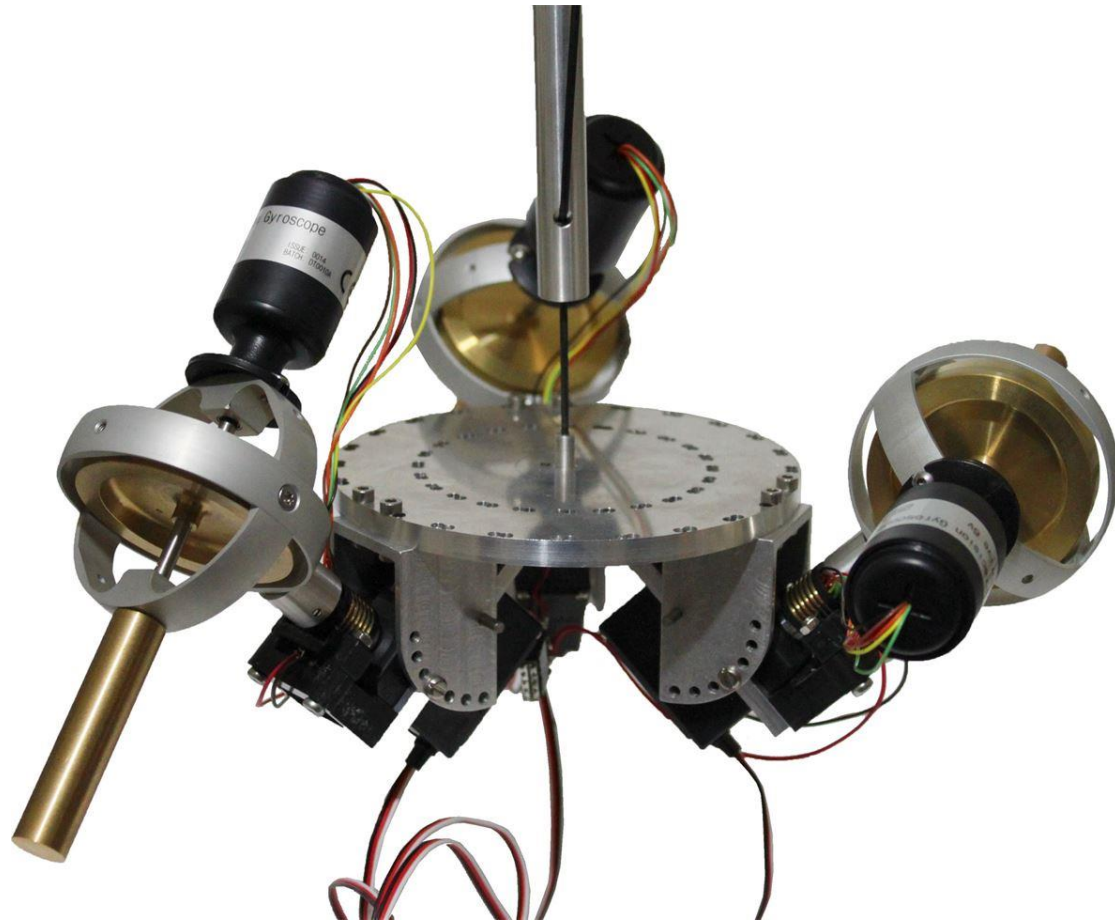


Ilustração do momento gerado em um giroscópio de controle de momento com guimbal de 2 graus de liberdade. Fonte: https://www.researchgate.net/figure/FIGURE-S1-Control-moment-gyroscope-CMG-A-CMG-consists-of-a-a-rotor-spinning-at-a_fig1_224594118

Giroscópio de Controle de Momento



- Um GCM é capaz de aplicar torque em torno de um eixo de controle;
- Para controlar mais de um eixo, volantes de inércia adicionais são necessários;
- A figura ao lado mostra um GCM com 3 volantes de inércia;
- No exemplo, cada volante tem um motor responsável por manter sua velocidade angular constante;
- Cada um deles também possui um guimbal associado e um motor elétrico responsável por alterar sua direção.

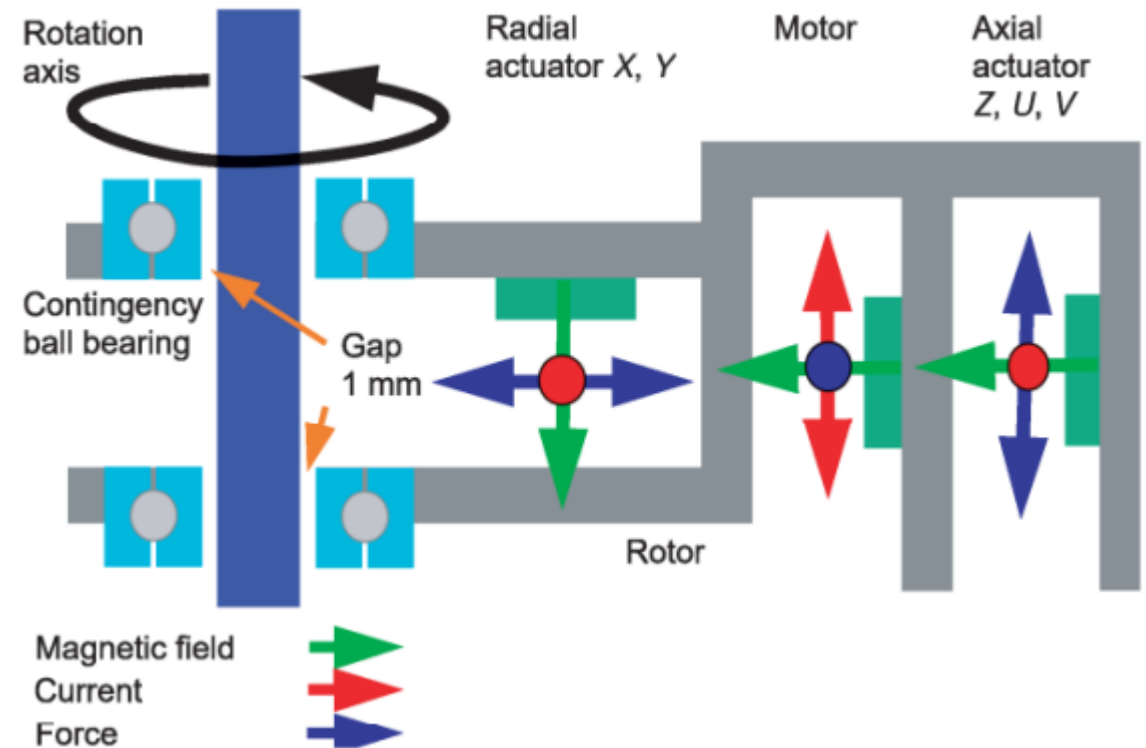
Giroscópio de Controle de Momento



- Assim como as rodas de momento e de reação, os GCMs possuem uma parte mecânica e uma eletrônica, responsável por seu controle;
- Na figura ao lado, consta um GCM real, onde pode-se visualizar seu guimbal, com um motor elétrico encapsulado em uma das pontas;
- O volante de inércia está contido em uma cápsula hermética;
- Também estão visíveis duas caixas que contém circuitos eletrônicos.

Volantes de Levitação Magnética

- Os mancais de suporte dos volantes de inércia podem trazer perturbações pequenas, mas persistentes, devido a desbalanceamento dos roletes dos rolamentos e do atrito nos mesmos.
- Uma alternativa aos mancais mecânicos são os magnéticos, que trabalham com levitação.



Esquemático das forças magnéticas em um mancal magnético de cinco eixos de um roda de momento. Fonte: ref. [1].

Dispositivos de Controle de Quantidade de Movimento

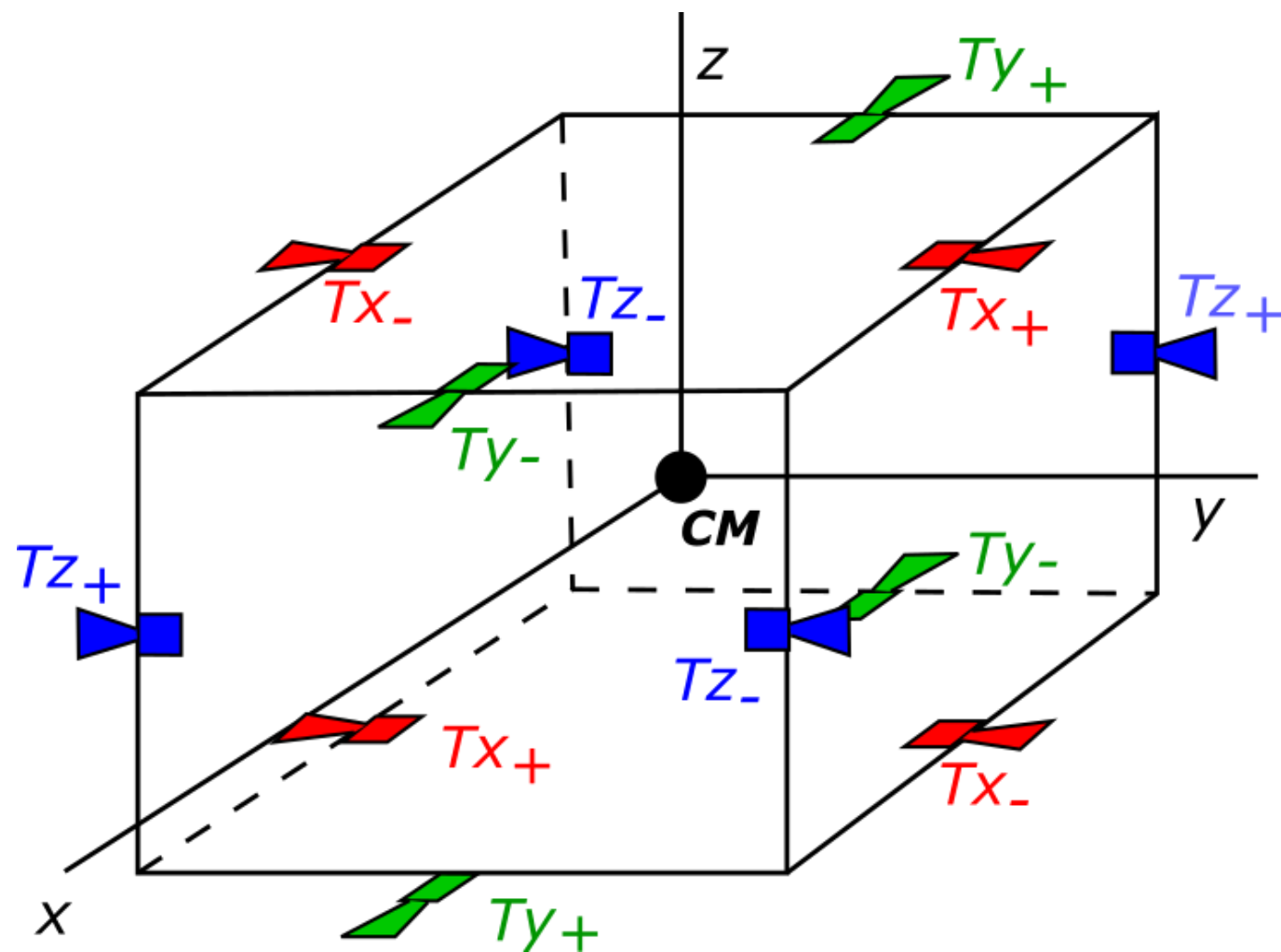
Actuator	Reaction wheel	Momentum wheel	Control momentum gyro	Remarks
Momentum capacity	15 Nm s*	50 Nm s	20 Nm s	At nominal speed; *at full speed
Reaction torque	200 mN m	50 mN m	45 000 mN m	Maximum
Mass	7 kg	8 kg	15 kg	--
Power	10 W	15 W	25 W	At steady-state speed. The temporary power consumption at full reaction torque is much higher

Valores característicos de atuadores de atitude. Fonte: ref. [1].

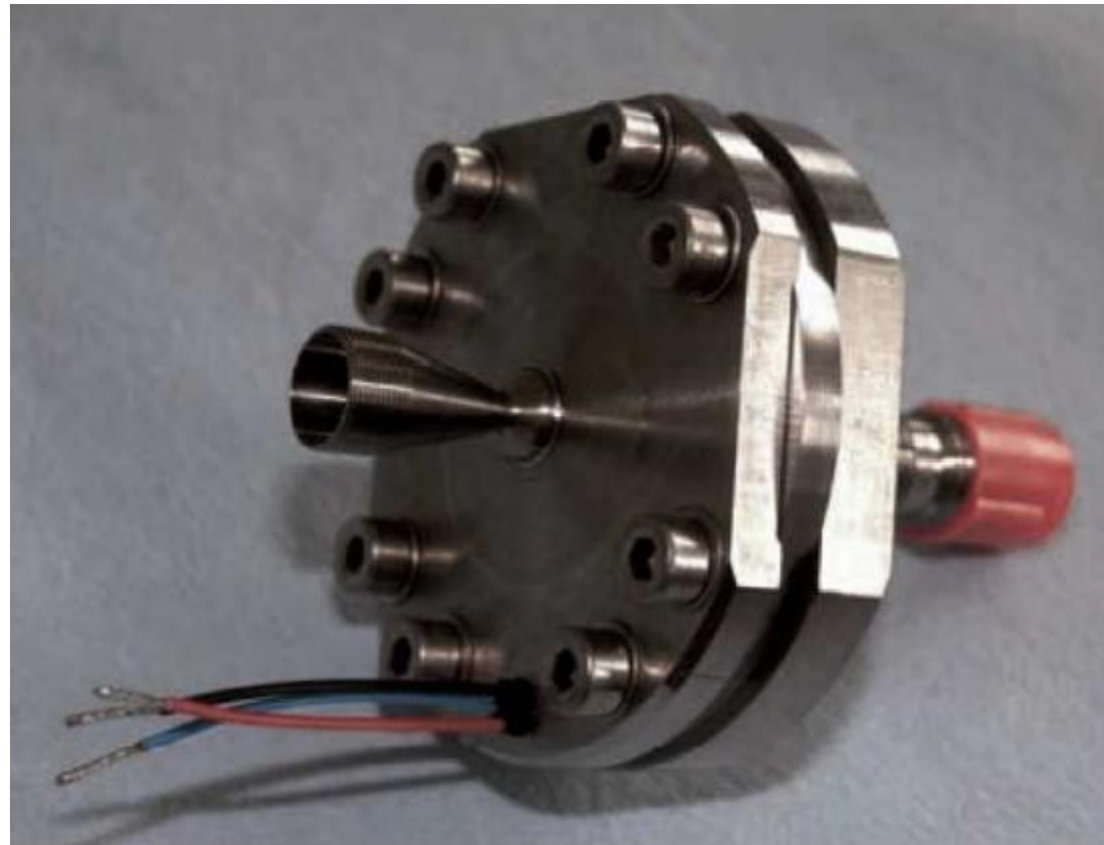
Thrusters

- Como ilustrado na figura seguinte, os thrusters são pequenos propulsores instalados em extremidades do veículo espacial;
- São atuadores ativos de reação externa;
- Geram uma força, o torque é resultado de um braço de alavanca, propiciado pela montagem dos dispositivos;
- Thrusters precisam carregar propelente. Por isso, são projetados para operar um número limitado de vezes;
- Geralmente operam com mono propelente, com disparo controlado pela abertura e fechamento de válvulas.

Thrusters



Thrusters



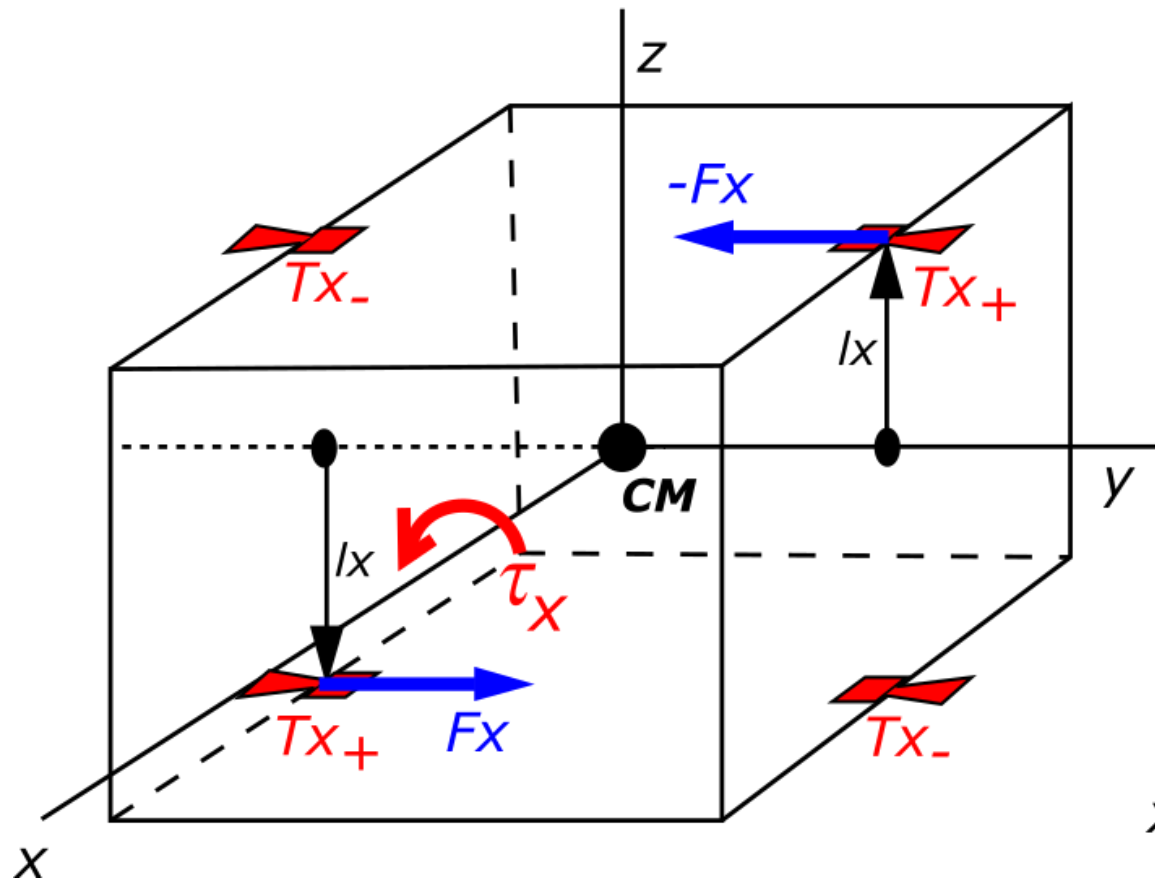
Thruster de gás frio de 40 mm de diâmetro. Fonte: ref. [1].

Thrusters

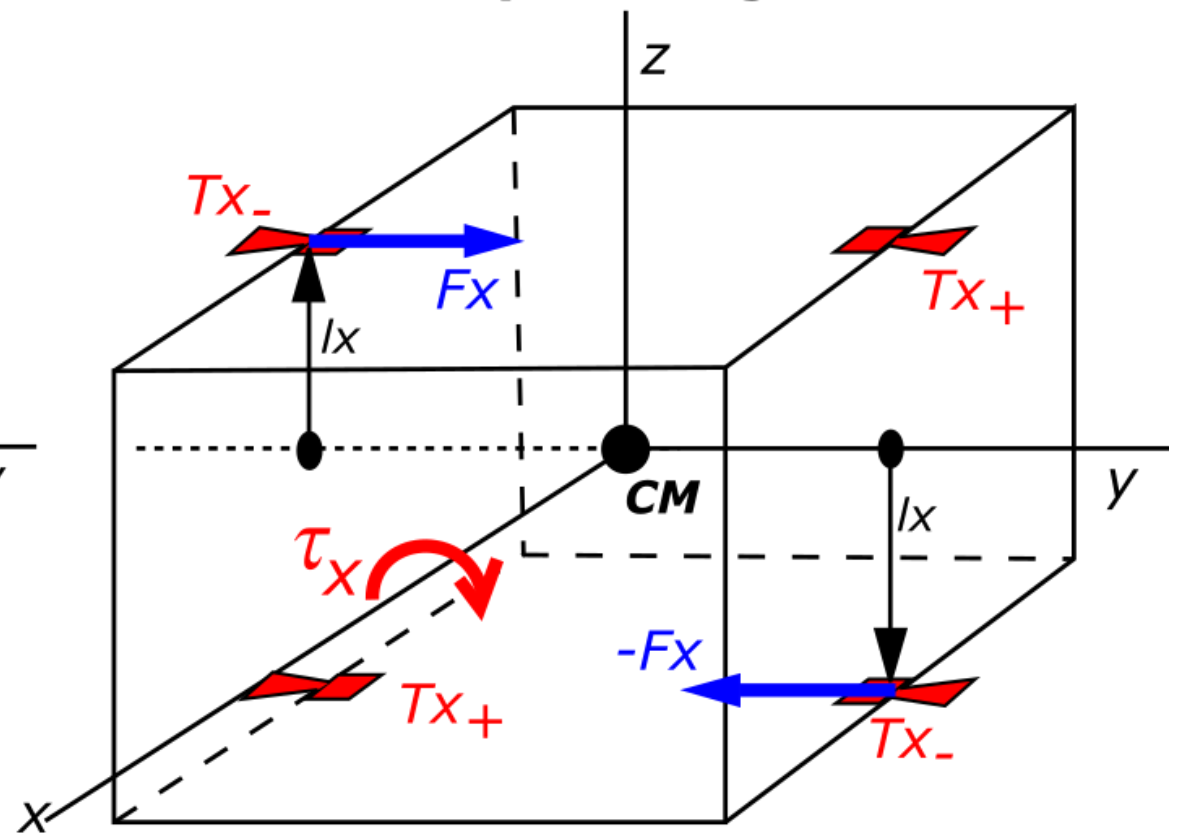
- Diferença entre thrusters e propulsores:
 - Os thrusters fornecem força relativamente pequena e o objetivo é prover momento a partir de um braço de alavanca;
 - Já os propulsores fornecem uma tração elevada com o objetivo de levantar ou abaixar uma órbita.
- Para evitar efeitos sobre a dinâmica de translação, os thrusters precisam ser usados em pares, de modo cancelar as suas forças;
- Cada par gera momento em relação a um eixo, como ilustrado nas figuras seguintes;
- O rendimento na produção de torque dependerá do braço de alavanca. Quanto maior, mais elevado o torque para o mesmo consumo de propelente.

Thrusters

Disparo Positivo X

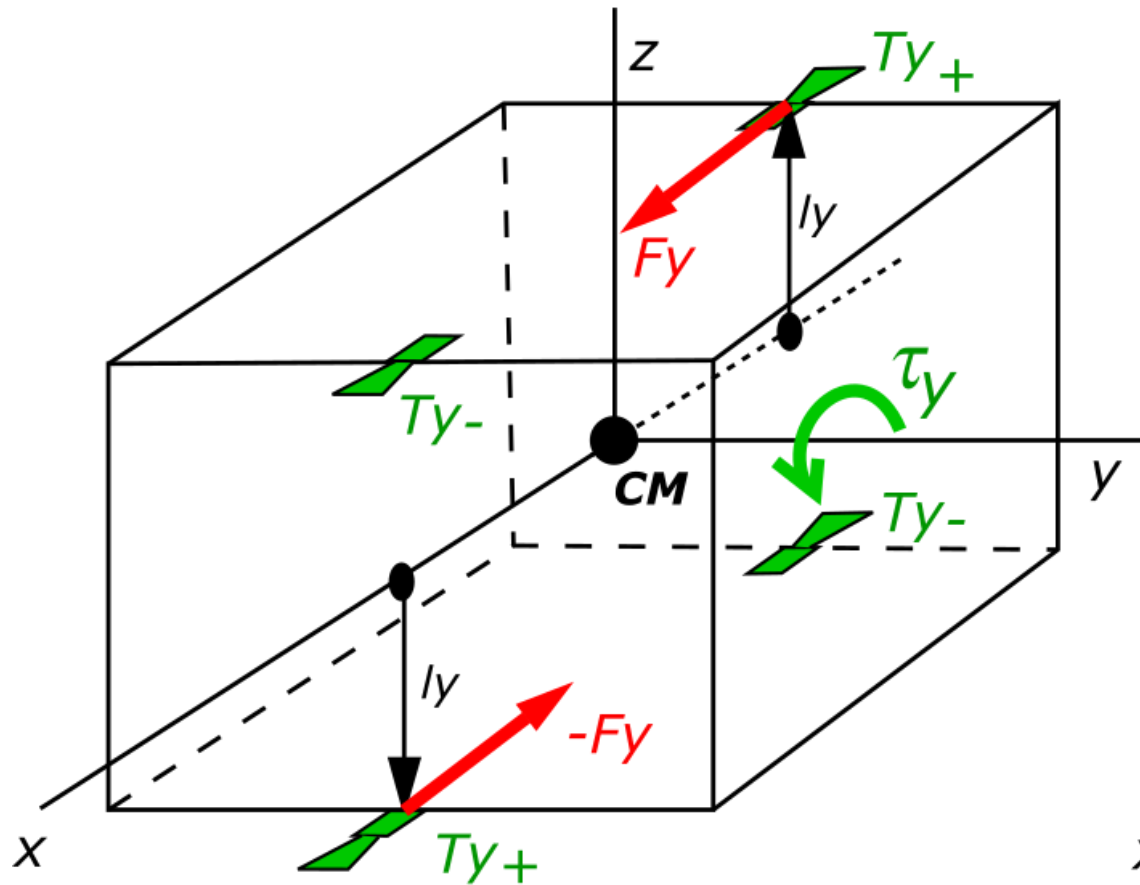


Disparo Negativo X

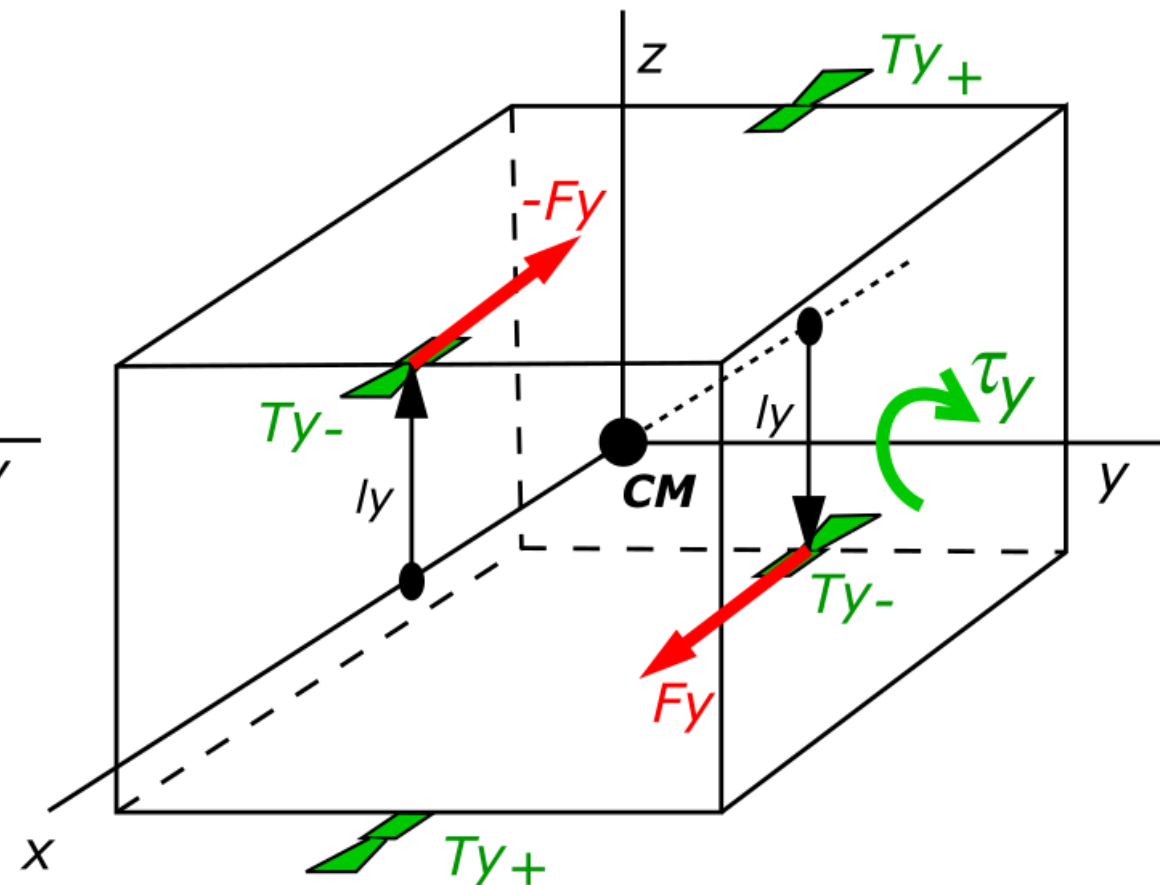


Thrusters

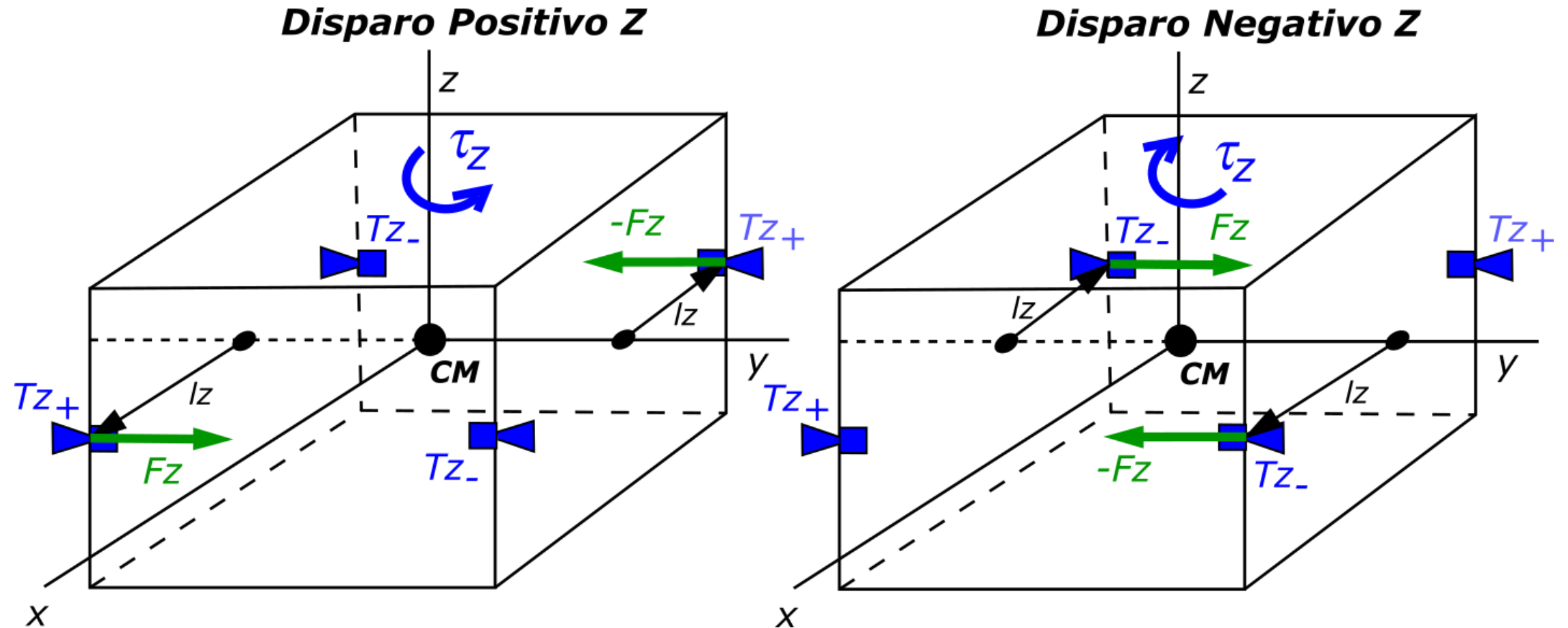
Disparo Positivo Y



Disparo Negativo Y



Thrusters



Thrusters

- Ao contrário das rodas de reação que provêm um torque contínuo, os thrusters trabalham na modalidade "liga-desliga". Então, o controle não é feito pela magnitude do torque, mas pelo tempo de ativação;
- Um thruster tem um tempo mínimo de ativação e isso gera o que se chama de **bit mínimo de impulso** (minimum impulse bit). Isso torna difícil manobras muito refinadas;
- Para que sejam usados em malhas de controle, as quais calculam valores contínuos de torque, é necessária uma lógica de disparo, que regula o tempo de disparo.

Thrusters

- A malha de controle precisa operar em tempo discreto, onde cada intervalo de tempo tem um valor de torque associado, calculado pela lei de controle;
- Como o valor do torque é constante, o valor desejado é convertido em tempo de ativação, por meio de algoritmo de **PWM** (modulação por largura de pulso) ou **PWPF** (modulação por largura de pulso e frequência);
- Para se ter uma ideia da magnitude dos torques que podem ser gerados por thrusters, na sequência apresenta-se uma tabela comparativa.

Thrusters

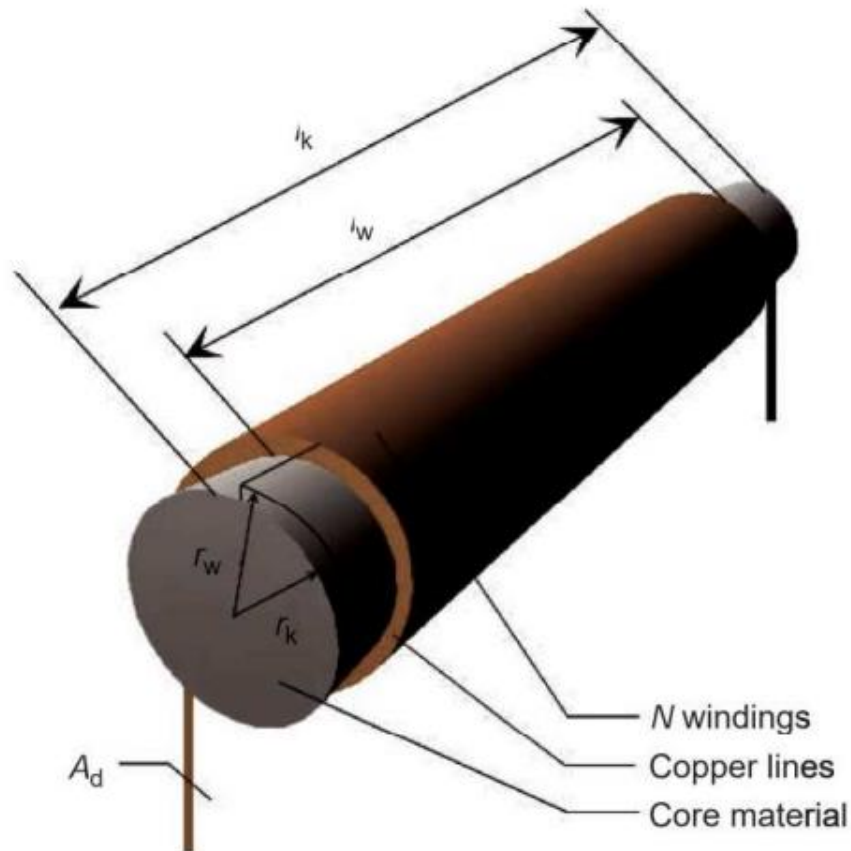
Thruster	Hydrazine monopropellant	Cold gas	Remark
Thrust	1 N	0.1 N	–
Flow of mass	450 mg/s	130 mg/s	At nominal thrust
“Impulse bit”	0.3 N m s	0.001 N m s	For 1 m lever arm
Power consumption	20 W	10 W	Hydrazine monopropellant: heating up required
Mass	0.4 kg	0.1 kg	Without piping and valves

Características típicas de thrusters para controle de atitude.

Thrusters

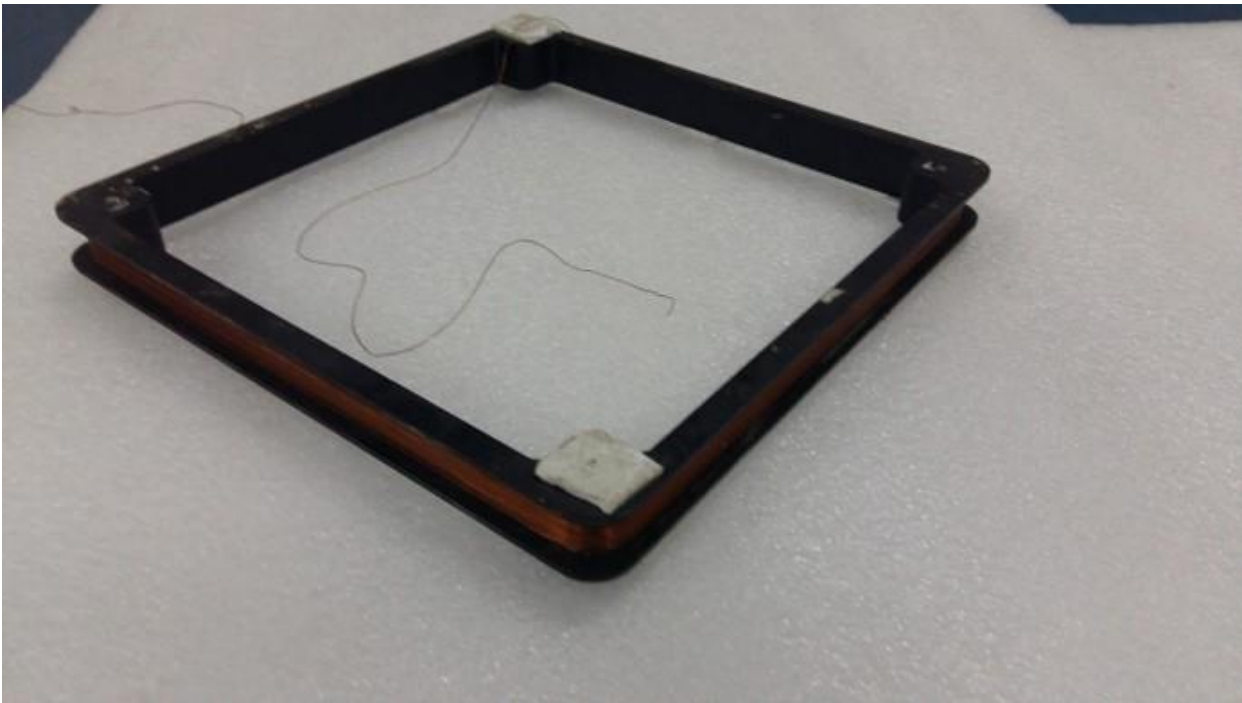
- Como os thrusters são dispositivos de reação externa, uma das suas aplicações é a dessaturação de rodas de reação ou giroscópios de controle de momento;
- Em algum momento da missão do satélite, quando nenhuma manobra de atitude ou modo de apontamento específico é requerido, o sistema de controle de atitude ativa o modo de dessaturação;
- Neste modo, os thrusters geram um torque oposto ao das rodas de reação ou GCM, ao longo do mesmo eixo, de modo a manter a atitude constante, enquanto a rotação das primeiras ou ângulo de inclinação do segundo é reduzido até a condição nula, ou o mais próximo possível.

Torqueadores Magnéticos



- Geram torque pela interação entre um dipolo magnético e o campo magnético terrestre;
- Só geram torques transversais ao campo magnético externo;
- Podem ser atuadores ativos ou passivos;
- Por interagirem com o campo magnético do planeta, são dispositivos de reação externa.

Torqueadores Magnéticos



- Podem ser de dois tipos:
 - **Bobinas**, tais como na figura ao lado, onde um enrolamento gera campo magnético na atmosfera na qual o satélite está inserido (quase vácuo);
 - **Barras de torque** (tork rod): tais como na figura seguinte, onde as espiras envolvem um núcleo ferromagnético.
- Uma barra de torque tem uma capacidade de geração de momento bem maior, devido a sua elevada permeabilidade magnética, mas é mais cara e pesada;
- Uma bobina também ocupa mais espaço, mas pode ser encaixada na estrutura do satélite.

Torqueadores Magnéticos



- Ao lado, uma barra de torque, constituída de um núcleo ferromagnético e um condutor enrolamento ao mesmo, formando espiras;
- Abaixo, um arranjo formado por uma bobina e duas barras de torque.

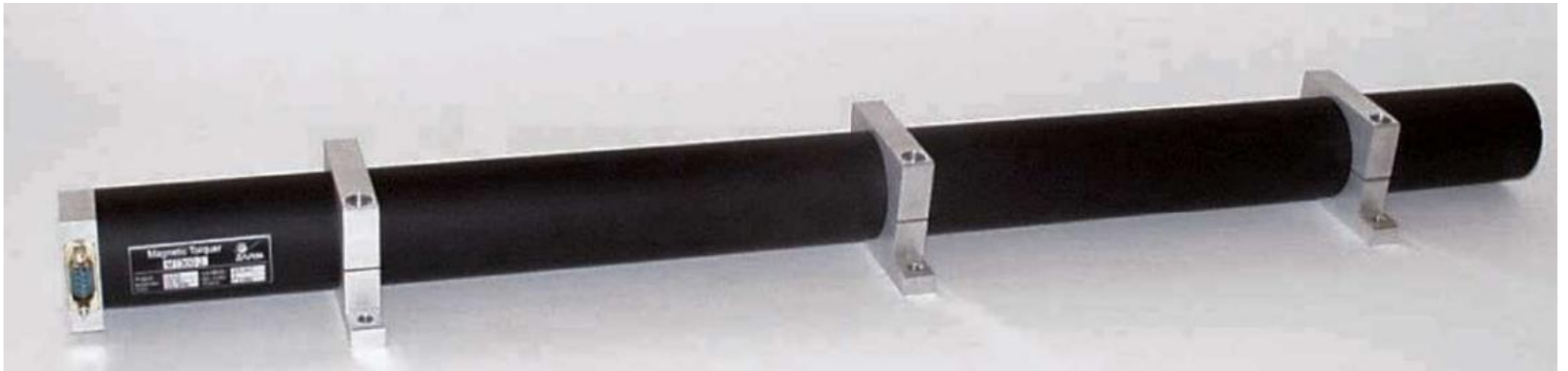
Torqueadores Magnéticos



- Cada torqueador magnético gera torque ao redor de um único eixo;
- Para gerar um torque triaxial, são necessárias 3 torqueadores;
- Na figura ao lado, tem-se um conjunto triaxial, formado por uma bobina e duas barras de torque;
- O momento de dipolo magnético de cada um dos torqueadores ao lado é ortogonal ao dos demais.

Torqueadores Magnéticos

- Abaixo, um exemplo de barra de torque real.
- A seguir, valores ilustrativos da magnitude dos momentos de dipolo e torques possíveis para alguns atuadores representativos.



Torqueador magnético de 250 Am² com núcleo de ferro doce. Fonte: ref. [1].

Torqueadores Magnéticos

Design	Coil (e.g., $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$)	Torque rod (0.85 m)	Remarks
Typical dipole moment	5 Am^2	$200/220 \text{ Am}^2$	Coil with iron core: linear/maximal
Usable torque	$75\text{--}250 \mu\text{Nm}$	$3000\text{--}10\,000 \mu\text{Nm}$	Nominal, in LEO
Remanence	–	$<0.5\%$	Remaining dipole, after switch-off
Mass	0.8 kg	5 kg	–
Power consumption	1.5 W	3 W	At 28 V, 100% duty cycle
Typical application	Satellites $< 50 \text{ kg}$	Satellites $> 100 \text{ kg}$	In polar and LEOs

Valores típicos de torqueadores magnéticos. Fonte: ref. [1].

Torqueadores Magnéticos

- Assim como os thrusters, torqueadores magnéticos podem ser usados para dessaturar rodas de reação e GCMs;
- Todos os cuidados tomados durante a dessaturação com thrusters precisam ser mantidos, mas surgem dificuldades adicionais;
- Como a geração de torque é limitada pela direção do campo magnético do planeta, o local da órbita onde a dessaturação é realizada é importante;
- Dependendo da orientação da roda de reação ou GCM, pode não ser possível gerar um torque na direção adequada, ou ter que esperar um longo período até entrar na região correta da órbita;
- Uma grande vantagem da dessaturação com atuadores magnéticos é a possibilidade de ser realizada uma quantidade infindável de vezes, visto que a energia para disparo dos atuadores é elétrica, que pode ser obtida pelos painéis solares.

Torqueadores Passivos

- **Boom gravitacional**: extensão que protumbersa para fora do satélite com uma massa na ponta, responsável por gerar uma variação de força gravitacional entre o corpo do satélite e sua extremidade;
- **Tubo de amortecimento**: tubo montado internamente no satélite com fluido viscoso e uma esfera emersa no mesmo. Responsável por amortecer energia de vibração.

What is a Gravity Gradient Boom

