

Curso Introdutório em Tecnologia de Satélites

Subsistema de Propulsão

Petrônio Noronha de Souza

**Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial – ETE
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
São José dos Campos, SP
Novembro de 2002**

Unidade 2/Parte 2.6/Versão 1.0

2.6 – Subsistema de Propulsão: Funções (*)

- **Funções durante a fase de lançamento de satélites e sondas:**
 - Injetar satélites na órbita designada (Ex.: Geoestacionária).
 - Injetar sondas interplanetárias em trajetória de escape da órbita da Terra.

- **Funções durante a fase de operação de satélites:**
 - Eliminação (“Despin”) e/ou controle da rotação (“Spin”) do satélite.
 - Corrigir a órbita (manutenção dos elementos orbitais).
 - Realizar manobras orbitais (alteração dos elementos orbitais).
 - Fazer a aquisição do apontamento para o Sol e a Terra.
 - Controlar o satélite em três eixos (modo normal ou durante correção de órbita).
 - Controlar a precessão de satélites estabilizados por rotação.
 - “Dessaturar” rodas de reação (eliminar a rotação acumulada devido às perturbações de torque por elas absorvidas).

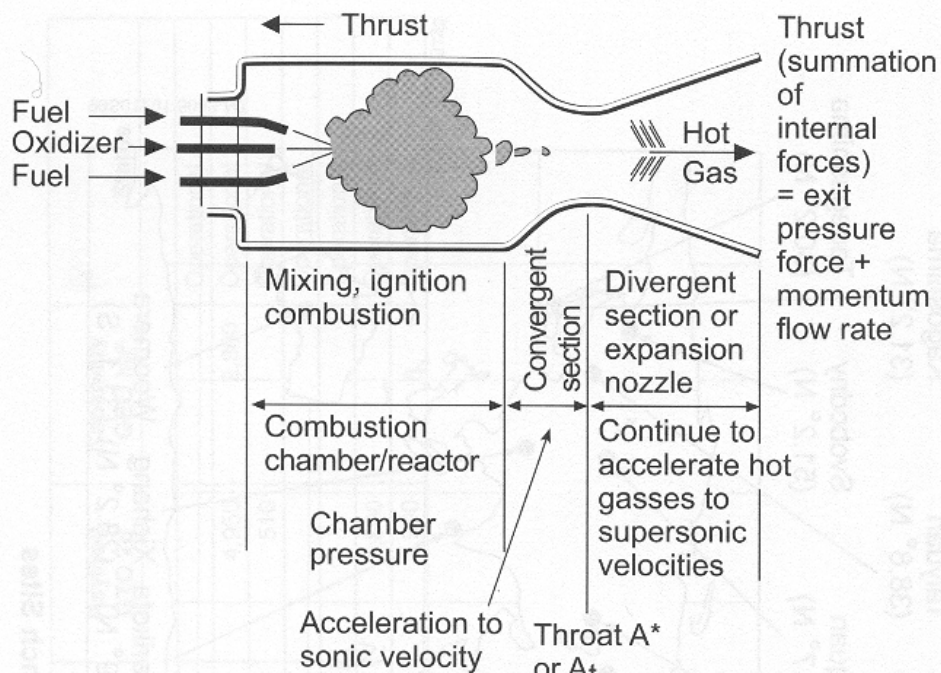
2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipos de propulsores

- **Gás frio (“cold gas thruster”)**
- **Líquido (“liquid engine” ou “thruster”)**
 - Monopropelente (“monopropellant”)
 - Bipropelente (“bipropellant”)
 - Híbrido (“dual” ou “bimodal”)
- **Sólido (“solid motor”)**
- **Elétrico (“electric propulsion”)**
 - “Eletrothermal”
 - “Resistojets”
 - “Arcjets”
 - “Electrostatic”
 - “Hall Effect Thruster” (HET)
 - “Ion Thruster” (IT)
 - “Field Emission”
 - “Electromagnetic”
 - “Pulsed Plasma Thruster” (PPT)
 - “Magnetoplasmadynamic Thruster” (MPD)
 - “Pulse Inductive Thruster” (PIT)

2.6 – Subsistema de Propulsão: Aplicações

Tipo de propulsor	Inserção em órbita		Manobras orbitais	Controle de atitude
	Perigeu	Apogeu		
Gás frio			X	X
Sólido	X	X		
Monopropelente			X	X
Bipropelente	X	X	X	X
Elétrico	X	X	X	

2.6 – Subsistema de Propulsão: Conceitos envolvidos, [3]



Characteristic velocity

$$C^* = \frac{P_c A_t g}{\dot{W}}$$

C^* is a measure of how well chemical propellants produce combustor pressure (depends on mixture ratio and combustion efficiency)

$$C_f = \frac{F}{P_c A_t}$$

C_f is a dimensionless representation of thrust

Fig.: Fluid Dynamics of Chemical Rockets

C^* = Velocidade característica dos gases propelentes

P_c = Pressão na câmara de combustão

A_t = Área da garganta da câmara de combustão

\dot{W} = Fluxo total de propelentes (combustível + oxidante)

F = Empuxo

C_f = Coeficiente de empuxo

I_{sp} = Impulso específico [s]

$$I_{sp} = \left(\int_{t_0}^t |F| dt \right) / \left(\int_{t_0}^t \dot{W} g dt \right)$$

2.6 – Subsistema de Propulsão: Comparação entre os diversos tipos, [3]

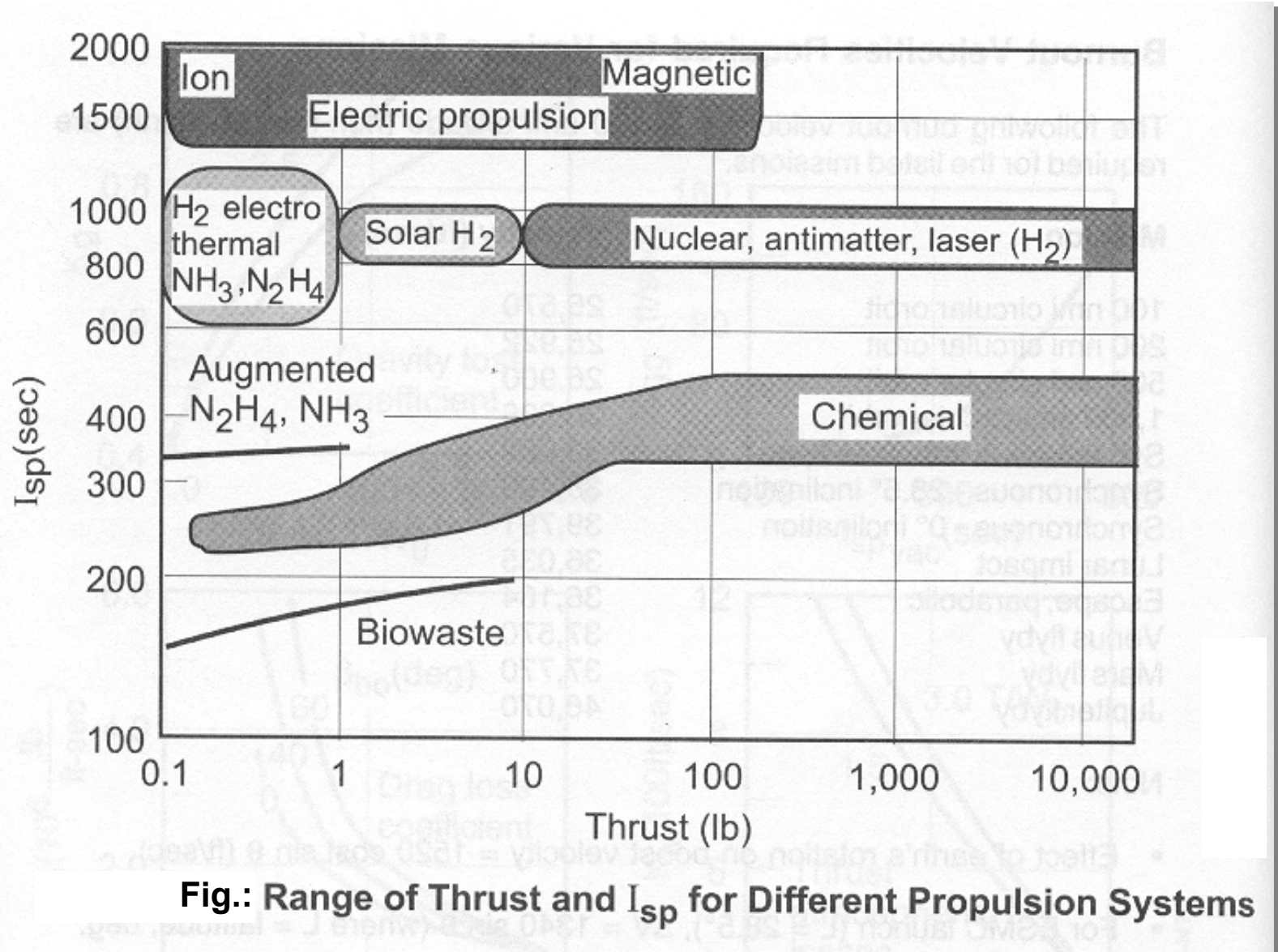


Fig.: Range of Thrust and I_{sp} for Different Propulsion Systems

2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipo gás frio

- Propulsores a **gás frio**:
 - Composto de reservatório de gás pressurizado, válvula de controle e bocal de expansão.
 - Propelentes: GN₂, GHe (baixa densidade do propelente, elevada razão de massa estrutural).
 - Pressão de trabalho: regulada ou blowdown (20 a 200 atm).
 - Vantagens:
 - Resposta rápida, pois não há atraso de ignição ou cauda de empuxo.
 - Boa repetibilidade de impulso.
 - Não há instabilidade de operação.
 - Não há problemas de compatibilidade.
 - Baixo risco de contaminação.
 - Baixo risco de falhas catastróficas.
 - Pode utilizar gás de pressurização de outros sistemas.
 - Desvantagens:
 - Baixa densidade dos propelentes.
 - Elevado coeficiente estrutural.
 - Baixo impulso específico.



**Miniature Cold Gas Thruster System
Supplier: Moog, Inc.**

2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipo sólido, [3]

- Propulsores a combustível **sólido**:
 - Neles o propelente é armazenado em estado sólido. Ele é normalmente constituído por pó de alumínio (combustível) e perclorato de amônia (oxidante). O composto também contém uma borracha sintética, como o polibutadieno, que serve de elemento de liga.
 - Estes propulsores diferem dos que utilizam combustível líquido por terem menor eficiência e por só poderem ser ligados uma única vez.

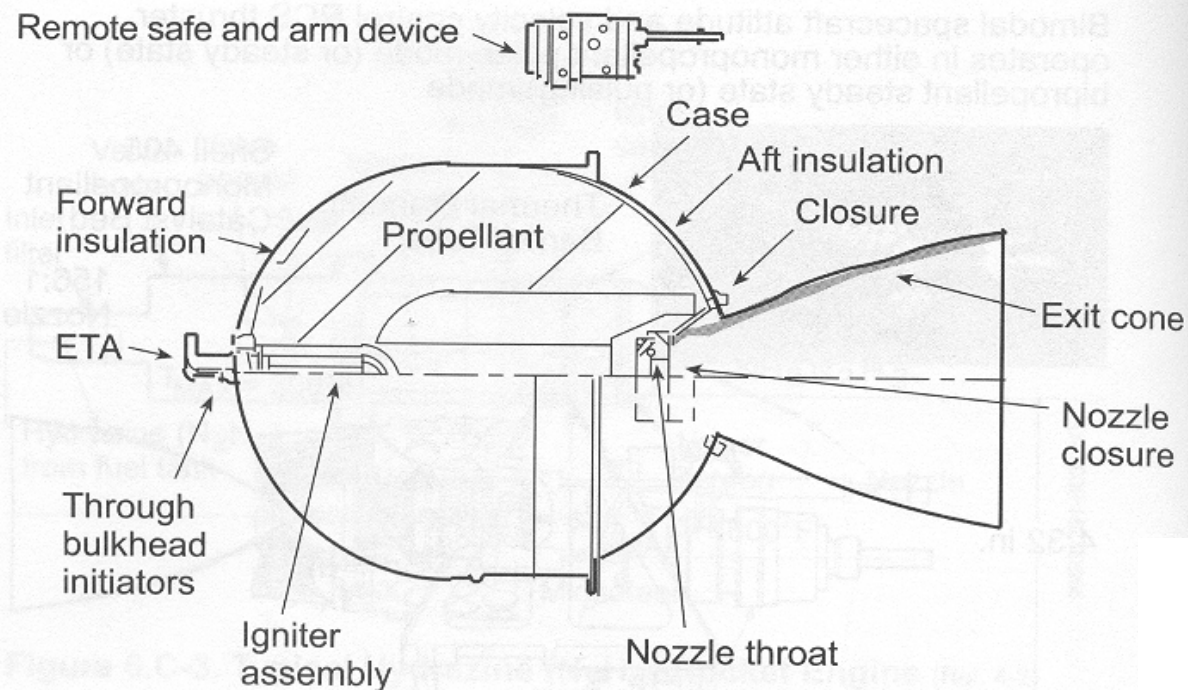


Fig.: Typical Solid Propellant Rocket Motor.
(ETA is the Explosive Transfer Assembly)

2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipo líquido

- Propulsores a combustível **líquido**:
 - O propelente é armazenado em tanques e injetado na câmara de combustão por meio de uma bomba ou pela pressão produzida por um gás pressurizante.
 - São divididos em sistemas a “monopropelente” e a “bipropelente”. Os primeiros são mais simples e menos eficientes. Os últimos são mais complexos e mais eficientes.
 - Existem também os sistemas “duais”. Estes podem operar tanto como monopropelente quanto como bipropelentes, dependendo da manobra a ser realizada.
 - O monopropelente mais conhecido é a Hidrazina (N_2H_4).
 - Um exemplo de sistema bipropelente utiliza Tetróxido de Nitrogênio (N_2O_4) como oxidante e Monometil Hidrazina (MMH) como combustível.

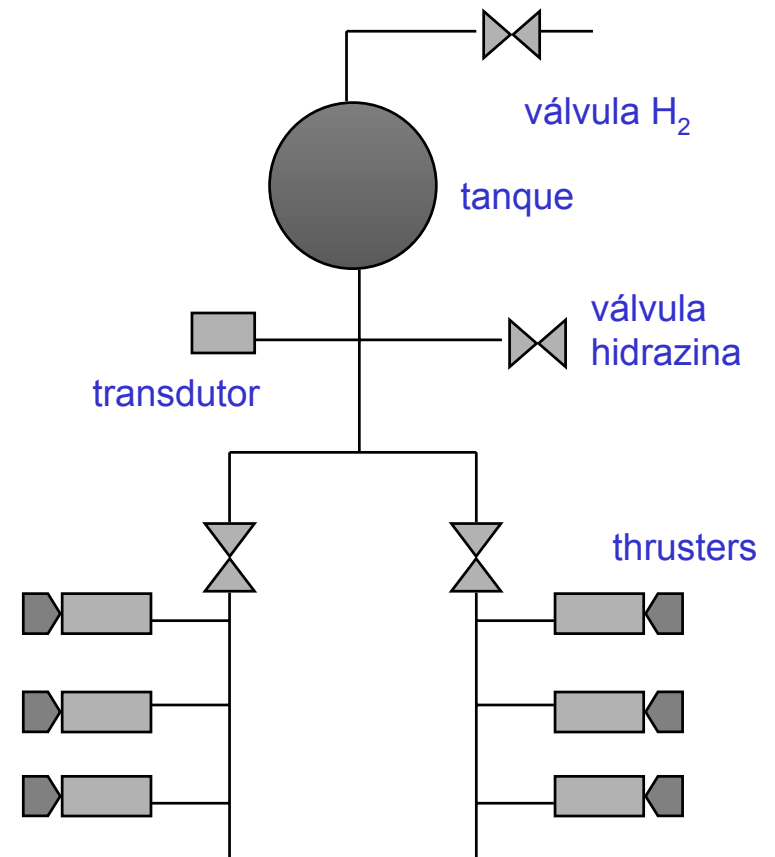
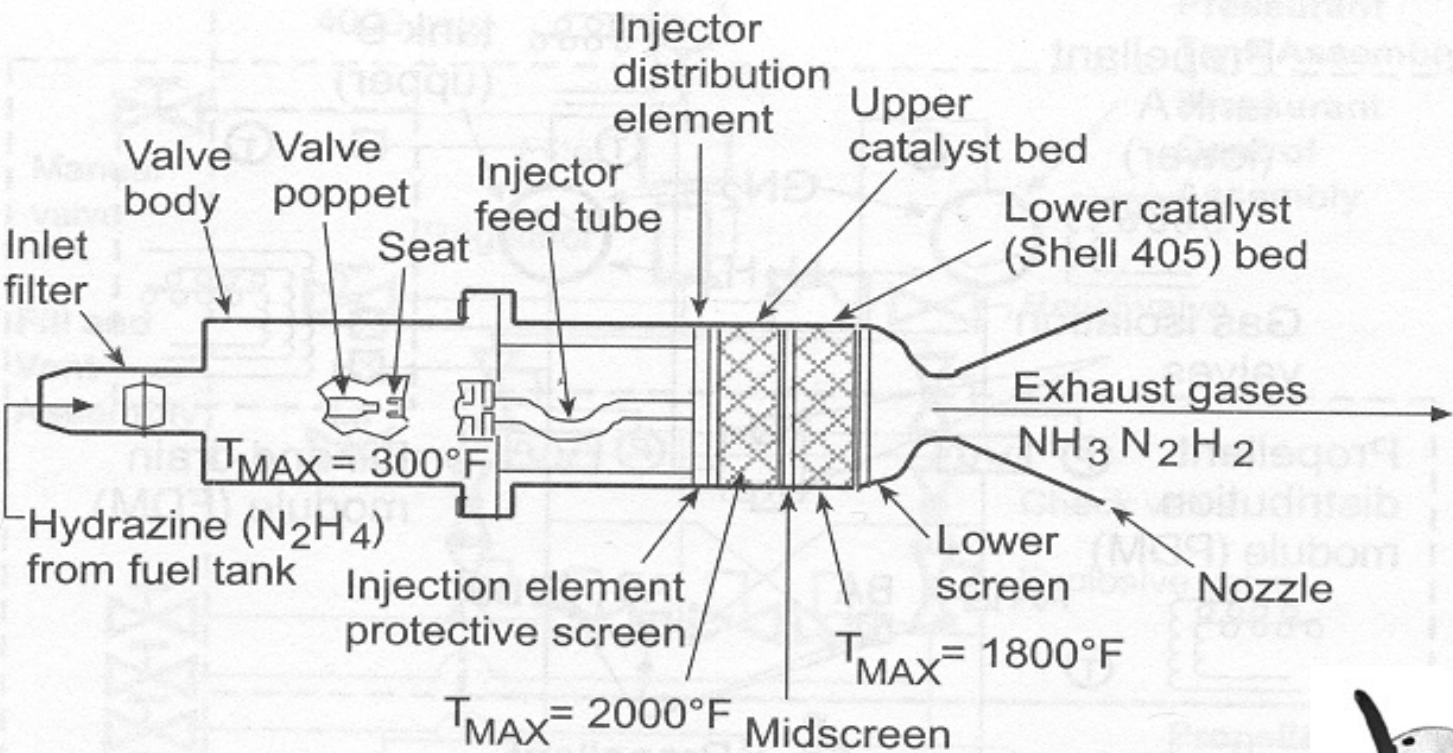


Fig.: Diagrama do circuito de um motor a hidrazina (N_2H_4).

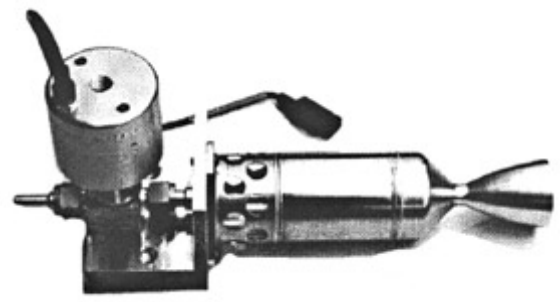
2.6 – Subsistema de Propulsão: Propulsor monopropelente líquido

- É composto de válvula de controle, sistema de injeção, câmara catalítica e bocal de expansão.
- Propelentes:
 - Hidrazina anidra.
 - Peróxido de hidrogênio concentrado.
- Catalisador: Irídio depositado em suporte de alumina com elevada densidade de poros ($\sim 60 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$).
- Operação com pressão variável (blowdown).
- Operação em modo contínuo e modo pulsado.
- Jato inicial de propelente evapora e se decompõe cataliticamente. A energia liberada acelera a evaporação e a decomposição de propelente sendo injetado.
- Pré-aquecimento da câmara catalítica para proteger o catalisador e evitar picos de pressão.
- Modos de falha:
 - Despressurização do tanque (volume pequeno, longo tempo de vida operacional).
 - Rompimento do tanque devido a excesso de pressão ocasionado por decomposição da hidrazina sob a ação de contaminantes.
 - Entupimento de passagens de dimensões reduzidas: assento da válvula e orifícios de injeção.
 - Quebra de grãos do catalisador: choque mecânico, ciclagem térmica, partidas a frio.
 - Falha em aberto da válvula: partículas sólidas na sede de vedação.
 - Falha da bobina de acionamento.

2.6 – Subsistema de Propulsão: Propulsor monopropelente líquido (cont.), [3, 33]



Typical Hydrazine (N_2H_4) Rocket Engine



Thruster / H₂O₂ Monoprop
Supplier: General Kinetics LLC

2.6 – Subsistema de Propulsão: Propulsor bipropelente líquido, [3]

- Composto de válvula de controle, sistema de injeção, câmara de combustão e bocal de expansão.
- Propelentes: MMH/NTO (Hipergólicos) UDMH/NTO (Hipergólicos).
- Operação com pressão fixa.
- Operação em modo contínuo e modo pulsado.
- Alta temperatura dos produtos de combustão, necessidade de proteção da parede da câmara de combustão.
- Controle da razão de mistura para evitar sobra de propelente.

Bimodal spacecraft attitude and velocity control RCS thruster operates in either monopropellant pulse mode (or steady state) or bipropellant steady state (or pulsing) mode

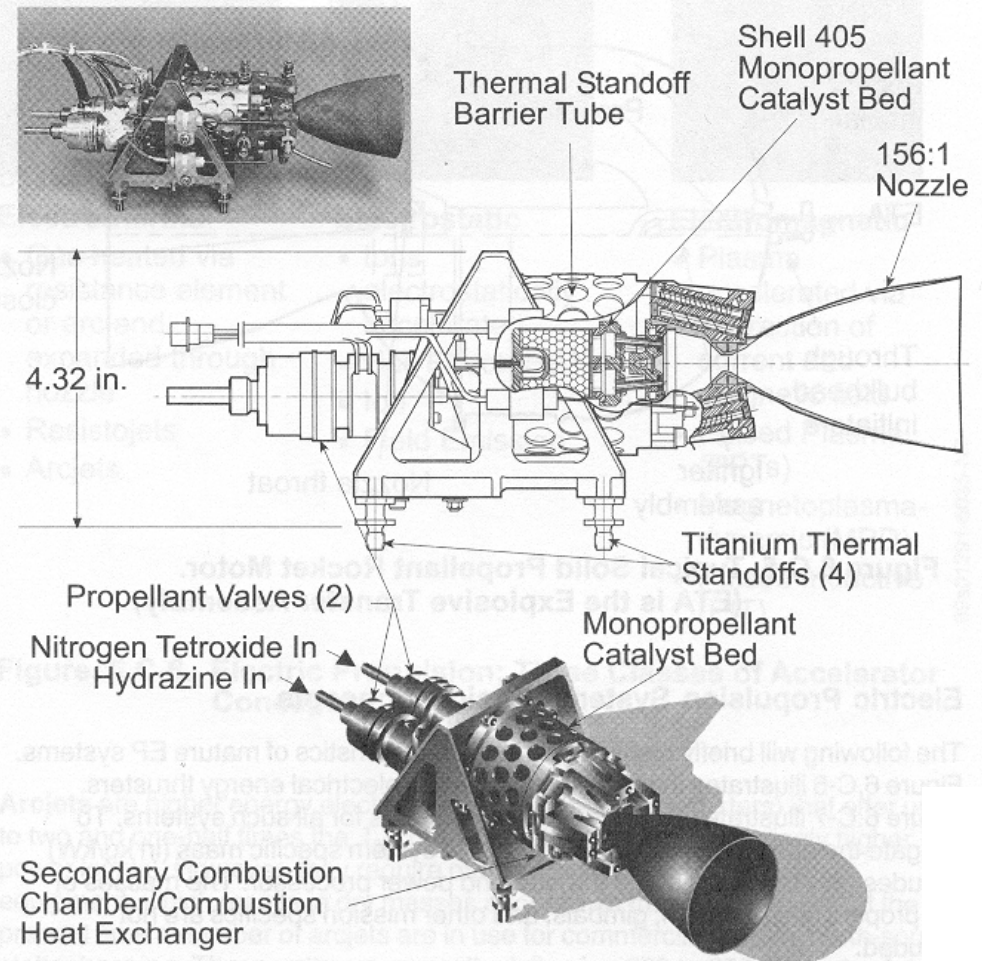


Fig.: Secondary Combustion Augmented Thruster (SCAT)

2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipos elétricos, [3]

● Propulsores elétricos:

- Neles a energia elétrica captada pelos painéis solares, ou produzida por um reator nuclear ou meios químicos, é utilizada para acelerar um fluido e produzir empuxo.
- A velocidade de expulsão da massa é limitada apenas pela velocidade da luz. No entanto, os motores existentes apresentam uma velocidade de expulsão ótima que depende de seu projeto e da energia total disponível.
- O balanço entre a quantidade de propelente e as dimensões do subsistema de suprimento de potência estabelece o ponto ótimo de operação. Explica-se, pois se houver mais energia, pode-se reduzir a quantidade de propelente. No entanto, para que haja mais energia disponível será necessário aumentar a massa do subsistema que a gera.

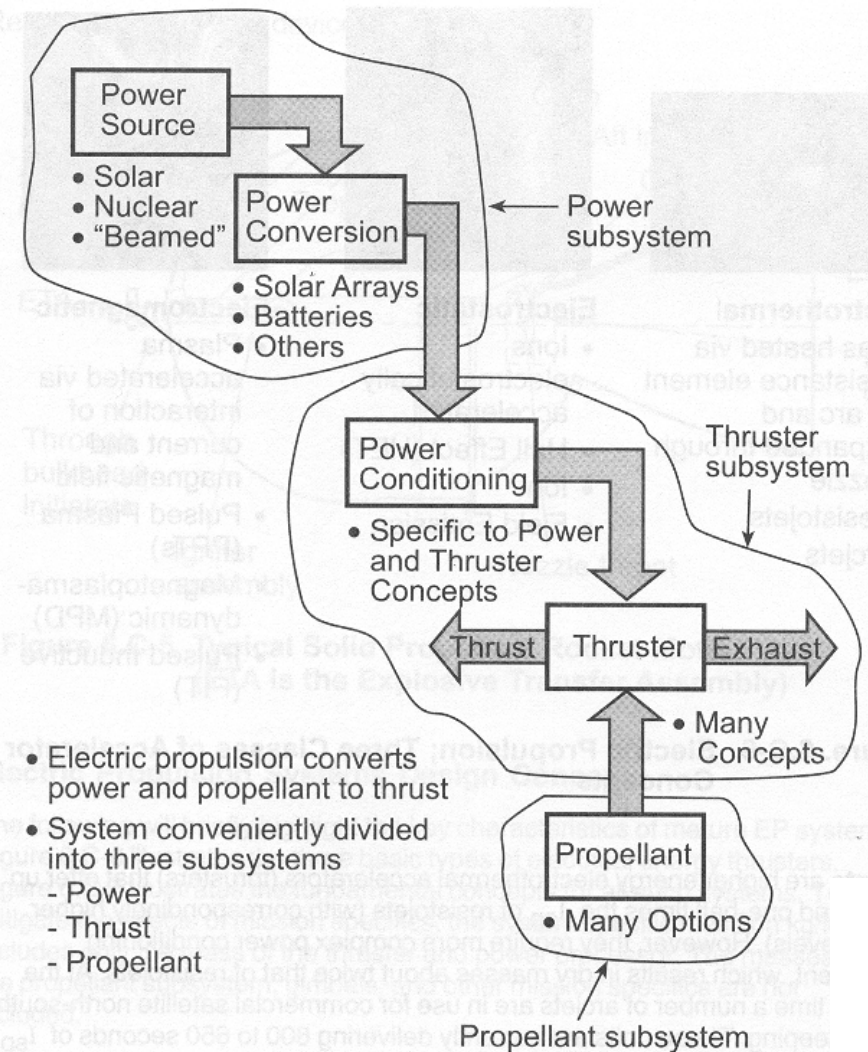
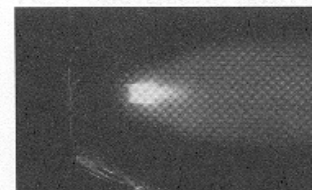


Fig.: Generic Electric Propulsion System - Functional Block Diagram

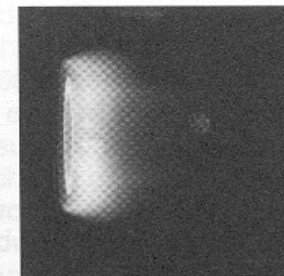
2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipos elétricos (cont.), [3]

- **“Resistojets”**: É um dos propulsores elétricos mais comuns e eficientes. A pluma gerada não possui carga e não provoca contaminação.
- **“Arcjets”**: São maiores e mais complexos que os “resistojets”. Aplicáveis em missões que demandam maiores impulsos específicos.
- **“Pulsed Plasma Thruster”**: Trata-se de um sistema pulsado com elevado impulso específico. Opera com propelente sólido (Ex.: Teflon).
- **“Hall Effect Thruster” e “Ion Thruster”**: Apresentam impulsos específicos extremamente elevados. Estão hoje sob intenso esforço de desenvolvimento. Emitem um pluma carregada, o que é um elemento complicador na fase de integração e testes.



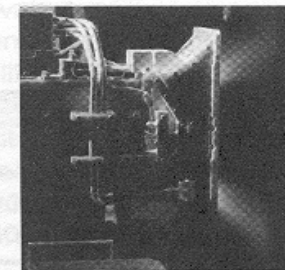
Electrothermal

- Gas heated via resistance element or arc and expanded through nozzle
- Resistojets
- Arcjets



Electrostatic

- Ions electrostatically accelerated
- Hall Effect (HET)
- Ion
- Field Emission



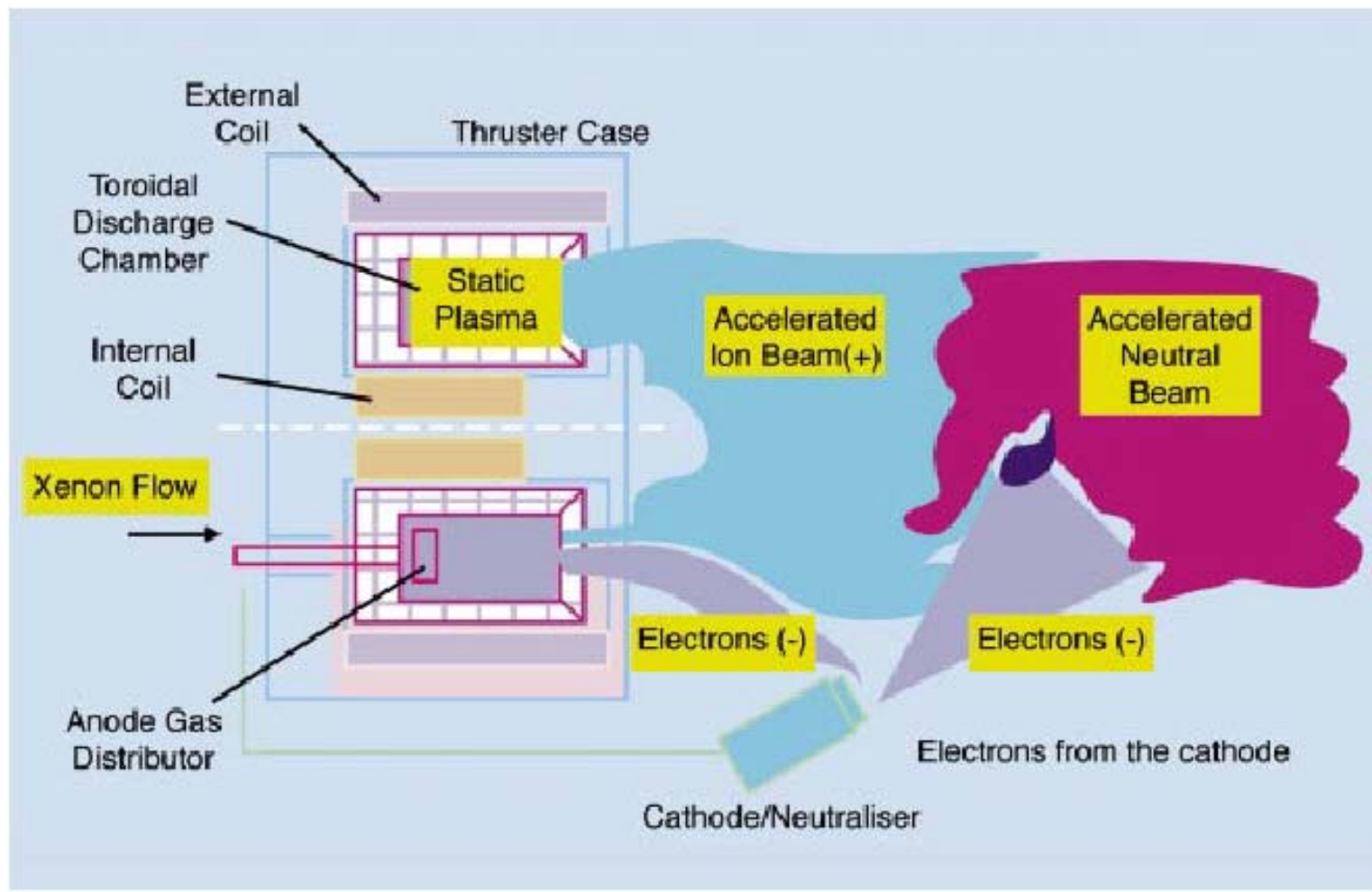
Electromagnetic

- Plasma accelerated via interaction of current and magnetic field
- Pulsed Plasma (PPTs)
- Magnetoplasmadynamic (MPD)
- Pulsed Inductive (PIT)

Fig.: Electric Propulsion; Three Classes of Accelerator Concepts

- **“Magnetoplasmadynamic Thruster” e “Pulse Inductive Thruster”**: São os de maior impulso específico. No entanto, só se tornam eficientes se operarem a elevadas potências (> 100 kW), o que limita seu campo de aplicação.

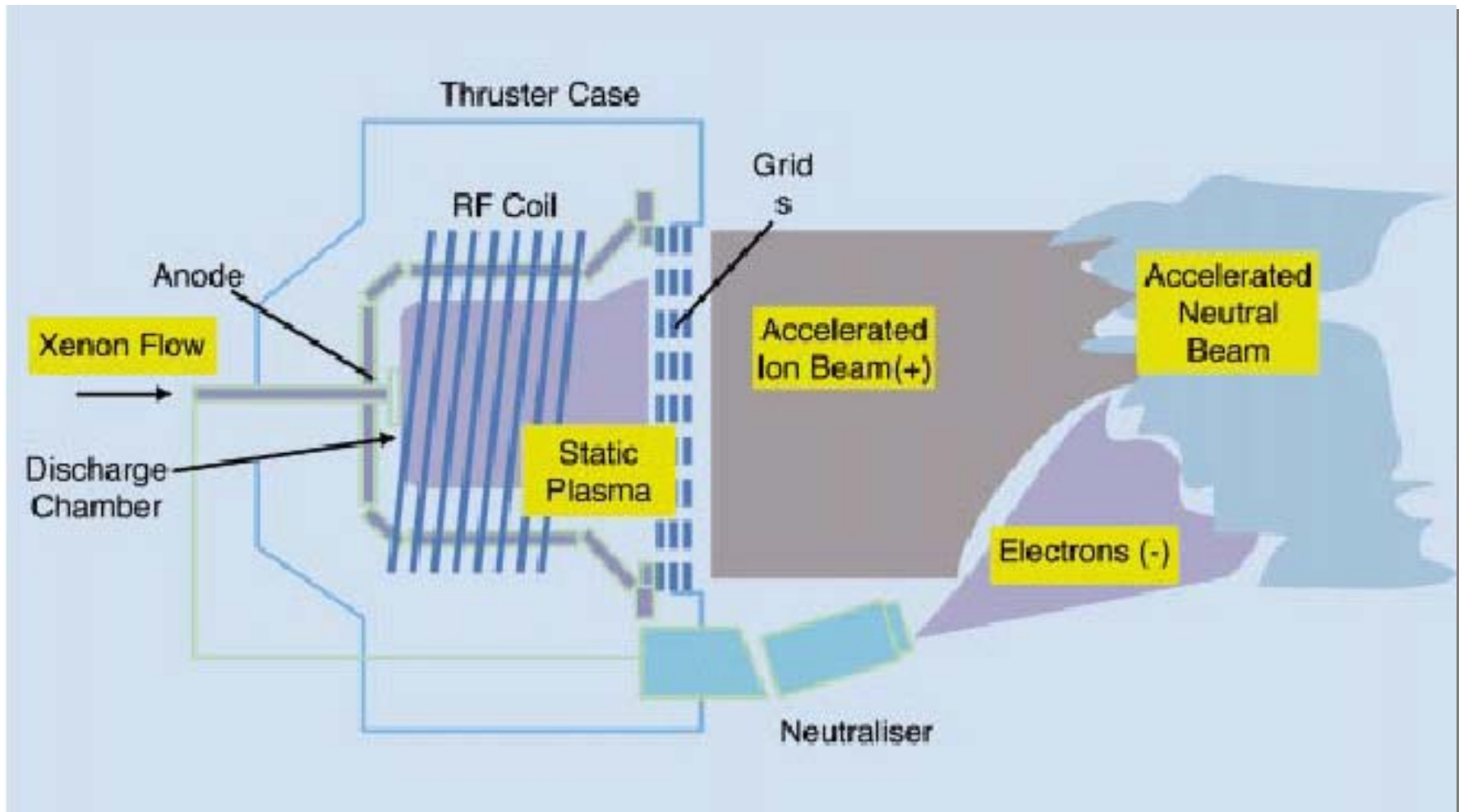
2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipos elétricos (cont.)



Stationary Plasma Thruster

Ref.: G.D. Racca, G.P. Whitcomb, B.H. Foing *The SMART-1 Mission*, ESA bulletin 95, august 1998.

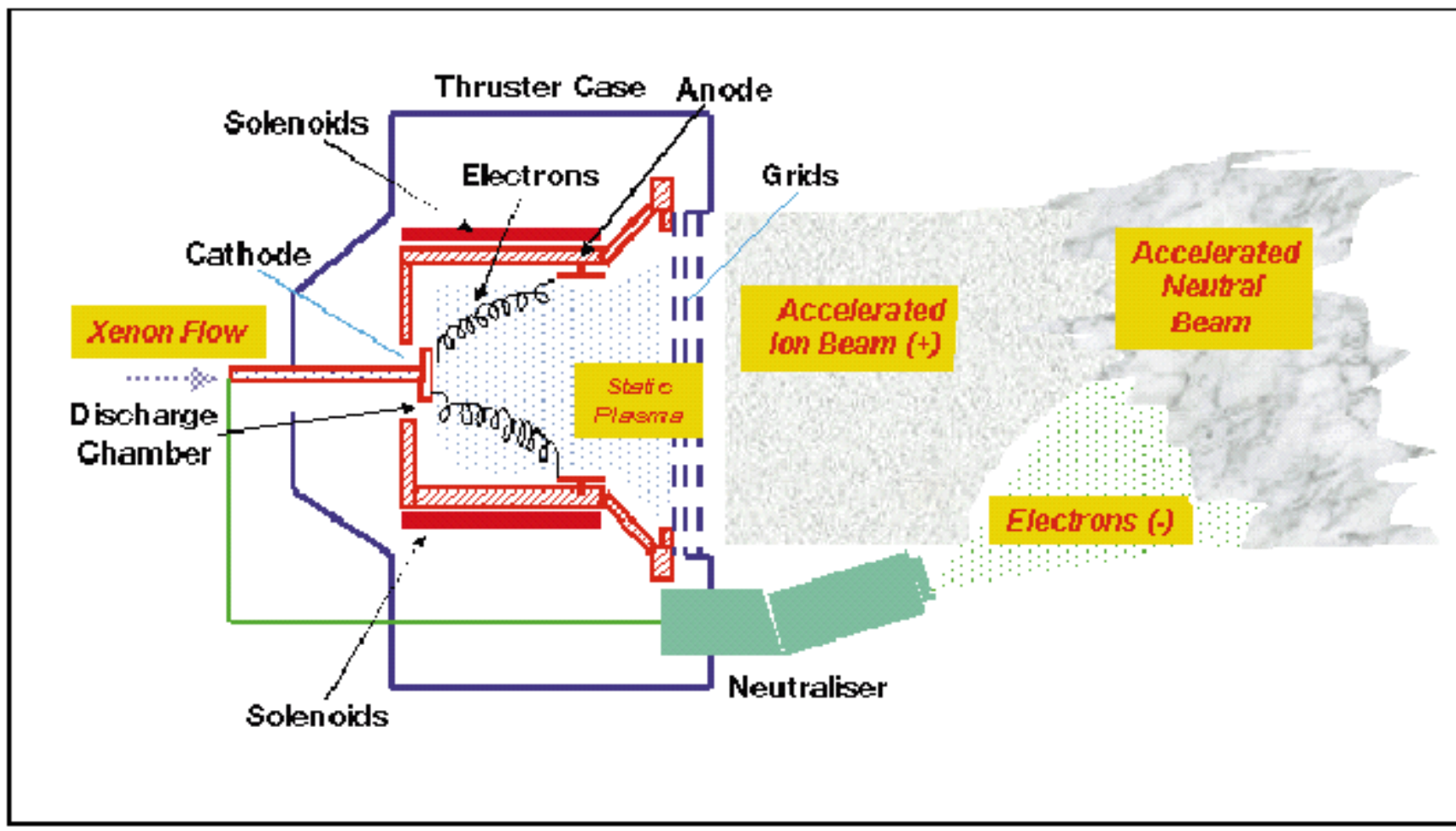
2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipos elétricos (cont.)



Radio-frequency Ionisation Thruster (RIT)

Ref.: G.D. Racca, G.P. Whitcomb, B.H. Foing *The SMART-1 Mission*, ESA bulletin 95, august 1998.

2.6 – Subsistema de Propulsão: Tipos elétricos (cont.)

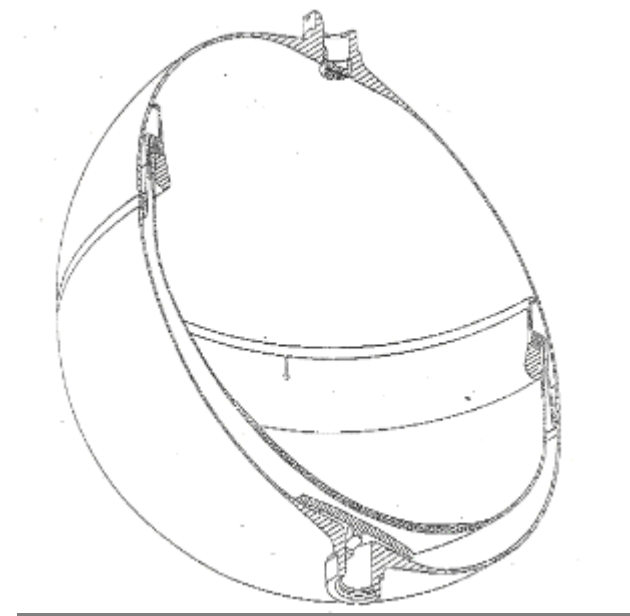
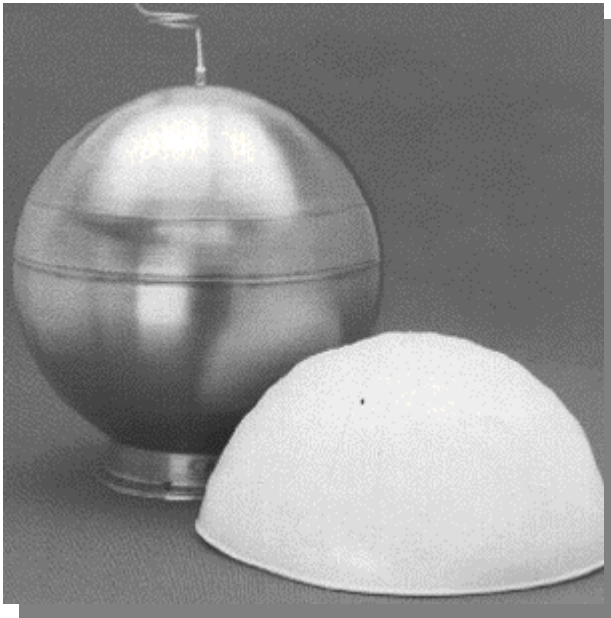


Electron Bombardment Ionization Thruster

Ref.: G.D. Racca, G.P. Whitcomb, B.H. Foing *The SMART-1 Mission*, ESA bulletin 95, august 1998.

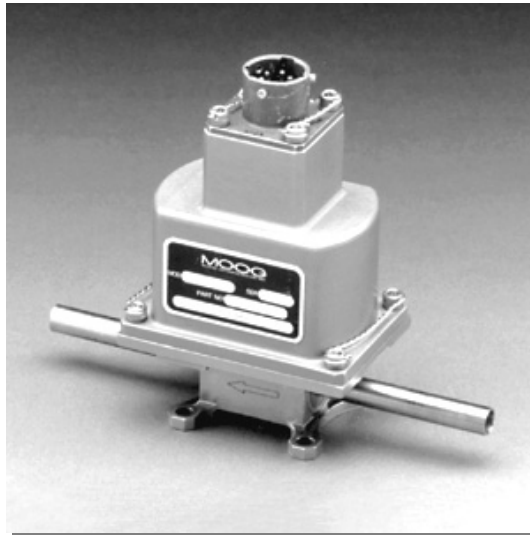
2.6 – Subsistema de Propulsão: Tanques, [12]

- **Tanques de propelentes para operação na ausência de gravidade:**
 - Dispositivos de tensão superficial.
 - Diafragmas metálicos.
 - Diafragmas de borracha.
 - Pistão.
 - Foles metálicos.



2.6 – Subsistema de Propulsão: Válvulas, [33]

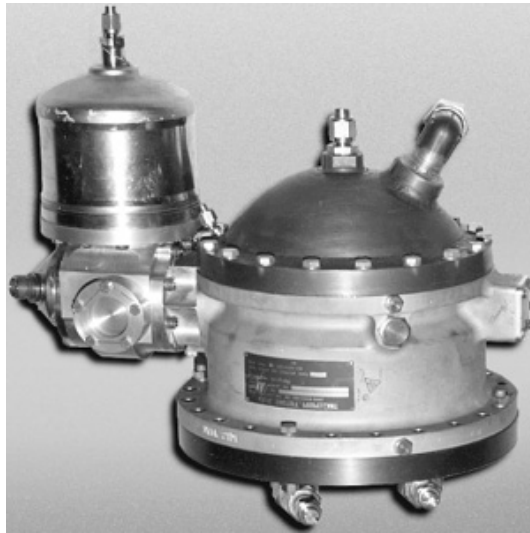
**Single Line Latching
Isolation Valve
Supplier: Moog, Inc.**



**2" Ball Valve
Supplier: Moog, Inc.**



**8" Butterfly Valve
Supplier: Moog, Inc.**



**Propellant Valve
Assembly
Supplier: Moog, Inc.**

