

# Eyectores de propulsión magnetoplasmádinámica: un análisis técnico exhaustivo

## Sección I: Introducción a la Propulsión Magnetohidrodinámica (MHD)

La propulsión magnetohidrodinámica (MHD) representa una clase avanzada de propulsión eléctrica espacial que, en teoría, promete revolucionar el transporte interplanetario. A diferencia de los sistemas de propulsión química que dependen de la energía liberada en reacciones de combustión, o de los sistemas electrostáticos que aceleran iones individuales, la propulsión MHD utiliza la interacción fundamental entre campos eléctricos y magnéticos para acelerar un propelente eléctricamente conductor, conocido como plasma, sin necesidad de partes mecánicas móviles complejas.<sup>1</sup> Esta característica fundamental no solo sugiere una mayor fiabilidad y una vida útil potencialmente más larga, sino que también abre la puerta a regímenes de rendimiento, en términos de empuje e impulso específico, que son inalcanzables para otras tecnologías. A pesar de su enorme potencial teórico para misiones que requieren tanto un alto empuje como una alta eficiencia de propelente, la tecnología de propulsión MHD, particularmente en sus variantes de alta potencia, permanece en gran medida en una fase de investigación fundamental más que en una de desarrollo para aplicaciones inminentes.<sup>1</sup>

### 1.1. Principios Fundamentales del Acoplamiento Electromagnético-Fluido

El núcleo conceptual de la magnetohidrodinámica reside en el acoplamiento intrínseco entre las leyes del electromagnetismo y la dinámica de fluidos.<sup>3</sup> Este campo de la física estudia el comportamiento de fluidos eléctricamente conductores —como metales líquidos o, más pertinentemente para la propulsión, plasmas— inmersos en campos magnéticos.<sup>4</sup> La interacción es bidireccional: la aplicación de un campo magnético a un plasma en movimiento induce corrientes eléctricas y fuerzas que alteran el flujo del fluido; simultáneamente, el

movimiento del plasma conductor genera sus propios campos magnéticos, que modifican el campo magnético original, creando así un sistema dinámico y acoplado.<sup>4</sup>

Un principio teórico clave que gobierna esta interacción en condiciones ideales es el **Teorema de Flujo Congelado de Alfvén**. Este teorema postula que, en un plasma con conductividad eléctrica perfecta (resistencia nula), las líneas de campo magnético se comportan como si estuvieran "congeladas" dentro del plasma. En consecuencia, el plasma puede moverse libremente a lo largo de las líneas de campo, pero cualquier movimiento perpendicular a ellas arrastrará consigo las líneas de campo magnético, y viceversa.<sup>5</sup> Aunque ningún plasma real es perfectamente conductor, este concepto es una aproximación útil para entender el fuerte acoplamiento que permite a los campos magnéticos confinar y dirigir el flujo de plasma en un propulsor.

## 1.2. El Plasma como Propelente

El medio de trabajo o propelente en un eyector de propulsión magnética es el plasma, a menudo denominado el cuarto estado de la materia. El plasma es un gas que ha sido ionizado, lo que significa que se le ha suministrado suficiente energía para que los electrones se separen de sus átomos, creando una mezcla eléctricamente neutra en su conjunto, pero compuesta por partículas cargadas: iones positivos y electrones libres.<sup>6</sup> Esta presencia de portadores de carga libres es lo que confiere al plasma su conductividad eléctrica y lo hace susceptible de ser manipulado por fuerzas electromagnéticas.<sup>1</sup>

El proceso de propulsión comienza con la ionización de un propelente inicialmente neutro, que suele ser un gas inerte. La elección de este propelente es una decisión de diseño crítica con profundas implicaciones para el rendimiento y la durabilidad del sistema. Se han investigado diversos propelentes, incluyendo gases nobles como el argón y el xenón, gases más ligeros como el hidrógeno y el amoníaco, e incluso metales alcalinos como el litio, que se vaporizan y luego se ionizan.<sup>8</sup> La facilidad con la que un átomo puede ser ionizado, cuantificada por su potencial de primera ionización, es un factor determinante, ya que una parte significativa de la energía de entrada del propulsor se consume en el propio proceso de ionización.

## 1.3. El Dilema del Propelente y su Impacto Sistémico

La selección del propelente para un propulsor magnetoplasmádinámico no es una elección trivial, sino un complejo problema de optimización que ilustra las interdependencias críticas en el diseño de sistemas de propulsión avanzada. La decisión va más allá de simplemente elegir un átomo con una masa iónica deseada; impacta directamente en la eficiencia, el empuje, la vida útil del motor y la complejidad general de la nave espacial.

La física fundamental dicta que, para una potencia de entrada dada, los iones más ligeros (como los de hidrógeno) pueden ser acelerados a velocidades de escape más altas, lo que se traduce en un mayor impulso específico (Isp), una medida clave de la eficiencia del propelente.<sup>8</sup> Por otro lado, los iones más pesados (como los de xenón o argón) generan un mayor empuje para la misma potencia, lo cual es deseable para maniobras más rápidas. Sin embargo, esta aparente dicotomía es solo la superficie del problema. Uno de los desafíos más significativos que limita la viabilidad de los propulsores MPD es la erosión de los electrodos, particularmente del cátodo, que es bombardeado por iones de alta energía.<sup>9</sup> Este proceso de desgaste limita la vida útil del motor a cientos o, en el mejor de los casos, a unos pocos miles de horas, una cifra insuficiente para misiones interplanetarias de larga duración. Aquí es donde la elección del propelente se vuelve crucial para la longevidad del sistema. Investigaciones de laboratorio han demostrado que el uso de metales alcalinos, específicamente el litio, como propelente puede mitigar significativamente la erosión del cátodo. Esto se debe en parte a sus propiedades físicas y a cómo interactúa con materiales de cátodo avanzados, como los cátodos huecos multicanal.<sup>8</sup> El litio, por lo tanto, se presenta como un candidato prometedor para permitir la operación extendida necesaria para misiones ambiciosas.

No obstante, la adopción del litio introduce un nuevo conjunto de desafíos de ingeniería de sistemas. A diferencia de los gases inertes, que pueden ser almacenados y alimentados con relativa facilidad, el litio es un metal que debe ser calentado, vaporizado y alimentado al propulsor en estado líquido, lo que requiere un sistema de alimentación mucho más complejo y masivo.<sup>9</sup> Además, existe el riesgo de que el litio se condense en superficies frías de la nave espacial, lo que podría causar cortocircuitos o dañar componentes sensibles.<sup>9</sup>

En consecuencia, no existe un "propelente ideal" universal. La elección óptima es el resultado de una optimización multivariable que depende directamente del perfil de la misión. Para misiones de muy alta potencia y larga duración, como el transporte tripulado a Marte, la longevidad del propulsor es el factor primordial. En este contexto, la complejidad y masa adicionales de un sistema de alimentación de litio podrían ser un compromiso aceptable para lograr las miles de horas de operación requeridas.<sup>13</sup> Por el contrario, para misiones robóticas más cortas, de elevación de órbita o donde la simplicidad y la fiabilidad a corto plazo son prioritarias, la menor complejidad de un sistema de propelente de gas inerte como el argón puede ser la opción preferible, aun a costa de un menor rendimiento o una vida útil más corta.<sup>14</sup> El avance de la propulsión MPD, por lo tanto, no solo depende de los avances en la física del plasma, sino también de la ingeniería de sistemas de propelentes y de una co-optimización cuidadosa con los objetivos de la misión.

## Sección II: Fundamentos Físicos y Marco Teórico-Matemático

El funcionamiento de los eyectores de propulsión magnética se rige por un conjunto bien establecido de principios físicos y ecuaciones matemáticas que conectan el electromagnetismo con la dinámica de fluidos. Este marco teórico es esencial para el diseño, análisis y predicción del rendimiento de estos sistemas de propulsión.

## 2.1. La Fuerza de Lorentz como Mecanismo Primario de Aceleración

El principio fundamental que impulsa un propulsor magnetoplasmadínamico es la **fuerza de Lorentz**. Esta fuerza describe la interacción que experimenta una partícula cargada eléctricamente cuando se mueve a través de campos eléctricos y magnéticos combinados.<sup>3</sup>

La expresión vectorial completa de la fuerza de Lorentz sobre una partícula individual es:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

donde:

- $\mathbf{F}$  es el vector de la fuerza experimentada por la partícula.
- $q$  es la carga eléctrica de la partícula.
- $\mathbf{E}$  es el vector del campo eléctrico.
- $\mathbf{v}$  es el vector de la velocidad de la partícula.
- $\mathbf{B}$  es el vector del campo magnético.
- $\times$  denota el producto vectorial.<sup>16</sup>

En el contexto de un plasma, que es una colección de muchas partículas cargadas, es más práctico considerar la densidad de corriente,  $\mathbf{J}$ , en lugar de las cargas individuales. La fuerza de Lorentz se manifiesta entonces como una "fuerza de cuerpo" que actúa sobre el volumen del plasma. En un propulsor MPD típico, se establece una corriente eléctrica que fluye radialmente desde el ánodo (electrodo exterior) hacia el cátodo (electrodo central). Esta corriente, al interactuar con un campo magnético azimutal (que rodea al cátodo), genera una fuerza de Lorentz que es predominantemente axial, es decir, a lo largo del eje del propulsor. Esta fuerza de cuerpo continua es la que acelera el plasma y lo expulsa a alta velocidad, generando empuje por la tercera ley de Newton.<sup>6</sup>

## 2.2. Ecuaciones Gobernantes de la Magnetohidrodinámica

El comportamiento macroscópico del plasma dentro del propulsor se describe mediante el formalismo de la magnetohidrodinámica (MHD), que trata el plasma como un fluido conductor continuo. Este modelo se basa en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales acopladas que combinan las ecuaciones de Navier-Stokes de la dinámica de fluidos con las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo.<sup>4</sup> Las ecuaciones fundamentales son:

- Ecuación de Continuidad (Conservación de la Masa):

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Esta ecuación establece que la tasa de cambio de la densidad del plasma ( $\rho$ ) en un punto es igual al flujo neto de masa que entra o sale de ese punto.

- Ecuación de Momento (Navier-Stokes Modificada):

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \mathbf{F}_{\text{viscosas}}$$

Esta es la segunda ley de Newton aplicada a un elemento de fluido. El término de la izquierda representa la aceleración inercial. En el lado derecho,  $-\nabla P$  es la fuerza debida a los gradientes de presión,  $\mathbf{F}_{\text{viscosas}}$  representa las fuerzas de fricción interna del fluido, y el término crucial,  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ , es la fuerza de Lorentz por unidad de volumen, que actúa como la principal fuerza impulsora en el propulsor.<sup>5</sup>

- Ecuación de Inducción Magnética:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B})$$

Esta ecuación, derivada de la ley de Faraday y la ley de Ohm generalizada, describe cómo evoluciona el campo magnético. El primer término en el lado derecho,  $\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ , representa la convección del campo magnético por el plasma en movimiento (el efecto de "flujo congelado"). El segundo término,  $-\nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B})$ , donde  $\eta$  es la difusividad magnética (inversamente proporcional a la conductividad eléctrica), representa la disipación o difusión del campo magnético debido a la resistencia del plasma.<sup>5</sup>

## 2.3. Ecuaciones Clave de Rendimiento

El rendimiento de un propulsor se cuantifica mediante un conjunto de parámetros clave derivados de los principios de conservación.

- Ecuación de Empuje (Thrust):

El empuje ( $T$ ) es la fuerza total que el propulsor ejerce sobre la nave espacial. Proviene de la tasa de cambio del momento del propelente expulsado. El empuje total tiene dos componentes:

$$T = \dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_e$$

donde:

- $\dot{m}$  es el caudal másico del propelente (kg/s).<sup>19</sup>
- $v_e$  es la velocidad de escape efectiva de los gases (m/s).<sup>21</sup>
- $p_e$  es la presión estática del gas en el plano de salida de la tobera.
- $p_a$  es la presión del ambiente externo (que es esencialmente cero en el vacío del espacio).

- $A_e$  es el área de la sección transversal de la salida de la tobera.<sup>20</sup>

En los propulsores MPD, la fuerza de Lorentz es la principal contribución al término de momento  $m\vec{v}_e$ . Para los propulsores MPD de campo propio, una fórmula empírica fundamental, conocida como la ley de Maecker, proporciona una buena aproximación del componente electromagnético del empuje:  $F_{em} \approx 4\pi\mu_0 I^2 \ln(R_c/R_a)$  donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío,  $I$  es la corriente total de descarga, y  $R_a$  y  $R_c$  son los radios del ánodo y del cátodo, respectivamente. Esta ecuación revela una dependencia cuadrática crucial del empuje con la corriente de descarga.<sup>18</sup>

- **Impulso Específico ( $I_{sp}$ ):**

El impulso específico es la métrica principal de la eficiencia del propelente. Se define como el impulso total generado por unidad de peso de propelente consumido.

Matemáticamente, es el empuje dividido por el flujo de peso del propelente:

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g_0} = \frac{F}{\dot{m}9.81}$$

donde  $g_0$  es la aceleración estándar debida a la gravedad en la superficie de la Tierra ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ), utilizada como constante de normalización.<sup>19</sup> El

$I_{sp}$  se mide en segundos. Un  $I_{sp}$  alto indica que se puede lograr un gran cambio de velocidad ( $\Delta v$ ) con una pequeña cantidad de propelente, lo cual es de vital importancia para misiones de larga duración y alta energía.<sup>10</sup>

- **Eficiencia del Propulsor y Balance Energético:**

La eficiencia total ( $\eta$ ) de un propulsor eléctrico mide qué tan bien se convierte la potencia eléctrica de entrada ( $P_{in}$ ) en potencia cinética del chorro de escape ( $P_{jet}$ ). Se define como:

$$\eta = \frac{P_{jet}}{P_{in}} = \frac{\dot{m} \frac{1}{2} v_e^2}{P_{in}} = \frac{\dot{m} v_e^2}{2 P_{in}}$$

Las ineficiencias en los propulsores MPD surgen de varios mecanismos de pérdida de energía, que incluyen 14:

- **Pérdidas en los electrodos:** Una parte significativa de la potencia de entrada se disipa como calor en el ánodo y el cátodo debido a las caídas de voltaje en las capas cercanas a sus superficies (conocidas como "caída de ánodo" y "caída de cátodo").<sup>11</sup>
- **Costos de ionización:** La energía utilizada para ionizar el propelente no se convierte en energía cinética dirigida, y si parte del propelente sale de la tobera sin ionizarse o se recombina prematuramente, su energía se pierde ("frozen flow losses").<sup>10</sup>
- **Pérdidas por radiación:** El plasma a alta temperatura irradia energía, que se pierde al espacio.

## Sección III: Tipologías de Eyectores de Propulsión

# Magnética

El principio de aceleración de plasma mediante la fuerza de Lorentz se ha materializado en diversas arquitecturas de propulsores, cada una con características operativas, componentes y perfiles de rendimiento distintos. La clasificación se basa principalmente en el método de generación del plasma y del campo magnético, así como en el régimen de operación (continuo o pulsado).

## 3.1. Propulsores Magnetoplasma dinámicos (MPD)

Los propulsores MPD son el arquetipo de la propulsión electromagnética de alta potencia. Su diseño está optimizado para procesar grandes cantidades de potencia y generar niveles de empuje significativamente más altos que otros tipos de propulsión eléctrica.

### 3.1.1. Arquitectura y Componentes Clave

La configuración más estudiada y desarrollada para los propulsores MPD es la coaxial <sup>8</sup>:

- **Cátodo:** Es el electrodo central, que actúa como emisor de electrones. Generalmente tiene forma de varilla y está hecho de materiales refractarios capaces de soportar temperaturas extremadamente altas, como el tungsteno toriado o el tungsteno impregnado de óxido de bario.<sup>27</sup>
- **Ánodo:** Es un electrodo cilíndrico hueco que rodea concéntricamente al cátodo. Recoge la corriente de electrones que fluye a través del plasma. Suele estar hecho de materiales con alta conductividad térmica como el cobre o el molibdeno.<sup>27</sup>
- **Inyector de Propelente:** El gas propelente se introduce en la cámara de descarga, típicamente a través de una placa aislante en la base del propulsor, aguas arriba de la región de descarga principal.<sup>27</sup>
- **Aislante:** Se utilizan materiales cerámicos como el nitruro de boro para aislar eléctricamente el ánodo del cátodo y mantener la integridad estructural a altas temperaturas.<sup>27</sup>

### 3.1.2. Distinción Operativa: Campo Propio vs. Campo Aplicado

La principal subdivisión dentro de los propulsores MPD se basa en el origen del campo magnético que genera la fuerza de Lorentz:

- **MPD de Campo Propio (Self-Field):** En este modo de operación, la corriente de

descarga que fluye del ánodo al cátodo es extremadamente alta (del orden de kiloamperios a decenas de kiloamperios). Según la ley de Ampere, esta intensa corriente genera su propio campo magnético azimutal (circular alrededor del cátodo). La interacción de la corriente radial con este campo magnético autoinducido produce la fuerza de Lorentz axial. Estos propulsores son conceptualmente más simples y ligeros, ya que no requieren bobinas magnéticas externas. Sin embargo, solo alcanzan una eficiencia razonable a niveles de potencia muy elevados, típicamente por encima de los 100-200 kW.<sup>8</sup>

- **MPD de Campo Aplicado (Applied-Field):** Para mejorar el rendimiento a niveles de potencia más bajos, se utiliza una fuente externa para generar un campo magnético adicional. Esto se logra típicamente mediante un solenoide (bobina) que rodea al ánodo o, en conceptos más pequeños, con imanes permanentes. El campo aplicado tiene componentes tanto radiales como axiales, lo que permite un control más sofisticado del plasma, mejora la estabilidad de la descarga y aumenta la eficiencia a potencias más bajas. La desventaja es el aumento de la masa, la complejidad y el consumo de energía del sistema magnético.<sup>8</sup>

### 3.2. Propulsores de Plasma Pulsado (PPT)

Los PPT representan la forma más simple y robusta de propulsión electromagnética y fueron los primeros en volar en el espacio.<sup>30</sup>

- **Principio de Funcionamiento:** A diferencia de los MPD que operan de forma continua o cuasi-continua, los PPT funcionan en pulsos discretos. Utilizan un bloque de propelente sólido, casi universalmente Teflón (PTFE). Un pulso de alta energía, liberado por la descarga de un banco de condensadores, crea un arco eléctrico a través de la superficie del propelente. Este arco vaporiza e ioniza instantáneamente una pequeña cantidad de material, creando una nube de plasma.<sup>30</sup>
- **Diseño Característico:** Un PPT consta de un bloque de propelente, un mecanismo de alimentación por resorte, dos electrodos (ánodo y cátodo), una bujía para iniciar la descarga y un banco de condensadores con su unidad de procesamiento de potencia (PPU). La simplicidad mecánica es su mayor ventaja. Al operar en pulsos, pueden alcanzar potencias pico muy altas (kilovatios o megavatios) durante microsegundos, mientras que el consumo de potencia promedio del sistema es muy bajo (del orden de vatios), lo que los hace ideales para naves espaciales con recursos energéticos muy limitados, como los CubeSats.<sup>31</sup>

### 3.3. Tecnologías Relacionadas y Avanzadas



El campo de la propulsión por plasma es amplio, e incluye otros conceptos que, aunque no son estrictamente MPD, comparten principios físicos o se comparan a menudo con ellos.

- **Propulsores de Efecto Hall (HET):** Son actualmente la forma más común de propulsión eléctrica en satélites comerciales. Aunque su mecanismo de aceleración principal es electrostático, dependen crucialmente de un campo magnético radial para su funcionamiento. Este campo atrapa a los electrones, creando una corriente azimutal (la "corriente de Hall") que es muy eficiente para ionizar el propelente neutro que fluye axialmente. Los iones resultantes, al no estar confinados magnéticamente debido a su mayor masa, son acelerados por el campo eléctrico axial.<sup>32</sup>
- **Cohete de Magnetoplasma de Impulso Específico Variable (VASIMR):** Es un concepto electrotérmico avanzado que utiliza un proceso de tres etapas. Primero, el gas propelente se ioniza usando ondas de radiofrecuencia (RF) para crear un plasma. Segundo, se inyectan ondas RF adicionales a la frecuencia de ciclotrón iónico para calentar el plasma a temperaturas extremadamente altas (millones de grados). Finalmente, este plasma de alta presión se expande y acelera a través de una tobera magnética, que es un campo magnético con una forma específica que convierte la energía térmica del plasma en empuje dirigido. Su característica más destacada es la capacidad de variar su impulso específico y empuje para optimizar diferentes fases de una misión.<sup>36</sup>

**Tabla 1: Análisis Comparativo de Tecnologías de Propulsión por Plasma**

La elección de una tecnología de propulsión específica depende de un complejo equilibrio entre los requisitos de la misión y las capacidades del sistema. La siguiente tabla resume y compara las características clave de las principales tecnologías de propulsión por plasma, permitiendo una evaluación rápida de sus fortalezas y debilidades relativas. Esta síntesis es fundamental para los ingenieros y planificadores de misiones al seleccionar la opción más adecuada para un objetivo determinado, ya sea una maniobra rápida de alta fuerza o un crucero interplanetario de alta eficiencia y larga duración.

| Característica                  | Propulsor Magnetoplasmadínámico (MPD) | Propulsor de Plasma Pulsado (PPT)                     | Propulsor de Efecto Hall (HET)  | VASIMR   |
|---------------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| <b>Principio de Aceleración</b> | Fuerza de Lorentz ( $J \times B$ )    | Fuerza de Lorentz ( $J \times B$ ) y expansión de gas | Principalmente electrostática (campo $E$ axial), con confinamiento magnético de | Calentamiento por RF y expansión en tobera magnética |

|                                   |  |  |  |  |
|-----------------------------------|--|--|--|--|
|                                   |  |  | electrones                               |  |
| <b>Rango de Empuje</b>            | Alto (2.5 - 200 N) <sup>8</sup>                  | Muy bajo ( $\mu\text{N}$ - mN) <sup>30</sup> | Bajo a medio (mN - N) <sup>40</sup>      | Variable (Bajo a medio)                              |
| <b>Impulso Específico (Isp)</b>   | Alto (1,000 - 11,000 s) <sup>39</sup>            | Medio a alto (~1,000 s) <sup>41</sup>        | Medio (1,600 - 3,000 s) <sup>40</sup>    | Muy alto y variable (3,000 - 12,000 s) <sup>38</sup> |
| <b>Eficiencia del Propulsor</b>   | Baja a media (40-60% en óptimas) <sup>8,31</sup> | Muy baja (5-15%)                             | Media a alta (50-60%)                    | Potencialmente alta (~73%) <sup>38</sup>             |
| <b>Requerimientos de Potencia</b> | Muy altos (100 kW - MW) <sup>8</sup>             | Muy bajos (1 - 150 W promedio) <sup>41</sup> | Bajos a medios (1 - 20 kW) <sup>43</sup> | Muy altos (kW - MW) <sup>37</sup>                    |
| <b>Propelente Típico</b>          | Gases (Argón, Hidrógeno), Litio <sup>8</sup>     | Sólido (Teflón) <sup>30</sup>                | Gas noble (Xenón, Kriptón) <sup>32</sup> | Gas (Argón) <sup>38</sup>                            |
| <b>Nivel de Madurez (TRL)</b>     | 4-5 (Investigación/Prototipo)                    | 9 (Probado en vuelo) <sup>44</sup>           | 9 (Probado en vuelo, uso comercial)      | 5 (Prototipo en tierra)                              |

## Sección IV: Análisis de Rendimiento: Ventajas y Desventajas

La evaluación de los propulsores magnetoplasmádinámicos revela un perfil de rendimiento con ventajas estratégicas significativas para ciertas clases de misiones, pero también con desventajas operativas formidables que han impedido su adopción generalizada hasta la fecha.

### 4.1. Ventajas Estratégicas

- Alto Impulso Específico (Isp):** La principal ventaja de los propulsores MPD es su capacidad para acelerar el propelente a velocidades de escape extremadamente altas, que oscilan entre 15 y 60 km/s, con potencial para superar los 100 km/s.<sup>8</sup> Esto se traduce en un impulso específico de miles de segundos (típicamente entre 1,000 y 7,000 s, con un potencial teórico de hasta 11,000 s).<sup>8</sup> En comparación, los cohetes químicos más avanzados apenas alcanzan los 450 s. Según la ecuación del cohete de Tsiolkovsky, un Isp alto reduce exponencialmente la cantidad de propelente necesaria para un determinado cambio de velocidad ( $\Delta v$ ). Este ahorro masivo de propelente es un factor habilitante para misiones ambiciosas de larga duración, como viajes tripulados a Marte o misiones robóticas a los planetas exteriores, ya que permite mayores masas de carga

útil o tiempos de viaje más cortos.<sup>45</sup>

- **Alta Densidad de Empuje:** A diferencia de otros sistemas de propulsión eléctrica como los motores iónicos, que producen empujes del orden de milinewtons, los propulsores MPD pueden generar empujes del orden de newtons a decenas de newtons.<sup>8</sup> Esta densidad de empuje, que es entre 10 y 100 veces mayor que la de un motor iónico, permite realizar maniobras orbitales de manera mucho más rápida. Esto es particularmente ventajoso para aplicaciones como la elevación de órbita de grandes satélites desde LEO a GEO o para maniobras de captura orbital en misiones interplanetarias, donde el tiempo es un factor crítico.<sup>10</sup>
- **Simplicidad Mecánica y Robustez:** En su forma más básica, un propulsor MPD no tiene partes móviles complejas, como las turbobombas, válvulas de alta presión y sistemas de refrigeración intrincados que caracterizan a los motores de cohetes químicos. Esta simplicidad inherente se traduce en un potencial de mayor fiabilidad y una vida útil operativa más larga, siempre que se puedan superar los desafíos de la erosión de los componentes.<sup>1</sup>

## 4.2. Desventajas y Limitaciones Operativas

- **Requerimientos de Alta Potencia:** El principal obstáculo para la implementación de los propulsores MPD es su enorme demanda de energía eléctrica. Estos dispositivos solo alcanzan niveles de eficiencia y empuje útiles cuando operan a niveles de potencia que van desde los cientos de kilovatios hasta varios megavatios.<sup>8</sup> Las fuentes de energía disponibles actualmente en las naves espaciales, como los paneles solares, están limitadas a decenas de kilovatios. Por lo tanto, el uso práctico de los MPD de alto rendimiento está intrínsecamente ligado al desarrollo de reactores de fisión nuclear compactos y seguros para el espacio, un desafío tecnológico en sí mismo.<sup>8</sup>
- **Baja Eficiencia del Propulsor:** A pesar de su potencial, la eficiencia de conversión de energía eléctrica en energía cinética del chorro en los propulsores MPD ha sido históricamente baja, a menudo por debajo del 40-60% incluso en condiciones optimizadas.<sup>8</sup> Una fracción significativa de la energía se pierde en forma de calor en los electrodos, un fenómeno conocido como "caída de ánodo", donde se disipa una gran cantidad de energía sin contribuir al empuje. Otras pérdidas incluyen la energía invertida en la ionización que no se recupera como energía cinética (pérdidas por flujo congelado) y la radiación térmica del plasma caliente.<sup>10</sup>
- **Erosión de Electrodos y Vida Útil Limitada:** Este es el desafío más crítico para la viabilidad a largo plazo de los MPD. El cátodo y el ánodo están expuestos a un entorno de plasma extremadamente hostil, con altas temperaturas y un bombardeo constante de iones de alta energía. Esto provoca una erosión severa del material de los electrodos a través de mecanismos como la pulverización catódica y la evaporación.

Esta erosión no solo limita la vida útil del propulsor a unos pocos cientos o miles de horas, sino que también puede contaminar superficies sensibles de la nave espacial.<sup>8</sup>

### 4.3. La Interdependencia Crítica entre Eficiencia, Vida Útil y Potencia

Los tres principales desafíos de los propulsores MPD —baja eficiencia, corta vida útil y alta demanda de potencia— no son problemas independientes, sino que están intrínsecamente interconectados en un ciclo de retroalimentación negativa que ha dificultado el progreso en este campo. Esta interdependencia forma un "trilema" tecnológico donde la mejora en una de las áreas a menudo degrada el rendimiento en las otras.

El punto de partida es la necesidad de generar un empuje útil. Según la ley de Maecker, el empuje electromagnético en un propulsor de campo propio es proporcional al cuadrado de la corriente de descarga ( $T \propto I^2$ ).<sup>18</sup> Por lo tanto, para aumentar el empuje, es necesario aumentar significativamente la corriente. Sin embargo, este aumento tiene dos consecuencias directas y perjudiciales. Primero, la potencia eléctrica requerida ( $P = V \times I$ ) aumenta drásticamente, exacerbando el ya formidable desafío de la fuente de alimentación.<sup>8</sup> Segundo, y más críticamente, una corriente más alta conduce a una mayor densidad de corriente en la superficie de los electrodos. Esto intensifica el bombardeo iónico y el calentamiento óhmico, acelerando masivamente la tasa de erosión y reduciendo de forma drástica la vida útil del motor.<sup>9</sup>

A su vez, los intentos de mitigar la erosión para prolongar la vida útil pueden afectar negativamente a la eficiencia. Por ejemplo, operar a corrientes más bajas para reducir la erosión lleva al propulsor a un régimen de baja eficiencia. El uso de campos magnéticos aplicados para estabilizar el plasma y distribuir la corriente de manera más uniforme puede mejorar la vida útil y la eficiencia a potencias más bajas, pero introduce la masa, la complejidad y el consumo de energía de las bobinas magnéticas, lo que penaliza al sistema en su conjunto.<sup>9</sup>

Por lo tanto, romper este trilema es el objetivo central de la investigación moderna en MPD. No se trata simplemente de construir un reactor nuclear más potente. La solución requiere un enfoque sistémico y avances concurrentes en múltiples frentes. En la ciencia de los materiales, se necesitan nuevos compuestos para cátodos y ánodos que puedan soportar entornos de plasma más extremos. En la física del plasma, es crucial comprender y controlar las inestabilidades, como el fenómeno de "onset" (un aumento repentino del voltaje y la erosión a corrientes críticas), que son una de las principales causas de la erosión.<sup>10</sup>

Finalmente, en el diseño de propulsores, se exploran conceptos innovadores que buscan desacoplar la generación de empuje de los procesos destructivos en los electrodos, lo que ha motivado la investigación en propulsores sin electrodos como el VASIMR, que, aunque enfrenta sus propios desafíos, representa un intento de eludir este trilema fundamental.<sup>9</sup>

## Sección V: Campo de Acción y Aplicabilidad Actual

El perfil de rendimiento único de los propulsores de plasma magnético, caracterizado por un alto impulso específico y una alta densidad de empuje, los posiciona para aplicaciones específicas en la exploración espacial, aunque su uso práctico ha sido limitado hasta la fecha.

### 5.1. Aplicaciones Espaciales

- **Misiones de Alta Energía:** Los propulsores MPD son considerados candidatos principales para misiones que requieren grandes cambios de velocidad ( $\Delta v$ ) y una potencia significativa. Esto incluye el transporte rápido de cargas pesadas y tripulaciones a Marte, así como misiones robóticas a los planetas exteriores y más allá. Su capacidad para acortar los tiempos de viaje interplanetario es una de sus ventajas más citadas.<sup>8</sup>
- **Maniobras Orbitales:** El empuje relativamente alto de los MPD en comparación con otros sistemas eléctricos los hace adecuados para maniobras de transferencia orbital, como mover grandes plataformas o satélites desde una órbita terrestre baja (LEO) a una órbita geoestacionaria (GEO). Esta capacidad podría ser crucial para la logística de la economía cislunar.<sup>45</sup>
- **Propulsión de Microsatélites (CubeSats):** En el otro extremo del espectro de potencia, los Propulsores de Plasma Pulsado (PPT) han encontrado un nicho de aplicación valioso. Su bajo consumo de energía promedio, simplicidad mecánica, y la capacidad de entregar impulsos muy pequeños y precisos los hacen ideales para el control de actitud (orientación), el mantenimiento de la estación orbital (compensación de la resistencia atmosférica) y las maniobras de desorbitado de satélites pequeños y CubeSats.<sup>30</sup>

#### 5.1.1. Revisión Histórica de Misiones Clave

A pesar de ser una tecnología en gran parte experimental, la propulsión por plasma magnético tiene una herencia de vuelo que ha proporcionado datos valiosos.

- **Zond-2 (1964):** Esta sonda soviética destinada a Marte fue la primera nave espacial en utilizar propulsión eléctrica en el espacio. Estaba equipada con seis PPT que funcionaban como actuadores para el sistema de control de actitud. Aunque se perdió la comunicación con la sonda, una prueba del sistema de propulsión se realizó con éxito, demostrando la viabilidad del concepto en el entorno espacial.<sup>30</sup>

- **Earth Observing-1 (EO-1) (2000):** Como parte de su programa New Millennium, la NASA voló un PPT en la nave espacial EO-1. El propulsor se utilizó con éxito para realizar el control de balanceo de la nave, y una de las conclusiones más importantes de la misión fue demostrar que la interferencia electromagnética generada por los pulsos del propulsor no afectaba a la electrónica sensible de la nave, un punto de preocupación clave para la integración de estos sistemas.<sup>30</sup>
- **Space Flyer Unit (SFU) (1995):** Esta plataforma experimental japonesa, lanzada y recuperada por el transbordador espacial, llevó a cabo el experimento de propulsión eléctrica (EPEX). Este experimento probó un propulsor MPD de 1 kW que utilizaba hidracina como propelente. La misión fue un éxito notable, ya que disparó el propulsor más de 40,000 veces y confirmó que su rendimiento en el espacio coincidía estrechamente con los datos obtenidos en las pruebas en tierra, validando los modelos de rendimiento y las instalaciones de prueba.<sup>29</sup>

## 5.2. Aplicaciones Potenciales No Espaciales

Aunque el desarrollo principal de la tecnología MHD se ha centrado en el espacio, sus principios tienen aplicaciones potenciales en otros campos:

- **Propulsión Marina:** Se ha investigado el uso de propulsores MHD para submarinos y barcos de superficie. Al utilizar el agua de mar como fluido conductor, estos sistemas podrían ofrecer una propulsión extremadamente silenciosa y sin partes móviles, una ventaja táctica significativa para aplicaciones militares. Sin embargo, desafíos como la electrólisis, la corrosión de los electrodos y la baja eficiencia han limitado su desarrollo práctico.<sup>3</sup>
- **Procesamiento de Materiales:** Las antorchas de plasma basadas en principios MPD pueden generar chorros de plasma de alta velocidad y alta temperatura, útiles para aplicaciones industriales como el recubrimiento por pulverización de plasma, la ablación de superficies y el temple de materiales.<sup>47</sup>
- **Aerodinámica de Alta Velocidad:** Se ha propuesto el uso de actuadores MHD para el control de flujo en vehículos hipersónicos. Al ionizar el aire que fluye sobre una superficie y aplicar campos electromagnéticos, sería teóricamente posible manipular la capa límite, reducir la resistencia y controlar las ondas de choque.<sup>4</sup>

## Sección VI: Estado del Arte, Retos Tecnológicos y Perspectivas Futuras

La propulsión magnetoplasmádinámica se encuentra en una encrucijada. A pesar de décadas

de investigación, la tecnología, especialmente en su variante de alta potencia (MPD), aún no ha alcanzado la madurez necesaria para su uso operativo generalizado. Sin embargo, los avances continuos en áreas complementarias y la persistente demanda de sistemas de propulsión de alto rendimiento mantienen vivo el interés en este campo.

## 6.1. Estado Actual de la Investigación en Agencias Espaciales

Las principales agencias espaciales del mundo continúan explorando la propulsión eléctrica de alta potencia, reconociendo su papel habilitador para futuras misiones ambiciosas.

- **NASA:** Históricamente, el Glenn Research Center (GRC) y el Jet Propulsion Laboratory (JPL) han liderado los esfuerzos de la NASA. La investigación se ha centrado en el desarrollo de instalaciones de prueba capaces de manejar propulsores de clase megavatio, tanto en modo pulsado como de estado estacionario, para simular las condiciones operativas.<sup>28</sup> Un enfoque clave ha sido la validación de códigos de simulación numérica avanzados, como MACH2, para predecir el comportamiento del plasma y el rendimiento del propulsor, guiando así el diseño de nuevas configuraciones.<sup>49</sup> Proyectos más recientes, como el "High Thrust Efficiency MPD Thruster", han explorado técnicas innovadoras para mejorar la eficiencia, como el uso de geometrías de campo magnético no convencionales (toberas magnéticas) y la inyección de propelente directamente a través del ánodo para mitigar las pérdidas de energía.<sup>47</sup> Actualmente, el proyecto de Propulsión Nuclear Espacial (SNP) de la NASA está desarrollando activamente propulsores MPD de litio de alta potencia (100-200 kWe) como una opción principal para la propulsión nuclear-eléctrica en futuras misiones a Marte.<sup>13</sup>
- **ESA (Agencia Espacial Europea):** Aunque la investigación europea ha estado más centrada en los propulsores de efecto Hall de alta potencia, existe un interés continuo en conceptos de propulsión avanzados. La ESA promueve la investigación a través de programas como Horizonte 2020 y apoya el desarrollo de tecnologías disruptivas, como el "Air-Breathing Ion Engine", que utiliza principios de plasma para operar en órbitas muy bajas utilizando la atmósfera residual como propelente.<sup>50</sup> Además, la ESA juega un papel crucial en la formación de la próxima generación de ingenieros a través de iniciativas como la "European Summer School on Electric Propulsion", asegurando la continuidad del conocimiento en este campo especializado.<sup>51</sup>
- **JAXA (Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón):** JAXA tiene una de las trayectorias más largas y consistentes en la investigación de MPD, culminando con el exitoso vuelo del propulsor en la misión SFU en 1995.<sup>29</sup> La investigación actual en JAXA se enfoca en escalar la tecnología a la clase de megavatios, necesaria para futuras misiones de transporte espacial a gran escala. Sus esfuerzos combinan la experimentación en tierra en cámaras de vacío con simulaciones numéricas de alto

rendimiento en su supercomputadora (JSS) para comprender la física del flujo de plasma, mejorar la eficiencia del empuje y resolver los desafíos de diseño térmico inherentes a los sistemas de tan alta potencia.<sup>52</sup>

## 6.2. Retos Tecnológicos Críticos y Líneas de Investigación

La transición de los propulsores MPD de prototipos de laboratorio a sistemas de vuelo fiables depende de la superación de varios desafíos fundamentales.

### 6.2.1. El Problema de la Vida Útil (Erosión de Electrodos)

- **Causa del Problema:** La principal limitación de la vida útil de los MPD es la erosión de los electrodos. Las altas densidades de corriente y el bombardeo constante por parte de iones energéticos del plasma provocan la degradación del material del cátodo y del ánodo a través de la evaporación térmica y la pulverización catódica (sputtering).<sup>9</sup>
- **Soluciones en Investigación:**
  - **Materiales Avanzados:** Se investigan materiales para cátodos con una menor "función de trabajo" (la energía necesaria para liberar un electrón), lo que les permite operar a temperaturas más bajas y reducir la evaporación. Ejemplos incluyen el tungsteno impregnado con óxido de bario o el hexaboruro de lantano (LaB6).<sup>14</sup>
  - **Cátodos Huecos:** Estos diseños distribuyen la emisión de corriente sobre una superficie interna más grande, lo que reduce la densidad de corriente local y, por lo tanto, la tasa de erosión en comparación con los cátodos de varilla sólida.<sup>12</sup>
  - **Propelentes de Metales Líquidos:** El uso de litio como propelente ha demostrado en laboratorio la capacidad de reducir significativamente la erosión del cátodo. Se cree que una fina capa de litio en la superficie del cátodo lo protege y facilita la emisión de electrones.<sup>8</sup>

### 6.2.2. El Desafío de la Potencia

- **Causa del Problema:** La eficiencia de los propulsores MPD cae drásticamente a niveles de potencia por debajo de 100-200 kW. Esto los hace incompatibles con la mayoría de las fuentes de energía espacial actuales, que se basan en paneles solares.<sup>10</sup>
- **Soluciones en Investigación:**
  - **Reactores Nucleares Espaciales:** La solución a largo plazo para la propulsión MPD de alta potencia es el desarrollo de reactores de fisión nuclear compactos,



ligeros y seguros. Programas como el anterior Proyecto Prometheus de la NASA y los esfuerzos actuales dentro del programa SNP están destinados a desarrollar estas fuentes de energía de clase megavatio.<sup>8</sup>

- **Arquitecturas de "Accionamiento Directo":** Para aplicaciones de menor potencia, se investigan arquitecturas que permiten alimentar los propulsores directamente desde paneles solares de alta tensión. Esto elimina la necesidad de unidades de procesamiento de potencia (PPU) pesadas y complejas que convierten y regulan el voltaje, mejorando la eficiencia y reduciendo la masa del sistema de propulsión.<sup>53</sup>

### 6.2.3. Mejora de la Eficiencia

- **Causa del Problema:** Una parte considerable de la energía eléctrica se pierde en forma de calor en el ánodo (la "caída de ánodo"), un fenómeno exacerbado por el efecto Hall, que empuja la corriente hacia el borde aguas abajo del ánodo, y por la "inanición de plasma" (una reducción de la densidad de plasma cerca de la superficie del ánodo).<sup>47</sup>
- **Soluciones en Investigación:**
  - **Geometrías de Campo Magnético Aplicado:** El uso de campos magnéticos aplicados con una forma específica, conocidas como "toberas magnéticas", puede ayudar a guiar el flujo de plasma, reducir el contacto directo con el ánodo, disminuir las pérdidas de energía y mejorar la conversión de la energía del plasma en empuje axial.<sup>47</sup>
  - **Inyección de Propelente a través del Ánodo:** Se está investigando la inyección de una pequeña cantidad de propelente a través de un ánodo poroso. Esto tiene como objetivo reponer el plasma cerca de la superficie del ánodo, contrarrestando la inanición de plasma y promoviendo una distribución de corriente más uniforme, lo que reduce la caída de ánodo.<sup>47</sup>
  - **Geometrías de Electrodo Optimizadas:** Diseños de ánodo con formas no cilíndricas, como perfiles convergentes-divergentes, han demostrado en simulaciones y experimentos que pueden mejorar la distribución de la corriente a lo largo del propulsor, reduciendo las concentraciones de corriente que conducen a ineficiencias y erosión.<sup>11</sup>

### 6.3. Conclusión y Visión a Futuro

La propulsión magnetoplasmádinamica representa una tecnología de alto potencial pero que aún se encuentra en un nivel de madurez tecnológica relativamente bajo. Mientras que los Propulsores de Plasma Pulsado (PPT) han demostrado su valía y han encontrado un nicho de

aplicación estable en el creciente mercado de los microsátélites, los propulsores MPD de alta potencia siguen siendo una promesa para el futuro de la exploración espacial. Su realización está intrínsecamente ligada a avances paralelos y fundamentales en campos como las fuentes de energía nuclear para el espacio y la ciencia de materiales de alta temperatura. El camino hacia la implementación de propulsores MPD para misiones tripuladas a Marte o más allá no será directo. Probablemente implicará una hoja de ruta escalonada, comenzando con el desarrollo y la calificación en vuelo de propulsores de campo aplicado en el rango de 100-200 kWe.<sup>13</sup> Estos sistemas podrían ser probados en misiones de transporte de carga robótica o en vehículos de transferencia orbital, demostrando su fiabilidad y rendimiento antes de ser escalados a los sistemas de clase megawatio necesarios para el transporte humano rápido. En última instancia, la tecnología MPD no debe ser vista como un fin en sí misma, sino como un componente integral y habilitador de una futura infraestructura de transporte espacial de alta energía, capaz de expandir de manera sostenible el alcance de la humanidad en el sistema solar.

## Obras citadas

1. Magnetohydrodynamic drive - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamic\\_drive](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamic_drive)
2. MPD Thruster Performance Analytic Models, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070032052/downloads/20070032052.pdf>
3. Propulsión Magneto Hidro Dinamica. | www.elSnorkel.com, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://www.elsnorkel.com/2005/03/propulsion-magneto-hidro-dinamica\\_24.html](https://www.elsnorkel.com/2005/03/propulsion-magneto-hidro-dinamica_24.html)
4. Magnetohidrodinámica - Física de los fluidos conductores - Evodrop, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://evodrop.com/es/glosario/magnetohydrodynamik/>
5. Magnetohydrodynamics (MHD), fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/cfsa/people/valery/teaching/khu\\_mhd/KHU\\_mhd\\_handout.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/cfsa/people/valery/teaching/khu_mhd/KHU_mhd_handout.pdf)
6. Magnetohidrodinámica: Física, Matemáticas | StudySmarter, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/mecanica-de-fluidos-en-ingenieria/magnetohidrodinamica/>
7. Propulsión por plasma: Espacio, Tecnología | StudySmarter, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-aeroespacial/propulsion-por-plasma/>
8. Magnetoplasmadynamic thruster - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoplasmadynamic\\_thruster](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoplasmadynamic_thruster)
9. Magnetoplasmadynamic (MPD) Thrusters - Beyond NERVA - WordPress.com, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://beyondnerva.wordpress.com/electric-propulsion/magnetoplasmadynamic-mpd-thrusters/>
10. MPD Thruster Technology and Its Limitations - ijsca, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.ijscia.com/wp-content/uploads/2021/08/Volume2-Issue4-Jul->

[Sep-No.131-578-586.pdf](#)

11. MPD Thruster Technology - CORE, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://core.ac.uk/download/pdf/42816445.pdf>
12. Performance Characteristics of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for Manned Mars Exploration - Electric Rocket Propulsion Society, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://electricrocket.org/IEPC/IEPC-2015-197 ISTS-2015-b-197.pdf>
13. Development of High Power Lithium Magnetoplasmdynamic Thrusters to Support Human Mars Exploration - Electric Propulsion and Plasma Dynamics Laboratory, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://alfven.princeton.edu/publications/pdf/polk-iepc-2024.pdf>
14. (PDF) A review of low-power applied-field magnetoplasmdynamic thruster research and the development of an improved performance model - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/367001765 A review of low-power applied-field magnetoplasmdynamic thruster research and the development of an improved performance model](https://www.researchgate.net/publication/367001765_A_review_of_low-power_applied-field_magnetoplasmdynamic_thruster_research_and_the_development_of_an_improved_performance_model)
15. es.wikipedia.org, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://es.wikipedia.org/wiki/Propulsi%C3%B3n\\_magnetohidrodin%C3%A1mica#:~:text=El%20principio%20de%20funcionamiento%20consiste,veh%C3%ADculo%20en%20la%20direcci%C3%B3n%20opuesta.](https://es.wikipedia.org/wiki/Propulsi%C3%B3n_magnetohidrodin%C3%A1mica#:~:text=El%20principio%20de%20funcionamiento%20consiste,veh%C3%ADculo%20en%20la%20direcci%C3%B3n%20opuesta.)
16. Fuerza de Lorentz - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza\\_de\\_Lorentz](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz)
17. Mastering the Lorentz Force Equation - Number Analytics, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-lorentz-force-equation>
18. Lecture 19 Notes: Plasma Accelerators / Magnetoplasmdynamic ..., fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/38dd1641a7e088aa1760801b4c256300 MIT16\\_522S15\\_Lecture19.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/38dd1641a7e088aa1760801b4c256300 MIT16_522S15_Lecture19.pdf)
19. www.studysmarter.es, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-aeroespacial/impulso-especifico/#:~:text=La%20f%C3%B3rmula%20del%20impulso%20espec%C3%ADfico&text=La%20f%C3%B3rmula%20b%C3%A1sica%20es%20propulsante%20por%20unidad%20de%20gravedad\).](https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-aeroespacial/impulso-especifico/#:~:text=La%20f%C3%B3rmula%20del%20impulso%20espec%C3%ADfico&text=La%20f%C3%B3rmula%20b%C3%A1sica%20es%20propulsante%20por%20unidad%20de%20gravedad).)
20. Resumen Detallado del Libro: "Rocket Propulsion Elements" (9ª ed.) por George P. Sutton y Oscar Biblarz, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://sa8e75bf96b3a9ae3.jimcontent.com/download/version/1724308501/module/8212026962/name/Rocket%20Propulsion%20Elements.pdf>
21. The Effect of the 2-Dimensional Magnetic Field Profile in Hall Thrusters - Scholarly Commons, fecha de acceso: agosto 7, 2025,

- <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1159&context=edt>
22. Basics Chemical Rocket Thrust Specific Impulse Rocket equation Efficiency Trajectories High-exhaust-velocity, low-thrust trajectories Plasma and electric propulsion Fusion propulsion - UT Physics, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://web2.ph.utexas.edu/~iheds/IntroductionPlasmaPhysics/375%20P%2010%20\(rocket\).pdf](https://web2.ph.utexas.edu/~iheds/IntroductionPlasmaPhysics/375%20P%2010%20(rocket).pdf)
  23. Teoría sobre motores cohete de propelente sólido - Richard Nakka Rocketry, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://www.nakka-rocketry.net/articles/teoria\\_de\\_los\\_motores\\_cohete.pdf](https://www.nakka-rocketry.net/articles/teoria_de_los_motores_cohete.pdf)
  24. Impulso Específico: 'Física', 'Cálculo' | StudySmarter, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-aeroespacial/impulso-especifico/>
  25. Specific impulse - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Specific\\_impulse](https://en.wikipedia.org/wiki/Specific_impulse)
  26. Lecture 2 Notes: Fundamentals and Definitions - MIT OpenCourseWare, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/d560a31b4f2a44ebac17fa3f32143602/MIT16\\_522S15\\_Lecture2.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/d560a31b4f2a44ebac17fa3f32143602/MIT16_522S15_Lecture2.pdf)
  27. Applied-Field MPD Thruster - NASA Technical Reports Server (NTRS), fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910017903/downloads/19910017903.pdf>
  28. High-Power Magnetoplasmadynamic Thruster Being Developed, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050196574/downloads/20050196574.pdf>
  29. Electric Propulsion Experiment (EPEX) of a Repetitively Pulsed MPD, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://electricrocket.org/IEPC/7120.pdf>
  30. Pulsed plasma thruster - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsed\\_plasma\\_thruster](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsed_plasma_thruster)
  31. (PDF) ANÁLISIS TEÓRICO DE PROPULSORES DE PLASMA PULSANTES ABLATIVOS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/376228154\\_ANALISIS\\_TEORICO\\_DE\\_PROPULSORES\\_DE\\_PLASMA\\_PULSANTES\\_ABLATIVOS\\_Y\\_VALIDACION\\_DE\\_RESULTADOS](https://www.researchgate.net/publication/376228154_ANALISIS_TEORICO_DE_PROPULSORES_DE_PLASMA_PULSANTES_ABLATIVOS_Y_VALIDACION_DE_RESULTADOS)
  32. propulsor lanzador espacial, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://frh.cvg.utn.edu.ar/mod/resource/view.php?id=65247&redirect=1>
  33. Pulsed Plasma Thruster (PPT) - 小紫・小泉研究室, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/ppt\\_j.html](http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/ppt_j.html)
  34. Pulsed Plasma Thrusters for Space Propulsion and Industrial Processing 1 Introduction, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://electricrocket.org/IEPC/0043-0303iepc-full.pdf>
  35. 30 Years of Electric Propulsion Flight Experience at Aerojet Rocketdyne, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://electricrocket.org/IEPC/7vc5f5xg.pdf>
  36. Plasma and Nuclear Propulsion - Earth & Space Sciences, fecha de acceso:

- agosto 7, 2025, [https://courses.ess.washington.edu/ess-102/FALL12/Lecture25\\_AdvancedPropulsion.pdf](https://courses.ess.washington.edu/ess-102/FALL12/Lecture25_AdvancedPropulsion.pdf)
37. Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Variable\\_Specific\\_Impulse\\_Magnetoplasma\\_Rocket](https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_Specific_Impulse_Magnetoplasma_Rocket)
  38. Our Engine – Ad Astra Rocket Company – Houston, US, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.adastrarocket.com/our-engine/>
  39. Electromagnetic Propulsion Systems - An Analysis of Current ..., fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://currentpropulsionsystems.weebly.com/electromagnetic-propulsion-systems.html>
  40. Electric propulsion: The engine behind the new era of space exploration, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.innovationnewsnetwork.com/electric-propulsion-the-engine-behind-the-new-era-of-space-exploration/59263/>
  41. Pulsed Plasma Thruster Technology for Small Satellite Missions - NASA Technical Reports Server (NTRS), fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960011377/downloads/19960011377.pdf>
  42. Space Travel Aided by Plasma Thrusters: Past, Present and Future - DSIAC, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://dsiac.dtic.mil/articles/space-travel-aided-by-plasma-thrusters-past-present-and-future/>
  43. Future Directions for Electric Propulsion Research - MDPI, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://www.mdpi.com/2226-4310/7/9/120>
  44. DEVELOPMENT AND TESTING OF PULSED PLASMA THRUSTER - Hindustan University, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://hindustanuniv.ac.in/assets/naac/CA/1\\_3\\_4/738\\_Kamalesh\\_T.pdf](https://hindustanuniv.ac.in/assets/naac/CA/1_3_4/738_Kamalesh_T.pdf)
  45. Spacecraft electric propulsion - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft\\_electric\\_propulsion](https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_electric_propulsion)
  46. [2412.19636] A Brief Overview on Magnetoplasma dynamic Thrusters - arXiv, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://arxiv.org/abs/2412.19636>
  47. High Thrust Efficiency MPD Thruster - NASA TechPort - Project, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://techport.nasa.gov/projects/9544>
  48. Pulsed Plasma Mission Endurance Test - DTIC, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA213462.pdf>
  49. High Power MPD Thruster Development at the NASA Glenn Research Center, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20010094060/downloads/20010094060.pdf>
  50. ESA - World-first firing of air-breathing electric thruster - European Space Agency, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/World-first\\_firing\\_of\\_air-breathing\\_electric\\_thruster](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/World-first_firing_of_air-breathing_electric_thruster)
  51. 2nd Electric Propulsion Summer School (1-3 April 2025) - Indico at ESA / ESTEC, fecha de acceso: agosto 7, 2025, [https://indico.esa.int/event/524/timetable/?view=standard\\_numbered](https://indico.esa.int/event/524/timetable/?view=standard_numbered)
  52. ISAS/JAXA Funaki Laboratory | Advanced Spacecraft Propulsion, fecha de

acceso: agosto 7, 2025, [https://stage.tksc.jaxa.jp/asplab/en/e\\_research1.html](https://stage.tksc.jaxa.jp/asplab/en/e_research1.html)

53. El accionamiento directo mejora el rendimiento de la propulsión eléctrica solar en una nave espacial | EDDA Project | Resultados resumidos - CORDIS, fecha de acceso: agosto 7, 2025, <https://cordis.europa.eu/article/id/451374-direct-drive-improves-solar-electric-propulsion-performances-in-a-spacecraft/es>