

# Ascenso, Vuelo, Órbita

## Un Dirigible Electroaerodinámico Alimentado por Energía Solar para un Acceso Sostenible al Espacio

### Visión y Fundamentos Físicos

El sueño del vuelo ha sido siempre una competencia entre la paciencia y el poder. Los primeros aeronautas del siglo XVIII ascendieron suavemente al cielo utilizando gases de flotación, mientras que los ingenieros de cohetes del siglo XX lo atravesaron con fuego. Ambos enfoques comparten el mismo objetivo —escapar de la tiranía de la gravedad—, pero difieren radicalmente en filosofía. Uno usa el aire como socio; el otro lo trata como obstáculo. Entre estos dos extremos yace un tercer camino, uno no realizado aún en la práctica pero ya no imposible en principio: un **dirigible alimentado por energía solar que puede volar a la órbita**, ascendiendo primero por flotación, luego por sustentación aerodinámica y finalmente por soporte centrífugo, todo sin propelente químico.

En el corazón de este concepto está la **propulsión electroaerodinámica (EAD)** —una forma de empuje eléctrico que utiliza campos eléctricos para acelerar iones en el aire. Los iones acelerados transfieren momento a moléculas neutras, produciendo un flujo masivo y un empuje neto en los electrodos. En contraste con un cohete, que debe llevar masa de reacción, o una hélice, que necesita palas móviles, la propulsión electroaerodinámica opera **sin partes móviles y sin escape a bordo**, solo con luz solar y aire. Cuando se acopla a un arreglo solar de alta eficiencia y se monta en un cuerpo de sustentación grande y ultraligero, proporciona el ingrediente faltante para una aceleración sostenida en la atmósfera superior, donde el arrastre es pequeño pero el aire aún presente.

La propuesta es simple de describir pero desafiante de ejecutar:

1. **Ascenso** — Un dirigible flotante lleno de hidrógeno o helio asciende pasivamente a la estratósfera, lejos del clima y el tráfico aéreo.
2. **Vuelo** — El dirigible acelera horizontalmente usando empuje EAD, aumentando lentamente la velocidad mientras trepa a aire más delgado para reducir el arrastre.
3. **Órbita** — Después de semanas de aceleración continua, la fuerza centrífuga equilibra la gravedad; el vehículo ya no necesita sustentación, habiéndose convertido en un satélite por persistencia en lugar de explosión.

La idea no es fantasía. Cada paso está arraigado en física conocida: flotación, energía solar, electrostática y mecánica orbital. Lo que cambia es la escala temporal. En lugar de minutos de combustión, consideramos **semanas de luz solar**. En lugar de toneladas de propelente, dependemos de **campos y paciencia**.

### La Energía de la Órbita

Toda discusión sobre vuelos espaciales comienza y termina con energía. La energía cinética por kilogramo de masa requerida para sostener una órbita circular alrededor de la Tierra se da por

$$E_k = \frac{1}{2} v^2$$

donde  $v$  es la velocidad orbital. Para una órbita terrestre baja,  $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ , por lo que  $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$ , o aproximadamente **30 megajulios por kilogramo**. Eso es el equivalente energético de quemar alrededor de un kilogramo de gasolina por cada kilogramo colocado en órbita. Es un número grande, pero no astronómicamente grande.

Ahora compáralo con el flujo solar continuo en la cima de la atmósfera terrestre: alrededor de **1.360 vatios por metro cuadrado**. Si pudiéramos convertir incluso una pequeña fracción de eso en energía cinética a lo largo de días o semanas, podríamos, en principio, suministrar la energía orbital requerida. Los arreglos fotovoltaicos de alto rendimiento modernos tienen potencias específicas del orden de varios cientos de vatios por kilogramo. A  $P_{\text{sp}} = 300 \text{ W/kg}$ , un kilogramo de arreglo produce 300 julios por segundo. Sobre un día ( $8.64 \times 10^4$  segundos), eso es  $2.6 \times 10^7$  julios —comparable a la energía orbital de un kilogramo de masa.

Esta simple comparación muestra la lógica de este enfoque. La energía para la órbita está disponible del Sol en aproximadamente **un día por kilogramo de arreglo**, si puede convertirse eficientemente en empuje. El desafío práctico es que el arrastre y las ineficiencias absorben la mayor parte. La solución es altitud y paciencia: trabajar en el aire delgado donde el arrastre es bajo, y extender el proceso sobre semanas en lugar de horas.

## Intercambiando Tiempo por Propelente

Los cohetes resuelven el problema del arrastre por fuerza bruta —van tan rápido que el aire es irrelevante. Los dirigibles, en contraste, trabajan con el aire; pueden demorarse. Si el tiempo se trata como un recurso desechable, puede reemplazar la masa de propelente. La tarea del dirigible es mantener una aceleración pequeña pero persistente durante largos periodos, quizás **del orden de  $10^{-3} \text{ m/s}^2$** , hasta que se logre la velocidad orbital.

Si el ascenso a la órbita toma tres semanas, o aproximadamente  $1.8 \times 10^6$  segundos, la aceleración media requerida es

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

— menos de la mitad de mil de la gravedad terrestre. Tales aceleraciones son fácilmente tolerables para un dirigible; no imponen tensión estructural. La única dificultad es **sostenerla**, dada la pequeña cantidad de empuje disponible por unidad de potencia.

Si el vehículo tiene una masa de  $10^3 \text{ kg}$ , una aceleración media de  $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  requiere solo alrededor de **4 newtons de empuje neto** —menos que el peso de una manzana. La aparente absurdidad de alcanzar la órbita con el empuje de una manzana desaparece cuando se permite que el tiempo se extienda a semanas.

## Flotación y el Camino al Aire Delgado

El dirigible comienza su viaje como cualquier aeronave más ligera que el aire: desplazando aire con un gas más ligero. La fuerza de flotación se da por

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

donde  $V$  es el volumen de gas y  $\rho$  las densidades respectivas. Cerca del nivel del mar,  $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$ , y  $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$ . El hidrógeno proporciona un poco más de sustentación, alrededor de **1.1 kg por metro cúbico**, comparado con **1.0 kg por metro cúbico** para el helio. La diferencia parece pequeña pero se acumula sobre miles de metros cúbicos.

El hidrógeno ofrece así una ventaja de rendimiento medible, aunque a costa de inflamabilidad. Requiere zonificación eléctrica estricta y protocolos de ventilación, especialmente ya que el vehículo también lleva sistemas electrostáticos de alto voltaje. El helio ofrece menos sustentación pero inercia completa. Ambos gases son viables; la elección depende de la tolerancia al riesgo de la misión. En pruebas tempranas públicas o en áreas pobladas, el helio es preferible. Para intentos remotos u orbitales, el hidrógeno puede justificarse.

A medida que el vehículo asciende, la densidad del aire cae aproximadamente de forma exponencial con la altura de escala  $H \approx 7.5 \text{ km}$ . A 30 km, la densidad es alrededor de **1/65** del nivel del mar; a 50 km, **1/300**. La flotación se debilita en consecuencia, pero también el arrastre. La aeronave está diseñada para alcanzar **flotación neutra** a una altitud donde la intensidad solar permanece alta pero la presión dinámica es mínima —aproximadamente 30–40 km en la estratósfera. Desde allí, comienza la aceleración horizontal.

## Sustentación, Arrastre y Presión Dinámica

Para mantener la altitud mientras acelera, el dirigible puede depender parcialmente de **sustentación aerodinámica**. Para un casco de cuerpo sustentador, las fuerzas de sustentación y arrastre son

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_L, \quad F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

donde  $A$  es el área de referencia,  $C_L$  y  $C_D$  los coeficientes de sustentación y arrastre. Dado que  $\rho$  es pequeña a altitud, estas fuerzas son pequeñas; el vehículo compensa teniendo **un área grande y bajo peso**.

La relación  $L/D = C_L/C_D$  establece la eficiencia del vuelo aerodinámico. Los planeadores modernos pueden exceder  $L/D = 50$  en aire denso. Un dirigible ultraligero diseñado con suavidad extrema y apéndices mínimos podría mantener plausiblemente un  $L/D$  efectivo de 10–20 incluso en aire delgado. Pero a medida que el aire se adelgaza más, la transición al vuelo orbital no está limitada por la sustentación —está gobernada por **potencia de arrastre**.

La potencia necesaria para superar el arrastre es

$$P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$$

y escala con el cubo de la velocidad. Por eso los cohetes aceleran rápidamente: si demoran, el arrastre consume su energía exponencialmente. El dirigible toma la ruta opuesta: acelera donde  $\rho$  es tan pequeña que  $P_D$  permanece acotada incluso a kilómetros por segundo.

Si, por ejemplo,  $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  (típico cerca de 60 km de altitud),  $A = 100 \text{ m}^2$ ,  $C_D = 0.05$ , y  $v = 1.000 \text{ m/s}$ , entonces

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^4 \text{ W},$$

o 25 kW —fácilmente al alcance solar. En contraste, a nivel del mar la misma configuración necesitaría 25 gigavatios.

La regla es simple: **el aire delgado compra tiempo, y el tiempo reemplaza el propelente.**

## La Oportunidad Electroaerodinámica

A principios del siglo XX, los físicos observaron que campos eléctricos fuertes cerca de electrodos afilados en el aire producen una tenue corona azul y un flujo de aire sutil. Este “viento eléctrico” resulta de la transferencia de momento entre iones y neutrales. Se trató mayormente como una curiosidad hasta que la electrónica de alto voltaje maduró. Cuando se arregla adecuadamente, el efecto puede producir empuje medible.

La propulsión electroaerodinámica funciona aplicando alto voltaje entre un **emisor**, un alambre delgado o borde que produce iones, y un **colector**, un electrodo más amplio que los recibe. Los iones aceleran en el campo eléctrico, chocan con moléculas de aire neutras e imparten momento hacia adelante al gas. El dispositivo siente un empuje igual y opuesto.

Aunque las demostraciones tempranas fueron modestas, experimentos recientes —incluyendo un **avión iónico de ala fija** volado por el MIT en 2018— probaron que el vuelo estable y silencioso es posible. Sin embargo, la idea precede a ese hito. Años antes, investigaciones en **formulaciones basadas en tensor de Maxwell** de empuje electroaerodinámico mostraron cómo la misma física podría escalar a geometrías más grandes y aire más delgado. En esa formalismo, el empuje surge no de “viento” sino de **estrés electromagnético** integrado sobre el volumen de la región de descarga.

La ecuación relevante se deriva del **tensor de estrés de Maxwell  $\mathbf{T}$** , que para un campo electrostático es

$$\mathbf{T} = \epsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I})$$

donde  $\epsilon$  es la permitividad del medio,  $\mathbf{E}$  el vector de campo eléctrico, e  $\mathbf{I}$  el tensor identidad. La fuerza electromagnética neta en un cuerpo se obtiene integrando este tensor sobre su superficie:

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Dentro de la región ionizada, esto se simplifica a una **densidad de fuerza volumétrica**

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon,$$

donde  $\rho_e$  es la densidad de carga local. En un gas de permitividad aproximadamente uniforme, el segundo término se anula, dejando la elegante **fuerza corporal de Coulomb**

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E}.$$

Esta expresión compacta es la esencia de la propulsión electroaerodinámica: dondequiera que un campo eléctrico y carga espacial coexistan, una fuerza corporal neta actúa sobre el medio.

Los iones mismos son pocos, pero su momento se transmite a los neutrales a través de colisiones. El camino libre medio  $\lambda$  entre colisiones determina cómo difunde el momento; escala inversamente con la presión. A presiones más bajas, los iones viajan más lejos por colisión, y la eficiencia de transferencia de momento cambia. Existe una **banda de presión óptima** donde los iones aún pueden colisionar con suficiente frecuencia para empujar el gas pero no tan frecuentemente como para desperdiciar energía calentándolo. Para la atmósfera terrestre, esa banda yace aproximadamente entre unos pocos torr y unos pocos militorr —exactamente el rango encontrado entre 40 y 80 kilómetros de altitud.

El sobre del dirigible se convierte así en el huésped ideal para baldosas electroaerodinámicas operando en su entorno natural. La atmósfera misma es la masa de reacción.

## La Física de la Propulsión Electroaerodinámica

A primera vista, la propulsión electroaerodinámica parece improbable. La idea de que un conjunto silencioso e inmóvil de electrodos pueda generar empuje lo suficientemente fuerte para mover un dirigible parece en desacuerdo con la experiencia cotidiana. La ausencia de masa de reacción visible o maquinaria móvil desafía la intuición. Sin embargo, cada ion que deriva en un campo eléctrico lleva momento, y el momento se conserva. El campo actúa como una palanca invisible, y el aire como su fluido de trabajo.

Los fundamentos de este fenómeno descansan no en física de plasma exótica sino en las **ecuaciones de Maxwell** y su expresión mecánica, el **tensor de estrés de Maxwell**. Esta formulación tensorial deja claro que los campos eléctricos no son solo patrones de potencial —almacenan y transmiten estrés mecánico en el medio circundante.

### Estrés de Campo y la Fuerza Corporal de Coulomb

El **tensor de estrés de Maxwell** en electrostática es

$$\mathbf{T} = \epsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I})$$

donde  $\epsilon$  es la permitividad,  $\mathbf{E}$  el campo eléctrico, e  $\mathbf{I}$  el tensor identidad. El primer término representa la presión direccional a lo largo de las líneas de campo, y el segundo término la tensión isotrópica que resiste la divergencia del campo.

La **fuerza electromagnética neta** en un cuerpo inmerso en tal campo es la integral superficial de este tensor:

$$\mathbf{F}_{\text{EM}} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Físicamente, esta expresión nos dice que el campo eléctrico ejerce estrés en los límites de cualquier región que contenga carga o gradientes dieléctricos. Pero puede reescribirse en una forma más local y volumétrica usando el teorema de la divergencia:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon.$$

El primer término,  $\rho_e \mathbf{E}$ , es la familiar **fuerza corporal de Coulomb**: una densidad de carga experimentando un campo. El segundo término solo importa donde la permitividad del medio cambia rápidamente, como en límites de material. En el aire,  $\epsilon$  es esencialmente uniforme, por lo que  $\nabla \epsilon \approx 0$ , dejando

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}.$$

Esta ecuación engañosamente simple codifica todo el principio de la propulsión electroaerodinámica. Si existe un volumen de gas en el que los iones (con densidad  $\rho_e$ ) experimentan un campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , entonces una **densidad de fuerza neta** actúa sobre ese gas. La magnitud del empuje total es la integral volumétrica de  $\rho_e \mathbf{E}$  sobre la región de descarga:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} dV.$$

Los electrodos sienten la reacción igual y opuesta, produciendo empuje.

## Transferencia de Momento y el Rol de las Colisiones

Los iones en el aire rara vez viajan lejos antes de colisionar con moléculas neutras. El **camino libre medio**  $\lambda$  es inversamente proporcional a la presión del gas  $p$  y la sección transversal  $\sigma$ :

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

donde  $d$  es el diámetro molecular. A nivel del mar,  $\lambda$  es diminuto —del orden de decenas de nanómetros. En la mesosfera (alrededor de 70 km),  $\lambda$  se extiende a milímetros o centímetros.

Cuando un ion acelera bajo el campo, transfiere momento a neutrales a través de colisiones. Cada colisión comparte una fracción del momento dirigido del ion; el efecto acumulativo es un **flujo neutral masivo** —lo que los experimentadores llaman *viento iónico*. El gas

se mueve del emisor al colector, y los electrodos experimentan un empuje de reacción opuesto.

En aire muy denso, los iones colisionan demasiado a menudo; su velocidad de deriva se satura, y la energía se pierde como calor. En aire extremadamente delgado, las colisiones son demasiado raras; los iones vuelan libremente pero no arrastran efectivamente a los neutrales. Entre estos extremos yace un **punto dulce** donde el camino libre medio permite transferencia de momento eficiente —precisamente la región que el dirigible atraviesa en su camino al espacio.

A presiones de alrededor de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  bar (correspondiente a 40–80 km de altitud), los iones pueden acelerarse sobre distancias macroscópicas antes de colisionar, pero las colisiones aún ocurren con suficiente frecuencia para producir empuje. El **acoplamiento electroaerodinámico** entre campo y gas está en su estado más favorable.

## La Relación Potencia-Empuje

La potencia eléctrica entregada a una descarga es  $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$ , que es aproximadamente  $IV$  para corriente constante  $I$  y voltaje  $V$ . La salida mecánica útil es el empuje veces la velocidad de la masa de aire acelerada, pero en propulsión estacionaria nos interesa principalmente la **relación empuje-potencia**,  $T/P$ .

Estudios empíricos han reportado valores de  $T/P$  que van de unos pocos milinewtons por vatio (**mN/W**) a casi **0.1 N/W** bajo condiciones optimizadas. En aire atmosférico a presión estándar, EAD es ineficiente; pero a presiones reducidas, la movilidad iónica aumenta y la densidad de corriente puede sostenerse a voltajes más bajos, mejorando  $T/P$ .

Un argumento dimensional simple vincula la densidad de fuerza corporal  $f = \rho_e E$  a la densidad de corriente  $J = \rho_e \mu E$ , donde  $\mu$  es la movilidad iónica. Entonces

$$f = \frac{J}{\mu},$$

por lo que para una densidad de corriente dada, una movilidad más alta (lograda a presión más baja) produce más empuje por corriente. La potencia eléctrica total es  $P = JEV$ , por lo que el **empuje-potencia** escala como

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu},$$

implicando que campos eléctricos más bajos o mayor movilidad iónica aumentan la eficiencia. Pero un  $E$  más bajo también reduce la corriente y por tanto el empuje total, por lo que hay de nuevo un régimen óptimo.

Estas relaciones no son curiosidades teóricas —determinan el diseño de cada baldosa EAD. A una altitud dada, el voltaje, la distancia de brecha y la geometría del emisor deben afinarse para que la **curva de Paschen** (que relaciona el voltaje de ruptura con el producto presión-distancia) se satisfaga pero no se exceda.

La ley de Paschen para el aire puede expresarse aproximadamente como

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + 1/\gamma_{se})]}$$

donde  $A$  y  $B$  son constantes empíricas y  $\gamma_{se}$  es el coeficiente de emisión de electrones secundarios. La geometría variable del dirigible permite ajustar  $d$ , la separación de electrodos, dinámicamente para mantener una descarga de corona eficiente sin arco a medida que la presión ambiental cae durante el ascenso.

## Geometría de Campo y Topología de Estrés

Las demostraciones tempranas de “lifters” usaban un alambre delgado como emisor y una lámina plana como colector. Las líneas de campo estaban fuertemente curvadas, y la mayor parte de la energía se iba en mantener la corona en lugar de producir empuje útil. La eficiencia era pobre porque el **campo de estrés de Maxwell** no estaba alineado con la dirección de empuje deseada.

La perspicacia clave —desarrollada en trabajo teórico precedente al ionoplano del MIT— fue tratar el campo eléctrico no como subproducto sino como variable de diseño primaria. El empuje surge del **integral de estrés electromagnético** a lo largo de las líneas de campo, por lo que el objetivo es dar forma a esas líneas para que sean paralelas y consistentes a través de una región amplia. La analogía es aerodinámica: así como el flujo laminar suave minimiza el arrastre, la topología de campo electrostático suave maximiza el estrés dirigido.

Esta “ingeniería de topología de campo” reformula el dispositivo como un *actuador electrostático* en lugar de un juguete de plasma. Controlando la curvatura de electrodos, potenciales guardianes y capas dieléctricas, se puede hacer  $\mathbf{E}$  casi uniforme a través del camino de aceleración, produciendo estrés cuasi-lineal y evitando el autoenfoco destructivo que causa arcos.

La consecuencia es escalabilidad. Cuando los electrodos se teselan en baldosas de metro cuadrado, cada una con su propio convertidor de alto voltaje y lógica de control, todo el sobre del dirigible puede convertirse en un arreglo EAD distribuido gigante. No hay partes móviles que sincronizar, solo campos que coordinar.

## Densidad de Empuje y el Camino a la Escalabilidad

La densidad de fuerza corporal volumétrica es  $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ . La densidad de carga en una descarga de corona típica a presión atmosférica está del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-3} \text{ C/m}^3$ . A presión reducida, puede caer algo, pero el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  puede aumentarse con seguridad a decenas de kilovoltios por centímetro sin ruptura.

Si  $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$  y  $\mathbf{E} = 10^5 \text{ V/m}$ , la densidad de fuerza es  $\mathbf{f} = 10 \text{ N/m}^3$ . Extendida sobre una región activa de 1 m de espesor, eso da una presión superficial de  $10 \text{ N/m}^2$  —equivalente a unos pocos milipascas. Puede sonar pequeño, pero sobre miles de metros cuadrados se vuelve significativo. Una superficie de  $1000 \text{ m}^2$  con estrés de  $10 \text{ N/m}^2$  produce  $10.000 \text{ N}$  de empuje, suficiente para acelerar un vehículo multi-tonelada a niveles de milig, precisamente el régimen requerido para elevar la órbita durante semanas.



Tales estimaciones ilustran por qué EAD, a pesar de su baja densidad de potencia, se vuelve factible para **estructuras grandes y livianas** en aire delgado. A diferencia de una tobera de cohete, que gana eficiencia solo cuando la densidad de potencia es alta, EAD gana ventaja de área. El sobre del dirigible proporciona área abundante; convertirlo en una superficie activa es una coincidencia natural.

## La Zona Dulce de la Atmósfera Superior

Todo sistema físico tiene un nicho operativo. Para la propulsión EAD, el mejor régimen es donde la presión del gas es lo suficientemente baja para permitir altos voltajes y largos caminos libres medios iónicos, pero no tan baja que el plasma se vuelva sin colisiones.

Por debajo de unos 20 km, la atmósfera es demasiado densa: movilidad iónica baja, voltajes de ruptura altos, y energía desperdiciada calentando el gas. Por encima de unos 100 km, el aire se vuelve demasiado rarefacto: la ionización no puede mantenerse continuamente, y la masa de reacción neutral desaparece. Entre unos 40 y 80 km yace una **banda transicional** —la mesosfera inferior—, donde la propulsión EAD puede producir sus mejores relaciones empuje-potencia.

Convenientemente, este es también el rango de altitud donde la potencia solar permanece casi sin atenuar y el arrastre aerodinámico es órdenes de magnitud menor que a nivel del mar. Es una ventana estrecha pero indulgente, un corredor natural para un nuevo tipo de vehículo: ni avión ni cohete, sino algo que vive en la superposición entre ellos.

## Eficiencia y Flujo de Energía

En cualquier instante, la potencia eléctrica de entrada  $P$  se divide entre:

1. **Potencia de empuje mecánico útil**  $P_T = T v_{\text{eff}}$ , donde  $v_{\text{eff}}$  es la velocidad de escape efectiva del flujo de aire.
2. **Pérdidas de ionización**  $P_i$ , la energía requerida para sostener el plasma.
3. **Pérdidas resistivas**  $P_r$ , debidas a calentamiento óhmico y fugas.
4. **Pérdidas radiativas**  $P_\gamma$ , emitidas como luz (el familiar resplandor de corona).

La eficiencia general es  $\eta = P_T/P$ . Los experimentos sugieren que  $\eta$  puede alcanzar unos pocos por ciento en aire denso y potencialmente decenas de por ciento en operación de baja presión optimizada. Aunque modesta, estos números son adecuados para un sistema alimentado por solar operando sobre duraciones largas, donde la eficiencia puede intercambiarse por tiempo.

A diferencia de la propulsión química, que debe alcanzar alta eficiencia por segundo para minimizar combustible, un dirigible EAD solar puede permitirse ineficiencia si puede **operar indefinidamente**. La métrica de éxito no es el impulso específico sino la **paciencia específica**: julios acumulados sobre días.

## Del Estrés de Maxwell al Empuje Macroscópico

Para ilustrar la conexión entre teoría de campos y experiencia cotidiana, considera el capacitor de placas paralelas en vacío. La presión entre las placas es  $p = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ . Si  $E = 10^6 \text{ V/m}$ , entonces  $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$ . Multiplica por área, y obtienes la fuerza mecánica requerida para separar las placas. El estrés electrostático es literalmente presión mecánica.

La propulsión EAD reemplaza una placa con la atmósfera misma. Los iones son el medio a través del cual se transmite el estrés del campo. En lugar de presión estática, obtenemos flujo direccional. La ecuación  $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$  es el análogo dinámico de esa presión estática del capacitor.

Cuando se suma sobre la superficie del dirigible, el estrés integrado se convierte en un vector de empuje neto, justo como la presión integrada sobre la superficie de un ala produce sustentación. La analogía es profunda: la sustentación aerodinámica es el flujo de momento del aire desviado por una superficie; el empuje EAD es el flujo de momento de iones acelerados por un campo.

## El Ionoplano del MIT y Prueba Experimental

Por décadas, los escépticos descartaron EAD como curiosidad de laboratorio. Entonces, en 2018, una pequeña aeronave de ala fija construida por el MIT demostró **vuelo estacionario sin hélice** impulsado únicamente por propulsión electroaerodinámica. El “ionoplano” pesaba alrededor de 2.5 kilogramos y voló decenas de metros bajo potencia de batería. Su relación empuje-peso era pequeña, pero el logro histórico: el primer vehículo más pesado que el aire sostenido en vuelo por propulsión iónica.

Crucialmente, la teoría y el trabajo conceptual que llevaron a esa demostración ya se desarrollaban independientemente. El marco teórico presentado en *Propulsión Electroaerodinámica* (ver [https://farid.ps/articles/electroaerodynamic\\_propulsion/en.html](https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html)) describió el mismo mecanismo en términos de **estrés de Maxwell** y **fuerza corporal de Coulomb** años antes, enfatizando topología de campo y escalabilidad en lugar de química de corona.

El ionoplano del MIT probó la practicidad del efecto en aire denso. El proyecto Rise-Fly-Orbit busca extenderlo a aire delgado, donde la física se vuelve aún más favorable. Si un pequeño avión puede volar a 1 bar, un dirigible solar puede volar a la órbita a microbares, dada suficiente paciencia y luz solar.

## La Virtud de la Simplicidad

La propulsión EAD es conceptualmente elegante: sin partes móviles, sin combustión, sin escape de alta velocidad, sin criogenia. Sus componentes son robustos por naturaleza — electrodos, dieléctricos, convertidores de potencia y pieles fotovoltaicas. El sistema escala naturalmente con área, no con masa.

El desafío técnico se desplaza de termodinámica a **ingeniería eléctrica y ciencia de materiales**: prevenir erosión de corona, gestionar fugas de carga y mantener aislamiento de

alto voltaje en presiones variables. Estos son solucionables con materiales y microelectrónica modernos.

Porque el mecanismo EAD depende solo de geometría de campo y movilidad iónica, es **inherentemente modular**. Cada metro cuadrado de la piel del dirigible puede tratarse como una baldosa con  $T/P$  y características de voltaje conocidas. El empuje total del vehículo es la suma vectorial de miles de baldosas independientes. Esta modularidad permite degradación elegante —falla de unas pocas módulos no compromete toda la aeronave.

## El Dirigible Electroaerodinámico como Sistema

Cuando acoplado a energía solar, la propulsión EAD se convierte no solo en una fuente de empuje sino en un **sistema climático** para el vehículo. Los mismos campos que generan empuje también ionizan gases traza, reducen carga superficial y potencialmente influyen en propiedades de capa límite. El campo eléctrico puede incluso servir como “vela electrostática” ajustable, interactuando débilmente con el campo magnético terrestre o el plasma ambiental en la atmósfera superior.

A largo plazo, se puede imaginar control activo de arrastre manipulando distribuciones de carga superficial —un **escudo de arrastre electrodinámico** que varía estrés de campo local para recortar el camino de vuelo sin superficies de control mecánicas.

Estas posibilidades elevan la propulsión EAD más allá de una curiosidad al reino de una tecnología de control de vuelo de estado sólido de propósito general —aplicable dondequiera que gases o plasmas puedan polarizarse y acelerarse por campos eléctricos.

## Arquitectura de Ingeniería y Dinámica de Vuelo

La ventaja fundamental del concepto Rise-Fly-Orbit yace no en materiales exóticos o física revolucionaria, sino en el **reordenamiento de principios familiares**. Flotación, energía solar y electrostática están todos bien entendidos. Lo nuevo es la manera en que se secuencia en un continuo único: *un ascenso sin momento de discontinuidad*.

Los cohetes pasan por regímenes distintos —lanzamiento, agotamiento, costa, órbita. El dirigible electroaerodinámico, en contraste, experimenta solo transiciones graduales. Ascende por ligereza, vuela por sustentación y orbita por inercia. Cada etapa se funde en la siguiente, gobernada por el mismo interplay estable de fuerzas de flotación, aerodinámicas y electrostáticas.

## El Sobre: Estructura como Atmósfera

El sobre del dirigible debe satisfacer demandas contradictorias: debe ser **ligero y fuerte, conductivo e aislante, transparente a la luz solar pero resistente a la radiación**. Estas son reconciliables a través de construcción en capas.

La capa exterior puede ser un **polímero metalizado** —por ejemplo, una película delgada de Kapton aluminizado o tereftalato de polietileno. Esta capa proporciona blindaje UV y

sirve como superficie de electrodo parcial para las baldosas EAD. Debajo yace una **capa dieléctrica** que previene descargas no deseadas y define la brecha al electrodo colector interior. La estructura interior es una red de membranas tensadas y largueros que mantienen la geometría general a una sobrepresión interna pequeña, del orden de  $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$  —solo unos pocos milésimos de presión atmosférica.

Esa sobrepresión es suficiente para mantener el sobre tenso pero no suficiente para causar masa estructural significativa. En efecto, todo el vehículo es un capacitor enorme y liviano, su piel cargada y viva con líneas de campo.

El volumen interno está lleno de gas de sustentación —hidrógeno o helio. Porque la sobrepresión requerida es pequeña, las demandas de carga en el material son modestas. El principal desafío es la permeabilidad al gas y degradación UV sobre misiones largas, ambos abordables con recubrimientos y películas en capas modernas.

## Hidrógeno o Helio

La elección de gas moldea la personalidad del vehículo.

El **hidrógeno** ofrece la mayor sustentación, proporcionando aproximadamente un 10% más de flotación que el helio. Esa diferencia se vuelve sustancial cuando el volumen total alcanza millones de metros cúbicos. El hidrógeno también es más fácil de obtener e incluso puede generarse in situ por electrólisis solar de agua. Su desventaja, por supuesto, es la inflamabilidad.

La presencia de electrostática de alto voltaje hace que el manejo de hidrógeno no sea trivial. La seguridad depende de compartimentación meticulosa, blindaje electrostático y ventilación. Los módulos EAD mismos están sellados y separados de las celdas de gas por barreras dieléctricas, y las diferencias de potencial a través del casco se minimizan por distribución de carga simétrica.

El **helio**, en contraste, es inerte y seguro pero proporciona menos sustentación y mayor costo. Su principal desventaja es la escasez; el uso a gran escala podría tensionar el suministro. Para vehículos de prueba tempranos y vuelos de demostración pública, el helio es la elección prudente. Para intentos orbitales operativos en corredores remotos, el hidrógeno puede justificarse por rendimiento y costo.

De cualquier manera, el diseño del sobre es en gran medida compatible; solo los sistemas de manejo de gas y seguridad difieren.

## Energía Solar y Manejo de Energía

El Sol es el motor del vehículo. Cada vatio de energía eléctrica comienza como luz solar absorbida por la piel fotovoltaica.

Fotovoltaicos de alta eficiencia y ultraligeros —compuestos de película delgada de arseniuro de galio o perovskita laminados sobre la superficie del dirigible— pueden lograr potencias específicas acercándose a **300–400 W/kg**. Los arreglos se disponen conforme-

mente para mantener suavidad aerodinámica. El manejo de potencia es distribuido: cada sección de panel alimenta un rastreador de punto de potencia máxima local (MPPT) que regula el voltaje al bus de alto voltaje que suministra las baldosas EAD.

Porque el vehículo experimenta ciclos día-noche, lleva un **buffer de energía modesto** —baterías livianas o supercapacitores— para sostener operaciones de bajo nivel durante la oscuridad. Pero estos no son grandes; la filosofía de diseño del sistema es **impulso solar directo**, no energía almacenada. A altitudes orbitales, el vehículo puede perseguir la luz solar casi continuamente, sumergiéndose en eclipse solo brevemente.

El control térmico se maneja radiativamente. Con convección negligible a gran altitud, el rechazo de calor depende de **superficies de alta emisividad** y caminos de conducción a radiadores. Afortunadamente, el proceso EAD es relativamente fresco —no hay combustión— y la carga térmica principal es de luz solar absorbida.

## Las Baldosas Electroaerodinámicas

Cada metro cuadrado del sobre funciona como una **baldosa EAD** —una celda de propulsión autocontenida que comprende un emisor, un colector y un pequeño circuito de control. El emisor puede ser una malla fina de puntas o alambres afilados a alto potencial positivo, mientras que el colector es una malla amplia mantenida cerca de tierra o a potencial negativo. El espacio entre es una región de descarga controlada.

Cuando energizada, la baldosa establece un campo eléctrico  $E$ , genera una densidad de carga  $\rho_e$ , y produce un empuje local  $f = \rho_e E$  dirigido tangencialmente a lo largo de la superficie. Modulando los voltajes en diferentes baldosas, el dirigible puede dirigir, inclinar y rodar sin partes móviles.

La geometría adaptativa es clave. A medida que la presión ambiental cae con la altitud, el camino libre medio aumenta. Para mantener descarga eficiente, la distancia de brecha efectiva  $d$  entre emisor y colector debe aumentar aproximadamente en proporción a  $1/p$ . Esto puede lograrse con **separadores dieléctricos flexibles e inflables** que se expanden ligeramente a medida que cae la presión externa, o con **modulación electrónica** de gradientes de potencial para emular brechas más grandes.

Cada baldosa reporta telemetría —corriente, voltaje, contadores de arco— a un controlador central. Si una baldosa experimenta arco o degradación, se apaga y se salta. El diseño modular significa que la pérdida de baldosas individuales apenas afecta el empuje total.

## De Flotación a Empuje

El vuelo comienza suavemente. Al lanzamiento, el dirigible asciende por flotación a la estratósfera. Durante el ascenso, el sistema EAD opera en modo de baja potencia, proporcionando empuje menor para estabilización y control de deriva.

A alrededor de 30–40 km de altitud, donde el aire es delgado pero aún colisional, comienza la aceleración principal. El dirigible gira gradualmente a vuelo horizontal, orientando su eje largo en la dirección de movimiento orbital pretendida.

Inicialmente, el empuje se equilibra entre aceleración horizontal y aumento de sustentación. La flotación residual del vehículo compensa gran parte de su peso; el empuje EAD proporciona componentes hacia adelante y ligeramente hacia arriba. A medida que aumenta la velocidad, crece la sustentación dinámica y la flotación se vuelve negligible. La transición es suave —no hay “momento de despegue” porque el dirigible nunca estuvo sentado en una pista.

## El Ascenso de Tres Semanas

Considera una masa de vehículo representativa de  $m = 2000 \text{ kg}$ . Para lograr velocidad orbital de  $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$  en  $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$  (tres semanas), el empuje medio requerido es

$$T = m \frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 8.7 \text{ N}.$$

Ocho newtons —el peso de una naranja pequeña— es el empuje total necesario para alcanzar la órbita si se aplica continuamente durante tres semanas.

Si el  $T/P$  del sistema es  $0.03 \text{ N/W}$ , típico de operación EAD eficiente a baja presión, entonces producir 8.7 N requiere solo alrededor de **290 W** de potencia. Parece asombrosamente pequeño, y en práctica, pérdidas adicionales de arrastre elevarán el requisito a decenas de kilovatios. Pero paneles solares cubriendo unos cientos de metros cuadrados pueden proveerlo fácilmente.

Incluyamos un factor de seguridad de 100 para ineficiencias y arrastre: alrededor de **30 kW** de potencia eléctrica. Con 15% de eficiencia general de luz solar a empuje, el vehículo debe cosechar alrededor de **200 kW de potencia solar**. Eso corresponde a alrededor de 700 metros cuadrados de área solar activa a  $300 \text{ W/m}^2$  de salida —un área más pequeña que un campo de fútbol, fácilmente integrada en un dirigible de 100 metros de longitud.

Esta aritmética simple demuestra que el **flujo de energía es plausible**. Lo que los cohetes logran por densidad de potencia, el dirigible lo logra por paciencia y área.

## Arrastre y el Corredor de Gran Altitud

El arrastre permanece como el principal sumidero de energía. La fuerza de arrastre es  $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$ , y la potencia correspondiente  $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$ .

A 50 km,  $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ . Si  $A = 100 \text{ m}^2$ ,  $C_D = 0.05$ , y  $v = 1000 \text{ m/s}$ , entonces

$$P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^6 \text{ W}.$$

Eso son 2.5 megavatios —demasiado alto. Pero a 70 km, donde  $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ , la misma configuración produce solo 25 kW de potencia de arrastre. De ahí la estrategia: **trepa mientras aceleras**, quedando en una trayectoria donde  $\rho v^3$  permanece aproximadamente constante.

El corredor óptimo es uno de aire que se adelgaza constantemente, quizás 40–80 km de altitud, donde la atmósfera proporciona justo densidad neutral suficiente para que EAD funcione pero lo suficientemente poco para mantener el arrastre manejable.

## Control de Vehículo y Estabilidad

Sin hélices o aletas, la estabilidad viene de simetría de campo. Activación diferencial de baldosas proporciona torque. Si las baldosas frontales a la izquierda producen ligeramente más empuje que las de la derecha, la aeronave cabecea suavemente. El control de cabeceo se logra sesgando baldosas superior e inferior. Porque el empuje por baldosa es pequeño, la respuesta es lenta, pero la aeronave opera en un régimen donde la agilidad es innecesaria.

Sensores de actitud —giroscopios, acelerómetros, rastreadores de estrellas— alimentan un sistema de control digital que mantiene orientación para máxima incidencia solar y camino de vuelo correcto. El vasto tamaño del vehículo y el régimen de vuelo lento lo hacen notablemente estable.

## Seguridad Térmica y Eléctrica

La operación EAD involucra decenas a cientos de kilovoltios a corriente baja. En el aire delgado y seco de la estratósfera, el aislamiento se comporta diferente: los arcos pueden propagarse largas distancias sobre superficies. El diseño eléctrico del dirigible trata así toda la estructura como un sistema de potencial controlado. Caminos conductivos son redundantes, con capas de aislamiento separando celdas de gas de líneas HV.

Los arcos no son catastróficos —tienden a ser locales y autoapagados— pero pueden dañar electrodos. Cada baldosa monitorea su forma de onda de corriente; si una descarga pica, el controlador reduce voltaje o apaga el módulo afectado por varios segundos.

Termalmente, la ausencia de convección significa que cualquier calentamiento local debe distribuirse por conducción a paneles radiativos. Los materiales se eligen por alta emisividad y baja absorción en infrarrojo, permitiendo que el exceso de calor se radie al espacio.

## Escalabilidad y Modularidad

El sistema escala por teselado, no por aumentar voltaje. Duplicar el número de baldosas duplica el empuje; no hay necesidad de descargas más grandes. Esto hace la arquitectura **escalable linealmente** de modelos de laboratorio a vehículos orbitales.

Un prototipo práctico podría comenzar como una plataforma pequeña llena de helio con una docena de metros cuadrados de superficie EAD, generando empujes de milinewtons medidos sobre horas. Demostradores más grandes podrían seguir, cada uno expandiéndose en área y potencia. La versión orbital final puede abarcar cientos de metros, con miles de baldosas controladas independientemente, operando bajo potencia solar completa por meses a la vez.

Porque todos los componentes son de estado sólido, el sistema tiene inherentemente larga vida útil. No hay rodamientos de turbina o ciclos de combustión para desgastarse — solo erosión gradual de electrodos y envejecimiento de material. Con diseño cuidadoso, el tiempo medio entre fallos podría alcanzar años.

## Perfiles de Ascenso y Transiciones de Altitud

La misión completa puede visualizarse como una espiral suave en el plano  $(v, \rho)$ : a medida que la velocidad aumenta, la densidad disminuye. El camino se elige para que el producto  $\rho v^3$  —que determina la potencia de arrastre— permanezca por debajo de un umbral que el sistema solar pueda suministrar.

1. **Ascenso por flotación** a 30–40 km.
2. **Fase de aceleración:** mantener aproximadamente  $P_D \approx 20\text{--}50\text{ kW}$  ajustando cabeceo y altitud.
3. **Transición al régimen orbital:** por encima de 70 km, la sustentación y flotación desaparecen, y el dirigible se convierte efectivamente en un satélite aún rozando la atmósfera.

La transición de “vuelo” a “órbita” no es un límite agudo. La atmósfera se desvanece gradualmente; el empuje compensa el arrastre hasta que el arrastre deja de importar. El camino del vehículo se vuelve circular en lugar de balístico, y permanece en el aire indefinidamente.

## Balance de Energía y Resistencia

Integrando sobre el ascenso completo, la entrada de energía total del Sol es vasta comparada con lo necesario. Incluso a una tasa de recolección modesta de 100 kW, tres semanas de operación continua acumulan

$$E = 100,000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11} \text{ J.}$$

Para un vehículo de 2000 kg, eso es **90 MJ/kg** —tres veces el requisito de energía cinética orbital. La mayor parte de esta energía se perderá en arrastre e ineficiencias, pero el margen es generoso.

Esta es la magia silenciosa de la paciencia solar: cuando se permite que el tiempo se extienda, la abundancia de energía reemplaza la escasez de potencia.

## Mantenimiento, Retorno y Reutilización

Después de completar su misión orbital, el dirigible puede desacelerar gradualmente invirtiendo la polaridad de su campo EAD. El arrastre aumenta a medida que desciende; el mismo mecanismo que lo levantó ahora actúa como freno. El vehículo puede reentrar en la estratósfera y flotar hacia abajo bajo flotación residual.

Porque no se descartan etapas desechables, el sistema es **totalmente reutilizable**. El sobre puede ser mantenido, relleno de gas y relanzado. El mantenimiento involucra reem-



plazar baldosas o películas degradadas en lugar de reconstruir motores.

En contraste con cohetes químicos, donde cada lanzamiento consume tanques y propelentes, el dirigible EAD es una **nave espacial de reciclaje de energía**. El Sol lo reposta continuamente; solo el desgaste requiere intervención humana.

## La Significado de Ingeniería Más Amplia

Las mismas tecnologías que habilitan un dirigible EAD solar —fotovoltaicos livianos, electrónica de potencia de alto voltaje, dieléctricos de película delgada— tienen aplicaciones terrestres inmediatas. Plataformas de comunicaciones estratosféricas, sensores de clima de gran altitud y drones de larga duración todos benefician de los mismos desarrollos.

Al perseguir un sistema capaz de alcanzar la órbita sin combustible, también inventamos una nueva clase de **vehículos aéreos de estado sólido** —máquinas que vuelan no por combustión sino por manipulación de campos.

En este sentido, el proyecto Rise–Fly–Orbit se sitúa en una línea que incluye el Wright Flyer y los primeros cohetes de combustible líquido: no una tecnología perfeccionada, sino una **prueba de principio** que transforma lo que “vuelo” puede significar.

## Regulación, Estrategia y la Filosofía del Ascenso Lento

La física de un dirigible electroaerodinámico solar es permisiva; la ley no lo es. Las reglas de vuelo actuales dividen el cielo en dominios delimitados netamente: **espacio aéreo** gobernado por ley de aviación, y **espacio exterior** gobernado por ley espacial. Entre ellos yace una región gris —demasiado alta para certificación de aeronaves, demasiado baja para registro orbital. El dirigible a la órbita vive cuadradamente en ese gris, moviéndose continuamente a través de altitudes que, en papel, pertenecen a ninguna categoría en absoluto.

### Por Qué Es “Imposible”

Las **leyes de espacio aéreo** asumen vehículos que despegan y aterrizan en horas. Requieren motores certificados, superficies de control aerodinámicas y la habilidad de ceder tráfico. Ninguna de esas suposiciones encaja un globo autónomo impulsado por solar que puede demorarse semanas por encima de 60 km.

Las **regulaciones de vehículos de lanzamiento** comienzan donde los cohetes encienden: un encendido discreto, un sitio de lanzamiento y un sistema de terminación de vuelo diseñado para contener explosiones. Nuestro dirigible no tiene ninguno de estos. Asciende tan lentamente como una nube; no hay momento de “lanzamiento.” Sin embargo, porque eventualmente excederá Mach 1 y alcanzará velocidad orbital, cae bajo jurisdicción de vuelo espacial. El resultado es paradójico: no puede volar legalmente como aeronave, pero debe licenciarse como un cohete al que no se parece.

## Una Clase de Vehículo Atmosférico–Orbital Híbrido

El remedio es reconocer una nueva categoría —un **Vehículo Atmosférico-Orbital Híbrido (HAOV)**. Sus rasgos definitorios serían:

- **Cruce de dominio continuo:** ascenso de superficie a espacio cercano sin etapas discretas.
- **Flujo de energía cinética bajo:** intercambio total de momento con la atmósfera muchas órdenes de magnitud por debajo de cohetes.
- **Comportamiento de falla segura pasivo:** en pérdida de potencia, la aeronave deriva y desciende; no cae balísticamente.
- **Seguimiento cooperativo:** siempre visible a radar y sensores satelitales, transmitiendo su vector de estado mucho como transpondedores ADS-B para aeronaves.

El marco HAOV permitiría certificación de tales aeronaves bajo **criterios basados en rendimiento** en lugar de **basados en hardware** —definiendo seguridad en términos de liberación de energía, huella en tierra y capacidad de descenso autónomo en lugar de presencia de motores o combustible.

**Corredores** oceánicos o desérticos podrían designarse donde HAOVs puedan operar continuamente, monitoreados por redes existentes de tráfico espacial. Su ascenso plantearía menos peligro a la aviación que un solo globo meteorológico, pero las reglas actuales no les ofrecen camino.

## La Política de la Paciencia

La regulación sigue a la cultura, y la cultura está adicta a la velocidad. Los hitos aeroespaciales se miden en relaciones empuje-peso y minutos a órbita. La idea de que un vehículo tome **tres semanas** para alcanzar la órbita suena, al primer oído, como regresión. Pero la paciencia es el precio de la sostenibilidad. El dirigible propone una métrica diferente: no “qué tan rápido quemamos energía” sino “qué tan continuamente la acumulamos.”

Para agencias espaciales acostumbradas a ventanas de lanzamiento y conteos regresivos, tal aeronave demanda un cambio en operaciones: planificación de misiones por estaciones en lugar de segundos; inserciones orbitales que dependen de geometría solar, no disponibilidad de plataforma. Sin embargo, este cambio se alinea con el giro más amplio hacia **infraestructura de estado estacionario** —naves espaciales solares-eléctricas, estaciones reutilizables, plataformas climáticas persistentes.

## Valor Estratégico

Un vehículo solar-EAD reutilizable ofrece capacidades que ningún cohete o avión puede igualar:

- **Observación y comunicaciones de gran altitud persistentes:** antes de órbita completa, el dirigible puede flotar meses en la estratósfera superior, relayando datos o imagenando la Tierra.
- **Entrega de carga incremental:** pequeñas cargas útiles pueden elevarse suavemente sin los choques acústicos y térmicos de lanzamiento.

- **Análogos planetarios:** en Marte, donde la velocidad orbital es solo 3.6 km/s y la presión atmosférica favorece aceleración iónica de largo camino, la misma arquitectura podría funcionar incluso mejor.
- **Mayordomía ambiental:** sin escape, sin derrames de propelente, impacto acústico negligible.

Económicamente, los primeros HAOVs operativos no reemplazarían cohetes sino complementarlos, sirviendo nichos donde la paciencia de carga útil supera la urgencia. Estratégicamente, desacoplarían el acceso a espacio cercano de cadenas de suministro de propelente —una característica atractiva para agencias espaciales buscando infraestructura sostenible.

## Ingeniería del Libro de Reglas

Crear una categoría HAOV es menos sobre cabildeo que sobre **medición**. Los reguladores confían en datos. El camino adelante es transparencia experimental:

1. **Demostradores basados en helio** en corredores remotos, instrumentados para registrar trayectoria, uso de energía y comportamiento de falla.
2. **Telemetría continua** compartida con redes de aviación civil y seguimiento espacial para probar dinámicas de vuelo predecibles.
3. **Simulación y modelos de riesgo** mostrando que el flujo de energía cinética peor caso sobre regiones habitadas es negligible.

Una vez que las agencias vean evidencia cuantificada de que un HAOV no puede dañar aeronaves o poblaciones terrestres, la arquitectura legal seguirá —como lo hizo para globos de gran altitud y drones antes que ellos.

## Dimensión Ética

El vuelo lento tiene peso moral. Los lanzadores químicos contaminan no porque los ingenieros sean descuidados sino porque la física no ofrece tiempo para reciclar su calor. Un dirigible solar, en contraste, consume nada irre recuperable. Reemplaza ruido con silencio, flash con resplandor. Su ascenso sería visible desde tierra como un punto brillante y sin prisa, un artefacto humano escalando sin violencia.

En una era de urgencia, tal movimiento deliberado es una declaración: que la ambición tecnológica no necesita ser explosiva para ser profunda.

## La Paciencia de la Luz

Cuando un cohete alcanza la órbita, lo hace por aceleración bruta: segundos de combustión que dejan el cielo temblando. El dirigible electroaerodinámico llega diferente. Cada fotón que golpea su piel contribuye un susurro de momento, mediado por electrones, iones y la matemática tranquila de las ecuaciones de Maxwell. Sobre tres semanas estos susurros se acumulan en órbita.

La misma expresión —  $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$  — que describe un microamperio de deriva iónica en un laboratorio también gobierna un cuerpo sustentador de mil toneladas deslizándose a través de la atmósfera superior. La escala cambia; el principio no. El tensor de Maxwell, la ley de Coulomb y la paciencia de la luz solar son universales.

Si la humanidad aprende a explotar esa paciencia, ganamos una nueva manera de dejar la Tierra —una que puede repetirse indefinidamente, impulsada por la misma estrella que nos sostiene.

## Hacia una Era de Vuelo Reversible

La coherencia química es un gesto de un solo sentido: esfuerzo inmenso para alcanzar la órbita, y fin abrupto al reingreso. El dirigible electroaerodinámico sugiere un **camino reversible**. Puede escalar y descender a voluntad, morando en cualquier lugar de la troposfera a la órbita. Es tanto nave espacial como hábitat, vehículo y estación.

En esa continuidad yace una reversión filosófica: vuelo espacial no como partida sino como extensión de la atmósfera. El gradiente de aire a vacío se convierte en terreno navegable. Tales aeronaves difuminarían la línea entre meteorología y astronáutica, convirtiendo el “borde del espacio” en un espacio de trabajo vivo en lugar de barrera.

## Reflexiones Finales

No se necesita nueva física —solo endurance, precisión y regulación reimaginada. El presupuesto de energía orbital puede pagarse con luz solar; el empuje puede surgir de campos eléctricos actuando sobre iones; el tiempo puede tomarse prestado de la paciencia de los ingenieros.

Los obstáculos son culturales y burocráticos: convencer a las agencias de que algo que parece un globo puede, a través de matemáticas y persistencia, convertirse en satélite. Sin embargo, toda tecnología transformadora comenzó como anomalía en el papeleo.

Cuando el primero de estos vasos electroaerodinámicos solares ascienda, su progreso será casi imperceptible hora a hora. Pero día a día acumulará velocidad, hasta que finalmente se deslice más allá del alcance del clima. No habrá rugido —solo el zumbido tenue y continuo de campos y la acumulación estable de luz solar en movimiento.

Eso marcará el comienzo del **acceso reutilizable, sostenible y gentil a la órbita**: una manera de ascender, volar y —sin encender nunca una cerilla— orbitar.

## Referencias y Lectura Adicional

- **Proyecto Rise Fly Orbit:** <https://riseflyorbit.org/> —visión general del concepto de dirigible solar a órbita y investigación relacionada.
- **Ensayo de Propulsión Electroaerodinámica:** [https://farid.ps/articles/electroaerodynamic\\_propulsion/en.html](https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) —tratamiento teórico en profundidad del empuje electroaerodinámico usando el tensor de estrés de Maxwell y formulación de fuerza corporal de Coulomb.

- Barrett, S. et al., *Nature* (2018). "Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion." —primera demostración de una aeronave de ala fija impulsada por propulsión iónica de estado sólido.
- Paschen, F. (1889). "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz." *Annalen der Physik*, 273(5).
- Sutton & Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 9ª ed. —para contraste en presupuestos de energía y consideraciones de  $\Delta v$ .
- NASA Glenn Research Center, "Solar Electric Propulsion Basics." —fondo en sistemas de empuje eléctrico de alta eficiencia.