

Propulsión Electroaerodinámica - Alimentada por Maxwell y Coulomb

Los conocimientos presentados en este ensayo provienen de docenas de experimentos realizados por el autor entre 2016 y 2018, explorando la propulsión electroaerodinámica con una amplia gama de fuentes de energía (CA y CC), geometrías de electrodos y tipos de emisores de iones. Estas investigaciones culminaron en la construcción del rotor de 80 cm representado a continuación, que alcanzó una velocidad de rotación de 18 rpm utilizando menos de 6 kV y solo alrededor de 100 mW de potencia eléctrica de entrada.

Esta campaña experimental reveló que el rendimiento depende mucho más de la distribución y geometría de los campos electrostáticos que del movimiento del aire o la corriente iónica en sí. Las observaciones sentaron las bases para el replanteamiento teórico de la propulsión electroaerodinámica que sigue a continuación.

Propulsión Electroaerodinámica - El Motor Silencioso

La propulsión electroaerodinámica (EAD) - a menudo llamada empuje electrohidrodinámico (EHD) o "viento iónico" - es una de esas tecnologías raras que parecen ciencia ficción: un dispositivo que se mueve silenciosamente a través del aire sin partes móviles, sin combustión y sin escape visible. El público oyó hablar de ella por primera vez a principios de los 2000 a través de proyectos caseros de "lifters", y nuevamente en 2018 cuando el MIT demostró un "avión iónico" que planeaba a través de un gimnasio.

Sin embargo, la física subyacente tiene una historia más larga e intrincada. Casi un siglo antes, Thomas Townsend Brown y Paul Biefeld observaron que los capacitores de alto voltaje podían generar un empuje pequeño pero persistente. Brown atribuyó el efecto a la "antigravedad". La ciencia moderna, armada con las leyes de Maxwell y Coulomb, reconoce que la verdad es más sutil - y, en muchos sentidos, más profunda.

La propulsión EAD no se trata de soplar aire con iones. Se trata de **esculpir campos eléctricos** para que las **tensiones electrostáticas** resultantes produzcan una fuerza mecánica neta. En este sentido, los dispositivos EAD están alimentados por Maxwell y Coulomb: por la geometría y dinámica del propio campo eléctrico.

El Malentendido del Viento Iónico

Pregunte a la mayoría de los ingenieros sobre la propulsión EHD y escuchará una historia simple: un emisor afilado produce iones mediante descarga corona; estos iones se aceleran hacia un electrodo colector, chocando con moléculas de aire neutras en el camino y transfiriendo momentum a ellas. El gas neutro se mueve - el llamado "viento iónico" - y por la tercera ley de Newton, el dispositivo experimenta un empuje igual y opuesto.

Esta imagen no es incorrecta, pero está incompleta.

En la práctica, los iones llevan una masa insignificante. Sus colisiones con neutros son frecuentes, sí, pero el momentum transferido por colisión es minúsculo. Más importante aún, **no actúa una fuerza mecánica significativa directamente en la punta de la aguja o el colector**. El “viento” es un subproducto, no la fuente, de la propulsión.

El verdadero motor radica en el **campo eléctrico** que acelera esos iones - en la redistribución de la energía electrostática a medida que se forma y fluye la carga espacial.

Presión de Campo y el Tensor de Tensión de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell describen cómo los campos eléctricos almacenan y transfieren momentum a través del **tensor de tensión de Maxwell**:

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{EE} - \frac{1}{2}\mathbf{E}^2\mathbf{I})$$

Integrar este tensor sobre la superficie de cualquier cuerpo produce la **presión electrostática neta** que actúa sobre él. Esta presión - no el movimiento del aire - es lo que impulsa un propulsor EHD hacia adelante.

Cuando ocurre una descarga corona, se forma una nube de iones alrededor del emisor. Estos iones hacen dos cosas críticas:

1. **Apantanllan parcialmente el campo eléctrico del emisor.** La intensidad del campo local disminuye cerca de la punta, pero permanece fuerte en el volumen circundante.
2. **Distorsionan la geometría general del campo.** En un lado del emisor, las líneas de campo terminan en superficies cargadas cercanas o estructuras a tierra. En el otro, se extienden hacia afuera, parcialmente neutralizadas por la carga espacial.

El resultado es un **desequilibrio en la presión electrostática** en el sistema emisor-colector - una fuerza neta. El momentum fluye del campo a los electrodos, no a través de colisiones moleculares.

La Ley de Coulomb en Acción

En el nivel más simple, las fuerzas involucradas se describen por la ley de Coulomb:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Cada elemento de superficie cargada de una estructura EHD atrae o repele cada otra región cargada en su entorno. El empuje total es la suma vectorial de estas innumerables interacciones coulombianas, continuamente remodeladas por los iones en movimiento que modulan el campo.

En una corona en estado estacionario, una capa delgada de iones positivos se sitúa entre un emisor de alto voltaje y un colector relativamente negativo (o el entorno circundante). Esos iones sirven como **mediadores**: apantanllan parcialmente la atracción entre emisor y colector, y al moverse, restablecen continuamente la asimetría del campo. La entrada eléctrica constante mantiene ese desequilibrio, convirtiendo la energía potencial electrostática en fuerza mecánica.

Lecciones de la NASA y los Límites del Paradigma del Viento Iónico

A principios de los 2000, la NASA y sus contratistas revisaron dispositivos de tipo Biefeld-Brown bajo los estudios Gravitec y Talley AIAA. Utilizando capacitores asimétricos de alto voltaje en entornos atmosféricos y de vacío, los experimentos pretendían probar si el efecto persistía en ausencia de aire.

Los resultados fueron inequívocos - y reveladores sin pretenderlo.

En modo atmosférico, los rotores alcanzaron rotaciones apenas medibles (1-2 rpm) y empuje en el rango de $10-100 \mu\text{N}$ - órdenes de magnitud por debajo de lo esperado si los dispositivos realmente aprovechaban un efecto gravitacional. El movimiento era completamente atribuible a la descarga corona convencional y al débil viento iónico.

En vacío, a presiones de hasta 10^{-6} Torr, el movimiento cesó por completo. Cualquier señal transitoria se rastreó hasta el desgasificación o carga superficial residual. Sin moléculas de aire para sostener la ionización, el campo electrostático se volvió simétrico, y la fuerza desapareció.

Los investigadores concluyeron que el empuje escalaba aproximadamente linealmente con la densidad del aire - un hallazgo a menudo citado para "desmentir" la propulsión EHD como una imposibilidad en vacío. Pero lo que realmente demostró fue algo más profundo: **sin un medio para transportar la carga espacial, el campo eléctrico pierde la asimetría que produce gradientes de presión electrostática.**

En otras palabras, esas pruebas tempranas confirmaron accidentalmente la **interpretación del tensor de tensión de Maxwell** de la propulsión electroaerodinámica. No era la gravedad en acción, ni mero arrastre iónico - era la presencia de un **desequilibrio de campo mediado por carga** lo que importaba.

Los dispositivos Gravitec, construidos para simplicidad y simetría, carecían de cualquier *reservorio de carga* significativo o *dieléctrico formador de campo*. Sus geometrías abiertas difundían las líneas de campo en el entorno, desperdiciando la mayor parte de la energía electrostática.

Por el contrario, el rotor EPS-aluminio descrito aquí concentraba la carga a lo largo de una piel conductora bien definida, permitiendo que la región de carga espacial *esculpiera el campo local*. El resultado: empuje utilizable con menos de 6 kV y aproximadamente 100 mW - un rendimiento casi dos órdenes de magnitud mejor en eficiencia energética.

Estos hallazgos hacen eco de un tema consistente: **la eficiencia electroaerodinámica surge no del voltaje o el flujo de aire, sino del control de la topología de carga y la geometría de campo.**

El Efecto del Reservorio de Carga

Una lámina ligera sobre un núcleo rígido e aislante se comporta como más que solo un conductor - forma un **reservorio de carga de gran área** que amplifica la asimetría del campo eléctrico. En el diseño actual, el poliestireno expandido (EPS) sirve puramente como **soporte estructural ligero**, con toda su superficie envuelta en lámina de aluminio que está **eléctricamente continua con la fuente de alto voltaje**. El EPS añade una función eléctrica insignificante; su valor radica en permitir una gran superficie conductora con masa mínima.

Esta piel conductora extensa almacena carga directamente de la fuente de energía, permitiendo que la descarga corona opere contra un **campo electrostático precargado** en lugar de construir uno desde cero en cada ciclo. El alto área superficial de la lámina aumenta drásticamente la capacitancia efectiva - del orden de $10-100 \text{ pF cm}^{-2}$, dependiendo de la textura superficial y la curvatura - y convierte un voltaje aplicado modesto en un gradiente de campo eléctrico local mucho más fuerte.

Cuando se enciende la corona, la lámina actúa como una referencia de potencial estabilizadora. Los iones emitidos modulan ligeramente el campo local pero no lo dominan; en cambio, la carga superficial almacenada mantiene una asimetría constante que produce empuje continuo con muy baja potencia.

Desde la perspectiva del tensor de tensión de Maxwell, la fuerza es proporcional a la integral de la intensidad del campo y su gradiente:

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

y la lámina grande y bien cargada maximiza ambos términos sin requerir voltaje más alto o corriente más alta. Esto explica por qué un rotor de baja potencia y bajo voltaje pudo lograr una rotación significativa: sustituyó **energía electrostática almacenada** por las pérdidas de corriente iónica pesada de las geometrías "viento iónico" convencionales - una forma práctica de *eficiencia electrostática*.

La Geometría de la Eficiencia

La eficiencia de un propulsor EHD no se determina por la velocidad del flujo de aire, sino por **qué tan efectivamente se da forma al campo eléctrico**. Los parámetros clave incluyen:

- **Asimetría de Campo:** El componente direccional neto del gradiente de presión electrostática.

- **Distribución de Densidad de Carga:** Cómo la nube de iones modifica ese campo mediante apantallamiento parcial.
- **Acoplamiento Capacitivo:** La carga total almacenada en superficies enfrentadas por volt aplicado.
- **Canales de Pérdida:** Pérdidas por corona, recombinación y fugas dieléctricas.

Los diseños que confinan y dan forma al campo - por ejemplo, colocando una superficie de carga opuesta amplia cerca del emisor - pueden lograr mejoras de órdenes de magnitud en el empuje por vatio. El campo eléctrico realiza el trabajo; los iones meramente permiten que el campo permanezca asimétrico y dinámico.

Revisando Biefeld-Brown

Las observaciones tempranas de Brown sobre el empuje de capacitores asimétricos preceden a nuestra comprensión moderna de la física de plasmas. Sin el marco del tensor de tensión de Maxwell o la dinámica de carga espacial, era natural pensar que el efecto podría involucrar gravedad. El hecho de que los propulsores EHD produzcan fuerza "contra" el vector de campo (y a veces verticalmente hacia arriba) solo profundizó el misterio.

Visto a través de la lente actual, la "antigravedad" de Brown era simplemente presión electrostática hecha visible. La similitud en la forma matemática - tanto las energías potenciales gravitacionales como electrostáticas caen como $1/r^2$ - hizo la confusión históricamente comprensible, pero la física es enteramente electromagnética.

Perspectivas y Contexto Moderno

Ánalisis recientes y discusiones entre pares refuerzan este replanteamiento de la propulsión electroaerodinámica como un **fenómeno de gradiente de campo** en lugar de un motor de viento iónico. En configuraciones clásicas de lifter, corrientes de corona del orden de miliamperios a decenas de kilovoltios producen densidades de empuje en el rango de micro- a mili-newtons por vatio - un reflejo de cuán poca de la energía del campo eléctrico termina como tensión mecánica dirigida. Por el contrario, el rotor envuelto en lámina EPS convierte la misma ley física en un proceso *impulsado por carga*: la amplia superficie conductora sostiene un fuerte gradiente E con corriente mínima, intercambiando pérdidas por deriva por energía de campo almacenada.

Esta distinción hace eco de un cambio más amplio en la investigación contemporánea. **Actuadores de descarga de barrera dieléctrica** en control aerodinámico también derivan su fuerza superficial del tensor de tensión de Maxwell en lugar de flujo de aire en volumen, logrando eficiencias de $10-100 \text{ N kW}^{-1}$ cuando la geometría del electrodo se ajusta para asimetría. **Geometrías de electrodo flotante y confinamiento** en estudio en ONERA y dentro de programas EHD de la UE muestran aumentos de dos a cinco veces en el empuje al dar forma a la capa de iones - precisamente la lógica de diseño del rotor de reservorio de carga. Y en **entornos de aire delgado**, como la estratosfera superior o la atmósfera marciana, donde el arrastre iónico se debilita pero la tensión electrostática perma-

nece, las superficies ricas en carga pueden sostener la propulsión mucho después de que fallen los diseños convencionales.

La física se alinea perfectamente con el marco de momentum de Poynting del electromagnetismo clásico: el empuje corresponde al gradiente de la densidad de energía de campo,

$$\mathbf{F} \approx \epsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}), dV$$

lo que significa que el sistema extrae momentum directamente del campo electromagnético. Los iones son catalizadores que mantienen el desequilibrio, no la masa de reacción en sí. Esto explica por qué, en experimentos de vacío donde el campo se vuelve simétrico, el empuje desaparece - el término $\nabla \mathbf{E}$ colapsa. Por el contrario, en el rotor de reservorio de lámina, la piel capacitiva mantiene \mathbf{E} empinado y direccional, produciendo aproximadamente **0.1-1 mN** de empuje equivalente a torque con solo **100 mW** de potencia de entrada - 10-100 veces la eficiencia de dispositivos de arrastre iónico.

Parámetro	Diseño Convencional de Viento Iónico	Rotor de Reservorio de Lámina de Carga	Implicación
Voltaje	20-50 kV	< 6 kV	Menor riesgo de ruptura, escalado más fácil
Potencia	1-10 W	≈ 0.1 W	10-100× mayor empuje / W
Mecanismo de Empuje	Colisiones ion-neutro	Gradiente de campo (tensión de Maxwell)	Granmente independiente de densidad de aire
Factor Clave	Separación emisor-colector	Reservorio capacitivo de lámina	Carga almacenada > corriente transitoria
Eficiencia (N kW⁻¹)	0.01-0.1	1-10 (inferida)	Factible para micro-UAVs

Tales comparaciones destacan un pivote conceptual: **de propulsión impulsada por corriente a impulsada por carga**, de mover materia a dar forma a campos. La frontera siguiente es lo que podría llamarse *arquitectura electrostática* - utilizando optimización computacional y materiales avanzados (emisores de nanotubos de carbono, láminas patronadas, dieléctricos metamateriales) para maximizar $\int \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}$. Modos de CC pulsada híbridos podrían explotar aún más el almacenamiento de carga transitorio mientras reducen subproductos químicos.

Conclusión - Alimentada por Maxwell y Coulomb

La propulsión electroaerodinámica no es una curiosidad exótica o anomalía pseudocientífica. Es una manifestación directa de las leyes de Maxwell y Coulomb - una máquina macroscópica que convierte la energía potencial electrostática en movimiento a través de asimetría de campo controlada.

Donde los inventores tempranos vieron “antigravedad” y los proyectos modernos ven “viento iónico”, la verdadera historia es más simple y profunda: **los campos eléctricos poseen tensión**. Dale forma a esa tensión, y puedes impulsarte a través del aire sin partes móviles, sin combustible y sin sonido.

Esa es la genialidad silenciosa de la propulsión electroaerodinámica - verdaderamente, **alimentada por Maxwell y Coulomb**.

Referencias

1. Talley, C. et al. *Evaluation of the Biefeld–Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Electrokinetic Apparatus*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *EHD Flow Control and Plasma Actuators*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: *Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control*. Internal Reports 2018–2023.