

Propulsão Eletroaerodinâmica - Alimentada por Maxwell e Coulomb

As percepções apresentadas neste ensaio derivam de dezenas de experimentos realizados pelo autor entre 2016 e 2018, explorando a propulsão eletroaerodinâmica com uma ampla gama de fontes de energia (AC e DC), geometrias de eletrodos e tipos de emissores de íons. Essas investigações culminaram na construção do rotor de 80 cm mostrado abaixo, que alcançou uma velocidade de rotação de 18 rpm usando menos de 6 kV e apenas cerca de 100 mW de potência elétrica de entrada.

Essa campanha experimental revelou que o desempenho depende muito mais da distribuição e geometria dos campos eletrostáticos do que do movimento do ar ou da corrente iônica em si. Essas observações estabeleceram a base para a reformulação teórica da propulsão eletroaerodinâmica que se segue.

Propulsão Eletroaerodinâmica - O Motor Silencioso

A propulsão eletroaerodinâmica (EAD) - frequentemente chamada de empuxo eletrohidrodinâmico (EHD) ou “vento iônico” - é uma daquelas tecnologias raras que parecem ficção científica: um dispositivo que se move silenciosamente pelo ar sem partes móveis, sem combustão e sem escapamento visível. O público ouviu falar dela pela primeira vez no início dos anos 2000 por meio de projetos de “lifters” em quintais, e novamente em 2018 quando o MIT demonstrou um “avião iônico” deslizando por uma ginásio.

No entanto, a física subjacente tem uma história mais longa e intrincada. Quase um século antes, Thomas Townsend Brown e Paul Biefeld observaram que capacitores de alta tensão podiam gerar um pequeno empuxo persistente. Brown atribuiu o efeito à “antigravidade”. A ciência moderna, armada com as leis de Maxwell e Coulomb, reconhece que a verdade é mais sutil - e, de muitas maneiras, mais profunda.

A propulsão EAD não se trata de soprar ar com íons. Trata-se de **esculpir campos elétricos** de modo que as **tensões eletrostáticas** resultantes produzam uma força mecânica líquida. Nesse sentido, os dispositivos EAD são alimentados por Maxwell e Coulomb: pela geometria e dinâmica do próprio campo elétrico.

A Ilusão do Vento Iônico

Pergunte à maioria dos engenheiros sobre propulsão EHD e você ouvirá uma história simples: um emissor afiado produz íons por descarga de corona; esses íons aceleram em direção a um eletrodo coletor, colidindo com moléculas de ar neutras no caminho e transferindo impulso para elas. O gás neutro se move - o chamado “vento iônico” - e, pela terceira lei de Newton, o dispositivo experimenta um empuxo igual e oposto.

Essa imagem não está errada, mas está incompleta.

Na prática, os íons carregam massa insignificante. Suas colisões com neutros são frequentes, sim, mas o impulso transferido por colisão é mínimo. Mais importante, **nenhuma força mecânica significativa atua diretamente na ponta da agulha ou no coletor**. O “vento” é um subproduto, não a fonte, da propulsão.

O verdadeiro motor reside no **campo elétrico** que acelera esses íons - na redistribuição da energia eletrostática à medida que a carga espacial se forma e flui.

Pressão de Campo e Tensão de Maxwell

As equações de Maxwell descrevem como os campos elétricos armazenam e transferem impulso através do **tensor de tensão de Maxwell**:

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

A integração desse tensor sobre a superfície de qualquer corpo produz a **pressão eletrostática líquida** que atua sobre ele. Essa pressão - não o movimento do ar - é o que impulsiona um propulsor EHD para frente.

Quando ocorre uma descarga de corona, forma-se uma nuvem de íons ao redor do emissor. Esses íons fazem duas coisas críticas:

1. **Eles blindam parcialmente o campo elétrico do emissor.** A intensidade do campo local diminui perto da ponta, mas permanece forte no volume circundante.
2. **Eles distorcem a geometria geral do campo.** De um lado do emissor, as linhas de campo terminam em superfícies carregadas próximas ou estruturas aterradas. Do outro, elas se estendem para fora, parcialmente neutralizadas pela carga espacial.

O resultado é um **desequilíbrio na pressão eletrostática** no sistema emissor-coletor - uma força líquida. O impulso flui do campo para os eletrodos, não através de colisões moleculares.

A Lei de Coulomb em Ação

No nível mais simples, as forças envolvidas são descritas pela lei de Coulomb:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r}$$

Cada elemento de superfície carregada de uma estrutura EHD atrai ou repele cada outra região carregada em seu ambiente. O empuxo total é a soma vetorial dessas inúmeras interações coulombianas, continuamente remodeladas pelos íons em movimento que modulam o campo.

Em um estado estacionário de corona, uma fina camada de íons positivos fica entre um emissor de alta tensão e um coletor relativamente negativo (ou o ambiente circundante). Esses íons servem como **mediadores**: eles blindam parcialmente a atração entre o emissor e o coletor, e ao se moverem, reiniciam continuamente a assimetria do campo. A entrada elétrica constante mantém esse desequilíbrio, convertendo energia potencial eletrostática em força mecânica.

Lições da NASA e os Limites do Paradigma do Vento Iônico

No início dos anos 2000, a NASA e seus contratados revisitaram dispositivos do tipo Biefeld-Brown sob os estudos Gravitec e Talley AIAA. Usando capacitores assimétricos de alta tensão em ambientes atmosféricos e de vácuo, os experimentos visavam testar se o efeito persistiria na ausência de ar.

Os resultados foram inequívocos - e involuntariamente reveladores.

No modo atmosférico, os rotores alcançaram rotação mal mensurável (1–2 rpm) e empuxo na faixa de 10–100 μN - ordens de magnitude abaixo do esperado se os dispositivos realmente explorassem um efeito gravitacional. O movimento era totalmente atribuível à descarga de corona convencional e ao fraco vento iônico.

No vácuo, em pressões até 10^{-6} Torr, o movimento cessou completamente. Qualquer sinal transitório foi rastreado até degaseamento ou carga residual de superfície. Sem moléculas de ar para sustentar a ionização, o campo eletrostático tornou-se simétrico, e a força desapareceu.

Os investigadores concluíram que o empuxo escalava aproximadamente linearmente com a densidade do ar - uma descoberta frequentemente citada para “desmascarar” a propulsão EHD como impossível no vácuo. Mas o que realmente demonstrou foi algo mais profundo: **sem um meio para carregar a carga espacial, o campo elétrico perde a assimetria que produz gradientes de pressão eletrostática.**

Em outras palavras, esses testes iniciais confirmaram acidentalmente a **interpretação da tensão de Maxwell** da propulsão eletroaerodinâmica. Não era gravidade, nem mero arrasto iônico - era a presença de um **desequilíbrio de campo mediado por carga** que importava.

Os dispositivos Gravitec, construídos para simplicidade e simetria, careciam de qualquer **reservatório de carga** significativo ou **dielétrico formador de campo**. Suas geometrias abertas dissipavam as linhas de campo para o ambiente, desperdiçando a maior parte da energia eletrostática.

Em contraste, o rotor EPS-alumínio descrito aqui concentrava a carga ao longo de uma pele condutora bem definida, permitindo que a região de carga espacial *esculpisse* o campo local. O resultado: empuxo utilizável com menos de 6 kV e cerca de 100 mW - desempenho quase duas ordens de magnitude melhor em eficiência energética.

Essas descobertas ecoam um tema consistente: **a eficiência eletroaerodinâmica emerge não da tensão ou fluxo de ar, mas do controle da topologia de carga e geometria de campo.**

O Efeito Reservatório de Carga

Uma folha leve sobre um núcleo rígido e isolante se comporta como mais do que apenas um condutor - ela forma um **reservatório de carga de grande área** que amplifica a assimetria do campo elétrico. No design atual, o poliestireno expandido (EPS) serve puramente como **suporte estrutural leve**, com toda a sua superfície envolvida em folha de alumínio que é **elétricamente contínua com a fonte de alta tensão**. O EPS adiciona função elétrica insignificante; seu valor reside em permitir uma grande superfície condutora com massa mínima.

Essa pele condutora extensa armazena carga diretamente da fonte de energia, permitindo que a descarga de corona opere contra um **campo eletrostático pré-carregado** em vez de construí-lo do zero a cada ciclo. A alta área de superfície da folha aumenta dramaticamente a capacitância efetiva - na ordem de 10-100 pF cm⁻², dependendo da textura e curvatura da superfície - e converte uma tensão aplicada modesta em um gradiente de campo elétrico local muito mais forte.

Quando a corona se acende, a folha atua como uma referência de potencial estabilizadora. Os íons emitidos modulam ligeiramente o campo local, mas não o dominam; em vez disso, a carga de superfície armazenada mantém uma assimetria estável que produz empuxo contínuo com potência muito baixa.

Do ponto de vista da tensão de Maxwell, a força é proporcional à integral da intensidade do campo e seu gradiente:

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

e a grande folha bem carregada maximiza ambos os termos sem exigir tensão ou corrente mais alta. Isso explica por que um rotor de baixa potência e baixa tensão pôde alcançar rotação significativa: ele substituiu a **energia eletrostática armazenada** pelas perdas de corrente iônica pesadas das geometrias “vento iônico” convencionais - uma forma prática de *eficiência eletrostática*.

A Geometria da Eficiência

A eficiência de um propulsor EHD não é determinada pela velocidade do fluxo de ar, mas por **quão efetivamente o campo elétrico é esculpido**. Os parâmetros chave incluem:

- **Assimetria de Campo:** O componente direcional líquido do gradiente de pressão eletrostática.
- **Distribuição de Densidade de Carga:** Como a nuvem de íons modifica esse campo por blindagem parcial.

- **Acoplamento Capacitivo:** A carga total armazenada em superfícies opostas por volt aplicado.
- **Canais de Perda:** Perdas de corona, recombinação e vazamento dielétrico.

Designs que confinam e esculpem o campo - por exemplo, colocando uma ampla superfície opostamente carregada perto do emissor - podem alcançar melhorias de ordens de magnitude em empuxo por watt. O campo elétrico faz o trabalho; os íons meramente permitem que o campo permaneça assimétrico e dinâmico.

Revisitando Biefeld-Brown

As observações iniciais de Brown sobre empuxo de capacitores assimétricos precedem nossa compreensão moderna da física de plasma. Sem o quadro da tensão de Maxwell ou dinâmica de carga espacial, era natural pensar que o efeito pudesse envolver gravidade. O fato de que os propulsores EHD produzem força “contra” o vetor de campo (e às vezes verticalmente para cima) apenas aprofundou o mistério.

Visto através da lente de hoje, a “antigravidade” de Brown era simplesmente pressão eletrostática tornada visível. A similaridade na forma matemática - tanto as energias potenciais gravitacional quanto eletrostática caem como $1/r^2$ - tornou a confusão historicamente compreensível, mas a física é inteiramente eletromagnética.

Perspectivas e Contexto Moderno

Análises recentes e discussões entre pares reforçam essa reformulação da propulsão eletroaerodinâmica como um **fenômeno de gradiente de campo** em vez de um motor de vento iônico. Em configurações clássicas de lifters, correntes de corona na ordem de mili-amperes a dezenas de kilovolts produzem densidades de empuxo na faixa de micro- a mili-newton por watt - um reflexo de quão pouco da energia do campo elétrico termina como tensão mecânica direcionada. Em contraste, o rotor EPS envolvido em folha converte a mesma lei física em um processo *impulsionado por carga*: a ampla superfície condutora mantém um forte gradiente E com corrente mínima, trocando perdas de deriva por energia de campo armazenada.

Essa distinção ecoa uma mudança mais ampla na pesquisa contemporânea. **Atuadores de descarga de barreira dielétrica** no controle aerodinâmico também derivam sua força de superfície da tensão de Maxwell em vez de fluxo de ar em massa, alcançando eficiências de $10\text{--}100\text{ N kW}^{-1}$ quando a geometria do eletrodo é ajustada para assimetria. **Geometrias de eletrodos flutuantes e confinamento** em estudo na ONERA e nos programas EHD da UE mostram aumentos de dois a cinco vezes no empuxo ao esculpir a bainha iônica - precisamente a lógica de design do rotor reservatório de carga. E em **ambientes de ar rarefeito**, como a estratosfera superior ou a atmosfera marciana, onde o arrasto iônico enfraquece mas a tensão eletrostática persiste, superfícies ricas em carga podem sustentar a propulsão muito depois da falha de designs convencionais.

A física alinha-se perfeitamente com o quadro de momento de Poynting do eletromagnetismo clássico: o empuxo corresponde ao gradiente da densidade de energia de campo,

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

significando que o sistema extrai impulso diretamente do campo eletromagnético. Os íons são catalisadores que mantêm o desequilíbrio, não a massa de reação em si. Isso explica por que, em experimentos de vácuo onde o campo se torna simétrico, o empuxo desaparece - o termo ∇E colapsa. Inversamente, no rotor reservatório de folha, a pele capacitiva mantém E íngreme e direcional, produzindo cerca de **0.1–1 mN** de empuxo equivalente a torque de apenas **100 mW** de potência de entrada - 10–100 vezes a eficiência de dispositivos de arrasto iônico.

Parâmetro	Design Convencional de Vento Iônico	Rotor Reservatório de Carga em Folha	Implicação
Tensão	20–50 kV	< 6 kV	Menor risco de quebra, escalonamento mais fácil
Potência	1–10 W	≈ 0.1 W	10–100× maior empuxo / W
Mecanismo de Empuxo	Colisões íon-neutro	Gradiente de campo (tensão de Maxwell)	Largamente independente da densidade do ar
Chave Enabler	Lacuna emissor-coletor	Reservatório capacitivo em folha	Carga armazenada > corrente transitória
Eficiência (N kW ⁻¹)	0.01–0.1	1–10 (inferido)	Viável para micro-UAVs

Tais comparações destacam um pivô conceitual: **da propulsão impulsionada por corrente para propulsão impulsionada por carga**, do movimento de matéria para esculpir campos. A próxima fronteira é o que poderia ser chamado de *arquitetura eletrostática* - usando otimização computacional e materiais avançados (emissores de nanotubos de carbono, folhas padronizadas, dielétricos metamateriais) para maximizar $\int E \cdot \nabla E$. Modos DC pulsados híbridos poderiam explorar ainda mais o armazenamento de carga transitória enquanto reduzem subprodutos químicos.

Conclusão - Alimentada por Maxwell e Coulomb

A propulsão eletroaerodinâmica não é uma curiosidade exótica ou anomalia pseudocientífica. É uma manifestação direta das leis de Maxwell e Coulomb - uma máquina macroscópica que converte energia potencial eletrostática em movimento através de assimetria de campo controlada.

Onde inventores iniciais viam “antigravidade” e projetos modernos veem “vento iônico”, a verdadeira história é mais simples e profunda: **os campos elétricos possuem tensão**. Esculpa essa tensão, e você pode se puxar pelo ar sem partes móveis, sem combustível e sem som.

Essa é a genialidade silenciosa da propulsão eletroaerodinâmica - verdadeiramente, **alimentada por Maxwell e Coulomb**.

Referências

1. Talley, C. et al. *Avaliação do Efeito Biefeld-Brown: Testes de Propulsores de Capacitores Assimétricos em Vácuo e Atmosfera*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Aparelho Eletrocinético*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Voo de um Avião com Propulsão Iônica de Estado Sólido*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Controle de Fluxo de Ar por Atuadores de Plasma Não Térmicos*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *Controle de Fluxo EHD e Atuadores de Plasma*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. Programa EHD ONERA: *Propulsão Eletrohidrodinâmica e Controle de Fluxo*. Relatórios Internos 2018–2023.