



**Universidad**  
Zaragoza

# Proyecto Fin de Carrera

## Levitador electrostático

Autor/es

Javier Ros Abad

Director/es y/o ponente

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Marzo 2012



---

# Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a Antonio Usón por la labor prestada, tanto de profesor durante la carrera, como de director de proyecto.

Y sobre todo a mi familia y amigos, por apoyarme durante estos años.



---

# Resumen

El presente proyecto final de carrera ha consistido en el estudio, realización de modelos mediante el método de elementos finitos (MEF) y en la construcción de una serie de prototipos de levitadores electrostáticos, también conocidos como “lifters” o “loncrafts”

Se ha hecho una breve revisión bibliográfica basándose en un artículo anteriormente publicado por profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica.

Para los modelos desarrollados en MEF se ha utilizado el programa de libre distribución Femm 4.2 desarrollado por David Meeker. Se han incluido modelos bidimensionales de los levitadores axisimétricos equivalentes en masa a los reales.

Los prototipos experimentales proceden de referencias obtenidas en páginas de internet; se ha tratado de aumentar el tamaño del lifter original que ya funcionaba correctamente en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica. La parte experimental ha quedado limitada a tensiones de 20 kV, insuficientes para elevar los levitadores más pesados.



# ÍNDICE GENERAL

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>2</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	<b>8</b>
1.1. Objetivo del proyecto .....	8
1.2. Antecedentes .....	8
1.3. Introducción histórica del levitador .....	8
1.4. Principio de funcionamiento .....	9
1.5. Partes del levitador .....	13
1.5.1. <i>La Corona</i> .....	13
1.5.2. <i>El espacio de aire</i> .....	13
1.5.3. <i>El colector</i> .....	13
1.6. Posibles aplicaciones del levitador [ref 4].....	14
1.6.1. <i>Características</i> .....	15
1.7. Introducción del método de los elementos finitos .....	18
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>19</b>
<b>2. PROTOTIPOS CONSTRUIDOS</b> .....	<b>20</b>
2.1. Construcción:.....	20
2.1.1. <i>Selección de material para la estructura</i> .....	20
2.1.2. <i>Selección de la Corona</i> .....	20
2.1.3. <i>Selección del Colector</i> .....	21
2.1.4. <i>Selección del método de unión de materiales</i> .....	21
2.2. Prototipos.....	21
2.2.1. <i>Levitador Triangular pequeño</i> .....	21
2.2.2. <i>Levitador Triangular Grande y Levitador Hexagonal</i> .....	23
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>25</b>
<b>3. ANÁLISIS MEDIANTE MEF</b> .....	<b>26</b>
3.1. Introducción a FEMM 4.2 .....	26
3.2. Representaciones gráficas de los modelos .....	27
3.2.1. Levitador Triangular pequeño .....	27
3.2.2. Triangular Grande y Hexagonal .....	29
3.3. Comparativas gráficas de los levitadores .....	30
3.3.1. Con la longitud de aluminio .....	30
3.3.2. Con el espacio entre electrodos .....	31
3.3.3. Con diferentes hilos de cobre.....	32
<b>Conclusión</b> .....	<b>34</b>



---

<b>Bibliografía</b> .....	<b>35</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>36</b>
ANEXO 1: TRES EXPERIMENTOS DE LEVITACIÓN PARA SU REALIZACIÓN EN CLASES DE ELECTROMAGNETISMO.....	37
ANEXO 2: APLICACIONES DE LA PATENTE DEL LEVITADOR.....	47
ANEXO 3: FORCE ON AN ASYMMETRIC CAPACITOR .....	49
ANEXO 4: PLANOS.....	77





---

# Capítulo 1

# Introducción general



## Capítulo 1. Introducción general

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. Objetivo del proyecto

El objetivo del proyecto es tratar de explicar en qué consiste un “lifter electrostático”, “levitador” o también llamado propulsor iónico (en inglés Ioncraft). Estudiar los fundamentos físicos en los que se basa su funcionamiento, los aspectos críticos que afectan a su rendimiento y las aplicaciones que pueden llegar a tener en la vida actual.

## 1.2. Antecedentes

Se realizó un estudio, incluido en el Anexo 1, titulado “Tres experimentos de levitación para su realización en clases de electromagnetismo”, por los autores C. Millán; J. Mur; J.S. Artal; A. Usón y J. Letosa, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.

En el artículo se habla de tres experimentos diferentes de levitación, de los cuales uno se basa en el levitador electrostático, titulado “efecto Biefeld-Brown o levitación eléctrica de un condensador asimétrico”. Explica que cuando se establece un alto voltaje entre los electrodos de un condensador asimétrico se observa una fuerza neta sobre dicho condensador, que siempre es dirigida hacia el electrodo pequeño y que dicha fuerza aparece independientemente del signo de la tensión DC utilizada. Entenderemos por un condensador asimétrico, aquel en que las dimensiones físicas de ambas placas son muy diferentes. Y dicho condensador asimétrico debe ser lo más ligero posible.

## 1.3. Introducción histórica del levitador

El levitador es un dispositivo basado en la propulsión de aire ionizado que trabaja sin partes móviles, vuela silenciosamente, usa solo energía eléctrica y puede elevar su propio peso más un plus de carga útil adicional, pudiendo ser usado como vehículo, con la perspectiva futura de su fuente de alimentación.

El principio de la propulsión del viento iónico con las partículas cargadas, generadas previamente, se ha conocido desde los primeros días del descubrimiento de la electricidad, con referencias que se remontan a 1709 en un libro titulado “Experimentos Físico-Mecánicos en varios sujetos” por Francis Hauksbee (Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects by Francis Hauksbee). Sin embargo, el uso de la propulsión fue pensado seriamente por primera vez por Thomas Townsend Brown (EEUU) en 1928 y Paul Alfred Biefeld (Alemania), denominándose dicho efecto “efecto Biefeld-Brown”.

Una extensa investigación se realizó durante los años 1950 y 1960 sobre el uso de este efecto de propulsión, durante la era de la investigación de propulsión de los Estados Unidos (1955-1974). Experimentos de alto secreto en dicho efecto fueron llevados a cabo también en Francia (1955-1958) por Thomas Townsend Brown en SNCASO (Proyecto Montgolfier).

Y después por el comandante Alexander Prokofieff de Seversky, el cual contribuyó mucho a su física básica y a sus variaciones constructivas en 1960. De hecho, fue el mismo comandante de Seversky quien en 1964 inventó el término



Ionocraft (Patente 3.130.945 de EE.UU.). El diseño básico externo de estos dispositivos puede ser encontrado en patentes más viejas, remontando al 1960, archivado por Thomas Townsend Brown, titulado “Elektrokinetic Apparatus”.

Estudios más recientes han aclarado muchas cuestiones ambiguas en relación con el trabajo original de Brown, y, el difícil de alcanzar, efecto Biefeld-Brown.

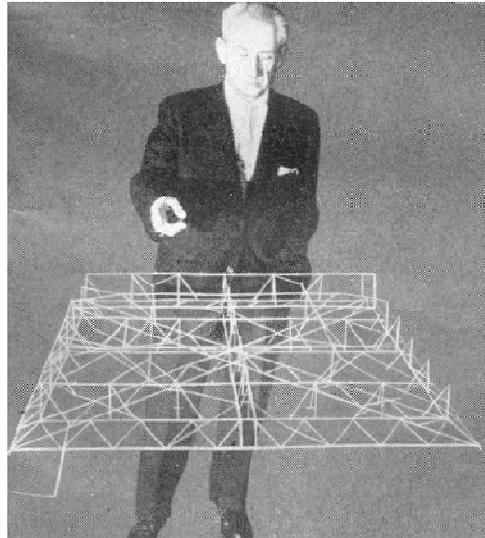


Figura 1- Alexander P. de Seversky con un Ionocraft

## 1.4. Principio de funcionamiento

El efecto Biefeld-Brown es un efecto eléctrico que produce un viento iónico que transfiere su cantidad de movimiento lineal a los alrededores de las partículas neutras, primero descubierto por Paul Alfred Biefeld (Alemania) y Thomas Townsend Brown (EEUU). El efecto es más extensamente conocido como electrohidrodinámica (EHD) o algunas veces electro-fluido-dinámica, un homólogo del conocido efecto magnetohidrodinámico

La cantidad de movimiento lineal, según la referencia [6], queda reflejado por la siguiente fórmula:

$$\vec{p} = m * \vec{v} \quad (1.1)$$

Donde:

$$\vec{p} \equiv \text{Cantidad de movimiento lineal } \left[ \frac{kg * m}{s} \right]$$

$$m \equiv \text{Masa [kg]}$$

$$\vec{v} \equiv \text{Velocidad [m/s]}$$

El efecto se basa en lo que habitualmente se conoce como “efecto corona”, que permite a las moléculas de aire ser ionizadas. Por lo general, se utilizan dos electrodos con un alto voltaje entre ellos, que van desde unos pocos kilovoltios hasta los niveles de megavoltios, donde un electrodo es pequeño, y fuerte, y el otro es más grande, y blando.



La distancia más eficaz entre los electrodos se produce en un gradiente de potencial eléctrico inferior a la tensión de ruptura del aire que es, según la Tabla 1, 3 kV/mm, a un nivel de densidad de corriente normalmente conocido como la condición de corriente de corona saturada; esto crea un alto campo eléctrico alrededor del electrodo cargado positivamente, el más pequeño. Alrededor de este electrodo, ocurre la ionización, que consiste en que, los electrones son arrancados de los átomos del medio circundante y son literalmente atraídos inmediatamente por la carga del electrodo.

Material	Constante dieléctrica $\epsilon$	Intensidad dieléctrica* (10 <sup>6</sup> V/m)
Aire (seco)	1.000 59	3
Baquelita	4.9	24
Cuarzo fundido	3.78	8
Mylar	3.2	7
Hule de neopreno	6.7	12
Nylon	3.4	14
Papel	3.7	16
Papel impregnado en parafina	3.5	11
Poliestireno	2.56	24
Cloruro de polivinilo	3.4	40
Porcelana	6	12
Vidrio pirex	5.6	14
Aceite de silicón	2.5	15
Titanato de estroncio	233	8
Teflón	2.1	60
Vacío	1.000 00	—
Agua	80	—

\* La intensidad dieléctrica es igual al campo eléctrico máximo que puede existir en un dieléctrico sin que se rompa el aislamiento. Observe que estos valores dependen en gran medida de si existen o no impurezas o defectos en los materiales.

**Tabla 1-** Constantes dieléctricas y rigidez dieléctricas aproximadas de diversos materiales a la temperatura ambiente.

Esto deja una nube de iones cargados positivamente en el medio, los cuales son atraídos por el electrodo “blando” negativo por la Ley de Coulomb, donde son neutralizados. Esto produce fuerza opuesta de igual magnitud en el electrodo inferior. Este efecto puede ser usado para propulsión (propulsores EHD), bombas de fluido, y recientemente también sistemas de refrigeración EHD. La velocidad alcanzable por las diferentes configuraciones se ve limitado por la cantidad de movimiento lineal alcanzable por el aire ionizado, que se reduce en el impacto del ión con el aire neutral.

Este efecto funciona usando distintas polaridades en los electrodos: el pequeño o delgado electrodo puede ser positivo o negativo, y el electrodo largo debe tener la polaridad contraria. En muchos lugares de experimentación se ha informado de que el efecto de empuje de un levitador es generalmente un poco más fuerte cuando el electrodo pequeño es el positivo. Esto es posiblemente un efecto de las diferencias entre la energía de ionización y la energía de afinidad del electrón de las partes constituyentes del aire y, por lo tanto, depende de la facilidad con la que los iones son creados en el electrodo “fuerte”.

El empuje generado puede ser explicado en términos electrocinéticos o en términos modernos de propulsión electrohidrodinámica, y está dado por la siguiente ecuación según la referencia [1]



$$F = \frac{Id}{k} \quad (1.2)$$

Donde:

$$F \equiv \text{Fuerza resultante} \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N} \right]$$

$I \equiv$  Intensidad de corriente de corriente eléctrica [A]

$d \equiv$  Distancia del espacio de aire [m]

$K \equiv$  Coeficiente de movilidad del ión en el aire  $\left[ \frac{\text{C} \cdot \text{s}}{\text{kg}} \right]$

En su forma básica, el levitador puede producir fuerzas suficientes para levantar alrededor de un gramo de carga útil por vatio (W), por lo que su uso está restringido a un modelo conectado a una fuente de alimentación externa. La capacidad de carga útil del levitador es del orden de unos pocos gramos y necesita ser alimentado por fuentes de energía y convertidores de alto voltaje con un peso de unos pocos kilogramos, por lo que aunque su diseño simple hace que sea una excelente manera de experimentar con esta tecnología, es poco probable que se fabrique un levitador completamente autónomo con los métodos de construcción actuales.

Un estudio detallado en electrohidrodinámica muestra las diferentes clases y métodos de construcción de propulsores EHD y tecnología híbrida (mezcla con técnicas más ligera que el aire) que pueden lograr mucha más capacidad de carga o una relación de empuje mayor que los obtenidos con el diseño simple del levitador. Los límites prácticos se pueden resolver utilizando la teoría y unos cálculos bien definidos. Por lo tanto, un propulsor EHD completamente autónomo es teóricamente posible.

Como se ha comentado anteriormente, cuando el cable de la corona (electrodo fuerte) está aproximadamente a 20 kV, hace que las moléculas de aire cercanas se ionicen extrayendo electrones fuera de ellas. Mientras esto sucede, los iones están fuertemente repelidos del ánodo pero también fuertemente atraídos hacia el cátodo, haciendo que la mayoría de los iones empiecen a acelerarse en la dirección del cátodo.

La velocidad de salida de los iones cuando son acelerados dentro del campo eléctrico puede ser calculada, según la referencia [2], con la fórmula:

$$vi = \sqrt{\frac{2VQ}{mi}} \quad (1.3)$$

Donde:

$vi \equiv$  Velocidad del ión acelerado [m/s]

$Q \equiv$  Carga del ión [C]

$mi \equiv$  Masa del ión [kg]

$V \equiv$  Diferencia de potencial del campo eléctrico [V]

La ionización de las moléculas de aire cercanas al ánodo resulta en la generación de aire ionizado con la misma polaridad que la del material cargado eléctricamente. Posteriormente, la punta repele la nube de iones, e inmediatamente se expande



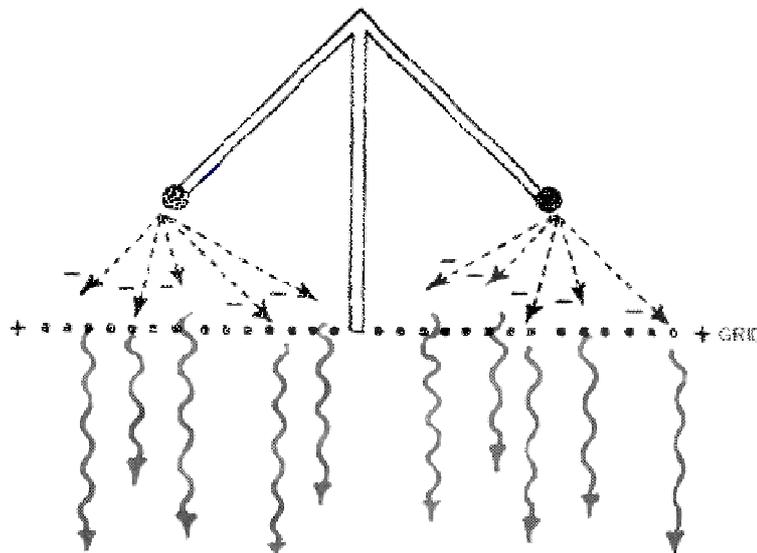
debido a la repulsión entre los propios iones puesto que el cátodo se carga negativamente.

Esta repulsión de iones crea un “viento” eléctrico, el cual es normalmente acompañado de un silbido ruidoso debido al cambio de la presión del aire. A medida que estas moléculas neutras son expulsadas del levitador hay, de acuerdo con la tercera ley de Newton, fuerzas opuestas e iguales, por lo que el levitador se mueve en la dirección opuesta con una fuerza igual.

Hay cientos de miles de moléculas por segundo expulsadas del dispositivo, por lo que la fuerza ejercida es comparable a la de una suave brisa. Esta es suficiente para hacer que un modelo de madera de balsa ligero levante su propio peso. El empuje resultante también depende de otros factores externos incluyendo la presión del aire y temperatura, composición del gas, el voltaje, la humedad, y la distancia de la separación de aire que hay entre el ánodo y el cátodo.

La separación de aire es muy importante para la función de este dispositivo. Entre los electrodos hay una masa de aire, que consta de moléculas de aire neutro, que se interponen en el camino de los iones en movimiento. Esta masa de aire es impactada repetidamente por partículas excitadas en movimiento a una alta velocidad. Esto crea una resistencia, la cual debe ser superada. El bombardeo de iones empujará toda la masa de aire fuera del camino, o se abrirá paso a través del colector donde los electrones se vuelven a unir, haciéndolo neutro otra vez. El resultado final del aire neutro recogido en el proceso suele causar efectivamente un cambio en la cantidad de movimiento lineal y generar empuje. Por lo tanto cuanto más pesado y denso sea el gas, mayor será el empuje resultante, de acuerdo con la segunda ley de Newton, según la referencia [6]

$$\vec{F} = m * \vec{a} = m \frac{d}{dt} \vec{v} = \frac{d}{dt} m\vec{v} = \frac{d}{dt} \vec{p} \quad (1.4)$$



**Figura 2-** Iones precipitándose hacia el colector con carga positiva, chocan con las moléculas de aire neutro. Los iones paran en el colector y las moléculas de aire neutro, golpeadas hacia abajo por los iones, pasan a través de la malla receptora de iones del colector. La fuerza hacia abajo mantiene el levitador a flote.



---

## 1.5. Partes del levitador

Según la referencia [3], el levitador consta de las siguientes partes:

### 1.5.1. La Corona

La corona o electrodo fuerte, está generalmente, pero no necesariamente, conectada al terminal positivo de la fuente de corriente de alto voltaje. En general, está hecho de un hilo de un metal conductor desnudo de pequeño diámetro.

Se puede usar el cobre como el metal conductor para la corona, pero el acero inoxidable funciona mejor. Similarmente, un hilo de diámetro pequeño, de 0,1 mm, tiende a funcionar bien en comparación con uno más común, de 1 mm de diámetro. El campo eléctrico más fuerte alrededor del pequeño diámetro de alambre da como resultado una mejor ionización y una corriente de corona mas grande.

La corona se llama así por su tendencia a emitir una luz de color púrpura mientras está en uso. Esto es simplemente un efecto secundario de la ionización.

Una corona excesiva debe evitarse, ya que los electrodos están peligrosamente cerca y pueden crear un arco en cualquier momento, por no mencionar los riesgos de salud asociados debido a la inhalación de ozono y NOx producida por la alta ionización del aire.

### 1.5.2. El espacio de aire

El espacio de aire es un lugar donde el aire fluye libremente entre los dos electrodos que forman la estructura del levitador.

El espacio de aire es fundamental para el funcionamiento de este dispositivo ya que es el dieléctrico usado durante el funcionamiento. Los mejores resultados han sido observados con un espacio de aire de 1 mm por cada kV aplicado entre los electrodos.

### 1.5.3. El colector

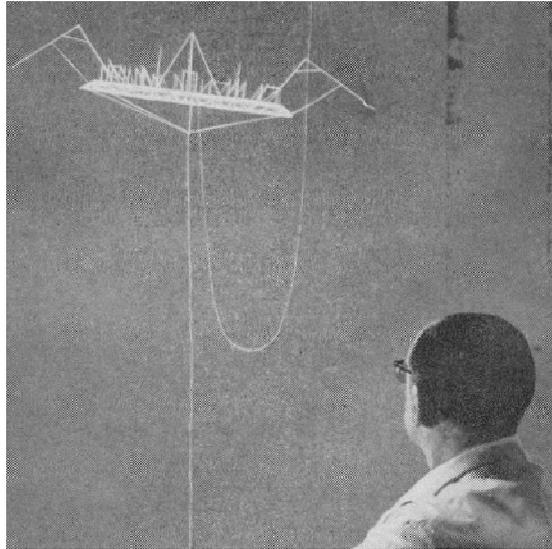
El colector puede tener varias formas, siempre y cuando el resultado sea una superficie equipotencial uniforme debajo del alambre de la corona. Variaciones de esto incluye una malla de alambre, tubos conductores paralelos, o una falda de aluminio con un borde liso y redondo. La falda de aluminio del colector es el más popular para pequeños modelos, y está generalmente, pero no necesariamente, conectada al terminal negativo de la fuente de alimentación. Por lo general se realiza a partir de papel de aluminio empleado para la conservación de alimentos.

Se le llama comúnmente falda de aluminio simplemente porque tiene forma de faldón, y está hecha de papel de aluminio. Es la parte más frágil, y no debe ser arrugado para que funcione correctamente. Los bordes afilados en la falda perjudican el rendimiento del empuje, ya que esto generará iones de polaridad opuesta a aquellos que están dentro mecanismo del empuje.

La inversión de la polaridad del cable de la corona con la del papel de aluminio no altera la dirección del movimiento. El empuje se produce independientemente de si los iones son positivos o negativos. Para la polaridad positiva de la corona, los iones de Nitrógeno son la principal fuente de carga, mientras que para la polaridad negativa, los



iones de Oxígeno serán la principal fuente y la producción de ozono será mayor. La ligera diferencia en su movilidad iónica, resulta ligeramente superior el empuje para el caso de una corona con polaridad positiva.



**Figura 3-** Un modelo de levitador elevado al aire, completamente sin apoyo, a excepción de la corriente descendente del aire. El siguiente paso es desarrollar un modelo que pueda llevar su propia fuente de alimentación.

## 1.6. Posibles aplicaciones del levitador [ref 4]

El comandante e investigador Alexander Procofieff de Seversky [4] se dio cuenta de la idea cuando estaba trabajando en un dispositivo eléctrico de limpieza de aire que había inventado. Ese aparato fue diseñado para combatir la contaminación atmosférica cargando eléctricamente las partículas del humo industrial y atrapándolas en un electrodo líquido con la carga opuesta.

Posee las características para operar dentro de la atmósfera, pero pudiendo hacer cosas que ningún otro tipo de aeronave actual pueden lograr:

-Gran altitud de vuelo: Los helicópteros giran sus palas sin rendimiento a altitudes donde la densidad del aire se reduce, más allá de 6 km de altitud no pueden subir. Y los aviones comerciales están diseñados para poder llegar a subir hasta un máximo de 20 km.

Por el contrario, los expertos calculan que el Levitador puede propulsar suficiente aire para mantenerse levitando hasta los 50 km.

-Tamaño ilimitado: Cuanto más grande mejor vuela, ya que aumenta la eficiencia con el área del colector. La distribución de flujo de aire alrededor del borde del colector se convierte, proporcionalmente, en un factor menos importante en grandes embarcaciones. La razón es que el área del colector aumenta más rápido que el de la circunferencia con un tamaño cada vez mayor.

-Alta velocidad: No se ha determinado un límite de velocidad práctica. La resistencia aerodinámica sería el principal factor de la limitación. Un diseño cuidadoso del borde del colector y del contorno de la nave podría minimizar la resistencia del aire.



-Seguridad: No hay partes móviles en la propulsión y no hay desgaste, lo que significa menos probabilidades de fallar y un mantenimiento más sencillo.

### **1.6.1. Características**

#### **DIRIGIDO CON TENSIÓN**

El control de la dirección se lleva a cabo mediante la aplicación de diferentes tensiones en varias partes de la nave. La parte con mayor voltaje consigue una mayor levitación, por lo que se inclina hacia arriba. La forma del levitador no importa. De cualquier forma va a volar, aunque el comandante e investigador Alexander Procofieff de Seversky asume que los modelos redondos en forma de platillo volador serían más fácilmente maniobrables.

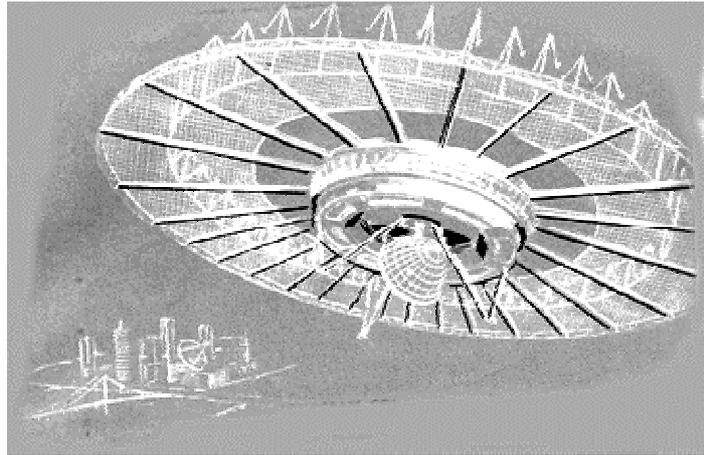
Por un sencillo control de palanca, el piloto puede elevar cualquier borde de la nave, produciendo inclinación y balanceo como si el levitador tuviera elevadores y alerones. Se puede poner la nave en cualquier actitud de vuelo hacia arriba o hacia abajo, o una inclinación lateral a ambos lados. Al igual que un rotor de helicóptero, esta inclinación empuja la nave hacia adelante, hacia atrás o hacia los lados.

JF Bruno, el director técnico de los modelos de Seversky, habló de una góndola de pasajeros en los futuros modelos, suspendido de cárdanes por debajo del colector principal para que quede a un nivel independiente de la cubierta principal, que sería inclinada. Las localizaciones por debajo del colector principal también protegen a los pasajeros del flujo de alta energía y una posible ruptura dieléctrica. Pero, incluso si los pasajeros se introducen en la corriente de iones, no se electrocutarían al no tocar la "tierra" del colector. "Sería como pájaros posados en un cable de alta tensión", dijo el hombre encargado del diseño electrónico.

La nave tripulada estaría prevista para:

-Transporte diario: Sin límite de tamaño esta nave podría cargar trenes llenos de gente, y aliviar la congestión de tráfico alrededor de los centros urbanos. Una nave usada como transporte de larga distancia, posiblemente a velocidades supersónicas, no exigiría grandes aeropuertos con largas pistas de aterrizaje.

-Monitores de tráfico aerotransportado: Al pasar por encima de los puentes y las principales intersecciones, o patrullando por encima de las carreteras, un levitador de un solo hombre proporcionaría una vista panorámica de las condiciones del tráfico, información de radio a los centros de control de tráfico de tierra, etc.



**Figura 4-** Un levitador para pasajeros puede ser la solución del futuro para los habitantes de suburbios en áreas congestionadas, llevando rápidamente a cientos de ellos en cortas distancias sobre el tráfico de la ciudad. La energía podría ser suministrada por cadenas de estaciones con base en tierra.

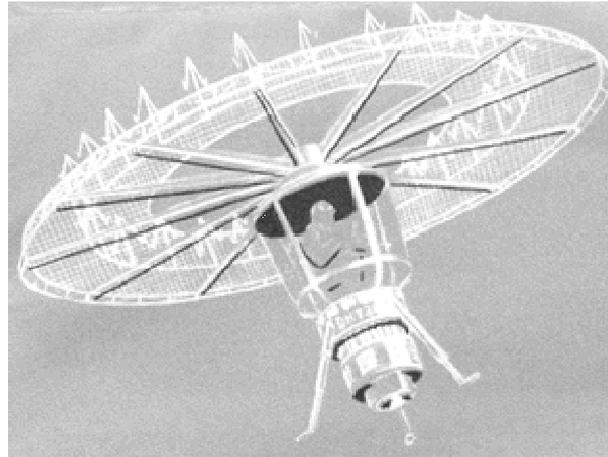
### EI COLECTOR ES DIFICIL DE DAÑAR

Al ser el colector difícil de sufrir desperfectos, podría tener estas aplicaciones:

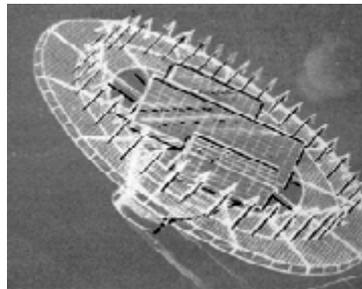
-Militares de reconocimiento y rescate: Sin partes móviles, el Levitador es menos vulnerable al fuego de armas ligeras que los helicópteros. La red al aire libre es un blanco pobre. La mayoría de las balas zumarían a través de ella. Incluso si la red es golpeada, la carga eléctrica sería mantenida a pesar del daño de algunas partes. A diferencia de un helicóptero con las palas destrozadas, un levitador no se estrellaría.

-Observación meteorológica: Mientras que los satélites miran hacia abajo en la atmósfera desde el espacio exterior, el levitador podría navegar directamente en las formaciones meteorológicas, suministrándonos una valiosa información adicional. Siendo dirigitible, el levitador no se dejaría llevar por el viento como los globos meteorológicos, y podría mantener una posición sobre las áreas cruciales, haciendo los pronósticos locales más fiables.

-Máquina antimisiles: El levitador podría ser usado como un interceptor de misiles. Normalmente, la nave flotaría a altas altitudes, escaneando el horizonte en un rango de 1125 km. Tan pronto como se descubriera e identificara un misil hostil a través de un sistema de detección de infrarrojos, el levitador se lanzaría a sí mismo contra el misil enemigo en rumbo a colisionar y explotar en el aire.



**Figura 5-** Un levitador de un solo tripulante podría ser el coche patrulla de tráfico del mañana o, en combate, el vehículo en suspensión para las guerras de guerrillas, casi impenetrable a algún daño menor de la red.



**Figura 6-** Levitador anti misiles, alimentado por la luz del sol, podría flotar indefinidamente en la atmósfera superior, para cuando una cabeza armada se acerque la haga volar por los aires.

## FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Se están diseñando varios sistemas de fuentes de alimentación, actualmente en desarrollo para el programa espacial de la NASA. Algunos de estos incluyen:

-Generadores de turbina de gas:

Varias empresas, en particular “General Electric” y “Allis-Chalmers”, han llegado a diseñar turbinas de queroseno compactas y ligeras, originalmente concebidas como fuentes de energía para naves espaciales. Estos pueden ser usados para generar electricidad a bordo de un levitador.

-Celdas de combustible:

Estos son reactores químicos produciendo electricidad como una batería de almacenamiento, pero pasando sus productos químicos desde tanques de alimentación externa. Las celdas de combustible que convierten el hidrógeno y oxígeno en electricidad, con agua potable como subproducto, podrían ser adecuados para la generación de la alta tensión.

-Las células solares:

Convierten directamente la luz solar en electricidad, la fuente de energía actual de la mayoría de los satélites. Cuando se llegue a la máxima eficiencia de las



células solares, es posible que puedan mantener al levitador en el aire por periodos indefinidos.

-El girasol:

Un nombre clave de otro proyecto destinado a obtener la energía eléctrica directamente de la luz solar. Se emplea un reflector como un paraguas que concentra el calor solar para producir la ebullición del mercurio, el cual se expande a través de la turbina y acciona un generador eléctrico.

-La radiación de microondas:

Las ondas de radio de alta frecuencia podrían transferir energía desde las estaciones de tierra al levitador, si la nave se va a utilizar como una plataforma flotante en una posición fija. Raytheon ha sido el pionero en este tipo de transmisión de energía a través de su tubo de Amplitron y ha recuperado un máximo del 72 por ciento de la energía radiada en el sitio receptor. Los rayos láser de alta potencia pueden ser igualmente utilizados para la transmisión.

Un hardware experimental ya ha sido producido para cada uno de estos sistemas de fuentes de alimentación.

## 1.7. Introducción del método de los elementos finitos

En el capítulo 3 se ha empleado este método en dos dimensiones para analizar y comparar los campos eléctricos que se producen en los prototipos de levitadores construidos.

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

Los programas de elementos finitos se componen en tres partes de software independiente:

- Preprocesador, que permite realizar el modelo en dos o tres dimensiones o importarlo de uno ya realizado en CAD, mallarlo (definiendo el tipo de elemento en cada subdominio) y establecer las condiciones de contorno.
- Programa de análisis o código de resolución del sistema de ecuaciones, diferentes en función del número de variables espaciales y dependencias temporales.
- Postprocesador, que permite realizar los cálculos posteriores necesarios para el análisis final del problema partiendo de las soluciones originales.



---

## Capítulo 2

# PROTOTIPOS CONSTRUIDOS



## Capítulo 2. Prototipos construidos

# 2. PROTOTIPOS CONSTRUIDOS

## 2.1. Construcción:

Para la construcción de los levitadores había primero que decidir qué materiales utilizar y como unirlos entre ellos. Puesto que es capaz de levantar muy poco peso, tenían que ser los materiales más ligeros posibles y como método de unión aquel que consiguiera una mejor sujeción ya que va a ser sometido a tensiones mecánicas.

### 2.1.1. Selección de material para la estructura

Tiene que ser un material que se pudiera modelar con cierta facilidad y fuera lo más ligero posible a la vez que fácil de conseguir, por lo que la elección fue madera de balsa, con posibilidad de comprarla en cualquier tienda de aerodelismo, y simple de cortar como un cúter.

Podemos ver en la siguiente tabla, Tabla 2, la relación de densidad con otros materiales para hacernos una idea de su peso.

	densidad ( $\delta$ )	
	kg/l	kg/m <sup>3</sup>
Agua (4°C)	1	1.000
Agua de mar (15°C)	1,025	1.025
Hielo	0,917	917
Sangre humana (37°C)	1,06	1.060
Plasma sanguíneo (37°C)	1,027	1.027
Alcohol	0,8	800
Aceite de oliva	0,92	920
Mercurio (20°C)	13,6	13.600
Aire frío (0°C, 1 atm)	0,00129	1,29
Aire caliente (100°C, 1 atm)	0,00095	0,95
Planeta Tierra	5,17	5.170
Madera balsa	0,12	120
Quebracho y algarrobo	0,7	700
Hierro	7,8	7.800
Plomo	11,4	11.400
Oro	19,3	19.300

Tabla 2- Comparación de densidades de diferentes materiales.

### 2.1.2. Selección de la Corona

La corona debe ser un material metálico, fino, ligero, fácil de conseguir y con buena conductividad. La elección fue hilo de bobina de cobre de 0,1 mm de diámetro, adquirible en cualquier tienda de electrónica.



Metales	Conductividad Eléctrica ( $S \cdot m^{-1}$ )	Temperatura( $^{\circ}C$ )
Plata	$6,30 \times 10^7$	20
Cobre	$5,96 \times 10^7$	20
Cobre Recocido	$5,80 \times 10^7$	20
Oro	$4,55 \times 10^7$	20-25
Aluminio	$3,78 \times 10^7$	20
Wolframio	$1,82 \times 10^7$	
Hierro	$1,53 \times 10^7$	

Tabla 3- Comparación de conductividad de diferentes metales.

### **2.1.3. Selección del Colector.**

El colector tiene que ser parecido a una malla metálica y lo más ligera posible, por lo que tiene que ser lo más fino posible y fácil de adquirir. La elección fue papel de aluminio de cualquier supermercado, también recomendado en [3]

### **2.1.4. Selección del método de unión de materiales.**

Es necesario un material ligero que deje fuertemente unidas todas las piezas, haciendo un análisis previo, la madera es un material poroso, por lo que nos interesará en la mayoría de los casos, que el pegamento sea líquido en vez de pastoso, con el fin de que penetre y se incremente la superficie impregnada y obtener mayor rendimiento y duración. Se escogió cola de carpintero, ya que se iba a usar principalmente para pegar madera sobre madera.

## **2.2. Prototipos**

Se han realizado 3 tipos diferentes de maquetas con diferentes formas geométricas y dimensiones. Escogí las medidas estructurales representadas en los planos del Anexo 4, puesto que eran los más utilizados en las principales páginas web, tales como la de la referencia [5]. A continuación paso a describirlas:

### **2.2.1. Levitador Triangular pequeño.**

Es la maqueta más sencilla de todas. Tiene forma triangular, y sus medidas se encuentran en el Plano 2 del Anexo 4. Se hicieron dos iguales con diferentes longitudes del papel de aluminio, (colector), distancia entre los dos electrodos y diferentes hilos de cobre (corona), para observar las diferencias.



**Figura 7-** Prototipo triangular pequeño levitando en un laboratorio de la Universidad de Zaragoza.

- Diferencias entre longitudes de aluminio:

Se realizaron pruebas sobre dos levitadores exactamente iguales, de la misma forma geométrica, la misma distancia entre electrodos, el mismo hilo de cobre y la misma tensión aplicada, salvo que uno tenía 3 cm de longitud de la falda de aluminio, y el segundo 3,5 cm. Al aplicar una tensión de hasta 20 kV observamos que mientras el levitador con la falda de 3,5 cm levitaba, la de 3 cm no conseguía despegar.

- Diferencias entre distancia de los electrodos:

Se realizaron pruebas sobre dos levitadores exactamente iguales, de la misma forma geométrica, el mismo hilo de cobre, la misma tensión aplicada y la misma longitud de la falda de aluminio, salvo que uno tenía 3,5 cm de distancia entre los dos electrodos, y el segundo 4 cm. Al aplicar una tensión de hasta 20 kV observamos que el primer levitador conseguía elevarse pero el segundo no.

- Diferencias entre los hilos de cobre:

Se realizaron pruebas sobre dos levitadores exactamente iguales, de la misma forma geométrica, la misma tensión aplicada, la misma longitud de la falda de aluminio, y la misma distancia entre los dos electrodos, salvo que probamos con dos hilos de cobre diferentes. El primer hilo de cobre era un hilo de bobina de cobre normal de 0,1 mm de diámetro, mientras que el segundo era un hilo de cobre de bobina de radio vieja, sintonizadora de frecuencias AM, de unos 0,3 mm de diámetro aproximadamente.



**Figura 8-** Hilo de bobina de cobre de radio vieja, sintonizadora de frecuencias AM

La diferencia entre las dos bobinas de cobre, aparte de su diámetro, radica en que la de radio de AM está compuesta por 10 filamentos de cobre más finos enrollados entre sí, todos ellos cubiertos por un material dieléctrico parecido a la tela.

Al aplicar la misma diferencia de tensión en ambos prototipos, hasta 20 kV observamos que los dos conseguían levitar, pero el que tenía el hilo de bobina de radio lo hacía con mayor empuje, pese a pesar más por sus dimensiones, realizando una mayor ionización del aire que se podía observar tanto auditivamente como por el olor a ozono que desprendía.

Esta diferencia no es un factor crítico del rendimiento del levitador, pero si que supone una mejora de su rendimiento.

### ***2.2.2. Levitador Triangular Grande y Levitador Hexagonal***

Son otras dos maquetas que realicé, de un tamaño mayor que la primera. Dos hexagonales con diferente grosor en la estructura (2 y 4 mm respectivamente) y otra triangular. En el Anexo 4 se encuentran ambos planos con sus respectivas medidas.

Se probaron en el laboratorio con una fuente de tensión DC de hasta 20 kV pero ninguna consiguió elevarse. El levitador triangular grande también fue probado en el laboratorio de Alta Tensión del edificio Torres Quevedo de la Universidad de Zaragoza, pero debido a no poder limitar la intensidad, se quemó el hilo de cobre cuando se le estaba aplicando una tensión de aproximadamente 16 kV.

Se está a la espera de poder usar una nueva fuente de Alta Tensión de 45 kV para comprobar el funcionamiento de estos levitadores.

A continuación se muestran las fotografías de estos modelos, el triangular grande en la Fig. 9 y los dos hexagonales en la Fig. 10.



**Figura 9-** Levitador Triangular Grande.



**Figura 10-** Dos levitadores hexagonales.



## Capítulo 3

# ANÁLISIS MEDIANTE MEF



### Capítulo 3. Análisis mediante MEF.

## 3. ANÁLISIS MEDIANTE MEF

### 3.1. Introducción a FEMM 4.2

El objetivo de este estudio es desarrollar métodos para calcular la fuerza del campo eléctrico sobre la base de simulaciones electroestáticas mediante MEF y comparar los datos obtenidos con diferentes prototipos, y así ver las diferencias a niveles del rendimiento del levitador.

El programa utilizado ha sido el Femm 4.2; es un programa de libre distribución desarrollado por David Meeker, diseñado para resolver problemas electrostáticos, magnéticos, de flujo de temperatura y flujo de corriente en dos dimensiones axisimétricos y planos.

Primero se realiza un dibujo de un plano de lo que queremos analizar, en este caso el levitador, se representa cada material con sus características y propiedades, y se ejecuta un mallado del plano, para después resolver las ecuaciones diferenciales del mallado.

En los problemas electrostáticos se tiene en cuenta el comportamiento de la intensidad del campo eléctrico,  $\mathbf{E}$ , y la densidad de flujo eléctrico o vector desplazamiento eléctrico,  $\mathbf{D}$ . Hay dos condiciones que se deben cumplir. La primera condición es la forma diferencial de la Ley de Gauss, que dice que el flujo de salida de cualquier volumen cerrado es igual a la carga contenida en el volumen:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3.1)$$

Donde  $\rho_v$  representa la densidad volumétrica de carga. La segunda condición hace referencia al carácter conservativo del campo electrostático,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (3.2)$$

El desplazamiento y la intensidad del campo están relacionados entre sí a través de la siguiente expresión:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

donde  $\varepsilon$  es la permitividad dieléctrica del medio. Aunque algunos problemas de electrostática podrían tener una relación no lineal constitutiva entre  $\mathbf{D}$  y  $\mathbf{E}$ , el programa considera solo problemas lineales. Para simplificar el cálculo de campos que satisfacen estas condiciones, el programa emplea el potencial escalar eléctrico,  $V$ , que se define por su relación con  $\mathbf{E}$  como:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (3.4)$$

Debido a la identidad matemática  $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \psi = 0$  para cualquier campo escalar, la condición (3.4) se cumple satisfactoriamente. Sustituyendo en la Ley de Gauss y



aplicando la relación constitutiva se obtiene la ecuación diferencial parcial de segundo orden:

$$-\varepsilon \nabla^2 V = \rho_v \quad (3.5)$$

que se aplica sobre las regiones homogéneas. El programa resuelve esta ecuación para una tensión,  $V$ , definida por el usuario, con las fuentes y las condiciones de contorno.

Según la referencia [6], para los cálculos realizados por Femm 4.2, se van a tener en cuenta los siguientes fundamentos teóricos.

La Ley de Gauss, expresión 3.1, establece en su forma integral que el flujo eléctrico neto a través de cualquier superficie cerrada, también conocida como superficie gaussiana, es igual a la carga neta que se encuentra dentro de ella, dividida por  $\varepsilon$

$$\Phi_e = \oint_s \vec{E} * d\vec{s} = \frac{1}{\varepsilon} q_{int} \quad (3.6)$$

donde:

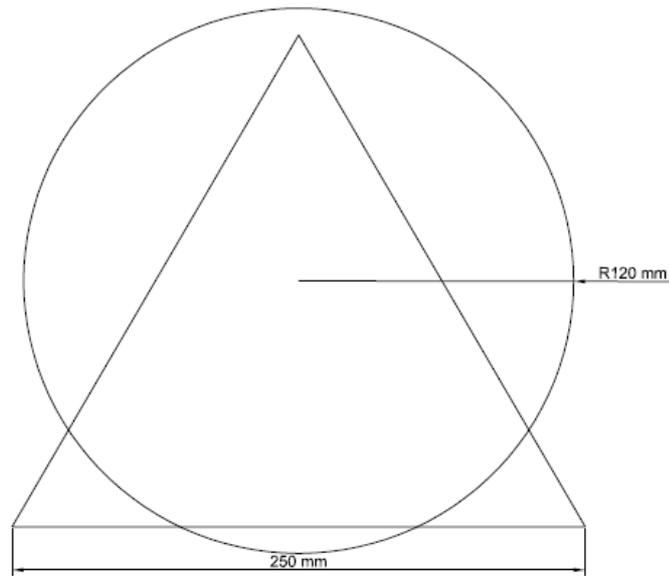
- $\Phi_e \equiv$  Número de líneas de fuerza que atraviesan la superficie  $\left[ \frac{Nm^2}{C} \right]$
- $\vec{E} \equiv$  Campo eléctrico sobre la superficie gaussiana [N/C]
- $d\vec{s} \equiv$  Superficie infinitesimal de la superficie  $s$  [ $m^2$ ]
- $q_{int} \equiv$  Carga encerrada en el interior de la superficie gaussiana [C]

## 3.2. Representaciones gráficas de los modelos

Para la representación gráfica en Femm 4.2 de los prototipos realizados, hay que tener en cuenta que es un programa que trabaja en dos dimensiones (2D), por lo que hay que hacer una estimación de los prototipos. Para ello, activamos la opción de problema axisimétrico, cuando todos los semiplanos tomados a partir de cierto eje y conteniéndolo presentan idénticas características, y hacemos equivalentes nuestros modelos a modelos cilíndricos axisimétricos.

### 3.2.1. Levitador Triangular pequeño

Para el modelo triangular pequeño, calculamos su perímetro (3x250mm) y lo equiparamos al perímetro de una circunferencia ( $2\pi r$ ), para sacar el radio de la circunferencia equivalente, como se muestra en la Figura 11. Los modelos así tendrán el mismo peso.

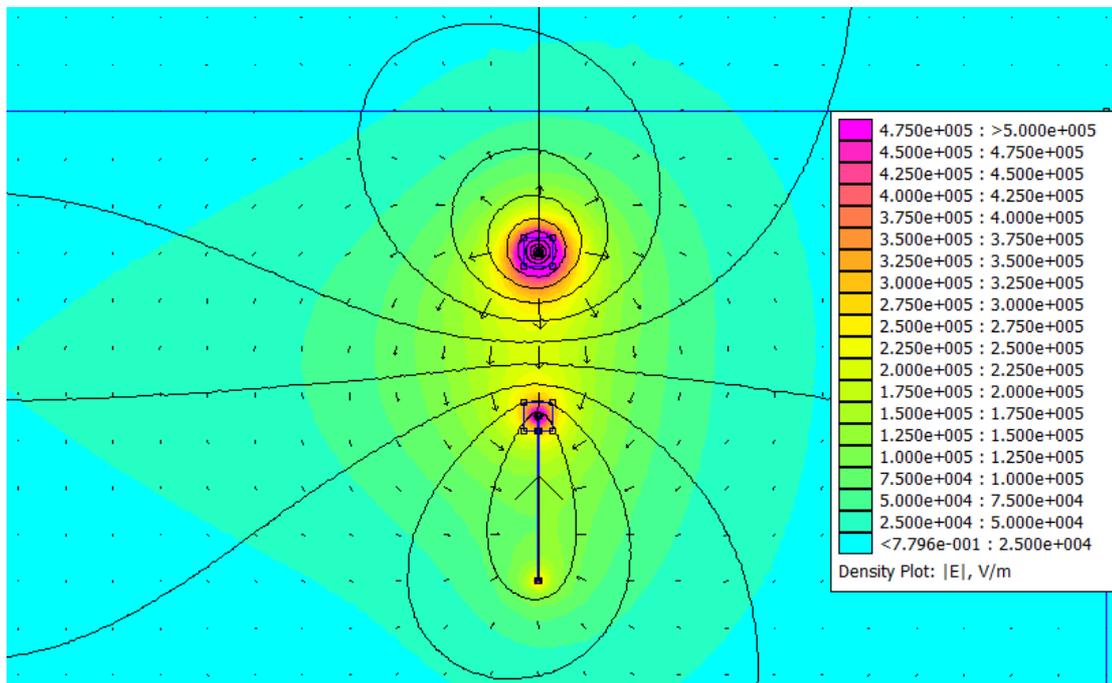


**Figura 11-** Equivalencia de perímetros de un triángulo con un círculo.

Perímetro triángulo  $\rightarrow 3 \times 250\text{mm} = 750\text{mm}$

Perímetro circunferencia  $\rightarrow 2\pi r = 750\text{mm} \rightarrow r = \frac{750\text{mm}}{2\pi} \rightarrow$

$\rightarrow r = 119,36\text{mm} \approx 120\text{mm}$



**Figura 12-** Representación gráfica y valores de  $E$  mediante Femm, del levitador triangular pequeño con bobina de cobre de 0,1 mm de diámetro.

### 3.2.2. Triangular Grande y Hexagonal

Para calcular los modelos triangular grande y hexagonal, hacemos lo mismo que con el triangular pequeño, pero para simular los radios interiores de estos dos modelos, lo vamos a equiparar a otra circunferencia interior, por lo que calculamos su perímetro tanto para la parte externa ( $3 \times 400 \text{ mm}$ ) como para la interna ( $3 \times 200 \text{ mm}$ ) y lo equiparamos al perímetro de una circunferencia ( $2\pi r$ ), para sacar el radio de la circunferencia equivalente.

$$\text{Perímetro triángulo grande} \rightarrow 3 \times 400 \text{ mm} = 1200 \text{ mm}$$

$$\text{Perímetro circunferencia grande} \rightarrow 2\pi r = 1200 \text{ mm} \rightarrow r = \frac{1200 \text{ mm}}{2\pi} \rightarrow$$

$$\rightarrow r = 190,99 \text{ mm} \approx 191 \text{ mm} \rightarrow \text{cogeremos } 190 \text{ mm para facilitarnos los cálculos.}$$

$$\text{Perímetro triángulo pequeño} \rightarrow 3 \times 200 \text{ mm} = 600 \text{ mm}$$

$$\text{Perímetro circunferencia grande} \rightarrow 2\pi r = 600 \text{ mm} \rightarrow r = \frac{600 \text{ mm}}{2\pi} \rightarrow$$

$$\rightarrow r = 95,49 \text{ mm} \approx 95 \text{ mm.}$$

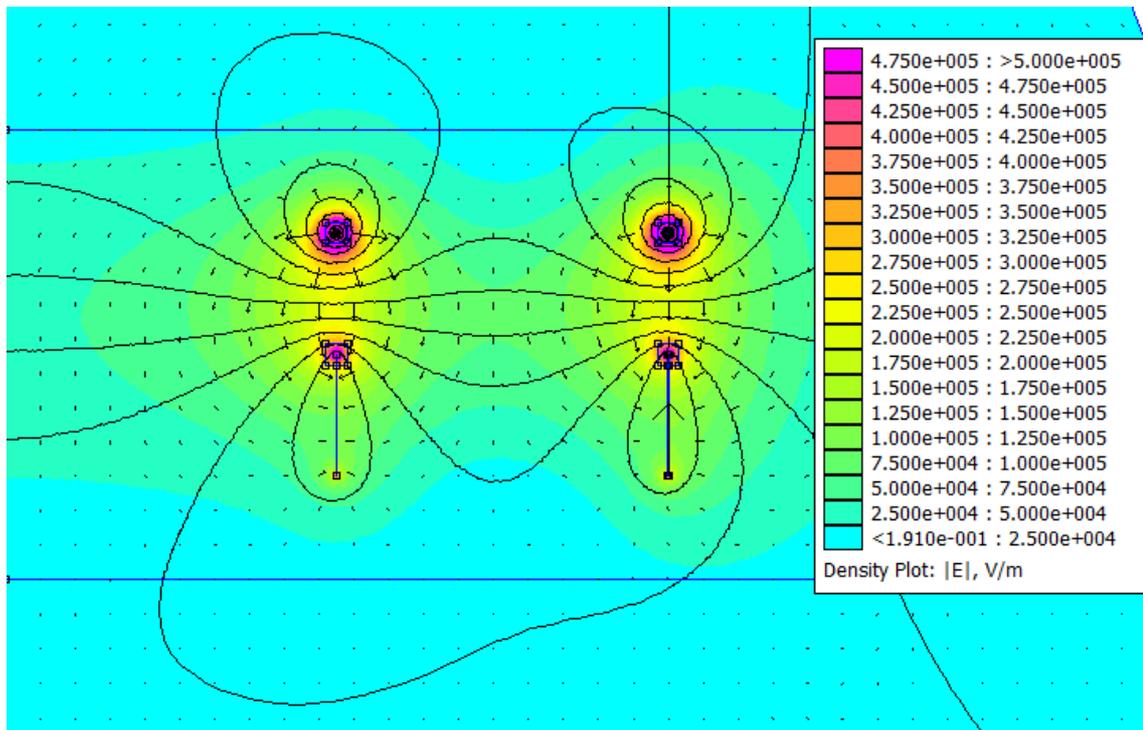


Figura 13- Representación gráfica mediante Femm, del levitador triangular grande con bobina de cobre de 0,1 mm de diámetro.

### 3.3. Comparativas gráficas de los levitadores

A continuación se van a exponer gráficamente las diferencias encontradas en los aspectos críticos del levitador, tanto la longitud del aluminio como la distancia entre los dos electrodos, para poder observar las diferencias.

#### 3.3.1. Con la longitud de aluminio

Se va a comparar la diferencia de la misma línea de fuerza del campo eléctrico en el caso de una longitud de aluminio de 3,5 cm, el cual consiguió levitar en el laboratorio, y otro de 3 cm de aluminio, que no consiguió elevarse en el laboratorio. Para ver si encontramos alguna diferencia llamativa.

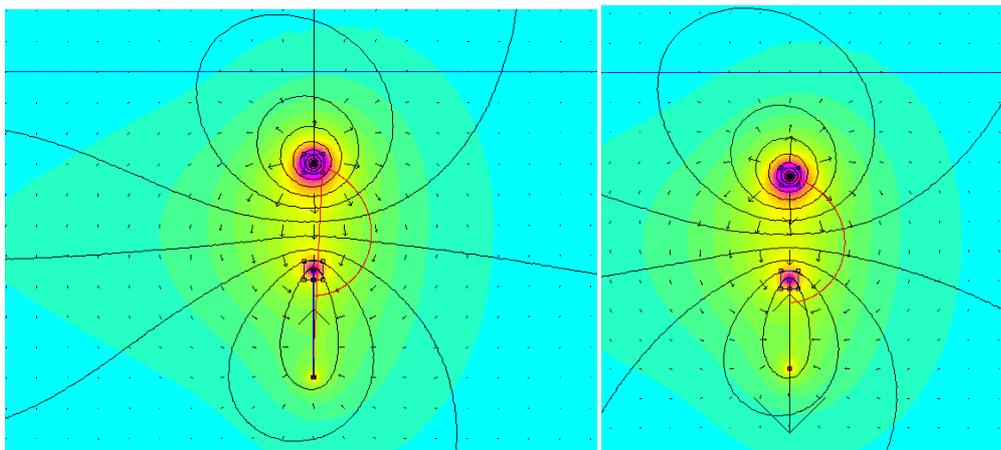


Figura 14- A la izda. levitador con 4 cm de falda de aluminio, y a la dcha. con 3,5 cm.

Usando un programa Lua, conseguimos tomar todos los valores del campo eléctrico en los puntos contenidos en las líneas señaladas con rojo en la figura 14, líneas de campo eléctrico, y los llevamos a una tabla Excel para hacer la comparativa.

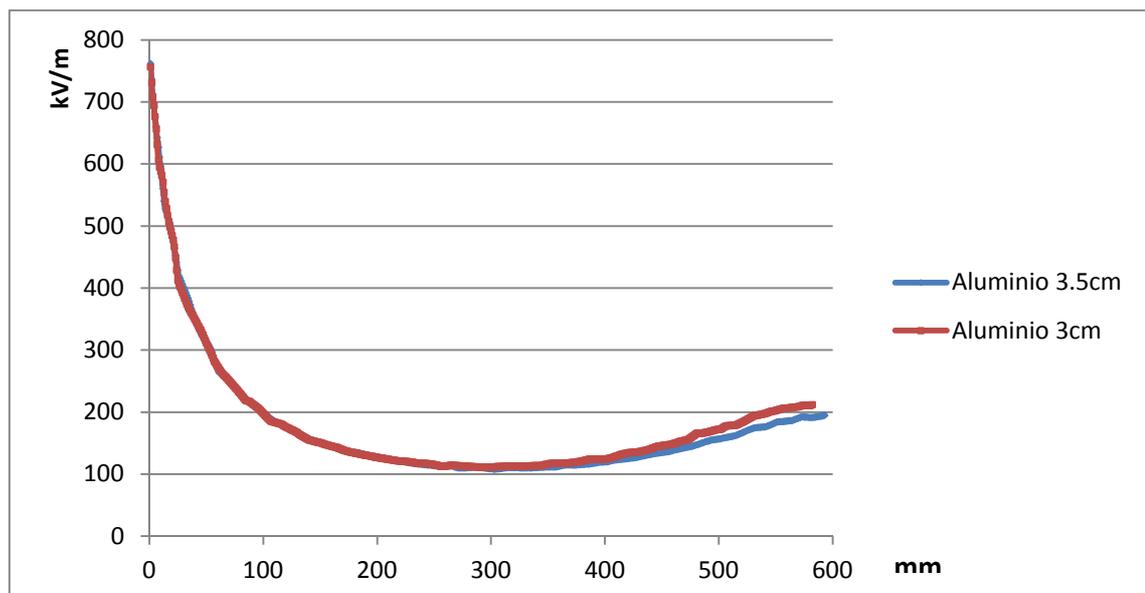


Figura 15- Gráfica comparativa de valores de  $E$  entre la misma línea de campo para dos levitadores con longitud de falda de aluminio diferente.

Podemos observar un mayor campo eléctrico para el de 3 cm de Aluminio, pero también es una curva más corta, por lo que tiene menos energía total, explicando porque únicamente levitaba el levitador con la falda de Aluminio de 3,5 cm

### 3.3.2. Con el espacio entre electrodos

Se va a comparar la diferencia de la misma línea de fuerza del campo eléctrico en el caso de una distancia entre electrodos de 4 cm, el cual consiguió levitar en el laboratorio, y otra de 3,5 cm, que no consiguió levitarse en el laboratorio. Para ver si encontramos alguna diferencia llamativa.

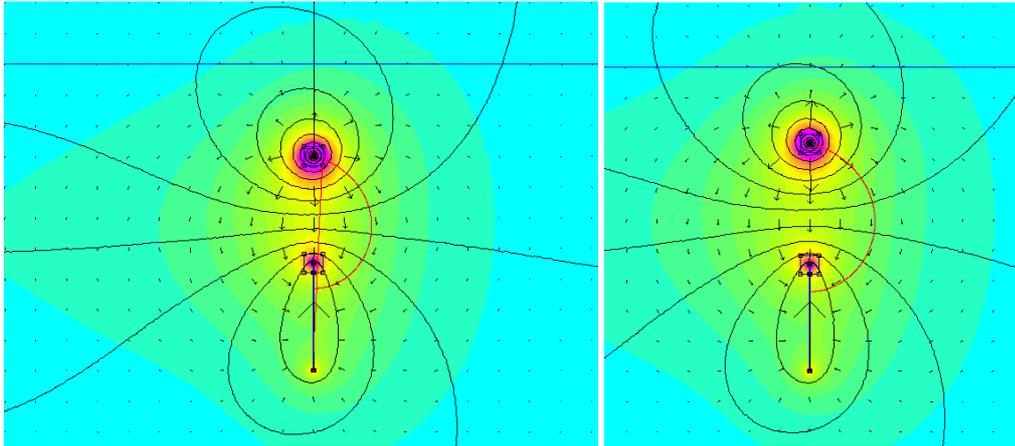


Figura 16- A la izda. levitador con 4 cm de distancia entre electrodos, y a la dcha. con 3,5 cm.

Usando el mismo programa anterior para obtener todas las medidas del campo eléctrico de todos los puntos por los que están formadas las líneas señaladas con rojo en la Figura 16, y llevándolos a una tabla Excel para hacer la comparativa obtenemos la siguiente gráfica.

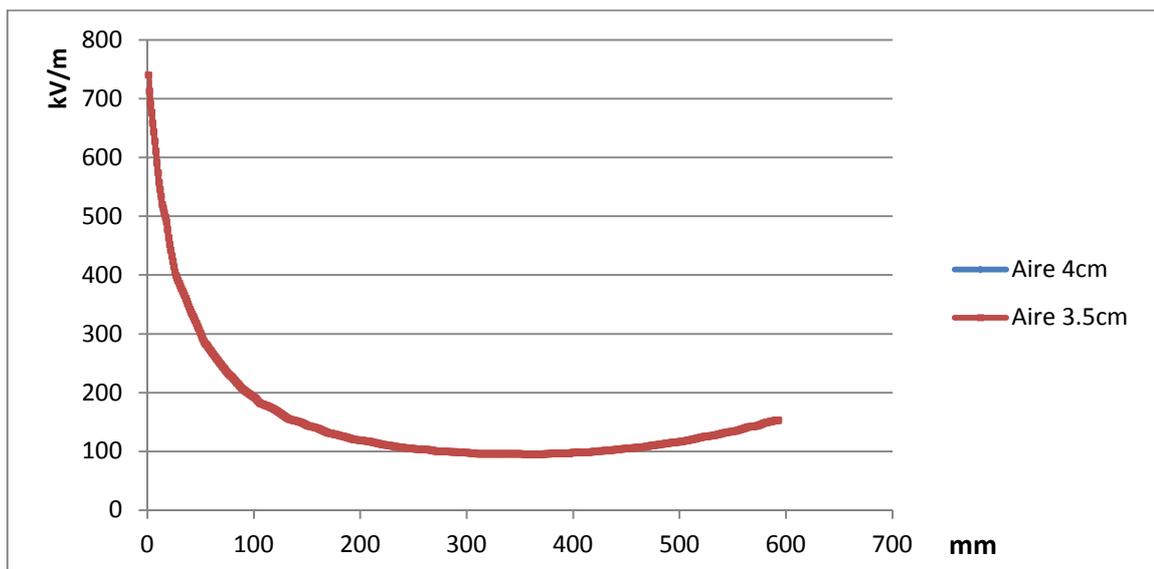
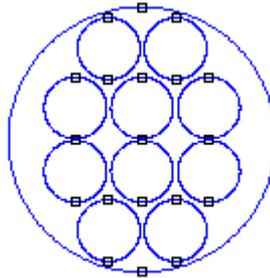


Figura 17- Gráfica comparativa de valores de  $E$  entre la misma línea de campo para dos levitadores con distancia entre electrodos diferente.

Podemos observar que no afecta prácticamente al campo eléctrico, puesto que ambas líneas están superpuestas, por lo que debe de ser un tema de ionización del aire.

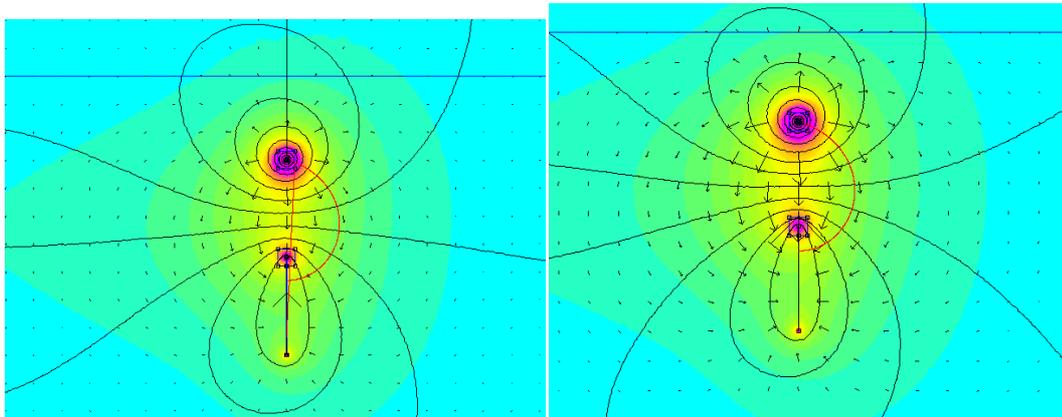
### 3.3.3. Con diferentes hilos de cobre

Ahora vamos a comparar el levitador con los dos posibles hilos de cobre a colocar, bobina de cobre de 0,1 mm de diámetro normal y corriente, con otro de 0,3 mm de diámetro aproximadamente, usado para la sintonización de frecuencias AM en radios viejas, y consta por 10 hilos de cobre más pequeños enlazados entre sí. La simulación de este cable se ha hecho de la según la siguiente imagen.



**Figura 18-** Hilo de bobina formada por 10 hebras de cobre finas arrolladas entre sí.

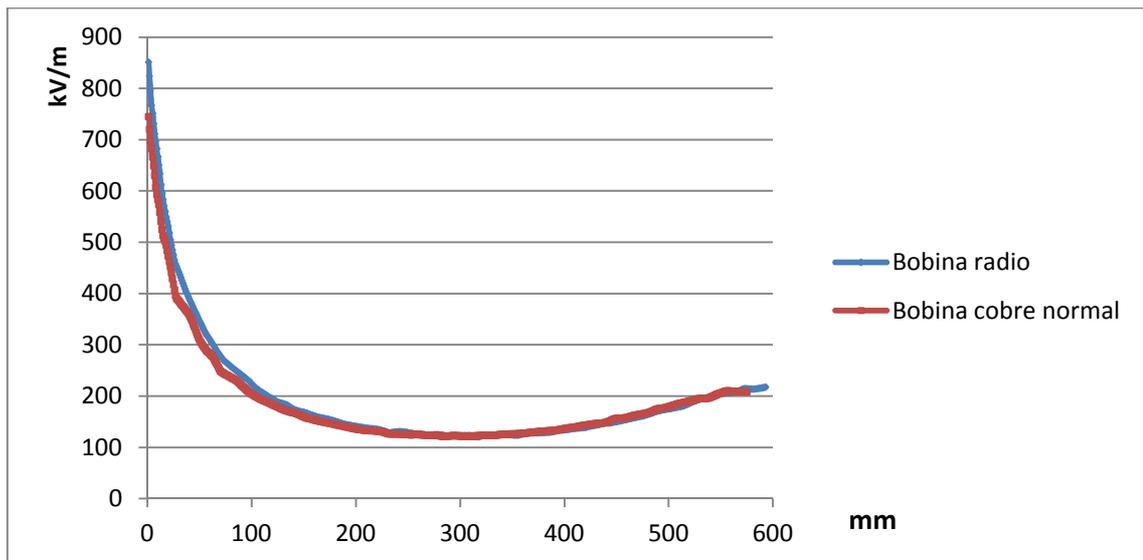
Como podemos observar en la imagen, está formado por 10 hebras de cobre más finas arrolladas entre sí, y el material que lo rodea debía ser un dieléctrico. Aquí ha sido simulado como si fuese aire.



**Figura 19-** A la izda. el levitador con hilo de cobre normal, y a la dcha. el levitador con el hilo de cobre de radio AM.

Simplemente observando la figura 19, podemos llegar a la conclusión de que el levitador con el hilo de cobre de bobina de radio AM produce un campo eléctrico mayor, dadas las dimensiones de las flechas del campo eléctrico y de los valores calculados.

Vamos a realizar la comparativa con Excel, de las dos líneas de campo señaladas con rojo en la figura 19, para hacer la comparativa y observarlo gráficamente.



**Figura 20-** Gráfica comparativa entre la misma línea de fuerza de dos levitadores uno con bobina de cobre normal, y otro con bobina de radio vieja.

Gráficamente podemos observar que inicialmente tiene un campo eléctrico superior el producido por la bobina de radio, que el de la bobina de cobre normal. Este resultado era totalmente previsible debido a las diferencias observadas, tanto a nivel acústico como a nivel de ozono producido, realizadas en el laboratorio.



# Conclusión

El proyecto realizado abarca varios aspectos constructivos del levitador y se han extraído las siguientes conclusiones.

En el capítulo 1 se expone los conceptos generales del levitador, tanto la historia como su funcionamiento, y posibles aplicaciones que podría tener si se llegara a desarrollar a nivel industrial. Lo que implicaría una auténtica revolución en los medios de transporte.

En el capítulo 2 se explica los prototipos construidos con los que se han realizado los diferentes experimentos, para averiguar las mejoras aplicables al rendimiento y los factores críticos para su funcionamiento

En el capítulo 3 se aplica el programa de cálculo por elementos finitos en dos dimensiones de libre distribución FEMM 4.2, para entender mejor la distribución del campo a lo largo del levitador, y comparar diferentes levitadores para observar gráficamente sus diferencias.

Los resultados de este trabajo permite mejorar el conocimiento que hasta ahora teníamos de:

- Factores críticos del funcionamiento del levitador o “lifter”.
- Mejoras en el rendimiento.

Los valores obtenidos de los diferentes levitadores en el programa FEMM 4.2 no son del todo precisos debido a que los modelos reales no son axisimétricos. Deberíamos utilizar un programa que pueda simular en 3D para obtener resultados más cercanos a los reales.

Respecto al futuro de este proyecto de investigación, expongo a continuación una serie de temas que pueden progresar la línea del trabajo.

*Análisis mediante un software de elementos finitos que pueda simular en 3D.*

*Análisis de las pérdidas en el hilo de cobre, o corona.*

*Análisis en un software de elementos finitos para probar nuevos materiales, tanto del hilo de cobre, o corona, como del espacio de aire (sustituyéndolo por un gas mas denso) y de la falda de aluminio, o colector.*

*Análisis de distancia óptima entre los dos electrodos.*



# Bibliografía

Para la realización de este proyecto se ha consultado y tomado datos de las siguientes fuentes:

[1] Thomas Townsend Brown “Bielfeld-Brown effect” en 1921

[2] [http://es.wikipedia.org/wiki/Propulsor\\_iónico](http://es.wikipedia.org/wiki/Propulsor_iónico)

[3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Lonocraft>

[4] <http://www.rexresearch.com/desev/desev.htm>

[5] <http://jnaudin.free.fr/html/liftbldr.htm>

[6] Raymond A. Serway. Electricidad y Magnetismo. 3a ed. México: McGRAW-HILL, 1998



# Anexos



## ANEXO 1: TRES EXPERIMENTOS DE LEVITACIÓN PARA SU REALIZACIÓN EN CLASES DE ELECTROMAGNETISMO

*C. Millán; J. Mur; J.S. Artal; A. Usón; J. Letosa*

**Departamento de Ingeniería Eléctrica**

Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza

C/ María de Luna 3, Edificio C "Torres Quevedo", 50018-Zaragoza

Tel: 976 76 25 89; FAX: 976 76 22 26

### Resumen

Un importante número de personas que deciden estudiar carreras experimentales, fundamentalmente Ingenierías y Física, lo hacen atraídos por los fenómenos físicos que han observado y han visto aplicados tecnológicamente en máquinas e instrumentos de uso diario. La ausencia de experimentos reales, insertados en el desarrollo de los contenidos teóricos de asignaturas, de primer curso, de Física (o electromagnetismo en el caso que nos ocupa), provoca en parte de los estudiantes una impresión de pérdida de tiempo, inutilidad del esfuerzo exigido y frustración. Hace varios cursos, los autores comenzaron a insertar en sus explicaciones teóricas pequeñas demostraciones o experimentos que podían transportarse fácilmente al aula y eran, de alguna manera, "espectaculares". La reacción de los estudiantes fue muy positiva, constatándose incluso casos de fuerte motivación como consecuencia de la observación de estos fenómenos. En los párrafos siguientes se describen tres de estos experimentos con el objeto de que puedan ser reproducidos y utilizados en clase por los docentes que estén interesados.

### 1. INTRODUCCIÓN

Este texto está dirigido a profesores de asignaturas de Electricidad y magnetismo o de Física general. Por ello, nos limitaremos a mostrar como realizar los experimentos, el material necesario y su factibilidad para la realización en el aula. No desarrollaremos aquí el material didáctico (histórico y explicativo) necesario para su utilización en clase, dando simplemente las referencias en que pueden encontrarse estos datos y quedando a disposición de cualquier lector o asistente al congreso que nos requiera mayor información. Explicaremos nuestra experiencia en la utilización de estos experimentos para la docencia en la materia y las principales ventajas que encontramos en su uso.

Los experimentos pueden utilizarse tanto en enseñanzas técnicas como científicas ya que ilustran principios básicos. Están orientados a enseñanzas universitarias pero también pueden utilizarse como demostraciones a estudiantes de secundaria que puedan despertar su motivación por posteriores estudios en la materia.

Las ventajas de utilizar experimentos de aula en la docencia de la Electricidad y Magnetismo y otras asignaturas básicas de la ciencia y la técnica ya ha sido discutida por los autores en otros trabajos [1] y está ampliamente avalada por la experiencia anglosajona [2] aunque poco utilizada aquí en España.

El argumento de la levitación, es decir cancelar la fuerza gravitatoria de los cuerpos, es didácticamente interesante en la enseñanza del electromagnetismo ya que despierta una viva curiosidad. Además permite demostrar conceptos teóricos básicos como las corrientes de Foucault inducidas, las fuerzas de Lorenz, y los fenómenos de inducción. Por otra parte, da pie a introducir aplicaciones prácticas de mucho interés tecnológico en la actualidad como los motores lineales de inducción, el transporte



terrestre mediante levitación magnética, los cojinetes magnéticos de baja fricción, el almacenamiento de energía en volantes de inercia levitados o la fundición de metales en levitación.

Aparte de los tres experimentos presentados aquí, durante el curso se explican también cuestiones relacionadas con la levitación de superconductores mediante el efecto Meissner, de levitación de materiales diamagnéticos mediante campos magnéticos muy intensos y de la levitación por atracción o por repulsión de imanes permanentes. Nuestra experiencia es que los experimentos en el aula ayudan a mantener el interés de los estudiantes y a conectar la teoría con cuestiones más aplicadas.

## **2. EL EXPERIMENTO DE ELIHU THOMSON O DEL SALTO DEL ANILLO**

Este experimento fue construido a partir de la lectura del trabajo citado en [3]. Un estudiante se encargó de construir una versión simplificada de la mostrada dicho artículo, como trabajo de asignatura, y siendo posteriormente mejorado por otros estudiantes. Hace varios años que utilizamos el prototipo en clase e incluso proponemos la resolución de un problema basado en este efecto, como se explica después. Los resultados hasta la fecha los consideramos satisfactorios.

### **2.1. Descripción del experimento**

El experimento del salto del anillo fue realizado por primera vez por Elihu Thomson en el American Institute of Electrical Engineers de Nueva York en mayo de 1887, repetido en París en 1889 y explicado detalladamente por Fleming en 1891. Consta de una bobina enrollada en torno a un vástago de hierro, ocupando únicamente la parte inferior de él (véase Figura 2). En la parte superior se colocan aros de distintos materiales y pesos. Si se alimenta con una fuente de tensión continua se observa un salto del anillo, tanto al cerrar como al abrir el circuito. En el caso que nos ocupa se alimenta con una tensión alterna de frecuencia de red y amplitud regulable, mediante un autotransformador, que produce una levitación estable del aro, si éste tiene un peso suficientemente bajo.

### **2.2. Detalles constructivos**

La construcción de un prototipo para este experimento es muy simple. Solo es necesario un vástago, preferentemente de sección circular, y aros de diversos materiales no magnéticos que tengan cierta holgura respecto al vástago. El vástago puede ser macizo o compuesto por un conjunto de alambres para evitar su calentamiento por efecto de las corrientes parásitas. Es fundamental que sea de material ferromagnético de alta permeabilidad (hierro dulce, acero con un alto contenido de hierro,...). Por último, se necesita construir una bobina que se adapte a la parte inferior del vástago. La sección del cable de cobre hay que seleccionarla con cuidado, ya que dependiendo del material del núcleo será preciso que la bobina tenga un alto número de vueltas y que la corriente eléctrica que circule sea intensa.

### **2.3. Explicación**

La explicación de este experimento está en las corrientes que se producen en el aro inducidas por la variación de flujo magnético producido por la bobina, tanto en régimen transitorio como en régimen senoidal permanente. La fuerza ascendente aparece como consecuencia de la acción del campo magnético dispersado en dirección no axial sobre la corriente inducida en la bobina. Para más detalles véase [3].

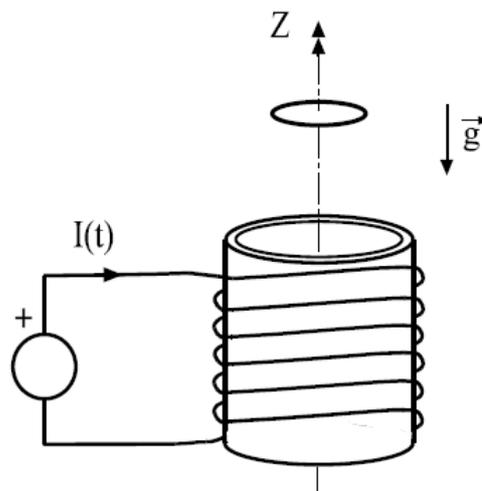
## 2.4. Utilidad didáctica

Su utilidad está en la explicación de las corrientes inducidas en un circuito cerrado por variación de flujo, según predice la ley de Faraday y Lenz. Nosotros, desde hace varios años, proponemos para su resolución en clase el problema cuyo enunciado se muestra después. Este problema se resuelve en la pizarra, con la colaboración de los estudiantes, y acto seguido se demuestra el experimento en la misma aula.

El enunciado del problema utilizado para explicar este experimento es el siguiente:

“Sobre un solenoide de eje vertical, recorrido por una corriente eléctrica  $I(t)$ , variable con el tiempo, se sitúa un anillo conductor de cobre, cortocircuitado, coaxial con el solenoide, de radio  $R_a = 2 \text{ cm}$ , tal como se representa en Figura 1. La resistencia eléctrica total del anillo es  $R_e = 650 \mu\Omega$ . El campo magnético creado por el solenoide en los puntos del entorno del anillo tiene una componente axial y otra componente radial, ambas dependientes del tiempo. Su expresión en coordenadas cilíndricas es:

$$\{\vec{B}\}_{r\phi z} = \alpha * t * \vec{u}_r + \beta * t * \vec{u}_z; 0s \leq t \leq 0.1 s; \alpha = 284 * 10^{-3} \frac{T}{s}; \beta = 6,2 \frac{T}{s}$$



**Figura 1.-** Esquema del sistema propuesto en el enunciado del problema.

- Calcular, para cualquier instante  $t$ , la intensidad de corriente eléctrica inducida,  $I_a$ , que circulará por el anillo, indicando claramente su sentido de circulación.
- Experimentalmente se observa que en esta situación y en el instante  $t = 80 \text{ ms}$  el anillo levita, como consecuencia de la aparición de una fuerza de origen electromagnético sobre el anillo, del mismo módulo y dirección que la debida a la aceleración de la gravedad, pero de sentido contrario. Si la masa del anillo es  $m_a = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ , calcular la corriente eléctrica inducida que estará circulando por el anillo, comparándola con la obtenida en el apartado anterior.”

El material necesario para realizar la demostración en clase se reduce al prototipo más un autotransformador que proporcione corrientes hasta 4 A (Figura 2). Aunque el autotransformador es un elemento pesado, todavía el conjunto resulta transportable. Puede reducirse el peso construyendo una fuente específicamente diseñada para alimentar este experimento.



**Figura 2.-** A la izquierda prototipo para experimento del salto del anillo con aro levitando. A la derecha autotransformador necesario para el experimento.

Una buena referencia sobre este fenómeno está en el curso interactivo de Física en Internet de Angel Franco García de la Escuela Universitaria de Eibar [4]. Dicha página web posee simulaciones por ordenador que ayudan a la comprensión del tema.

### 3. LEVITACIÓN DE BOBINAS SOBRE UNA LÁMINA METÁLICA NO MAGNÉTICA

La idea sobre la construcción de este experimento partió de la lectura del trabajo citado en [5]. Este experimento es muy ilustrativo sobre la influencia de las corrientes parásitas de Foucault que aparecen en la lámina no magnética. La bobina original fue construida por un estudiante y después se realizaron perfeccionamientos sucesivos. De este modo la bobina inicial requería 40 A para su funcionamiento, mientras que las actuales funcionan con corrientes entre 4 A y 8 A, lo que permite su realización en clase.

#### 3.1. Descripción del experimento

En este experimento se observa que al colocar una bobina plana, centrada sobre una lámina conductora no magnética, y alimentarla con corriente alterna, ésta levita. Es posible conseguir una separación de más de 1 cm con el prototipo desarrollado. La posición de la bobina con respecto a la lámina no es estable por lo que se requieren topes mecánicos de estabilización.

Para ninguna de las bobinas construidas se ha conseguido un régimen de funcionamiento continuo ya que la densidad de corriente que es necesario introducir en los cables es demasiado elevada. Esto hace que tras un periodo relativamente corto de tiempo ( $\square$  1 minuto) la bobina se caliente considerablemente, siendo necesario desconectar el equipo. No obstante, el tiempo es suficiente para llevar a cabo la demostración.

### 3.2. Detalles constructivos

La sección de los conductores de la bobina se ha de escoger en función de la corriente máxima que pueda suministrar la fuente. La densidad de corriente es  $J \leq 30 \text{ A/mm}^2$  y el producto amperios-vuelta es  $NI \leq 1720 \text{ Av}$  para el prototipo de cobre;  $J \leq 12 \text{ A/mm}^2$  y  $NI \leq 1360 \text{ Av}$  para el de aluminio. Las bobinas construidas son aproximadamente de 7 y 11 cm de diámetro interior y exterior, un centímetro de altura (el caso más favorable es realizar una bobina de aluminio bastante plana, con un factor NI elevado, sobre una plancha de cobre de aproximadamente 1 cm).

Los datos de los prototipos utilizados en clase son:

Prototipos	$\varnothing_{\text{cable}}$	$I_{\text{max}}$	Nº vueltas	Peso
Aluminio	0,9 mm	8 A	170	87 g
Cobre	0,4 mm	4 A	430	135 g

**Tabla 1.** Parámetros de los prototipos realizados.

También es necesaria una lámina de material no magnético de espesor aproximado 1 cm, y área mucho mayor que la bobina. Nosotros hemos construido la lámina de aluminio a partir de chapas de 1mm de espesor apiladas.

Por último hemos utilizado un autotransformador para alimentar la bobina a través de la red. Para las bobinas construidas se inyecta una corriente máxima de 8 A, obteniéndose separaciones entre la bobina y la lámina del orden de 1 cm, como se aprecia en Figura 3.



**Figura 3.-** Detalle de una bobina levitando sobre una placa de aluminio.

### 3.3. Explicación

La explicación a este fenómeno reside en las corrientes de Foucault que se inducen en la lámina no magnética debido a la variación de flujo magnético que sobre ella produce la bobina. Estas corrientes originan a su vez un campo magnético que crea la fuerza de repulsión sobre la bobina. Si esta fuerza supera su peso la bobina levita. Es



necesario que la placa sea de material no magnético, ya que sino domina el efecto de atracción debido a la orientación de los dipolos magnéticos del material.

### **3.4. Utilidad didáctica**

Las corrientes inducidas en medios conductores debido a variación del campo magnético en su entorno son difíciles de entender por los estudiantes. Por ello es importante disponer de recursos experimentales para su explicación. Nosotros, entre otros, usamos este experimento para la ilustración de las corrientes parásitas inducidas.

Este problema puede resolverse matemáticamente mediante el método de las imágenes, de la misma forma que se hace con las cargas electrostáticas en la proximidad de superficies conductoras. Es también un ejercicio típico de resolución por elementos finitos.

En nuestro caso, al impartir un curso básico de electromagnetismo, simplemente lo utilizamos como una demostración del efecto de las corrientes parásitas resaltando su posible aplicación a sistemas de tracción de vehículos terrestres basados en levitación magnética.

En cuanto a los recursos necesarios para su realización en el aula, decir que es necesaria la bobina, la lámina de aluminio y un autotransformador.

## **4. EFECTO BIEFELD-BROWN O LEVITACIÓN ELÉCTRICA DE UN CONDENSADOR ASIMÉTRICO**

Este experimento se ha construido este mismo curso, encontrándose todavía está en fase de experimentación y ensayo de sus posibilidades didácticas. El primero de los autores de esta comunicación encontró información sobre este sistema, denominado "lifter" en la literatura inglesa y realizó un prototipo. Dado que se trata de un experimento menos conocido que los anteriores y su fundamento teórico no está totalmente aclarado daremos una breve explicación sobre su historia y fundamentos que basaremos esencialmente en [6] y [7].

### **4.1. Descripción del experimento**

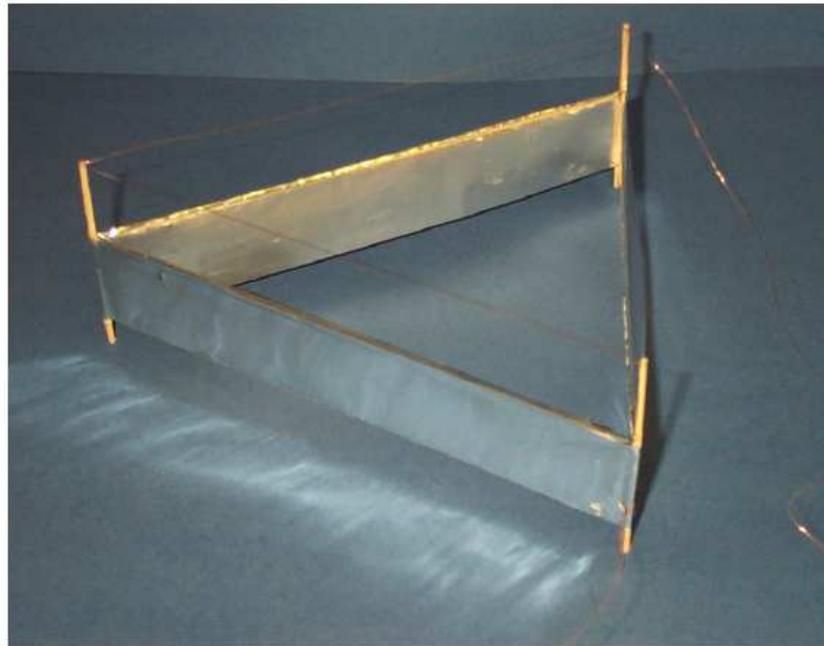
En la década de 1920 Thomas Townsend Brown, experimentando con un tubo de rayos X, denominado tubo de Coolidge descubrió que sobre el tubo se ejerce una fuerza neta cuando se conecta. Inicialmente creyó haber encontrado una relación entre las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias, patentando el descubrimiento en 1928. El descubrimiento se atribuye a Brown y a su profesor P. A. Biefeld, denominándose efecto Biefeld-Brown.

En la actualidad el fenómeno se describe del siguiente modo: Cuando se establece un alto voltaje entre los electrodos de un condensador asimétrico se observa una fuerza neta sobre dicho condensador. Entenderemos por un condensador asimétrico, aquel en que las dimensiones físicas de ambas placas son muy diferentes. Basándose en este fenómeno es posible construir prototipos en los que la fuerza originada supera su peso, como el que se presenta en esta comunicación y otros que pueden encontrarse en internet [7].

Se observa que siempre aparece una fuerza dirigida hacia el electrodo pequeño y que dicha fuerza aparece independientemente del signo de la tensión DC utilizada.

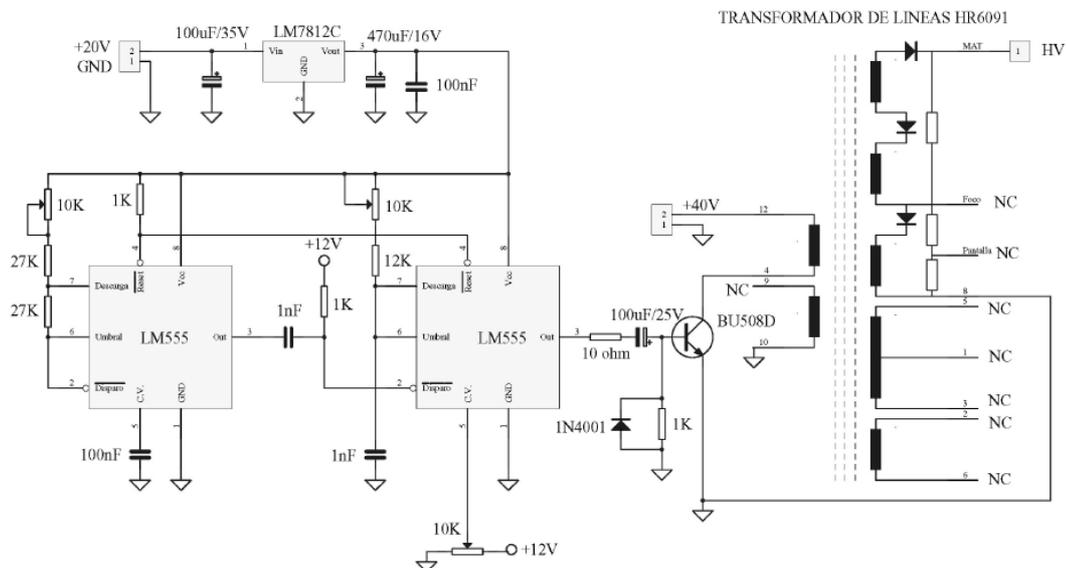
## 4.2. Detalles constructivos

Debe construirse un prototipo muy ligero para el condensador asimétrico, que pese lo menos posible (unos pocos gramos). Para ello una posibilidad es construir el electrodo grande con papel de aluminio y el electrodo pequeño con un cable muy fino. El soporte físico y el aislamiento entre ambos electrodos puede realizarse con palillos (véase Figura 4). Son posibles geometrías diversas.



**Figura 4.-** Prototipo de condensador asimétrico

Como generador de alta tensión se utiliza un transformador de muy alta tensión (MAT) de televisión, que junto a una pequeña circuitería electrónica consigue una tensiones en torno a los 30 kV. El esquema de un posible circuito de alimentación del MAT se muestra en Figura 5.



**Figura 5.-** Esquema de operación del transformador de MAT



Las distancias entre los electrodos tienen que ser suficientes para que no se produzca ruptura dieléctrica entre ambos electrodos; así que en caso de utilizar una fuente de 30 kV deben separarse un poco más de 1 cm. Para una información más detallada véanse las referencias citadas o ponerse en contacto con los autores.

### 4.3. Explicación

Hasta la fecha no existe una explicación totalmente satisfactoria sobre el mecanismo detallado en el que se basa este experimento. Esto hace que su potencial en aplicaciones tecnológicas sea aún desconocido.

La explicación más habitual es la basada en el intercambio de cantidad de movimiento en los electrodos debido al "viento iónico" generado por acción del elevado campo eléctrico en la región de dichos electrodos. Bajo un alto voltaje DC electrones o iones pesados son arrancados de un electrodo y acelerados por el campo eléctrico hasta que se recogen en el otro. La fuerza de reacción es la que se observa sobre el condensador. Los cálculos muestran que la fuerza debido a este fenómeno es, al menos, tres ordenes inferior a la que se observa experimentalmente [véase p. 11 de 6]. Mientras que este fenómeno no puede explicar los experimentos en aire debe tenerse en cuenta para los experimentos en vacío.

Otra explicación tiene que ver con la deriva de portadores de carga del dieléctrico que rodea los electrodos del condensador en presencia del campo eléctrico. Esta es una explicación que no entra en el mecanismo detallado del fenómeno y que, con cálculos realizados, con gruesas aproximaciones, da un orden de magnitud para la fuerza coherente con el experimento. No obstante requiere mayores estudios teóricos y experimentales. Según esta teoría, debido a que el electrodo pequeño tiene un radio de curvatura mucho menor, el campo eléctrico a su alrededor es mucho mayor que el que aparece en las proximidades del otro electrodo. Esto hace que ionice parcialmente las moléculas de aire que lo rodean, generalmente electrones e iones pesados con carga positiva. Dado que los electrones tienen una masa muy inferior, presentan una movilidad muy superior a los iones. Esto provoca la creación de una zona de carga espacial, alrededor del electrodo pequeño, que atrae al otro electrodo desplazando el conjunto. Al desplazarse, una nueva nube de carga sustituye a la anterior entorno al electrodo pequeño. Esta explicación es fácil de razonar cuando el electrodo pequeño es el positivo pero resulta difícil de entender en el caso contrario.

Los autores de la referencia [6] proponen una tercera explicación, basada en las ecuaciones de movimiento de un fluido dieléctrico en un campo eléctrico externo creado por conductores cargados. En este modelo, el fluido dieléctrico es el aire parcialmente ionizado que rodea los electrodos y éstos son los conductores cargados que crean el campo eléctrico. En p. 17 y siguientes de [6] puede verse la deducción realizada. Esto es sólo un cálculo teórico que requiere constatación experimental, como indican sus autores.

### 4.4. Utilidad didáctica

Este experimento puede utilizarse como parte de un conjunto de demostraciones de levitación, que pueden incluir los dos experimentos anteriores y otros de levitación con imanes permanentes, diamagnética o de efecto Meissner. Concretamente no hemos utilizado aún este experimento con estudiantes, pero los experimentos de levitación son bien acogidos tanto en demostraciones divulgativas del electromagnetismo como parte de las explicaciones teóricas.



Otra forma de utilización es al describir los fenómenos de ruptura dieléctrica, cerca del final de la electrostática. Puede introducirse al hilo de la ionización parcial del aire como una aplicación, junto con los generadores de ozono y otros. El problema es que no se disponga de una explicación teórica suficientemente sencilla.

Para la realización de este experimento solamente es necesario el transformador de MAT con su circuitería de operación, que puede construirse en un pequeño aparato de poco peso, y el prototipo de "lifter". Todo ello es perfectamente transportable, como se mostrará en el transcurso del congreso.

## 5. CONCLUSIONES

Se han descrito tres experimentos de levitación eléctrica y magnética muy fáciles de construir, baratos y ligeros, que pueden transportarse y realizarse durante una clase convencional de teoría. Frente a otros recursos docentes, como el empleo de visualizaciones, simulaciones numéricas, estas demostraciones tienen la ventaja de ser observadas directamente por los estudiantes, quienes pueden incluso probar posteriormente a realizarlas ellos mismos. Esta inmediatez y proximidad física permite al docente justificar la necesidad de aprender los conceptos teóricos que está enseñando como un paso previo para entender, construir e incluso perfeccionar experimentos como los observados.

Los resultados de la incorporación de estos experimentos han sido muy positivos. Es importante recordar que en los primeros cursos universitarios los estudiantes carecen de base matemática suficiente para trabajar con ecuaciones diferenciales y que, por lo tanto, se les hace muy difícil conectar la matemática con la que se trabaja en las asignaturas con la realidad física que les rodea. Este recurso docente permite la justificación de unos desarrollos teóricos-matemáticos, que difícilmente son aceptados por los estudiantes cuando comienzan sus estudios técnicos. Son también un importante elemento de motivación, que despierta la curiosidad de estudiantes apáticos o desinteresados.

## Referencias

- [1] Usón A., Artal J.S., Mur J., Letosa J. y Samplón M.; "Incorporación de experimentos en las clases teóricas de electromagnetismo"; XI congreso de innovación educativa en las enseñanzas técnicas, CIETT'03; Vilanova i la Geltrú; julio, 2003.
- [2] Pueden encontrarse referencias a experimentos de aula realizados en USA clasificados en la página de Physics Instructional Resource Association, (PIRA) <http://www.wfu.edu/physics/pira/index.htm> o en <http://www.wfu.edu/physics/pira/webring/PIRAwebring.html>
- [3] Barry N., Casey R.; "Elihu-Thmsom's jumping ring in a levitated closed-loop control experiment"; IEEE Transactions on Education, V. 42, N. 1, pp. 72- 80; February, 1999.
- [4] Franco García Angel; "Curso de física por ordenador", Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar, <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccion/anillo/anillo.htm> (Última actualización: 7 de Mayo de 2004)
- [5] Thompson M. T.; "Electrodynamic magnetic suspension-Models, scaling laws, and experimental results"; IEEE Transactions on Education, V. 43, N. 3, pp. 336-342; August, 2000.



- 
- [6] Bahder B., Fazi C.; "Force on an asymmetric capacitor"; Army Research laboratory, ARL-TR-3005; june 2003. Este informe puede descargarse en la dirección dada en la referencia siguiente.
- [7] Referencias completas sobre este experimento pueden encontrarse en:  
<http://jnaudin.free.fr/lifters/main.htm> (last update 13 april 2004).



## ANEXO 2: APLICACIONES DE LA PATENTE DEL LEVITADOR

Este invento se refiere a la mejora de la aeronave más pesada que el aire, y más específicamente a las estructuras que son capaces de cualquier vuelo estacionario o en movimiento en cualquier dirección a altas altitudes por medio de descarga iónica. La presente invención es una mejora del conocido generador electrostático de los vientos, usada de una manera novedosa para suministrar propulsión y fuerzas de sustentación para una aeronave más pesada que el aire.

Naves de los tipos "heroin" revelaron que áreas efectivas de varios metros cuadrados han volado con éxito y las plataformas serán de gran tamaño ya que la fuerza de sustentación es proporcional al área a través del cual grandes cantidades de masas de aire son aceleradas hacia abajo desde electrodos descargados a electrodos de colección, siendo esta última una pantalla de malla, barras, cintas o cualquier otra estructura que proporciona la máxima área de recolección de electrodos con perforaciones, ranuras u otro tipo de apertura para permitir que el aire pase a través con un mínimo de resistencia.

Este levitador puede servir como plataforma que estaría estacionada sobre la Tierra por largos periodos de tiempo. La potencia de salida de generadores de microondas, como magnetrones, junto con los tubos de amplificador de potencia de alta capacidad, puede ser transmitida al levitador mientras está en el aire, o la nave puede llevar su propia fuente de alimentación.

Un objetivo principal para el desarrollo de esta nave es proporcionar un espacio limitado por la estructura, preferiblemente en el centro de la nave, para la instalación del equipo electrónico, para la planta de energía, y la tripulación que la usa.

Otro objetivo pendiente es proporcionar a un nuevo levitador un ligero refuerzo para formar una estructura lo suficientemente rígida para hacer frente a las cargas dinámicas y estáticas y para mantener la distancia deseada entre los cables emisores de descarga y la red de recolección.

Está pendiente de desarrollar una nueva configuración y disposición de los cables de emisión para asegurar un espaciado uniforme de la red de recolección y proporcionar un número máximo de partículas ionizadas para la producción de la sustentación deseada.

Un levitador mejorado contendría alguna estructura, como diédrica, que proporciona estabilización de la nave durante el vuelo. El diedro puede ser positivo o negativo dependiendo de si el vuelo es suspendido o el movimiento horizontal de la aeronave es el principal factor de rendimiento de la nave. Una estructura de cubierta múltiple puede utilizarse cuando se desea incrementar la fuerza de elevación, y el diedro puede ser proporcionado en dos o más direcciones relacionadas angularmente para proporcionar estabilidad en todas las direcciones.

Otro objetivo todavía es proporcionar estructuras auxiliares de descarga iónica montadas para el movimiento relacional que está orientado para proporcionar una fuerza de propulsión horizontal y fuerzas de dirección que pueden cambiar el rumbo de la nave. Mediante el montaje de este tipo de estructuras auxiliares para girar sobre el eje vertical, la nave puede ser usada para girar en un plano horizontal sobre un eje vertical pasando a través de la nave para proporcionar así un aparato de exploración o búsqueda de objetivo. Un movimiento de exploración similar puede conseguirse mediante el montaje de estructuras auxiliares que giren alrededor de un eje horizontal. Un objetivo adicional de esta invención reside en la provisión de una nueva palanca de control usando impedancias de variables eléctricas para controlar la postura y para



manipular la nave a través de la variación del voltaje aplicado a diferentes puntos de la nave.

Un Segundo objetivo principal de esta presente invención es proporcionar una combinación de un levitador y un sistema de antena por energía de frecuencia de radio en la que la estructura del levitador está dispuesta de manera que sirva en su totalidad o en parte como una estructura de un sistema eficiente de antena electromagnética. De acuerdo con la invención de este objetivo, el dispositivo contiene una o más antenas que pueden ser usadas para la transmisión de señales de comunicación, para la detección, seguimiento y/o la identificación y para la eventual destrucción a través de la colisión de aproximaciones aéreas o vehículos espaciales o misiles y similares. La estructura del levitador puede utilizarse, por ejemplo, como el elemento de antena principal, como una serie de elementos dirigidos o reflectantes o como un elemento parásito y puede tener la forma para proporcionar matrices de las parábolas, reflectores de esquinas, cuernos o lentes y adaptarse para transmitir un único o completo espectro de frecuencias de extremadamente bajas a las más altas frecuencias incluidas los infrarrojos.

Otro objeto de esta invención es proporcionar una combinación de levitador con antena con medios de exploración para la detección y/o seguimiento de vehículos o misiles aéreos. Esta combinación puede también incluir un adecuado servocontrol y otros equipos convencionales, ya sea en el levitador o en la estación de tierra cercana para ocasionar el "bloqueo" automáticamente y/o interponerse en el camino de un "inminente" vehículo o misil.

Un objetivo adicional es proporcionar una antena que constantemente bloquee haces de radiación, tales como un microondas o un haz de luz, por ejemplo, proyectada desde el suelo o una aeronave en vuelo para cambiar la posición del levitador en vuelo.

Estos y otros objetos del invento se harán más evidentes según la demanda.



## **ANEXO 3: FORCE ON AN ASYMMETRIC CAPACITOR**

**Army research Laboratory by Thomas B. Bahder and Chris Fazi.  
March 2003**

### **Contents**

#### **Figures**

#### **Acknowledgments**

- 1. Introduction**
- 2. Biefeld-Brown Effect**
- 3. Preliminary Experiments at ARL**
- 4. Previously Proposed Explanations for the Biefeld-Brown Force**
  - 4.1 Ionic Wind: Force Too Small
  - 4.2 The Ion Drift Picture: Scaling Theory of Force
- 5. Thermodynamic Analysis of the Biefeld-Brown Force**
- 6. Summary and Suggested Future Work**

#### **References**

#### **Appendix A. Short Patent History Dealing With Asymmetric Capacitors**

#### **Appendix B. Force on Asymmetric Capacitor in Vacuum**

#### **Report Documentation Page**



## Figures

Figure 1. Excerpt from Thomas Townsend Brown British Patent No. 300,311 entitled "Method of Producing Force or Motion," issued on November 15, 1928

Figure 2. Excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 2949550 entitled "Electrokinetic Apparatus," issued on August 16, 1960

Figure 3. Excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 2949550 entitled "Electrokinetic Apparatus," issued on August 16, 1960

Figure 4. Figure excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 2949550 entitled "Electrokinetic Apparatus," issued on August 16, 1960

Figure 5. Excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 3018394 entitled "Electrokinetic Transducer," issued on January 23, 1962

Figure 6. Excerpt from Thomas Townsend Brown Patent No. 3,187,206, entitled, "Electrokinetic Apparatus," issued on June 1, 1965

Figure 7. Our first attempt at making an asymmetric capacitor (a "lifter"), according to the specifications given by J. Naudin on Internet Web site <http://jnaudin.free.fr/>

Figure 8. The second attempt at making a lighter asymmetric capacitor

Figure 9. Flat-shaped (or wing-shaped) asymmetric capacitor used to test whether closed electrode geometry is needed

Figure 10. The capacitor consisting of a single wire. No bias applied

Figure 11. The wire capacitor showing displacement from the vertical. 35 kV applied

Figure 12. Schematic diagram of the side view of electric field for the asymmetric capacitor in Figure 9



## Acknowledgments

One of the authors (T.B.B.) thanks W. C. McCorkle, Director of Aviation and Missile Command, for the suggestion to look at the physics responsible for the net force on an asymmetric capacitor. The authors want to thank Jean-Louis Naudin (JLN Labs) for his permission to reproduce the letter of Thomas Townsend Brown in Appendix B. One of the authors (T.B.B.) is grateful for personal correspondence with Jean-Louis Naudin (JLN Labs).

## 1. Introduction

Recently, there is a great deal of interest in the Biefeld-Brown effect, i.e., when a high voltage (~30 kV) is applied to the electrodes of an asymmetric capacitor, a net force is observed on the capacitor. By asymmetric, we mean that the physical dimensions of the two electrodes are different, i.e., one electrode is large and the other small. According to the classical Biefeld-Brown effect (see Brown's original 1960, 1962, and 1965 patents cited in Appendix A, and a partial reproduction in section 2), the largest force on the capacitor is in a direction from the negative (larger) electrode toward the positive (smaller) electrode. Today, there are numerous demonstrations of this effect on the Internet in devices called "lifters," which show that the force on the capacitor exceeds its weight [1]. In fact, these experiments indicate that there is a force on the capacitor independent of polarity of applied voltage. In the future, the Biefeld-Brown effect may have application to aircraft or vehicle propulsion, with no moving parts. At the present time, there is no accepted detailed theory to explain this effect, and hence the potential of this effect for applications is unknown. The authors are aware of only two reports [2] and theoretical papers that address such issues [3, 4].

In section 2, we describe the history of the Biefeld-Brown effect. The effect of a net force on an asymmetric capacitor is so surprising that we carried out preliminary simple experiments at the U.S. Army Research Laboratory (ARL) to verify that the effect is real. The results of these experiments are described in section 3. Section 4 contains estimates of the force on the capacitor for the case of ballistic ionic wind and drift of carriers across the capacitor's gap between electrodes. In section 5, we present a detailed thermodynamic treatment of the force on an asymmetric capacitor, assuming that a non-linear dielectric fluid fills the region between capacitor electrodes. Section 6 is a summary and recommendation for future experimental and theoretical work.

## 2. Biefeld-Brown Effect

During the 1920s, Thomas Townsend Brown was experimenting with an x-ray tube known as a "Coolidge tube," which was invented in 1913 by the American physical chemist William D. Coolidge. Brown found that the Coolidge tube exhibited a net force (a thrust) when it was turned on. He believed that he had discovered a new principle of electromagnetism and gravity. Brown applied for a British patent on April 15, 1927, which was issued on November 15, 1928 as Patent No. 300,311, entitled, "Method of Producing Force or Motion." The patent and its figures clearly describe Brown's early work on forces on asymmetric capacitors, although the electromagnetic concepts are mixed with gravitational concepts (Figure 1).

This invention relates to a method of controlling gravitation and for deriving power therefrom, and to a method of producing linear force or motion. The method is fundamentally electrical.

**Figure 1.** Excerpt from Thomas Townsend Brown British Patent No. 300,311 entitled "Method of Producing Force or Motion," issued on November 15, 1928.

The discovery of the Biefeld-Brown effect is generally credited to Thomas Townsend Brown. However, it is also named in honor of Brown's mentor, Dr. Paul Alfred Biefeld, a professor of physics and astronomy at Denison University in Granville, Ohio, where Brown was a laboratory assistant in electronics in the Department of Physics. During the 1920s, Biefeld and Brown together experimented on capacitors.

In order to find a technical description of the Biefeld-Brown effect, we performed a search of the standard article literature and found no references to this effect. It is prudent to ask whether this effect is real or rumor. On the other hand, the Internet is full of discussions and references to this effect, including citations of patents issued [1], see also Appendix A. In fact, patents seem to be the only official publications that describe this effect.

On July 3, 1957, Brown filed another patent entitled "Electrokinetic Apparatus," and was issued a U.S. Patent No. 2949550 on August 16, 1960. The effect in this patent is described more lucidly than his previous patent No. 300,311, of November 15, 1928. In this 1960 patent, entitled "Electrokinetic Apparatus," Brown makes no reference to gravitational effects (Figure 2).

This invention was disclosed and described in my application Serial No. 293,465, filed June 13, 1952, which application has become abandoned. However, reference may be made to this application for the purpose of completing the disclosure set forth below.

The invention utilizes a heretofore unknown electrokinetic phenomenon which I have discovered; namely, that when a pair of electrodes of appropriate form are held in a certain fixed spaced relation to each other and immersed in a dielectric medium and then oppositely charged to an appropriate degree, a force is produced tending to move the pair of electrodes through the medium. The invention is concerned primarily with certain apparatus for utilizing such phenomenon in various manners to be described.

**Figure 2.** Excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 2949550 entitled "Electrokinetic Apparatus," issued on August 16, 1960.

The claims, as well as the drawings in this patent, clearly show that Brown had conceived that the force developed on an asymmetrical capacitor could be used for vehicle propulsion. His drawings in this patent are strikingly similar to some of the capacitors designs on the Internet today. In this 1960 patent, entitled "Electrokinetic Apparatus," Brown gives the clearest explanation of the physics of the Biefeld-Brown effect. Brown makes several important statements, including:



- the greatest force on the capacitor is created when the small electrode is positive
- the effect occurs in a dielectric medium (air)
- the effect can be used for vehicle propulsion or as a pump of dielectric fluid
- Brown's understanding of the effect, in terms of ionic motion
- the detailed physics of the effect is not understood

In the following, we reproduce Brown's first two figures and partial text explaining the effect (Figures 3 and 4).

I have discovered that when apparatus of the character just described is immersed in a dielectric medium, as for example, the ordinary air of the atmosphere, there is produced a force tending to move the entire assembly through the medium, and this force is applied in such direction as to tend to move the body 20 toward the leading electrode 21. This force produces relative motion between the apparatus and the surrounding fluid dielectric. Thus, if the apparatus is held in a fixed position, the dielectric medium is caused to move past the apparatus and to this extent the apparatus may be considered as analogous to a pump or fan. Conversely, if the apparatus is free to move, the relative motion between the medium and the apparatus results in a forward motion of the apparatus, and it is thus seen that the apparatus is a self-propulsive device.

While the phenomenon just described has been observed and its existence confirmed by repeated experiment, the principles involved are not completely understood. It has been determined that the greatest forces are developed when the leading electrode is made positive with respect to the body 20, and it is accordingly thought that in the immediate vicinity of the electrode 21 where the potential gradient is very high, free electrons are stripped off of the atoms and molecules of the surrounding medium. These electrons migrate to the positive electrode 21 where they are collected. This removal of free electrons leaves the respective atoms and molecules positively charged and such charged atoms and molecules are accordingly repelled from the positive electrode 21 and attracted toward the negative electrode 20. The paths of movement of these positively charged particles appear to be of the nature represented by the lines 27 in Figure 2.

It appears that upon reaching or closely approaching the surface of the body 20, the positively charged atoms and molecules have their positive charges neutralized by the capture of electrons from the body 20 and in many cases, it may be that excess electrons are captured whereby to give such atoms and molecules a negative charge so that they are actually repelled from the body 20.

It will be appreciated that the mass of each of the individual electrons is approximately one two-thousandths the mass of the hydrogen atom and is accordingly negligible as compared with the mass of the atoms and molecules of the medium from which they are taken. The principal forces involved therefore are the forces involved in moving the charged atoms and molecules from the region of the positive electrode 21 to and beyond the negatively charged body 20. The fires so started by the system on those atoms and molecules not only produces a flow of the medium relative to the apparatus, but, of course, results in a like force on the system tending to move the entire system in the opposite direction; that is, to the left as viewed in Figure 1 of the drawing.

The above suggested explanation of the mode of operation of the device is supported by observation of the fact that the dimensions and potentials utilized must be adjusted to produce the required electric field and the resulting propulsive force. Actually I have found that the potential gradient must be below that value required to produce a visible corona since corona is objectionable inasmuch as it represents losses through the radiation of heat, light and molecular charges in the medium.

My experiments have indicated that the electrode 21 may be of small diameter for the lower voltage ranges, i.e. below 125 kv. while above this voltage, rod or hollow pipe electrodes are preferred. These large electrodes are preferred for the higher voltages since sharp points or edges are eliminated which at these elevated potentials would produce losses thus diminishing the thrust. For example, electrodes to be operated at potentials below 125 kv. may be made from small gauge wire only large enough to provide the required mechanical rigidity while

electrodes to be operated at potentials above 125 kv. may be hollow pipes or rods having a diameter of  $\frac{3}{4}$  to  $\frac{1}{2}$  inch.

In Figure 3, I have illustrated the manner in which a plurality of assemblies, such as are shown in Figure 1, may be interconnected for joint operation. As may be seen from Figure 3, a plurality of such assemblies are placed in spaced side-by-side relation. They may be held fixed in such spaced relation through the use of a plurality of tie rods 28 and interposed spacers (not shown) placed between adjacent plates 20. The assembly of plates 20 may be electrically interconnected by a bus bar or similar conductor 29 to which the negative lead 25 is connected. In a similar way, the plurality of positive leading electrodes 21 may be held in appropriately spaced relation to each other by fastening their ends to pairs of bus bars 30 and 31, to the latter of which the positive lead 26 is connected. The assembly of leading electrodes 21 may be held in spaced relation to the assembly of body members 20 by an appropriate arrangement of the supports 22.

In Figure 4, I have illustrated diagrammatically an arrangement of parts for producing a reversible action; that is, permitting the direction of the propulsive force to be reversed. The apparatus is similar to that shown in Figure 1, differing therefrom in utilizing a pair of leading electrodes 21f and 21r spaced by means of spacers 22 from the front and rear edges 23f and 23r of the body member 20 in a manner similar to that described with reference to the supports 22 in Figure 1. The source 24 of high voltage electrical potential has its negative terminal connected to the body 20 as by means of the aforementioned conductor 25. The positive terminal is connected as by means of the conductor 26 to the blade 27 of a single-pole, double-throw switch, serving in one position to connect the conductor 26 to a conductor 26f which is in turn connected to the forward electrode 21f and arranged in its opposite position to connect the conductor 26 to a conductor 26r which is in turn connected to the reverse electrode 21r.

It will be seen that with the switch 27 in the position shown in Figure 4, the apparatus will operate in the manner described in connection with Figure 1, causing the assembly to move to the left as viewed in Figure 4. By throwing the switch 27 to the opposite position, the direction of the forces produced are reversed and the device moves to the right as viewed in Figure 4.

In Figure 5, I have illustrated the principles of the invention as embodied in a simple form of mobile vehicle. This device includes a body member 50 which is preferably of the form of a circular disc somewhat thicker in its center than at its edges. The disc 50 constitutes one of the electrodes and is the equivalent of the body member 20 referred to in connection with Figure 1. A leading electrode 51 in the form of a wire or similar small diameter conductor is supported from the body 50 by a plurality of insulating supports 52 in uniform spaced parallel relation to a leading edge portion 53 of the body 50. A skirt or similar fairing 54 may be carried by the body 50 to round out the entire structure so as to provide a device which is substantially circular in plan. A source of high voltage electrical potential 55 is provided with its negative terminal connected as indicated at 56 to the body 50 and its positive terminal connected as indicated at 57 to the leading electrode 51.

The device operates in the same manner as the apparatus shown in Figure 1 to produce a force tending to move the entire assembly through the surrounding medium to the left as viewed in Figure 5 of the drawing.

Referring now to Figure 6, there is depicted an illustrative embodiment of this invention in which a pair of mobile vehicles, such as depicted in Figure 5, are shown suspended from the terminals of arm 40, which arm is supported at its midpoint by a vertical column 41. High voltage source 55 is shown connected through wires

Figure 3. Excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 2949550 entitled "Electrokinetic Apparatus," issued on August 16, 1960.

Aug. 16, 1960

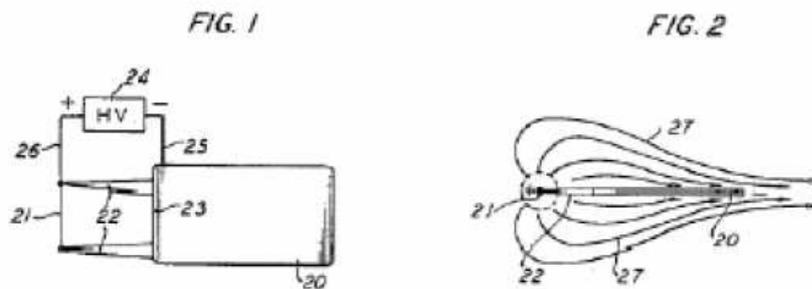
T. T. BROWN

2,949,550

ELECTROKINETIC APPARATUS

Filed July 3, 1957

2 Sheets-Sheet 1



**Figure 4** . Figure excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 2949550 entitled "Electrokinetic Apparatus," issued on August 16, 1960.

Soon after Brown's 1957 filing for the patent previously mentioned, on May 12, 1958, A.H. Bahnsen Jr. filed for an improved patent entitled "Electrical Thrust Producing Device," which was granted a U.S. Patent No. 2958790 on November 1, 1960.

On July 3, 1957, Brown filed another patent (granted on January 23, 1962, as U.S. Patent No. 3018394) for an "Electrokinetic Transducer." This patent deals with the inverse effect, i.e., when a dielectric medium is made to move between high voltage electrodes, there is a change in the voltage on the electrodes. (This is reminiscent of Faraday's law of induction.) Quoting from the 1962 patent by Thomas Townsend Brown (Figure 5).

This invention utilizes heretofore unknown electrokinetic phenomenon which I have discovered, namely that when pairs of electrodes of appropriate form are held in a certain fixed spacial relationship to each other and immersed in a dielectric medium and then oppositely charged to an appropriate degree, a force is produced tending to move the surrounding dielectric with respect to the pair of electrodes. I have also discovered that if the dielectric medium is moved relative to the pairs of electrodes by an external mechanical force, a variation in the potential of the electrodes results which variation corresponds to the variations in the applied mechanical force.

Accordingly, it is an object of this invention to provide a method and apparatus for converting the energy of an electrical potential directly into a mechanical force suitable for causing relative motion between a structure and the surrounding medium.

**Figure 5**. Excerpt from Thomas Townsend Brown U.S. Patent No. 3018394 entitled "Electrokinetic Transducer," issued on January 23, 1962.



Until this time, the net force on an asymmetric capacitor was reported as occurring when the capacitor was in a dielectric medium. On May 9, 1958, Brown filed for another patent (improving upon his previous work) entitled "Electrokinetic Apparatus." The patent was issued on June 1, 1965 as Patent No. 3,187,206. The significance of this new patent is that it describes the existence of a net force on the asymmetric capacitor as occurring even in vacuum. Brown states that, "The propelling force however is not reduced to zero when all environmental bodies are removed beyond the apparent effective range of the electric field." Here is a quote from the patent (Figure 6).

3,187,206  
**ELECTROKINETIC APPARATUS**  
Thomas Townsend Brown, Walkertown, N.C., assignor,  
by mesne assignments, to Electrokinetics, Inc., a corporation of Pennsylvania  
Filed May 9, 1958, Ser. No. 734,342  
23 Claims. (Cl. 310—5)

This invention relates to an electrical device for producing thrust by the direct operation of electrical fields.

I have discovered that a shaped electrical field may be employed to propel a device relative to its surroundings in a manner which is both novel and useful. Mechanical forces are created which move the device continuously in one direction while the masses making up the environment move in the opposite direction.

When the device is operated in a dielectric fluid medium, such as air, the forces of reaction appear to be present in that medium as well as on all solid material bodies making up the physical environment.

In a vacuum, the reaction forces appear on the solid environmental bodies, such as the walls of the vacuum chamber. The propelling force however is not reduced to zero when all environmental bodies are removed beyond the apparent effective range of the electrical field.

By attaching a pair of electrodes to opposite ends of a dielectric member and connecting a source of high electrostatic potential to these electrodes, a force is produced in the direction of one electrode provided that electrode is of such configuration to cause the lines-of-force to converge steeply upon the other electrode. The force, therefore, is in a direction from the region of high flux density toward the region of low flux density, generally in the direction through the axis of the electrodes. The thrust produced by such a device is present if the electrostatic field gradient between the two electrodes is non-linear. This non-linearity of gradient may result from a difference in the configuration of the electrodes, from the electrical potential and/or polarity of adjacent bodies, from the shape of the dielectric member, from a gradient in the density, electric conductivity, electric permittivity and magnetic permeability of the dielectric member or a combination of these factors.

**Figure 6.** Excerpt from Thomas Townsend Brown Patent No. 3,187,206, entitled, "Electrokinetic Apparatus," issued on June 1, 1965.

In this patent, Brown reports that the asymmetric capacitor does show a net force, even in vacuum. However, at present, there is little experimental evidence, except for two reports [2], which do not explain the origin of the observed force and two theoretical papers [3, 4]. If the

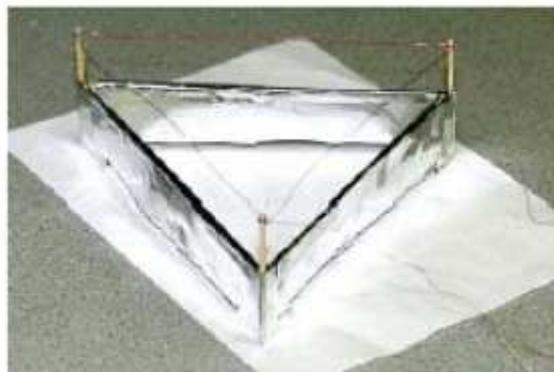
Biefeld-Brown effect is to be understood on a firm basis, it is imperative to determine whether the effect occurs in vacuum. Enclosed in Appendix B, is my email correspondence with J. Naudin, where Naudin quotes from a letter by Thomas Townsend Brown, who discusses the effect in vacuum.

The main question to be answered is: what is the physical mechanism that is responsible for the net force on an asymmetric capacitor? The answer to this question may depend on whether the asymmetric capacitor is in a polarizable medium (such as air), or in vacuum. However, to date, the physical mechanism is unknown, and until it is understood, it will be impossible to determine its potential for practical applications.

### 3. Preliminary Experiments at ARL

The Biefeld-Brown effect is reported in many places on the Internet; however, as mentioned above, only two papers exist [3, 4]. Therefore, we decided to verify that the effect was real. C. Fazi (ARL) and T. Bahder (ARL) have fabricated three simple asymmetric capacitors, using the designs reported on the Internet [1]. In all three cases, we have verified that a net force is exerted on the capacitors when a high DC voltage is applied to the electrodes. The three asymmetric capacitors that we tested had different geometries, but they all had the common feature that one electrode was thin and the other very wide (asymmetric dimensions). Also, a suspended wire, representing a capacitor with the second electrode at infinity, showed lift.

Our first model was made by Tom Bahder, and was triangular in shape, which is a typical construction reported on the Internet (Figure 7). One electrode is made from thin 38-gauge (0.005-mil) wire, and the other electrode is made from ordinary Aluminum foil. The capacitor is ~20 cm on a side, the foil sides are 20 cm x 4 cm, and the distance of the top of the foil to the thin wire electrode is 3 cm. The foil and wire are supported by a Balsa wood frame, so that the whole capacitor is very light, ~5 g. Initially, we made the Balsa wood frame too heavy (capacitor weight ~7 grams), and later we cut away much of the frame to lighten the construction to ~5 g. We found that in order to demonstrate the lifting effect, the capacitor must be made of minimum weight. (Typical weights reported on the Internet for the design in Figure 7 are 2.3 g–4 g.)



**Figure 7.** Our first attempt at making an asymmetric capacitor (a “lifter”), according to the specifications given by J. Naudin on Internet Web site <<http://jnaudin.free.fr/>>.

When ~37 kV was applied to the capacitor in Figure 7, the current was ~1.5 mA. The capacitor lifted off its resting surface. However, this capacitor was not a vigorous flier, as reported by others on the Internet. One problem that occurred was arcing from the thin wire electrode to the



foil. The thin wire electrode was too close to the foil. We have found that arcing reduces the force developed on the capacitor. Also, compared to other constructions, ours was too heavy, 5 g. We found that a ground plane beneath the capacitor is not essential for the lifting force to exceed the capacitor's weight.

Consequently, we decided to make a second version of an asymmetric capacitor, using a Styrofoam lunch box and plastic drinking straws from the ARL cafeteria (Figure 8). The capacitor had a square geometry, 18 cm x 20 cm. The distance of the thin wire (38 gauge) to the foil was adjustable, and we found that making a 6-cm gap resulted in little arcing. When 30 kV was applied, the capacitor drew ~1.5 mA, and hovered vigorously above the floor.



**Figure 8.** The second attempt at making a lighter asymmetric capacitor.

A question occurred: is the toroidal (closed circular) geometry of the capacitor electrodes essential to the lifting effect that we have observed? Consequently, Tom Bahder made a flat<sup>9</sup> shaped, or wing-shaped, capacitor as shown in Figure 9. This capacitor was made from two (red) plastic coffee stirrers and a (clear) plastic drinking straw to support the Aluminum foil. The significance of the clear plastic straw was that the foil could be wrapped over it, thereby avoiding sharp foil edges that would lead to corona discharge or arcing. The dimensions of the foil on this capacitor were 20 cm x 4 cm, as shown in Figure 9. The distance between the thin wire electrode (38 gauge wire) and edge of the foil was 6.3 cm. This capacitor showed a net force on it when ~30 kV was applied, drawing ~500 mA. The force on this capacitor greatly exceeded its weight, so much so that it would vigorously fly into the air when the voltage was increased from zero. Therefore, we have concluded that the closed geometry of the electrodes is not a factor in the net force on an asymmetric capacitor. Furthermore, the force on the capacitor always appeared in the direction toward the small electrode— independent of the orientation of the capacitor with respect to the plane of the Earth's surface. The significance of this observation is that the force has nothing to do with the gravitational field of the Earth and nothing to do with the electric potential of the Earth's atmosphere. (There are numerous claims on the Internet that asymmetric capacitors are antigravity devices, or devices that demonstrate that there is an interaction of gravity with electric phenomena, called.)



**Figure 9.** Flat-shaped (or wing-shaped) asymmetric capacitor used to test whether closed electrode geometry is needed.

The thin wire electrode must be at a sufficient distance away from the foil so that arcing does not occur from the thin wire electrode to the foil at the operating voltage. In fact, in our first model, shown in Figure 7, the 3-cm gap from top of the foil to thin wire electrode was not sufficiently large, and significant arcing occurred. We have found that when arcing occurs, there is little net force on the capacitor. An essential part of the design of the capacitor is that the edges of the foil, nearest to the thin wire, must be rounded (over the supporting Balsa wood, or plastic straw, frame) to prevent arcing or corona discharge at sharp foil edges (which are closest to the thin wire). The capacitor in Figure 7 showed improved lift when rounded foil was put over the foil electrode closest to the thin wire, thereby smoothing-over the sharp foil edges. Physically, this means that the radius of curvature of the foil nearest to the small wire electrode was made larger, creating a greater asymmetry in radii of curvature of the two electrodes.

When operated in air, the asymmetric capacitors exhibit a net force toward the smaller conductor, and in all three capacitors, we found that this force is independent of the DC voltage polarity.

The detailed shape of the capacitor seems immaterial, as long as there is a large asymmetry between the characteristic size of the two electrodes. The simplest capacitor configuration consists of a suspended thin wire from the hot electrode of the high-voltage power supply, as shown in Figure 10. To observe the wire movement, a small piece of transparent tape was attached at the lower end of the thin wire. A suspended thin wire (~12 in length) also showed force with ~35 kV and 1-mA current (Figure 9). From a vertical position, the wire lifted, as shown in Figure 11 by as much as 30°, once the high voltage approached 35 kV. The usual air breakdown hissing sound of the other capacitors was heard when current reached ~1 mA. Actually, the wire did not remain suspended, but oscillated back and forth approximately 60° from vertical, and the hissing pitch followed the oscillation period with amplitude and frequency changes. Without the piece of tape at the end, the wire did not lift as much and the sound was considerably weaker. The piece of tape seems to increase the capacitance and or the air ionization. This suspended wire configuration can be viewed also as a capacitor surrounded by the ground system located several feet away (metallic benches, floor and ceiling). As in the other capacitor experiments, it also did not exhibit a polarity dependence.

When the asymmetric capacitors have an applied DC voltage, and they are producing a net force in air, they all emit a peculiar hissing sound with pitch varying with the applied voltage. This sound is similar to static on a television or radioset when it is not

tuned to a good channel. We believe that this sound may be a clue to the mechanism responsible for the net force.



**Figure 10.** The capacitor consisting of a single wire. No bias applied.



**Figure 11.** The wire capacitor showing displacement from the vertical. 35 kV applied.

#### 4. Previously Proposed Explanations for the Biefeld-Brown Force

There are two proposed explanations for the Biefeld-Brown force. Both of these have been discussed on the Internet in various places. The first proposed scheme is that there exists an ionic wind in the high field region between the capacitor electrodes, and that this ionic wind causes the electrodes to move as a result of the momentum recoil. This scheme, described in Section 4.1, leads to a force that is incorrect by at least three orders of magnitude compared to what is observed. (This scheme also assumes ballistic transport of charges in the atmosphere between electrodes of the capacitor, and it is known that instead drift current exists.)

In section 4.2, we present the second scheme, which assumes that a drift current exists between the capacitor plates. This scheme is basically a scaling argument, and



not a detailed treatment of the force. In this scheme, the order of magnitude of the force on an asymmetric capacitor is correct, however, this scheme is only a scaling theory. Finally, in section 5, we present our thermodynamic treatment of the force on an asymmetric capacitor.

#### 4.1 Ionic Wind: Force Too Small

The most common explanation for the net force on an asymmetric capacitor invokes ionic wind. Under a high-voltage DC bias, ions are thought to be accelerated by the high potential difference between electrodes, and the recoil force is observed on an asymmetric capacitor. A simple upper limit on the ion wind force shows that the ion wind effect is at least three orders of magnitude too small. Consider a capacitor that operates at voltage  $V$ . Charged particles of mass  $m$ , having charge  $q$ , such as electrons or (heavy) ions, are accelerated to a velocity  $v$ , having a kinetic energy

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV. \quad (1)$$

The force exerted on an asymmetric capacitor is given by the rate of change of momentum

$$F = mv \frac{I}{q}, \quad (2)$$

where  $I$  is the current flowing through the capacitor gap, and we assume that all the ionic momentum,  $mv$ , is transferred to the capacitor when the charged particles leave an electrode. Also, we assume that none of this momentum is captured at the other electrode. This is a gross over-estimation of the force due to ionic effects, so equation (2) is an upper limit to the ionic force.

Solving equation (1) for the velocity, and using it in equation (2) gives the upper limit on the force due to ionic wind

$$F = \left(\frac{2mV}{q}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{I}{g} \quad (3)$$

When the force  $F$  is equal to the weight of an object,  $Mg$ , where  $g$  is the acceleration due to gravity, the force will lift a mass

$$M = \left(\frac{2mV}{q}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{I}{g}. \quad (4)$$

If we assume that electrons are the charged particles responsible for force of the ionic wind, then we must use mass  $m = 9.1 \times 10^{-31}$  kg. Substituting typical experimental numbers into equation (4), I find that the ionic wind can lift a mass

$$M = \left(\frac{(2)(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(40 \times 10^3 \text{ Volt})}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ A}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 6.8 \times 10^{-5} \text{ gram}. \quad (5)$$

The typical weight of an asymmetric capacitor is on the order of 5 g, so this force is too small by 5 orders of magnitude.



Another possibility is that heavy ions (from the air or stripped off the wire) are responsible for the ionic wind. As the heaviest ions around, assume that Cu is being stripped from the wire. Using Cu for the ions, the mass of the ions is  $63.55 mp$ , where 63.55 is the atomic mass of Cu and  $mp$  is the mass of a proton. The weight that could be lifted with Cu ionic wind is then (upper limit):

$$M = \left( \frac{(2)(63.55)(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(40 \times 10^3 \text{ Volt})}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ A}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.002 \text{ gram.} \quad (6)$$

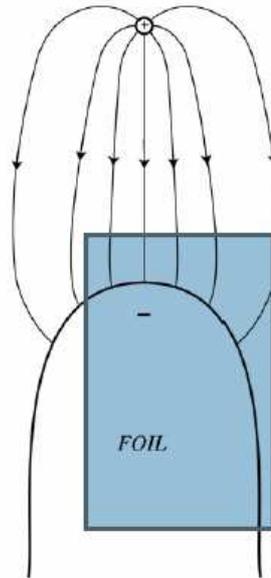
Again, this value is three orders of magnitude too small to account for lifting a capacitor with a mass of 3–5 g. Therefore, the ionic wind contribution is too small, by at least three orders of magnitude, to account for the observed force on an asymmetric capacitor.

While the force of the ionic wind computed above is too small to explain the experiments in air, it should be noted that this effect will operate in vacuum, and may contribute to the overall force on a capacitor.

#### 4.2 The Ion Drift Picture: Scaling Theory of Force

In the previous section, we computed an upper limit to the force on a capacitor due to ionic wind effects. Ionic wind is a ballistic flow of charges from one electrode to the other. Clearly the force due to ionic wind is at least three orders of magnitude too small to account for the observed force on an asymmetric capacitor (in air). There is another type of classical transport: drift of charge carriers in an electric field. In the case of drift, the carriers do not have ballistic trajectories, instead they experience collisions on their paths between electrodes. However, due to the presence of an electric field, the carriers have a net motion toward the opposite electrode. This type of transport picture is more accurate (than ballistic ionic wind) for a capacitor whose gap contains air. Drift transport is used by Evgenij Barsoukov to explain the net force on an asymmetric capacitor [5].

The general picture of the physics is that the positive and negative electrodes of the capacitor are charged and that these charges experience different forces because the electric field surrounding the capacitor is nonuniform (Figure 12). The electric field surrounding the capacitor is created by the potential applied to the capacitor electrodes and partial ionization of air into positive ions and electrons. These charge carriers experience drift and diffusion in the resulting electric field. The battery supplies the energy that is dissipated by transport of carriers in the electric field. The electric field is particularly complicated because it is the result of a steady state: the interplay between the dynamics of ionization of the air in the high-field region surrounding the electrodes and charge transport (drift and diffusion of positive and negative carriers) in the resulting electric field.



**Figure 12.** Schematic diagram of the side view of electric field for the asymmetric capacitor in Figure 9.

If the capacitor is surrounded by vacuum (rather than a dielectric, such as ions on air), the net force  $F$  on the asymmetric capacitor can be computed by the sum of two surface integrals, one over the surface of the positive electrode and one over the surface of the negative electrode [6]:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left( \int_{S_+} E^2 \mathbf{n} dS + \int_{S_-} E^2 \mathbf{n} dS \right), \quad (7)$$

where  $\epsilon_0$  is the permittivity of vacuum,  $E$  is the electric field normal to the conducting electrodes,  $S_+$  and  $S_-$  are the positive and negative electrode surfaces of the capacitor and  $\mathbf{n}$  is the outward normal to  $S_+$  and  $S_-$ . The integrals in equation (7) are done over closed surfaces  $S_+$  and  $S_-$ . As stated above, the complexity of the calculation is contained in computing the electric field  $E$ . In section 5, we give an expression for the net force on the capacitor assuming that it is surrounded by a dielectric, such as air.

The electric field around the small wire electrode is much stronger than the field around the foil (see Figures 9 and 12). In our experiments, there is a big difference in the radii of curvature of the two capacitor electrodes: the thin wire electrode has a radius  $r_1 = 0.0025$  inch, and the edge of the foil has a radius of curvature of  $r_2 = 0.125$  inch. This difference in curvature leads to an electric field with a strong gradient. The ratios of electric fields at the thin wire electrode to that at the rounded edge of the foil is inversely proportional to the square of the radii of curvatures:

$E_1/E_2 = (r_1/r_2)^2 \sim 2500$ . However, the applied voltage is on the order of 30 kV, over a gap of 6 cm, so an electric field of magnitude  $2500 \times \frac{30 \text{ kV}}{6} \text{ cm} \sim 1 \times 10^7 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$  would not be supported in air. It is clear that screening of the electric field is occurring due to the dielectric effects of charged air ions and electrons, as well as polarized air atoms. When a positive high voltage is applied to the thin wire electrode of the asymmetric capacitor, ionization of air atoms, such as Nitrogen, probably occurs first near the thin wire electrode. The ionization of Nitrogen atoms leads to free electrons and ions near the small electrode. The electron mobility is significantly larger for electrons than for



Nitrogen ions. This can be expected because the current density  $J = \sigma E = n e v$  where  $\sigma = n e^2 \tau / m$  is the electrical conductivity,  $n$  is charge density,  $\tau$  is the scattering time, and the mean drift velocity  $v = \mu E$ . So the mobility behaves as  $\mu = e \tau / m$ . Because electrons are three orders of magnitude more massive than ions, it is expected that they are correspondingly more mobile. Experimentally, it is found that the electron mobility in air at atmospheric pressure and electric field  $E = 104$  Volt/cm is approximately [7]

$$\mu_e = 620 \frac{cm^2}{Volt \cdot sec}. \quad (8)$$

The mobility of  $N_2$  ions in air is [8]

$$\mu_{N_2} = 2.5 \frac{cm^2}{Volt \cdot sec}. \quad (9)$$

Therefore, the physical picture is that in the high field region the electrons, with their high mobility, are swept out by the electric field, toward the thin wire electrode leading to screening of the field. The massive (probably positive) ions are less mobile and are left behind in a plasma surrounding the thin wire electrode.

A scaling argument can be made as follows: The lower foil conductor feels a force  $F$  of magnitude

$$F = Q \frac{V}{l}, \quad (10)$$

where  $Q$  is the charge on the foil electrode,  $V$  is the voltage between the capacitor conductors, and  $l$  is the length of the gap between thin wire electrode and foil. The charge  $Q$  and voltage  $V$  are quantities that are actually present when screening is taking place. The negative charge on the foil,  $-Q$ , can be approximated in terms of the measured current,  $I \sim 1$  mA, by saying that all the carriers are swept out in a time  $t$ :

$$I = \frac{Q}{t} = Q \frac{v}{l}, \quad (11)$$

where  $t$  is the time for carriers to move across the capacitor gap,  $l$ , if they are travelling at an average drift velocity,  $v$ . Eliminating the charge  $Q$  from equations (10) and (11), leads to an expression for the net force on the capacitor

$$F = I \frac{V}{v}. \quad (12)$$

In equation (12), the current  $I$  is a measured quantity, the voltage  $V$  is on the order of 30 kV, and the drift velocity for electrons is [7]

$$v_e = 6.2 \times 10^6 \frac{cm}{sec}. \quad (13)$$

Alternatively, the electron drift velocity,  $v_e$ , can be expressed in terms of the mobility,  $\mu_e$ , given in equation (8), and electric field,  $E$ . The net force on the asymmetric capacitor is then given by

$$F = I \frac{V}{\mu_e E} = I \frac{l}{\mu_e} \quad (14)$$



where we again used  $E = V/l$ . Using the value of electron mobility in equation (8), the net force becomes

$$F = I \frac{l}{\mu} = \frac{(10^{-3} A)(0.04 \text{ m})}{\left(620 \frac{\text{cm}^2}{\text{Volt}\cdot\text{sec}}\right) \left(10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{cm}}\right)^2} = 6.4 \times 10^{-4} \text{ N}. \quad (15)$$

The force in equation (15) could lift a mass  $M$

$$M \frac{F}{g} = \frac{6.4 \times 10^{-4} \text{ N}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.064 \text{ gram}. \quad (16)$$

The typical asymmetric capacitor has a mass that is two orders or magnitude greater. Consequently, drift of electrons cannot explain the observed force on the capacitor.

An alternative to using the value of electron mobility is to use the smaller value of ionic mobility. This will lead to a larger force because the force in equation (14) is inversely proportional to the mobility.

$$F = I \frac{l}{\mu} = \frac{(10^{-3} A)(0.04 \text{ m})}{\left(2.5 \frac{\text{cm}^2}{\text{Volt}\cdot\text{sec}}\right) \left(10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{cm}}\right)^2} = 0.16 \text{ N}. \quad (17)$$

The force in equation (17), due to the drift of Nitrogen ions, could lift a mass  $M$ :

$$M \frac{F}{g} = \frac{0.16 \text{ N}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 16 \text{ gram}. \quad (18)$$

The force on the capacitor, given in equation (18), is within a factor of 3, assuming a capacitor of mass 5 g.

As alternative derivation of the scaling equation (14), consider the asymmetric capacitor as being essentially an electric dipole of magnitude,

$$|\mathbf{p}| = p = Ql, \quad (19)$$

where  $Q$  is the charge on one plate and  $l$  is the average effective separation between plates. When a high voltage is applied to the asymmetric capacitor (assume positive voltage on the thin wire and negative on the foil), the high electric field around the thin wire ionizes the atoms of the air. There is comparatively little ionization near the foil due to the lower magnitude electric field near the foil. The ionized atoms around the foil form a plasma, consisting of charged electrons and positively charged ions. The force on the capacitor must scale like

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}) \quad (20)$$

where  $E$  is the electric field. The gradient operates on the electric field, producing a magnitude  $dE/dx \sim E/l$ . Using this value in equation (20), together with the size of the dipole in equation (19), leads to a force on the capacitor

$$F = Q \frac{V}{l} \sim \frac{Il}{v} \cdot \frac{V}{l} = I \frac{V}{v}, \quad (21)$$

which is identical to equation (12).



From the scaling derivations that were presented, it is clear that electron drift current leads to a force on the capacitor that is too small. Using the value of mobility appropriate for (nitrogen) ions leads to a force whose order of magnitude is in agreement with experiment.

Note that the force, given by equation (14), scales inversely with the mobility  $\mu$ . If the ions are responsible for providing the required small mobility, then the picture is that the ions are like a low-mobility molasses, which provides a large spacecharge to attract the negatively charged foil electrode. As soon as the foil electrode moves toward the positive ion cloud, another positive ionic cloud is set up around the thin electrode, using the energy from the voltage source. In this way, the dipole (asymmetric capacitor) moves in the nonuniform electric field that it has created. Physically, this is a compelling picture; however, much work must be done (experimentally and theoretically) to fill in important details to determine if this picture has any merit.

## 5. Thermodynamic Analysis of the Biefeld-Brown Force

In this section, we present our hypothesis that the Biefeld-Brown force, generated on an asymmetric capacitor, can be described by the thermodynamics of a fluid dielectric in an external electric field produced by charged conductors. The (partially ionized) air between capacitor electrodes is the fluid dielectric. Although the air is partially ionized, we assume that this fluid dielectric is close to neutral on the macroscopic scale. The charged conductors are the asymmetric electrodes of the capacitor. The battery provides the charge on the electrodes and the energy to sustain the electric field in the air (dielectric) surrounding the capacitor electrodes.

The total system is composed of three parts: the partially ionized air dielectric, the metal electrodes of the capacitor and the battery (voltage source) and connecting wires, and the electromagnetic field. The battery is simply a large reservoir of charge. The total momentum (including the electromagnetic field) of this system must be constant [9]:

$$\mathbf{P}_{dielectric} + \mathbf{P}_{electrodes} + \mathbf{P}_{field} = constant, \quad (22)$$

where  $\mathbf{P}_{dielectric}$  is the momentum of the fluid dielectric (air in the capacitor gap and surrounding region),  $\mathbf{P}_{electrodes}$  is the momentum of the metallic electrodes, wire and battery, and  $\mathbf{P}_{field}$  is the momentum of the electromagnetic field. Taking the time derivative of equation (22), the forces must sum to zero

$$\mathbf{F}_{dielectric} + \mathbf{F}_{electrodes} + \frac{d\mathbf{P}_{field}}{dt} = 0. \quad (23)$$

As far as the electric field is concerned, its total momentum changes little during the operation of the capacitor, because the field is in a steady state; energy is supplied by the battery (charge reservoir). So we set the rate of change of field momentum to zero, giving a relation between the force on the electrodes and the dielectric:

$$\mathbf{F}_{electrodes} = -\mathbf{F}_{dielectric}. \quad (24)$$

A lengthy derivation based on thermodynamic arguments leads to an expression for the stress tensor,  $\sigma_{ik}$ , for a dielectric medium in an electric field [6, 10, 11,

$$\sigma_{ik} = \left[ \tilde{F} - \rho \left( \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \rho} \right)_{T,E} \right] \delta_{ik} + E_i D_k, \quad (25)$$



where the free energy  $\tilde{F}$  is a function of the fluid density,  $\rho$ , temperature,  $T$ , and electric field  $\mathbf{E}$ . The differential of the free energy is given by

$$d\tilde{F} = -SdT + \zeta d\rho - \mathbf{D} \cdot d\mathbf{E}, \quad (26)$$

where  $S$  is the entropy,  $\mathbf{D}$  is the electric induction vector, and  $\zeta$  is the chemical potential per unit mass [6]. Equation (25) is valid for any constitutive relation between  $\mathbf{D}$  and  $\mathbf{E}$ . We assume that the air in between the capacitor plates is an isotropic, but nonlinear, polarizable medium, due to the high electric fields between plates. Therefore, we take the relation between  $\mathbf{D}$  and  $\mathbf{E}$  to be

$$\mathbf{D} = \varepsilon(E)\mathbf{E}, \quad (27)$$

where  $\varepsilon(E)$  is a scalar dielectric function that depends on the magnitude of the electric field,  $E = |\mathbf{E}|$ , the temperature,  $T$ , and the density of the fluid,  $\rho$ . We have suppressed the dependence of  $\varepsilon$  on  $T$  and  $\rho$  for brevity. The dielectric function  $\varepsilon(E)$  depends on position through the variables  $T$  and  $\rho$  and because the medium (air) between capacitor plates is assumed to be nonuniform. Inserting equation (27) into equation (26), we integrate the free energy along a path from  $E = 0$  to some finite value of  $E$  obtaining

$$\tilde{F}(\rho, T, \mathbf{E}) = \tilde{F}_o(\rho, T) - \frac{1}{2} \varepsilon_{eff} E^2 \quad (28)$$

where  $\varepsilon_{eff}$  is an effective (averaged) dielectric constant, given by

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{E^2} \int_0^{E^2} \varepsilon(\sqrt{\xi}) d\xi \quad (29)$$

where  $\xi$  is a dummy integration variable. The dielectric constant  $\varepsilon_{eff}$  depends on spatial position (because of  $\varepsilon$ ), on  $T$ ,  $\rho$ , and on electric field magnitude  $E$ .

The body force per unit volume of the dielectric,  $f_i$ , is given by the divergence of the stress tensor,

$$f_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (30)$$

where there is an implied sum over the repeated index  $k$ . Performing the indicated differentiations in equation (30), we obtain an expression for the body force [6,10,11]

$$\mathbf{f} = -\nabla P_o(\rho, T) + \frac{1}{2} \nabla \left[ E^2 \rho \left( \frac{\partial \varepsilon_{eff}}{\partial \rho} \right)_{T,E} \right] - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon_{eff} + \frac{1}{2} (\varepsilon - \varepsilon_{eff}) \nabla E^2 + \rho_{ext} \mathbf{E}, \quad (31)$$

where the external charge density is give by  $\text{div } \mathbf{D} = \rho_{ext}$ . This charge density is the overall external charge density in the dielectric, which may have been supplied by the battery, electrodes, and the surrounding air. In equation (31), the pressure  $P_o(\rho, T)$  is that which would be present in the absence of the electric field. In the case of a linear medium, the dielectric function  $\varepsilon$  is independent of field  $E$ , and  $\varepsilon_{eff} = \varepsilon$ , which reduces to the result derived by Landau and Lifshitz (see their equations (15.12) in reference[6]).



The total force on the fluid dielectric,  $\mathbf{F}_{\text{dielectric}}$ , is given by the volume integral of  $\mathbf{f}$  over the volume of the dielectric,  $\Omega$ :

$$\mathbf{F}_{\text{dielectric}} = \int_{\Omega} \mathbf{f} dV \quad (32)$$

The volume  $\Omega$  is the whole volume outside the metal electrodes of the capacitor. According to equation (24), the net force on the capacitor,  $\mathbf{F}_{\text{electrodes}}$ , is the negative of the total force on the dielectric:

$$\mathbf{F}_{\text{electrodes}} = \int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla [\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon] E^2 - \frac{1}{2} \nabla \left[ E^2 \rho \left( \frac{\partial \varepsilon_{\text{eff}}}{\partial \rho} \right)_{T,E} \right] - \rho_{\text{ext}} \mathbf{E} \right\} dV, \quad (33)$$

where we have dropped the term containing the gradient in the pressure, assuming that it is negligible. Equation (33) gives the net force on capacitor plates for the case where the fluid dielectric is nonlinear, having the response given in equation (27). In equation (33), both  $\varepsilon$  and  $\varepsilon_{\text{eff}}$  are functions of the electric field. Note that the first three terms of the integrand depend on the square of the electric field, which is in agreement with the fact that the observed force direction is independent of the polarity of the applied bias.

There are four terms in the force. The first term is proportional to the gradient of the dielectric constant,  $\nabla \varepsilon$ . We expect that the dielectric constant has a large variation in between regions of low and high electric field, such as near the smaller electrode. We expect that there is a strong nonlinear dielectric response due to ionization of the air. The resulting free charges can move large distances, leading to a highly nonlinear response at high electric fields. Therefore, it is possible that this first term in the integrand in equation (33) has the dominate contribution. We expect this term to contribute to a force that points toward the smaller electrode (as observed experimentally), and we expect that this contribution is nearly independent of polarity of applied bias.

The second term in the force equation (33) is proportional to the gradient of the product of the square of the electric field and the difference in dielectric constants. The difference in the dielectric constants,  $\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon$ , can be expanded in a Taylor series in  $E$

$$\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon = -\frac{1}{3} \varepsilon'(0) E - \frac{1}{4} \varepsilon''(0) E^2 + \dots, \quad (34)$$

where

$$\begin{aligned} \varepsilon'(0) &= \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} \right)_{T,\rho,E=0}, \quad \text{and} \\ \varepsilon''(0) &= \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial E^2} \right)_{T,\rho,E=0} \end{aligned} \quad (35)$$

The gradient of the square of the electric field always points toward the smaller electrode, independent of the polarity of bias applied to the capacitor. We do not know the sign of the dielectric constants  $\varepsilon'(0)$  and  $\varepsilon''(0)$ . If the air has dielectric properties described by  $\varepsilon'(0) < 0$  and  $\varepsilon''(0) < 0$ , then this term would contribute to a force toward the smaller electrode (which would be in agreement with experiment). Alternatively, the



term  $\frac{1}{2}\nabla[(\epsilon_{eff} - \epsilon)E^2]$  may have the wrong sign but may be small. This must be determined experimentally by studying the dielectric properties of air or other gas.

The third term in the force equation (33) is difficult to evaluate. It may well be negligible, especially compared to the first term (assuming highly nonlinear dielectric response at high fields). Alternatively, if the air behaves as a nearly linear dielectric medium, then  $\epsilon_{eff} \sim \epsilon$ , and the dielectric constant of a gas is typically proportional to its density,  $\epsilon = \alpha \epsilon_o \rho$ , where  $\epsilon_o$  is the permittivity of free space, and  $\alpha$  is a constant. Using these expressions in equation (33) for  $\epsilon$  yields the force on the capacitor electrodes for the case of a linear dielectric fluid:

$$(F_{electrodes})_{Linear\ Medium} = \int_{\Omega} \left\{ -\frac{1}{2}\epsilon\nabla E^2 - \rho_{ext}\mathbf{E} \right\} dV. \quad (36)$$

For a linear medium, the first term in equation (35) contributes to a force pointing in a direction that is opposite to the gradient of the square of the electric field, i.e., it points toward the larger electrode (opposite to the experimentally observed force). In order to obtain a net force from equation (36) that is oriented toward the smaller electrode, the second term in equation (36) would have to dominate, i.e., the net force on the capacitor would be due to external charge effects. The magnitude of the external charges (from battery and surrounding air) on the dielectric fluid must be determined experimentally.

If the space between the capacitor plates is filled with a vacuum instead of dielectric, equation (33) reduces to a force given by

$$(F_{electrodes})_{vacuum} = - \int_{\Omega} \rho_{ext}\mathbf{E}dV. \quad (37)$$

where  $\rho_{ext} = 0$  for vacuum, leading to zero force on the capacitor.

The thermodynamic theory presented here provides a general expression in equation (33) for the net force on a capacitor in terms of the macroscopic electric field  $\mathbf{E}$ . This electric field in equation (33) must be determined by a microscopic calculation, taking into account the ionization of gas between capacitor plates, and details of charge transport.

In summary, at the present time, the relative magnitudes of the four terms in the force expression given in equation (33) are unknown. The magnitudes of these terms must be determined by constructing a set of experiments designed to determine the field-dependent dielectric properties of the fluid (given by  $\epsilon$ ) surrounding the asymmetric capacitor electrodes. These experiments will permit us to verify if the thermodynamic theory presented here can explain the magnitude and sign of the observed force.

## 6. Summary and Suggested Future Work

We have presented a brief history of the Biefeld-Brown effect: a net force is observed on an asymmetric capacitor when a high voltage bias is applied. The physical mechanism responsible for this effect is unknown. In section 4, we have presented estimates of the force on the capacitor due to the effect of an ionic wind and due to charge drift between capacitor electrodes. The force due to ionic wind is at least three orders of magnitude too small. The force due to charge drift is plausible, however, the estimates are only scaling estimates, not a microscopic model.



In section 5, we have presented a detailed thermodynamic theory of the net force on a capacitor that is immersed in a nonlinear dielectric fluid, such as air in a high electric field. The main result for the net force on the capacitor is given in equation (33). The thermodynamic theory requires knowledge of the dielectric properties of the fluid surrounding the capacitor plates. It is not possible to estimate the various contributions to the force until we have detailed knowledge about the high-field dielectric properties of the fluid.

More experimental and theoretical work is needed to gain an understanding of the Biefeld-Brown effect. As discussed, the most pressing question is whether the Biefeld-Brown effect occurs in vacuum. It seems that Brown may have tested the effect in vacuum, but not reported it (Appendix B). More recently, there is some preliminary work that tested the effect in vacuum, and claimed that there is some small effect—smaller than the force observed in air; see the second report cited in reference [2]. Further work must be done to understand the effect in detail. A set of experiments must be performed in vacuum, and at various gas pressures, to determine the force versus voltage and current. A careful study must be made of the force as a function of gas species and gas pressure. In order to test the thermodynamic theory presented here, the dielectric properties of the gas must be carefully measured. Obtaining such data will be a big step toward developing a theoretical explanation of the effect. On the theoretical side, a microscopic model of the capacitor (for a given geometry) must be constructed, taking into account the complex physics of ionization of air (or other gas) in the presence of high electric fields. Only by understanding the Biefeld-Brown effect in detail can its potential for applications be evaluated.



## References

1. There are numerous references to asymmetric capacitors, called “lifters” on the internet, see Web sites:

<<http://jnaudin.free.fr/>> (J. Naudin)

<<http://www.soteria.com/brown/>> (Web site summarizing information about Thomas Townsend Brown)

<<http://www.tdimension.com/>> (Transdimensional Technologies)

<<http://www.jlnlabs.org>> (J. Naudin)

<<http://tventura.hypermart.net/index.html>> (American Antigravity)

2. Stein, W. B. “Electrokinetic Propulsion: The Ionic Wind Argument.” Purdue University Energy Conversion Lab, Hangar #3, Purdue Airport West Lafayette, IN 47906, September 5, 2000, on Web at  
<<http://foldedspace.com/EKP%20Ionic%20Wind%20Study%20%20Purdue.doc>>.

Talley, R. L. “Twenty First Century Propulsion Concept.” Veritay Technology, Inc. 4845 Millersport Highway, East Amherst, N.Y. 14051, Report prepared for the Phillips Laboratory, Air Force Systems Command, Propulsion Directorate, Edwards AFB CA 93523–5000.

3. Cheng, Sin-I. “Glow discharge as an Advanced Propulsion Device,” ASRS Journal vol. 12, p1910–1916 (1962).

4. Christenson, E. A. and P. S. Moller. “Ion-Neutral Propulsion in Atmospheric Media,” AIAA Journal vol. 5, no. 10, p. 1768–1773 (1967).

5. See the Web site of Evgenij Barsoukov,  
<[http://sudy\\_zhenja.tripod.com/lifter\\_theory/](http://sudy_zhenja.tripod.com/lifter_theory/)>.

6. See sections 2, 5 and 15 of L. D. Landau and E. M. Lifshitz. “Electrodynamics of Continuous Media.” 2nd Edition, NY: Pergamon Press, 1984.

7. Loeb, L. B. “Fundamental Processes of Electrical Discharges in Gases,.” p. 191, New York: John Wiley & Sons, 1939.

8. Brown, S. C. “Basic Data of Plasma Physics,” p. 62. New York: John Woley & Sons, 1959.

9. Stratton, J. A. “Electromagnetic Theory,” p. 104. New York: McGraw Hill Book Company, 1941.

10. Abraham, M. and R. Becker. “The Classical Theory of Electricity and Magnetism,” p. 95. New York: Hafner Publishing Co. Inc., Second Edition, 1950.

11. Stratton, J. A. “Electromagnetic Theory,” p. 139. McGraw Hill Book Company, N.Y., 1941.



---

## **Appendix A. Short Patent History Dealing With Asymmetric Capacitors**

Townsend Brown, T. "A Method of and an Apparatus or Machine for Producing Force or Motion." GB Patent 300311 issued on November 15, 1928[6].

Townsend Brown, T. "Electrokinetic Apparatus." U.S. Patent 2949550 issued on August 16, 1960.

Bahnson, A. H. Jr. "Electrical thrust producing device." U.S. Patent 2958790 issued on November 1, 1960.

Townsend Brown, T. "Electrokinetic Transducer." U.S. Patent 3018394 issued on January 23, 1962.

Townsend Brown, T. "Electrokinetic Apparatus." U.S. Patent 3187206 issued on June 1, 1965.

Bahnson, A.H. Jr. "Electrical thrust producing device." U.S. Patent 3227901 issued on January 4, 1966.

Cambell, J. W. (NASA). "Apparatus for Generating Thrust Using a Two Dimensional, Asymmetrical Capacitor Module." U.S. Patent US2002012221, issued January 31, 2002.

Cambell, J. W. (NASA). "Aparatus for Generating Thrust Using a Two Dimensional Asymmetric Capacitor Module." U.S. Patent 6411493 issued on June 25, 2002.



## Appendix B. Force on Asymmetric Capacitor in Vacuum

Enclosed below is a copy of my email correspondence with Jean-Louis Naudin (JLN Labs) [1], who hosts a Web site on "Lifters." In this correspondence, Naudin quotes a letter, purportedly signed by T. Townsend Brown, in which Brown discusses the question of whether an asymmetric capacitor has a net force on it in vacuum under high voltage.

T. Townsend Brown's letter, as provided by J. Naudin:

*Dear .....*

*You have asked several question which I shall try to answer. The experiments in vacuum were conducted at "Societe Nationale de Construction Aeronautique" in Paris in 1955-56, in the Bahnsen Laboratories, Winston-Salem, North Carolina in 1957-58 and at the "General Electric Space Center" at King of Prussia, Penna, in 1959.*

*Laboratory notes were made, but these notes were never published and are not available to me now. The results were varied, depending upon the purpose of the experiment. We were aware that the thrust on the electrode structures were caused largely by ambient ion momentum transfer when the experiments were conducted in air. Many of the tests, therefore, were directed to the exploration of this component of the total thrust. In the case of the G.E. test, cesium ions were seeded into the environment and the additional thrust due to seeding was observed.*

*In the Paris test miniature saucer type airfoils were operated in a vacuum exceeding 10<sup>-6</sup>mm Hg. Bursts of thrust (towards the positive) were observed every time there was a vacuum spark within the large bell jar.- These vacuum sparks represented momentary ionization, principally of the metal ions in the electrode material. The DC potential used ranged from 70kV to 220kV.*

*Condensers of various types, air dielectric and barium titanate were assembled on a rotary support to eliminate the electrostatic effect of chamber walls and observations were made of the rate of rotation. Intense acceleration was always observed during the vacuum spark (which, incidentally, illuminated the entire interior of the vacuum chamber). Barium Titanate dielectrique always exceeded air dielectric in total thrust. The results which were most significant from the -standpoint of the Biefeld-Brown effect was that thrust continued, even when there was no vacuum spark, causing the rotor to accelerate in the negative to positive direction to the point where voltage had to be reduced or the experiment discontinued because of the danger that the rotor would fly apart.*

*In short, it appears there is strong evidence that Biefeld-Brown effect does exist in the negative to positive direction in a vacuum of at least 10<sup>-6</sup> Torr. The residual thrust is several orders of magnitude larger than the remaining ambient ionization can account for. Going further in your letter of January 28th, the condenser "Gravitor" as described in my British patent, only showed a loss of weight when vertically oriented so that the negative-to-positive thrust was upward. In other words, the thrust tended to "lift" the gravitor. Maximum thrust observed in 1928 for one gravitor weighing approximately 10 kilograms was 100 kilodynes at 150kV DC. These gravitors were very heavy, many of them made with a molded dielectric of lead monoxide and beeswax and encased in bakelite. None of these units ever "floated" in the air.*

*There were two methods of testing, either as a pendulum, in which the angle of rise against gravity was measured and charted against the applied voltage, or, as a rotor*



4ft. in diameter, on which four "gravitors" were mounted on the periphery. This 4 ft. wheel was tested in air and also under transformer oil. The total thrust or torque remained virtually the same in both instances, seeming to prove that aero-ionization was not wholly responsible for the thrust observed. Voltage used on the experiments under oil could be increased to about 300kV DC and the thrust appeared to be linear with voltage.

In subsequent years, from 1930 to 1955, critical experiments were performed at the Naval Research Laboratory, Washington, DC.; the Randall-Morgan Laboratory of Physics, University of Penna., Philadelphia; at a field station in Zanesville, Ohio, and two field stations in Southern California, of the torque was measured continuously day and night for many years. Large magnitude variations were consistently observed under carefully controlled conditions of constant voltage, temperature, under oil, in magnetic and electrostatic shields, not only underground but at various elevations. These variations, recorded automatically on tape, were statistically processed and several significant facts were revealed.

There were pronounced correlations with mean solar time, sidereal time and lunar hour angle. This seemed to prove beyond a doubt that the thrust of "gravitors" varied with time in a way that related to solar and lunar tides and sidereal correlation of unknown origin. These automatic records, acquired in so many different locations over such a long period of time, appear to indicate that the electrogravitic coupling is subject to an extraterrestrial factor, possibly related to the universal gravitational potential or some other (as yet) unidentified cosmic variable. In response to additional questions, a reply of T.T. Brown, dated April, 1973, stated: "The apparatus which lifted itself and floated in the air, which was described by Mr Kitselman, was not a massive dielectric as described in the English patent. Mr Kitselman witnessed an experiment utilising a 15" circular, dome-shaped aluminum electrode, wired and energized as in the attached sketch. When the high voltage was applied, this device, although tethered by wires from the high voltage equipment, did rise in the air, lifting not only its own weight but also a small balance weight which was attached to it on the underside. It is true that this apparatus would exert a force upward of 110% of its weight.

The above experiment was an improvement on the experiment performed in Paris in 1955 and 1956 on disc air foils. The Paris experiments were the same as those shown to Admiral Radford in Pearl Harbor in 1950.

These experiments were explained by scientific community as due entirely to "ion-momentum transfer", or "electric wind". It was predicted categorically by many "would-be" authorities that such an apparatus would not operate in vacuum. The Navy rejected the research proposal (for further research) for this reason. The experiments performed in Paris several years later, proved that ion wind was not entirely responsible for the observed motion and proved quite conclusively that the apparatus would indeed operate in high vacuum.

Later these effects were confirmed in a laboratory at Winston-Salem, N.C., especially constructed for this purpose. Again continuous force was observed when the ionization in the medium surrounding the apparatus was virtually nil. In reviewing my letter of April 5th, I notice, in the drawing which I attached, that I specified the power supply to be 50kV. Actually, I should have indicated that it was 50 to 250kV DC for the reason that the experiments were conducted throughout that entire range.

The higher the voltage, the greater was the force observed. It appeared that, in these rough tests, that the increase in force was approximately linear with voltage. In vacuum the same test was carried on with a canopy electrode approximately 6" in diameter,



---

*with substantial force being displayed at 150 kV DC. I have a short trip of movie film showing this motion within the vacuum chamber as the potential is applied."*

*Kindest personal regards,*

*Sincerely,*

*T. Townsend Brown*



REPORT DOCUMENTATION PAGE			Form Approved OMB No. 0704-0188		
Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing the burden, to Department of Defense, Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports (0704-0188), 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302. Respondents should be aware that notwithstanding any other provision of law, no person shall be subject to any penalty for failing to comply with a collection of information if it does not display a currently valid OMB control number. <b>PLEASE DO NOT RETURN YOUR FORM TO THE ABOVE ADDRESS.</b>					
1. REPORT DATE (DD-MM-YYYY) March 2003		2. REPORT TYPE Final		3. DATES COVERED (From - To) August 2002 to December 2002	
4. TITLE AND SUBTITLE Force on an Asymmetric Capacitor				5a. CONTRACT NUMBER	
				5b. GRANT NUMBER	
				5c. PROGRAM ELEMENT NUMBER 62705A	
6. AUTHOR(S) Thomas B. Bahder and Christian Fazi				5d. PROJECT NUMBER 3NE6BC	
				5e. TASK NUMBER	
				5f. WORK UNIT NUMBER	
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) U.S. Army Research Laboratory Attn: AMSRL-SE-EE 2800 Powder Mill Road Adelphi, MD 20783-1197				8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER ARL-TR-	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) U.S. Army Research Laboratory 2800 Powder Mill Road Adelphi, MD 20783-1197				10. SPONSOR/MONITOR'S ACRONYM(S)	
				11. SPONSOR/MONITOR'S REPORT NUMBER(S)	
12. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Approved for public release; distribution unlimited					
12. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Approved for public release; distribution unlimited					
13. SUPPLEMENTARY NOTES AMS Code 622705.H94 DA Project AH94					
14. ABSTRACT When a high voltage (~30 kV) is applied to a capacitor whose electrodes have different physical dimensions, the capacitor experiences a net force toward the smaller electrode (Biefeld-Brown effect). We have verified this effect by building four capacitors of different shapes. The effect may have applications to vehicle propulsion and dielectric pumps. We review the history of this effect briefly through the history of patents by Thomas Townsend Brown. At present, the physical basis for the Biefeld-Brown effect is not understood. The order of magnitude of the net force on the asymmetric capacitor is estimated assuming two different mechanisms of charge conduction between its electrodes: ballistic ionic wind and ionic drift. The calculations indicate that ionic wind is at least three orders of magnitude too small to explain the magnitude of the observed force on the capacitor. The ionic drift transport assumption leads to the correct order of magnitude for the force, however, it is difficult to see how ionic drift enters into the theory. Finally, we present a detailed thermodynamic treatment of the net force on an asymmetric capacitor. In the future, to understand this effect, a detailed theoretical model must be constructed that takes into account plasma effects: ionization of gas (or air) in the high electric field region, charge transport, and resulting dynamic forces on the electrodes. The next series of experiments should determine whether the effect occurs in vacuum, and a careful study should be carried out to determine the dependence of the observed force on gas pressure, gas species and applied voltage.					
15. SUBJECT TERMS Electrostatic propulsion, capacitor, high voltage, dielectric, ion propulsion, Bieheld-Brown effect, thermodynamics, force, electric					
16. SECURITY CLASSIFICATION OF:			17. LIMITATION OF ABSTRACT  UL	18. NUMBER OF PAGES  34	19a. NAME OF RESPONSIBLE PERSON Thomas B. Bahder
a. REPORT UNCLASSIFIED	b. ABSTRACT UNCLASSIFIED	c. THIS PAGE UNCLASSIFIED			19b. TELEPHONE NUMBER (Include area code) 301-394-2044

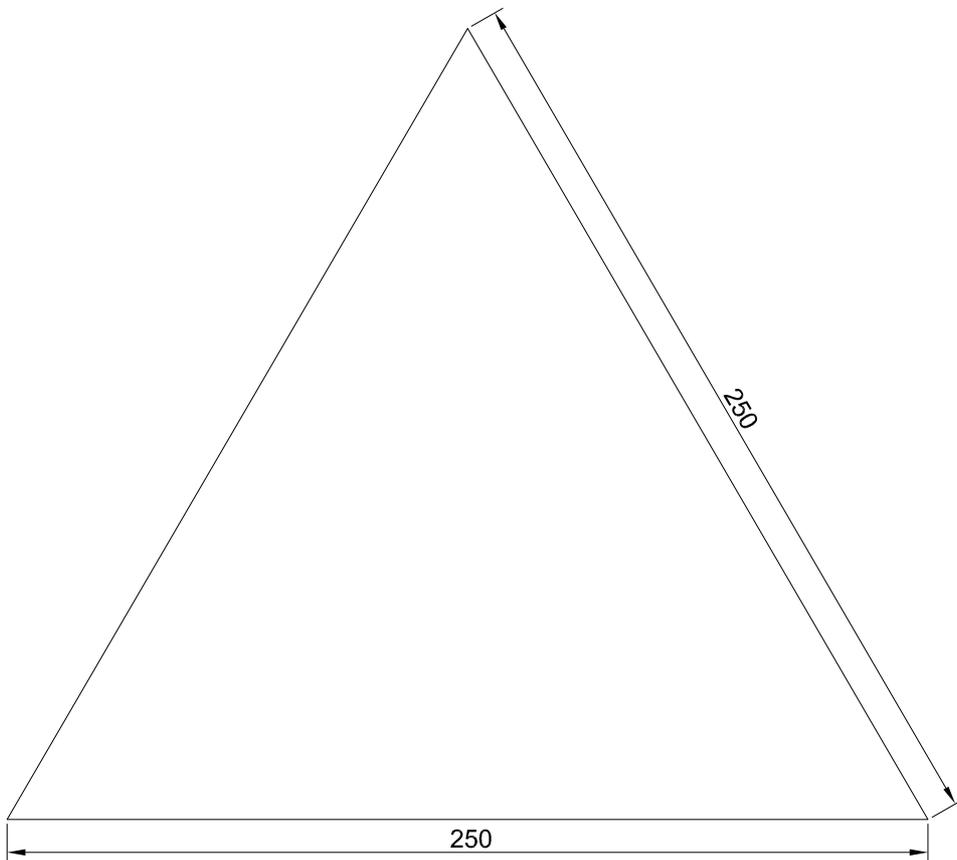
Standard Form 298 (Rev. 8/98)  
Prescribed by ANSI Std. Z39.18



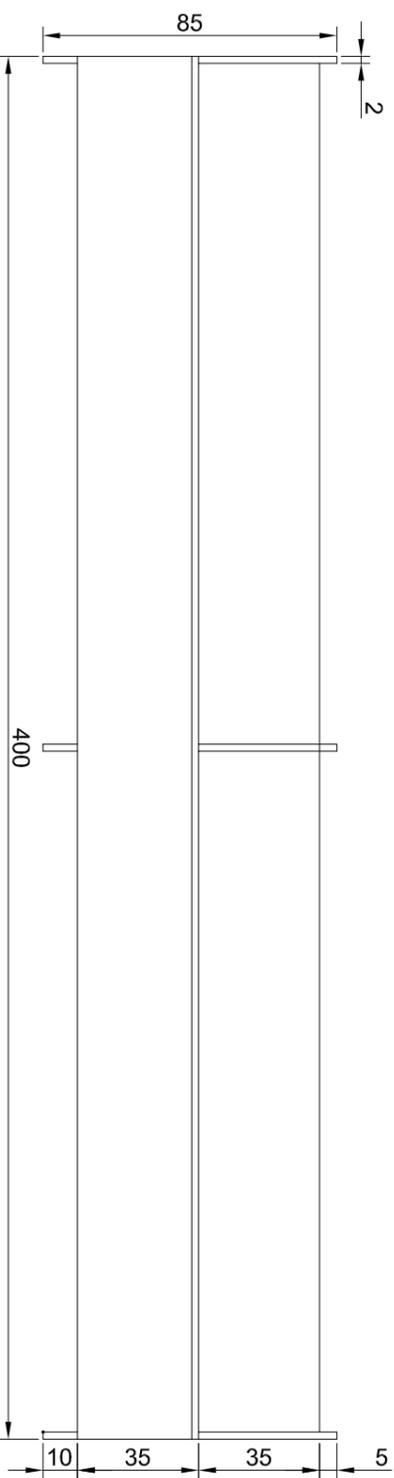
---

## ANEXO 4: PLANOS

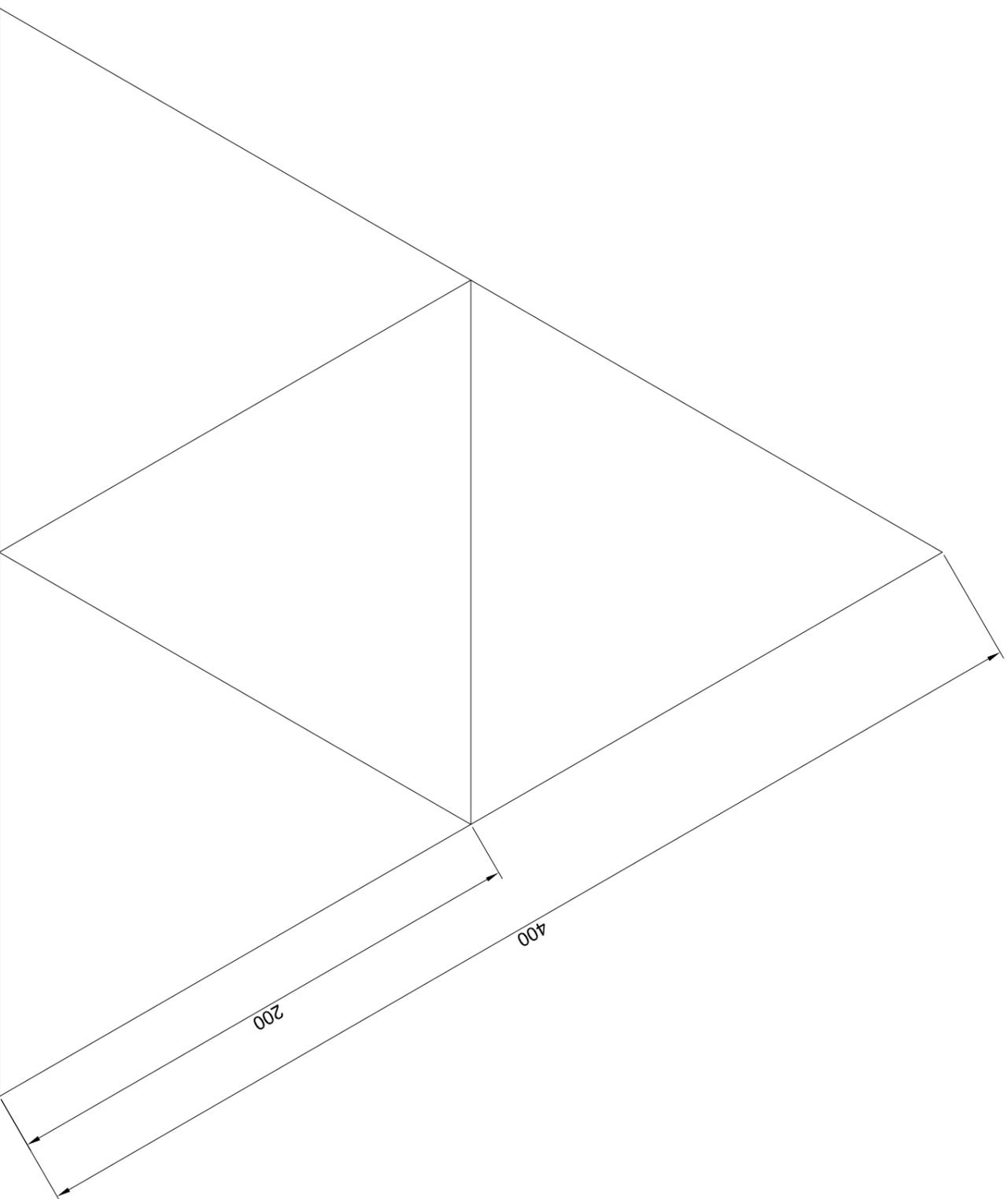




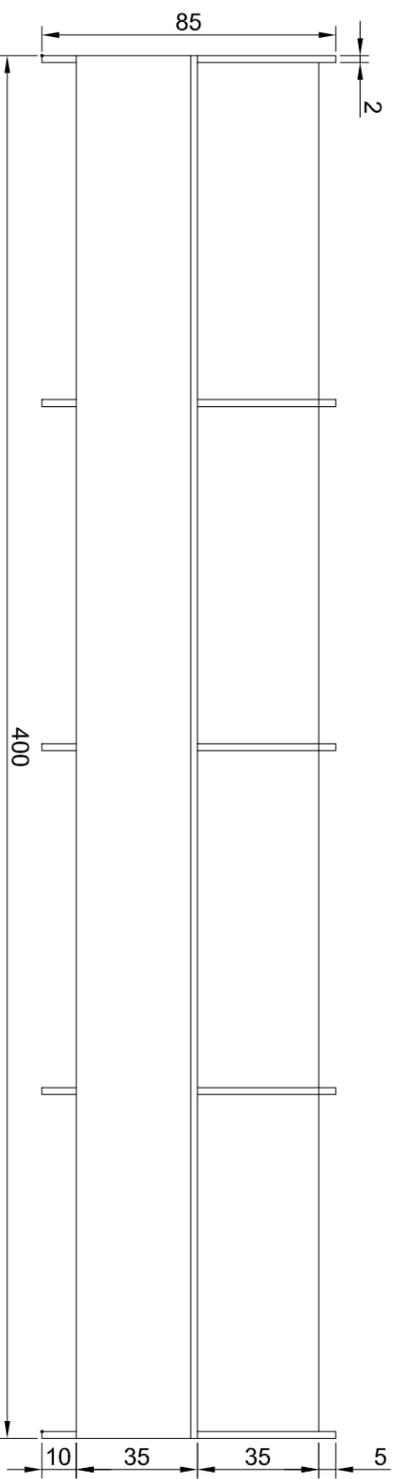
Fecha	Nombre	ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TÉCNICA DE ZARAGOZA	
15/2/12	JAVIER ROS		
Escala:	LIFTER TRIANGULAR		Plano: 1
1:2			Hoja: 2



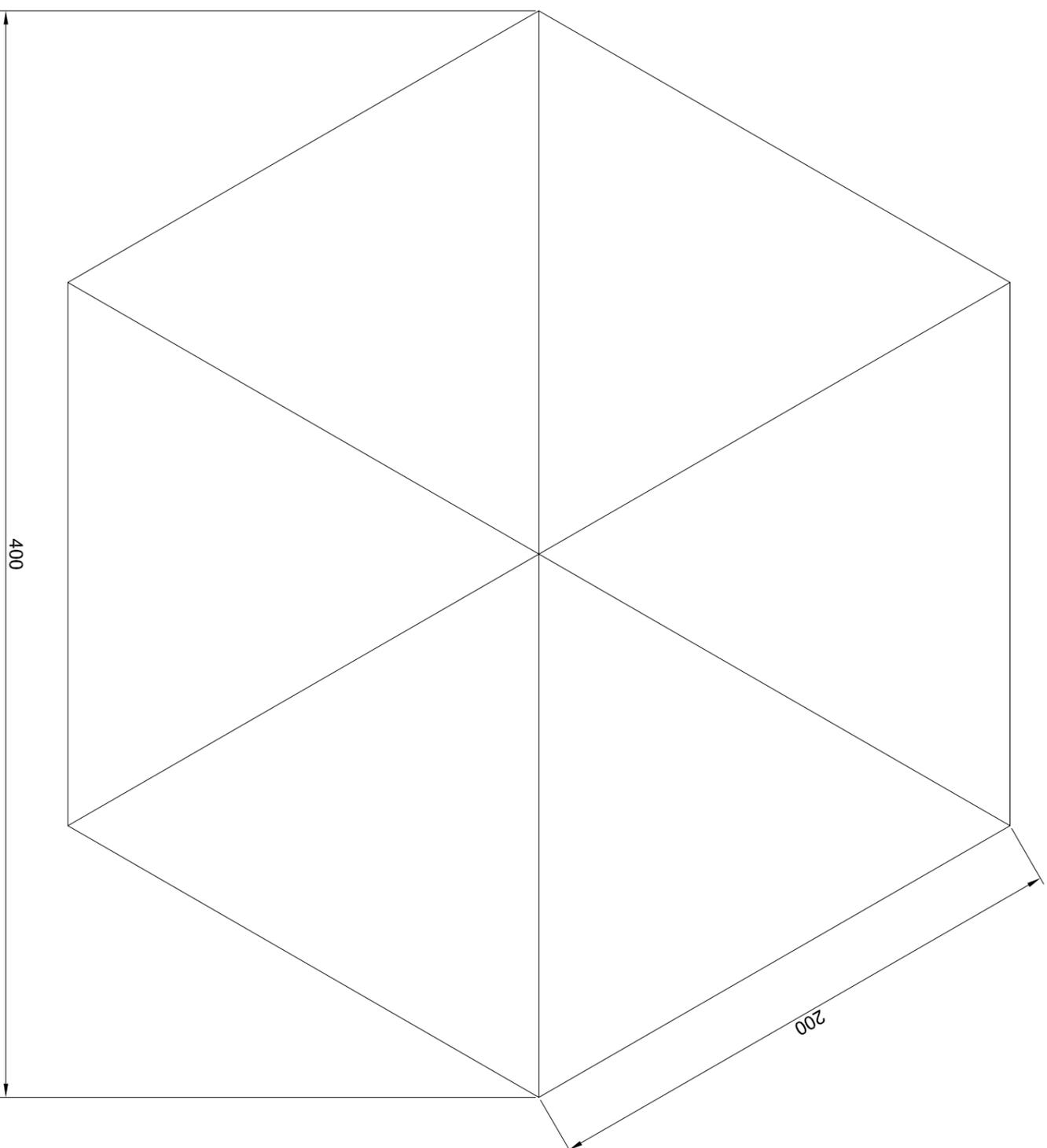
Nombre	JAVIER ROS ABAD	Firma	ESCUOLA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA
Fecha	15/2/12		
Dibujado			
Comprab.			
Escala:	1:2	LIFTER TRIANGULAR GRANDE	
		Plano:	2
		Hoja:	1
		Especialidad:	ELECTRICIDAD



Nombre	JAVIER ROS ABAD	Firma	ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA
Fecha	15/2/12		
Dibujado Comprab.			
Escala:	LIFTER TRIANGULAR GRANDE		
1:2	Plano: 2	Hoja: 2	Especialidad: ELECTRICIDAD



Nombre	JAVIER ROS ABAD	Firma	ESCUOLA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA
Fecha	15/2/12		
Dibujado			
Comprab.			
Escala:	LIFTER HEXAGONAL		Plano: 3
1:2			Hoja: 1
			Especialidad: ELECTRICIDAD



Nombre	JAVIER ROS ABAD	Firma	ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA
Fecha	15/2/12		
Dibujado			
Comprab.			
Escala:	LIFTER HEXAGONAL		Plano: 3
1:2			Hoja: 2
			Especialidad: ELECTRICIDAD