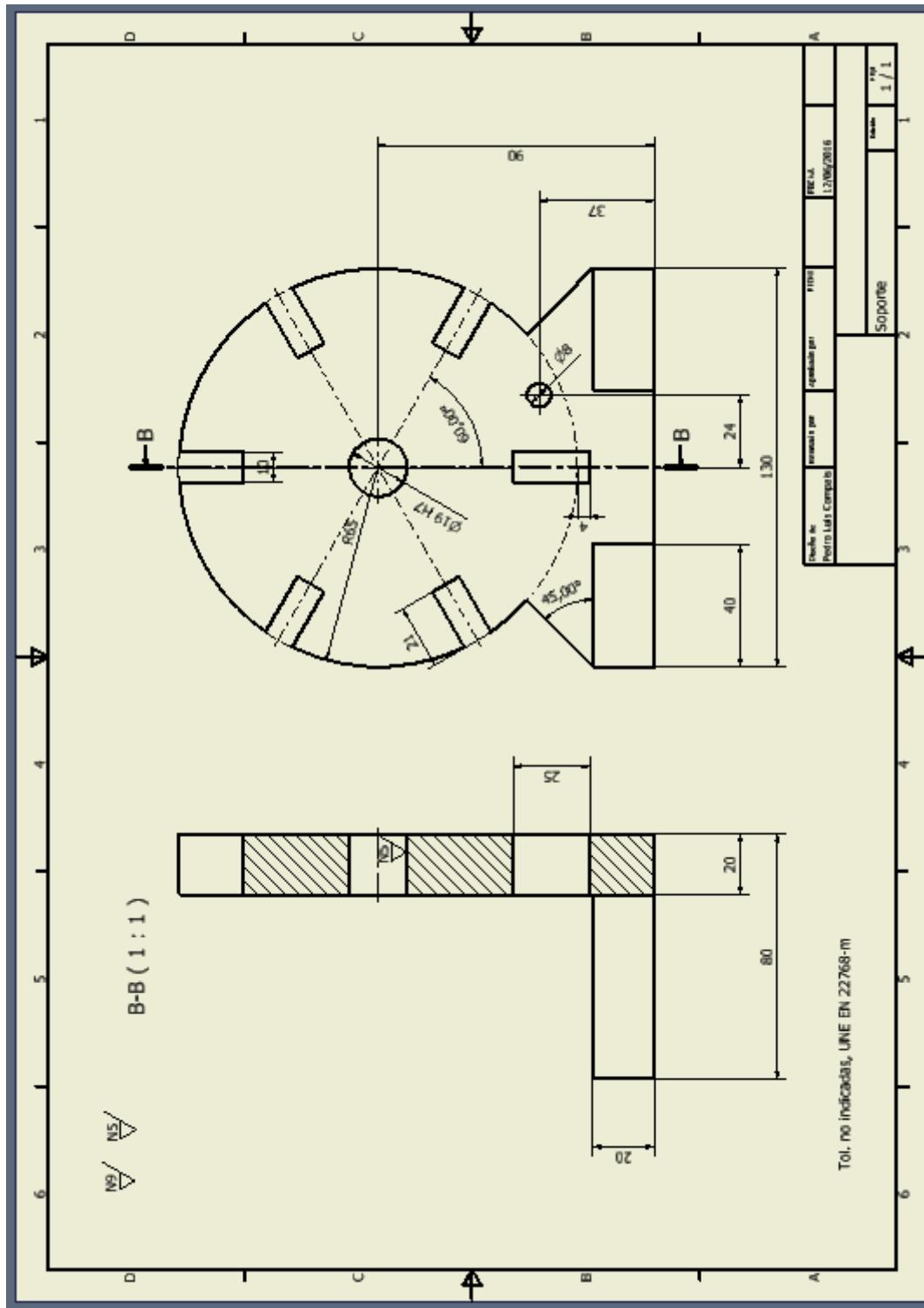




Anexos

Anexo I. Plano del diseño del soporte





Anexo II. Imágenes ampliadas del diseño

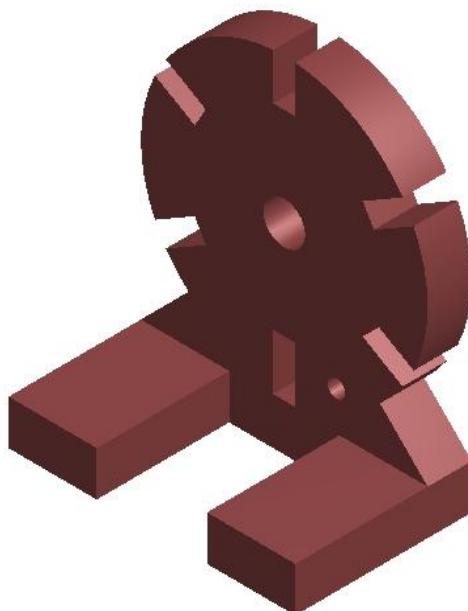


Figura 21. Diseño del soporte.

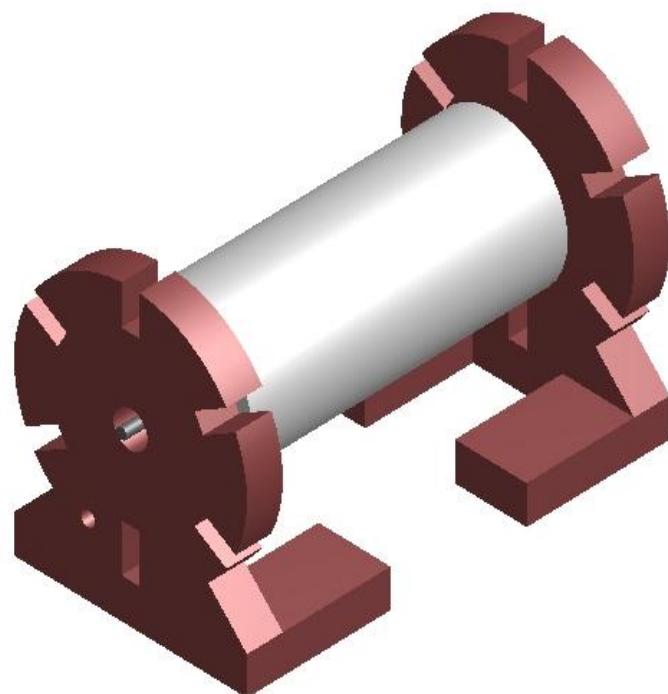


Figura 22. Diseño del rotor, eje y soportes.

Anexo III. Imágenes del motor construido

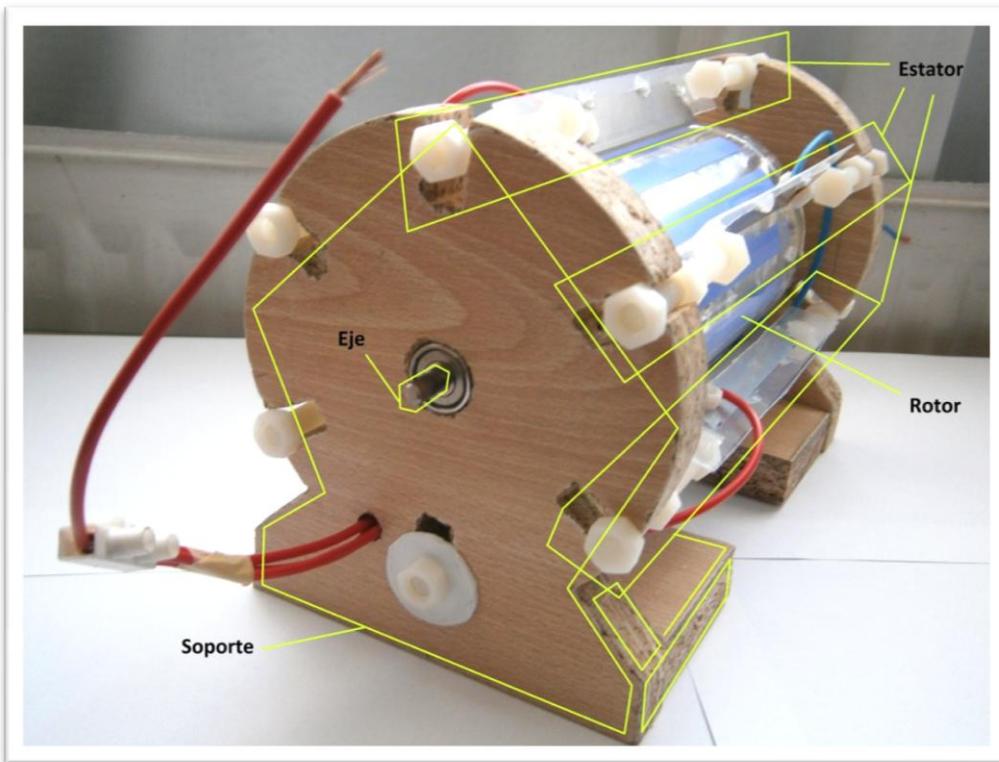


Figura 23. Motor construido

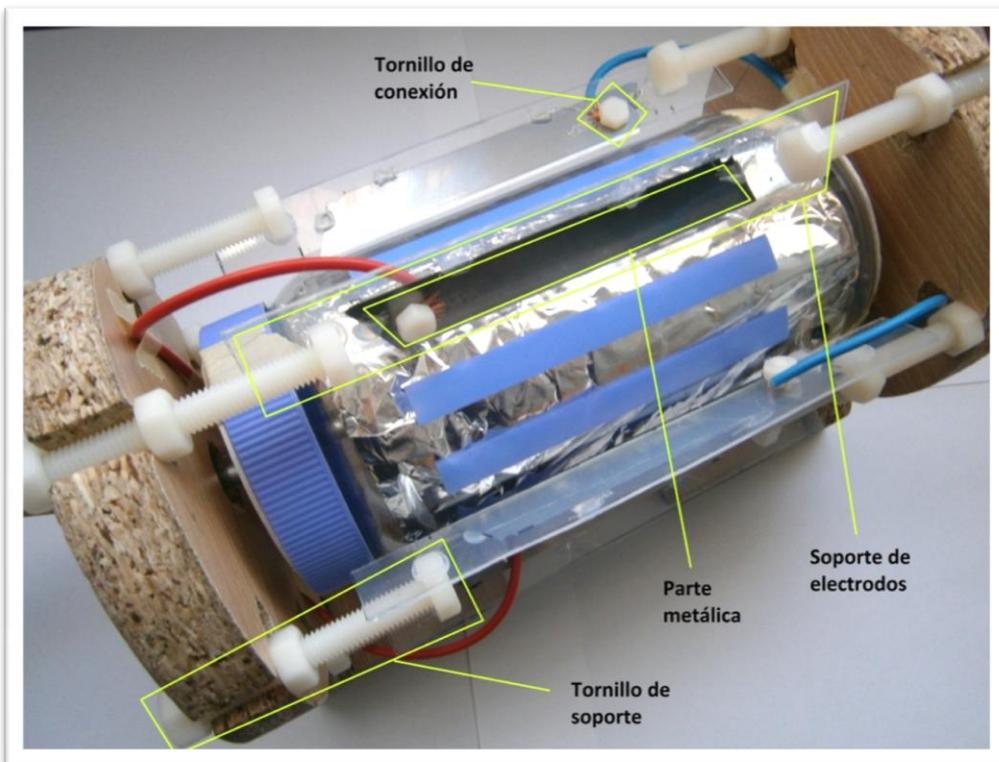


Figura 24. Motor construido.



Anexo IV. Profundización del funcionamiento del motor corona

Se realiza un resumen de un documento incluido en la bibliografía de la memoria de un estudio para conocer más detalles respecto al funcionamiento de un motor corona genérico. Al final se realiza una nota aclaratoria sobre el motor construido en este trabajo.

Se profundiza en el funcionamiento de un motor corona a través del fenómeno del "viento iónico". Se recuerda que el motor corona se fabrica con electrodos puntiagudos para ionizar las moléculas del aire, de forma que se transfieren iones desde los electrodos a la superficie del rotor, donde las fuerzas de Coulomb existentes entre los electrodos y el rotor, producen el giro. En los electrodos se dan altas tensiones (que pueden ser positivas o negativas), de manera que se crea un campo electrostático en torno a ellos, dando lugar a una descarga corona en el aire adyacente a las puntas.

«Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor»

M. Abdel-Salam et al., Electrical Engineering Department, Assiut University, abril 2014.
[En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

El movimiento del aire es provocado por los iones generados en los electrodos debido a la descarga corona. Estos iones pueden circular hacia los electrodos contiguos (si están conectados a tierra o a una tensión de signo contrario) o hacia el rotor, conectado a tierra. En este movimiento, los iones colisionan con el aire eléctricamente neutro, transfiriéndole a sus moléculas una cantidad de movimiento. A este fenómeno se le conoce como "viento iónico".

Como se ha expuesto anteriormente, el viento iónico tiene dos direcciones predominantes, por lo que se discriminarán dos componentes:

- Componente monopolar, cuya dirección viene dada por los electrodos de alta tensión y el rotor conectado a tierra.
- Componente bipolar, con dirección dada por electrodos contiguos y distinta tensión.

Con relación a la componente monopolar, hay conducción monopolar de los iones corona de los electrodos con tensión al rotor, asociada con el viento iónico (la polaridad de los iones es la misma que la de los electrodos).

Con relación a la componente bipolar, el ángulo de los electrodos se usa para producir distinta componente de viento iónico para cada lado del electrodo, ayudando a generar momento en el rotor.

El viento iónico asociado al flujo de iones positivos es mayor que el de los iones negativos, debido a la menor movilidad de los iones positivos frente a los negativos. Una menor movilidad radica en un mayor tiempo de residencia en el desplazamiento de los iones entre electrodos bipolares, lo que implica un mayor tiempo disponible para transferir la cantidad de movimiento.

El viento iónico entre electrodos se puede relacionar con una dirección tangencial, así como con un gradiente en dirección radial que aumenta hacia el eje del rotor, dando lugar a una fuerza tangencial.

Con el incremento de tensión aplicado en los electrodos del estator, el campo eléctrico cercano a sus puntas alcanza el valor umbral para la ionización de las moléculas del gas por colisión de electrones. Una avalancha de electrones comienza a desarrollarse en la dirección de máximo campo eléctrico (hacia el rotor). Con el crecimiento de la avalancha, más electrones se desarrollan en la frontera de la avalancha, se emiten más fotones en todas las direcciones y más iones positivos son dejados tras el paso de la avalancha. Se puede dar más de una avalancha si se cumplen determinadas condiciones.

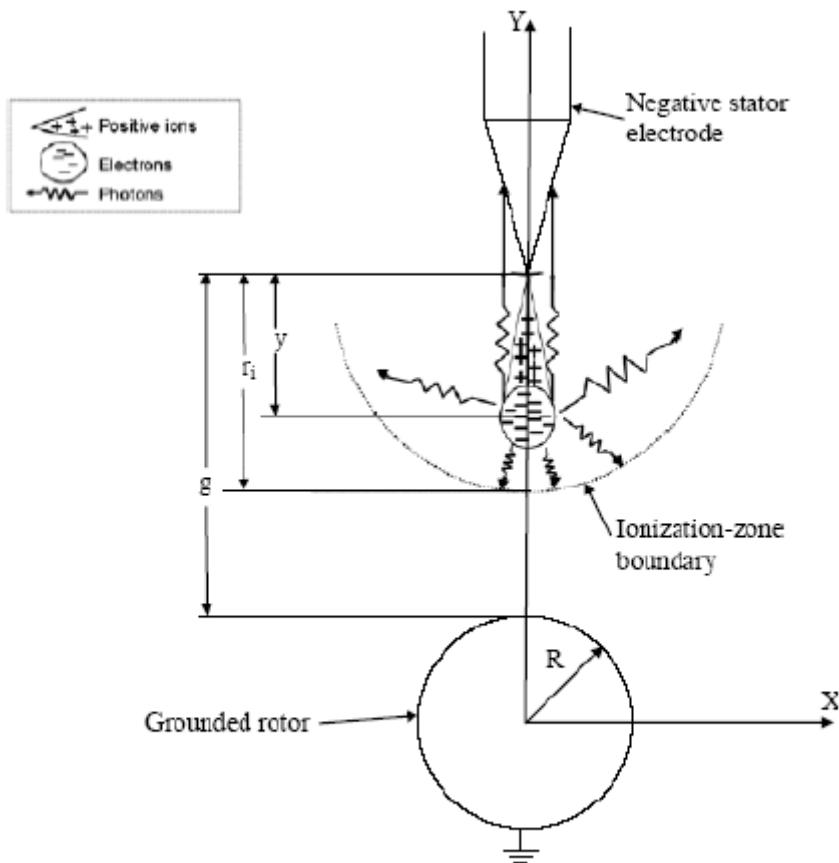


Fig. 5. Development of avalanche at one of ESM electrodes.

Una vez realizada esta profundización, indicar que el motor que se construye en este trabajo sólo tiene componente monopolar debido a que hay una única fuente de alta tensión, la atmósfera (no se tienen dos fuentes con distinta polaridad).



Anexo V. Técnicas de simulación de la descarga corona

A continuación se presenta un breve resumen y conclusiones respecto a las técnicas utilizadas en la bibliografía de la memoria.

No hay método numérico fiable y preciso para la descarga corona, pero suele ser suficiente el empleo de técnicas numéricas, en especial, es común usar algoritmos iterativos donde los problemas de ecuaciones acopladas de campo eléctrico y transporte de cargas se resuelven secuencialmente.

En cuanto al problema del campo eléctrico, la ecuación de Poisson es la que lo gobierna, para cuya resolución existen los métodos de diferencias finitas (no apto para la forma puntiaguda del electrodo) y elementos finitos (aceptado de forma general), además de las técnicas de frontera, que incluyen los métodos de simulación de carga y de elementos frontera (en ambas técnicas, la inclusión de la carga en el espacio complica su resolución).

Respecto al transporte de cargas, la elección del método es menos obvia; puede ser un método de características, método de volúmenes finitos o método de elementos finitos.

«Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor»

M. Abdel-Salam et al., Electrical Engineering Department, Assiut University, abril 2014. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

Se parte de la técnica de simulación de cargas usando los puntos frontera para obtener las líneas del campo eléctrico, a lo largo de las cuales se integran las expresiones de la densidad de carga en el espacio y la función punto escalar de las coordenadas del espacio. Posteriormente, se calcula la densidad de corriente a través de la densidad de carga en el espacio sobre la superficie del electrodo. Con ella, se obtiene la intensidad, que permite hallar el campo eléctrico.

Se presenta la comparativa de los valores medidos y calculados de la corriente corona para una configuración, observando unos errores que no alcanzan el 10% en el peor de los casos, correspondiente con la tensión máxima que soporta una configuración del motor.

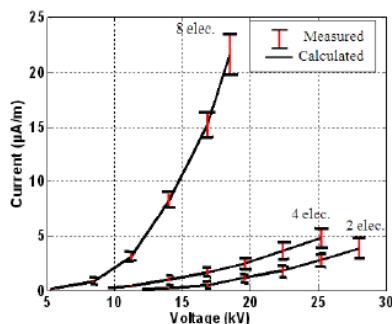


Fig. 8. Measured and calculated corona current of different number of stator electrodes ($g = 0.04\text{m}$) and $R = 0.02\text{(m)}$) ESM.

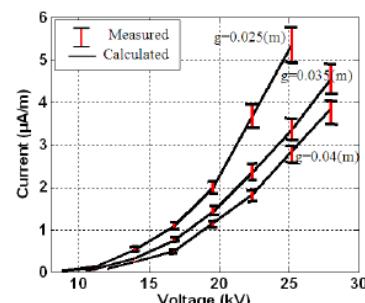


Fig. 11. Measured and calculated corona current of different gaps spacing ($N=2$ -electrodes) ESM.

«Simulation of corona discharge in point-plane configuration»

K. Adamiak y P. Atten, 25 enero 2004. [En línea].

Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

Se usa la técnica de frontera junto al método de elementos finitos (técnica híbrida de FEM-BEM-MOC) para obtener respectivamente la componente armónica (ecuación de Laplace) y distribución de carga del campo eléctrico (ecuación de Poisson), así como el método de características para obtener la distribución de densidad de carga. Se usa un esquema de interpolación simple para unir ambos pasos. Se obtiene una curva razonablemente buena de la característica V-I, pero el cálculo de la distribución de densidad de carga sólo es satisfactorio para electrodos no demasiado punzantes (radios de curvatura iguales a 95 μm).

A continuación se observan algunas comparaciones realizadas entre resultados simulados y experimentales.

En la primera gráfica se tiene un error del 3'87% para el cálculo de la tensión umbral que provoca la descarga corona. Cuando la tensión aumenta por encima de ese valor umbral, la corriente total corona incrementa de una forma más rápida que la lineal. La curva experimental y la calculada concuerdan muy bien si la movilidad de los iones es de 2.3×10^{-4} .

En la segunda gráfica se observa que la curva I/V es casi perfectamente lineal y que los resultados experimentales y computacionales apenas difieren.

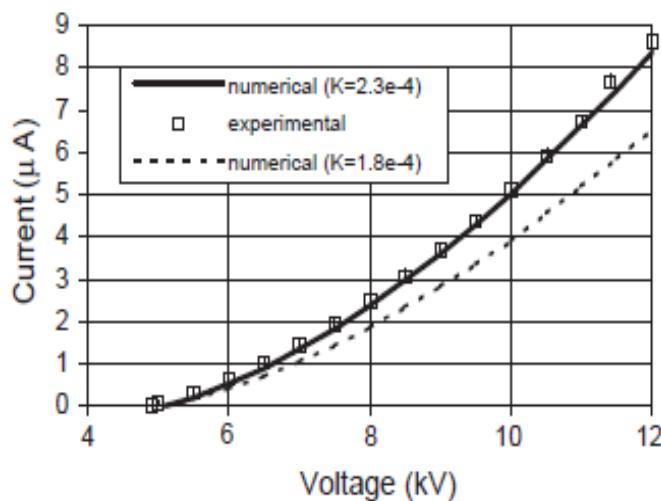


Fig. 1. Experimental and computational V - I characteristics for the 95 μm needle 3.1 cm above the ground plate.

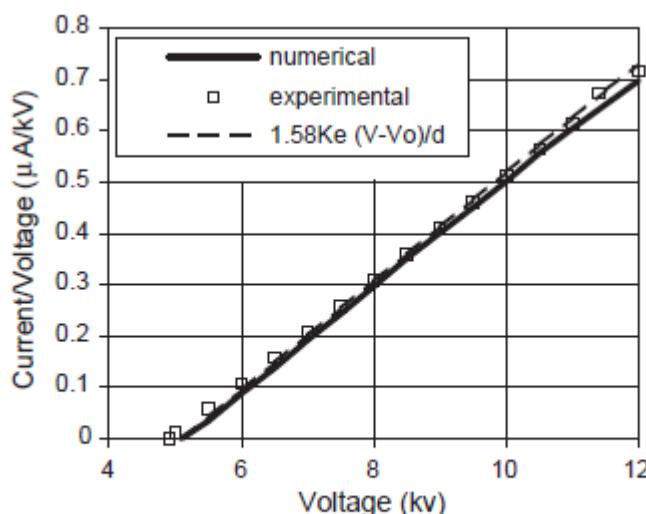


Fig. 2. I/V versus V characteristics for the point-plane configuration (95 μm needle, 3.1 cm above the ground plate).

«Numerical Simulation of Corona Discharge in Compressed Gases with the Effect of EHD Flow»

L. Zhao y K. Adamiak, 2008. [En línea].

Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

Se usa el método híbrido, y se llega a las conclusiones de que la relación entre la corriente corona normalizada y la tensión normalizada es independiente de la presión, pero para obtener la misma corriente de descarga corona a una presión mayor, se necesita una tensión mayor.

«Improved fictitious charge method for calculations of electric potential and field generated by point-to-plane electrodes»

D. Benyoucef y M. Yousfi, 2015. [En línea].

Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

Se usa otra técnica; simulación de carga y mínimos cuadrados, que proporcionan resultados satisfactorios, obteniendo la mayor precisión cuando el electrodo tiene simetría de revolución. Además, este método no requiere condiciones frontera para resolver la ecuación de Laplace, su tiempo de cálculo es pequeño en el problema estudiado y puede adaptarse a la introducción de cargas espaciales.

Se adjuntan gráficas comparativas entre los resultados experimentales y analíticos para una configuración dada. Los errores son menores al 0'2% y 1'5% para la tensión y gradiente respectivamente.

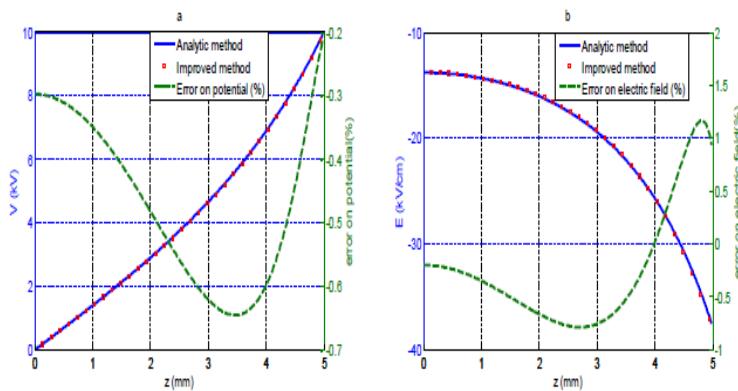


Fig. 15. Comparison between the results of the improved fictitious charge method and the analytical results in the gap along the z-axis (a) electric potential, (b) electric field for positive DC voltage $V_0 = 10$ kV, gap distance $D = 5$ mm and curvature radius $\rho = 4$ mm.

«Calculation of electrostatically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines»

M. Talaat, 2014. [En línea].

Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

Se usa la ecuación de Laplace y simulación de carga, lo que permite calcular situaciones de geometría variable con un método sencillo.



Anexo VI. Experimentos de las referencias

A continuación se presenta un resumen de los distintos experimentos realizados para motores electrostáticos. Todos los experimentos forman parte de estudios incluidos en la bibliografía de la memoria. Destacar la heterogeneidad de los datos proporcionados por cada referencia.

«Operation of Electric Motors from the Atmospheric Electric Field»

O. Jefimenko, West Virginia University, 16 febrero 1971. [En línea].

Available: http://www.ittc.ku.edu/~callen/energy_harvesting/Jefimenko1971AJPpp776-778.pdf. [Último acceso: 14 junio 2016].

- Experimento nº 1: se usó primero una “antena fija” de madera de 7 m de altura, en cuyo extremo se tenía una capsula de latón con una fuente α (material radiactivo) en su interior, para aumentar la ionización local del aire [12], situada al nivel del suelo y suficientemente lejos de edificios altos y árboles que modificasen las líneas equipotenciales, obteniéndose de media 500 V y una intensidad de 0'1 μ A, consiguiendo que un motor electret operase a 60 rpm (diseñado para trabajar a 100 V y 50 nA).

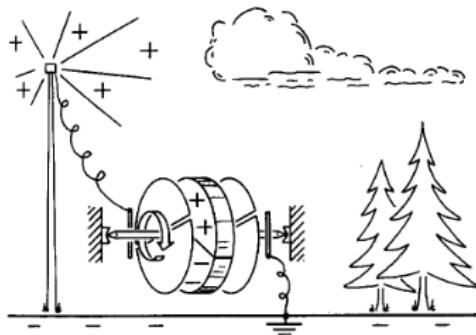


FIG. 2. Operation of the electret motor from the atmospheric electric field by means of an antenna with a radioactive collector.

- Experimento nº 2: la misma antena se situó sobre el tejado de un edificio de 11 plantas que no tenía otros edificios cercanos, obteniéndose una tensión de miles de voltios y una intensidad de 1 μ A, con el motor electret girando a cientos de rpm.
- Experimento nº 3: el mismo motor también funciona con una “antena fija” de 7 m acabada en punta (sin material radiactivo) sobre el tejado nombrado.
- Experimento nº 4: el mismo motor también funciona con una “antena aérea”.
- Experimento nº 5: Se probó un motor corona conectado a la antena acabada en punta colocada en el tejado del edificio, pero no se consiguieron más de 100 rpm, alejadas de las 10.000 rpm y 70 W máximos conseguidos en laboratorio, dado que la antena proporcionaba la tensión e intensidad mínima para que el motor funcionase (4 kV y 0'1 μ A).



El estudio concluye que las antenas convencionales son más adecuadas para motores electrets, de menor potencia que los corona, debido a que estas antenas producen corrientes muy pequeñas.

«The Earth's Atmosphere as a Source for Electric Power»

W. Aston, [En línea].

Available: <http://electretscientific.com/author/Article.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].

- Experimento nº 6: se usó un globo de helio de 62 cm de diámetro, unido a una cuerda de piano de 56 cm de largo (que hacía de captador), conectados al motor a través de un cable de 91 m de largo, conformando una "antena aérea". No se usó material radiactivo. El globo se soltó desde el edificio de 11 plantas comentado en [11], pero apenas sobrepasó el tejado del edificio. El motor corona proporcionaba una potencia de 73'5 mW a velocidades mucho más bajas que las del laboratorio.
- Experimento nº 7: Cuando el motor electret se conectó a la antena, giró tan rápido que hubo que desconectarlo ante el riesgo de que se dañase. Se midieron tensiones de 6 kV.

«Rimstar.org»

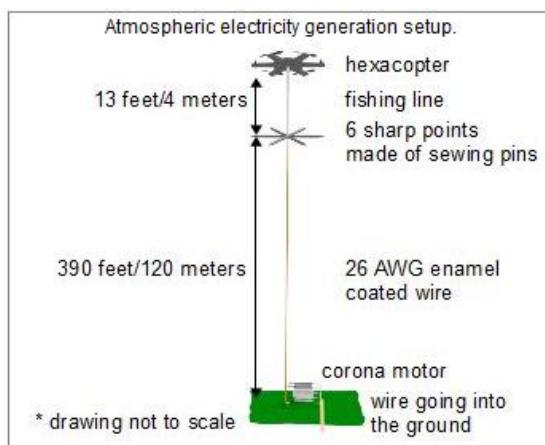
[En línea].

Available:

http://rimstar.org/science_electronics_projects/corona_motor_electrostatic_atmospheric_motor.htm. [Último acceso: 14 junio 2016].

Se tiene un motor corona que en laboratorio proporciona 2'2 mNm, 7'5 mW mediante un generador Van de Graaff (destacar que la transmisión de energía del generador al cable de alta tensión del motor se puede realizar sin contacto entre ellas. Se recomienda separar las hebras del cable para mejorar la transferencia de electricidad).

- Experimento nº 8: Este mismo motor, es conectado a una "antena aérea", formada por 6 alfileres de coser dispuestos de tal forma que sus extremos forman un hexágono, que se eleva a 120 m sobre el nivel del suelo al estar unida a un dron. En este caso, el motor gira a menos revoluciones que en el laboratorio.



«Meridian International Research»

[En línea].

Available: <http://www.meridian-int-res.com/Energy/Atmospheric.htm>. [Último acceso: 14 junio 2016].

Previamente a realizar su experimento, se hace una labor de búsqueda de otras investigaciones de campo. Dr. Hermann Plauson realizó experimentos con globos aerostáticos ("antenas aéreas") fabricados con aleación de magnesio y aluminio, en los que se pintaron zonas con amalgama de zinc, cubiertos de agujas depositadas electrolíticamente y cubiertas con una mezcla de radio. Se obtuvo de 0'72 a 3'4 kW con dos globos aerostáticos a 300 m sobre el nivel del suelo. Heinrich Rudolph diseño colectores de globos aerostáticos de forma elíptica ("antenas aéreas"), hechos con superficies planas que reducen el efecto del viento.

El propio experimento del MIR establece que con una antena de zinc se puede obtener suficiente carga como para iluminar varios LEDs de color blanco. Se aconseja usar una antena con estructura de onda baja, que funciona como si fuese más grande que sus dimensiones reales, lo que permite capturar mayores cantidades de carga y amplificarlas.



Anexo VII. Diseño del motor

El resumen de los estudios contemplados en la bibliografía de la memoria es el siguiente:

«Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor»

M. Abdel-Salam et al., Electrical Engineering Department, Assiut University, abril 2014. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].

Se tiene un motor cuyo rotor es de papel de aluminio, que gira sobre la punta de un eje de metal (contacto puntual, "eje estático"), con electrodos de cobre sujetados por protectores de madera. De este estudio se extraen las siguientes conclusiones:

- La velocidad de giro del motor aumenta con la tensión aplicada.
- Aumentar el espacio entre los electrodos y el rotor entre 25 y 40 mm hace que se necesite más tensión para obtener una misma velocidad. Además, aumentar este espacio hace que la tensión de operación mínima y máxima sea mayor, al igual que las velocidades mínimas y máximas.
- Aumentar el número de electrodos entre 2 y 8 hace que se requiera menos tensión para alcanzar una misma velocidad. También permite reducir la tensión mínima y máxima de operación.

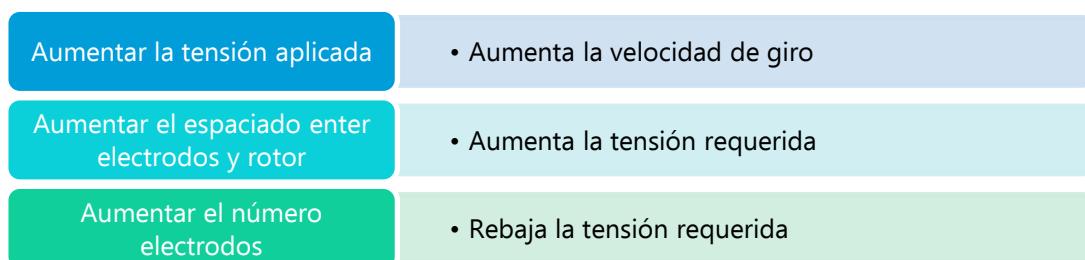


Figura 25. Relaciones de parámetros de diseño.

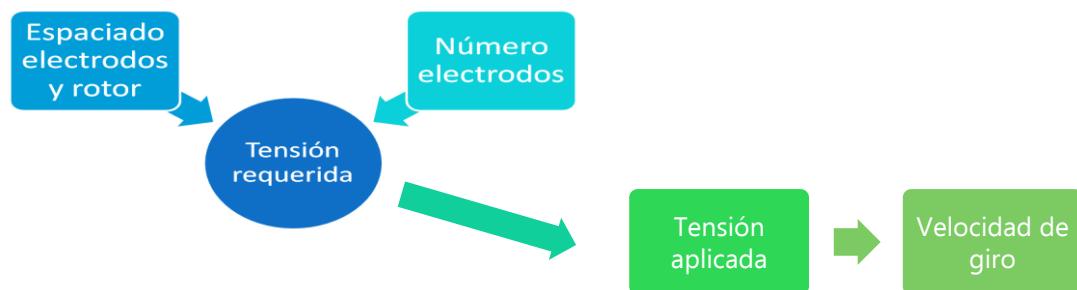


Figura 26. Dependencia de parámetros de diseño.

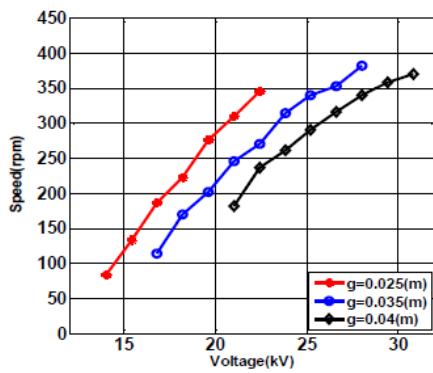


Fig. 14. Speed-voltage characteristics for 2-electrode ESM with different gaps spacing.

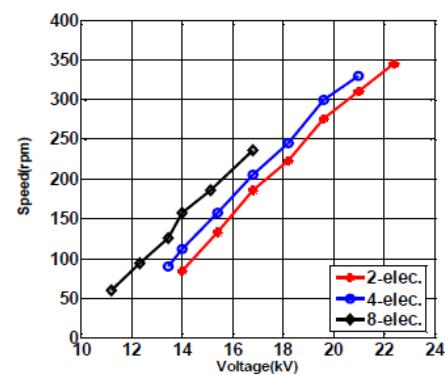


Fig. 17. Speed-voltage for 2, 4, and 8 electrode ESM ($R = 0.035\text{ (m)}$, $g = 0.025\text{ (m)}$).

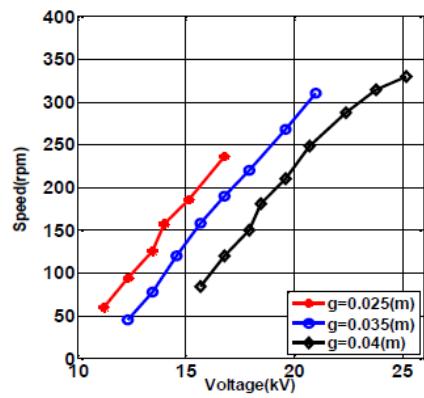


Fig. 16. Speed-voltage characteristics for 8-electrode ESM with different gaps spacing.

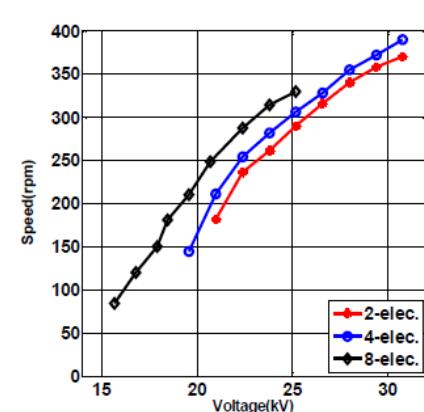


Fig. 19. Speed-voltage for 2, 4, and 8 electrode ESM ($R = 0.02\text{ (m)}$, $g = 0.04\text{ (m)}$).

A continuación se analizan los diseños de dos micromotores corona, cuya fabricación se realiza mediante litografía de rayos X. Las características de los motores corona permiten superar los problemas de fricción y desgaste que presentaban versiones anteriores de micromotores, a la vez que proporciona un par mayor [14], [15]. La información que pueden aportar estos diseños de micromotores al de un macromotor es relevante debido a que investigaciones recientes han hallado similitudes en la descarga corona en ambas escalas [36], [37]. Estos motores se construyeron con níquel para los electrodos, polimetilmetacrilato (PMMA) para el rotor y el soporte de los electrodos, y una aleación de níquel para el eje. Ambos motores son de tipología "eje solidario".

«A Micro corona motor fabricated by a SU-8 built-on X-ray mask»

S. Lee et al., 6 noviembre 2003. [En línea].

Available: DOI 10.1007/s00542-004-0385-4. [Último acceso: 14 junio 2016].

Se ha llegado a distintas conclusiones con una simulación de elementos finitos para un micro motor corona construido con litografía de rayos X:



- La reducción del radio de curvatura de la punta del electrodo hace aumentar la intensidad del campo en su zona colindante, permitiendo trabajar con tensiones menores.
- Al hacerse más largo el estator, la superficie carga en el rotor aumenta, mejorando el par
- El par es proporcional al número de electrodos

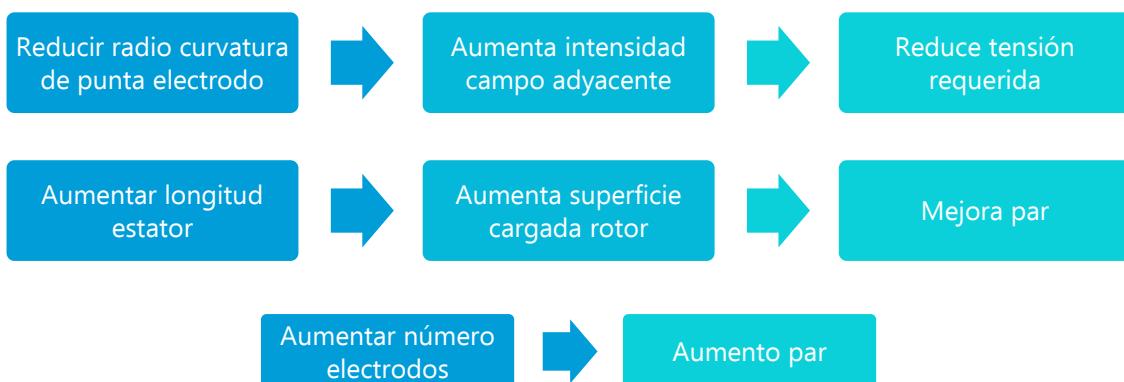


Figura 27. Relaciones de parámetros de diseño.

- Aumentar el número de electrodos reduce la distancia entre electrodos, pero también incrementa la superficie carga, proporcionando un movimiento del rotor más uniforme y estable. Sin embargo, para evitar la ruptura dieléctrica entre electrodos adyacentes se necesita de un espaciado grande, lo que concentra más el campo en la punta del electrodo.

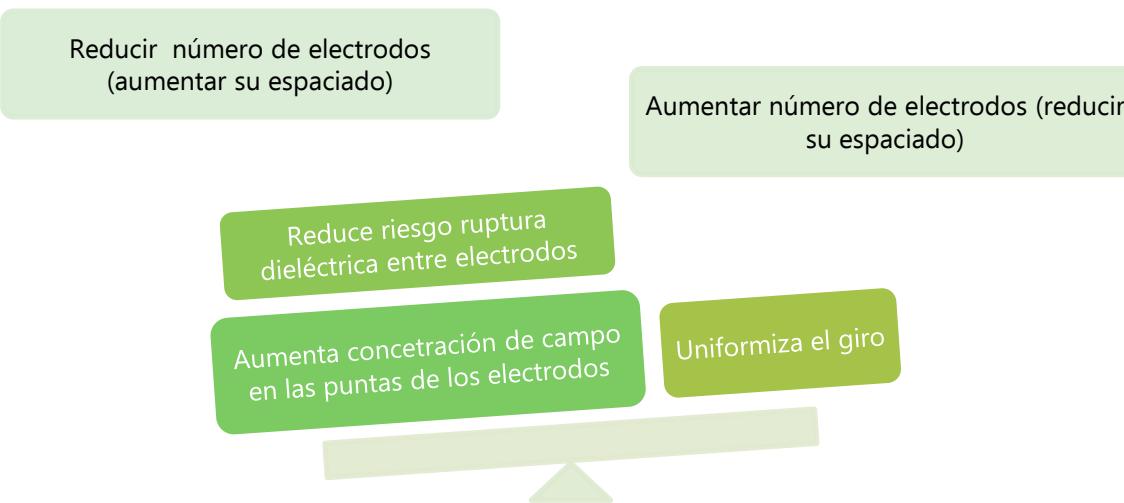


Figura 28. Relaciones de parámetros de diseño.

- Para maximizar el par del motor, se debe de reducir el espaciado de aire entre electrodos y rotor, dado que las fuerzas de Coulomb decrecen rápidamente con la distancia. Sin embargo un espaciado demasiado pequeño reduce la heterogeneidad del campo eléctrico, disminuyendo la generación corona y la carga de la superficie del



rotor. Se elige un espaciado entre electrodos de 360 μm con 12 electrodos y un espaciado con el rotor de 50 μm .

Aumentar espaciado entre electrodos y rotor

Aumenta la carga en la superficie del rotor

Aumenta la generación corona

Maximiza el par

Reducir espaciado entre electrodos y rotor

Figura 29. Relaciones de parámetros de diseño.

- Para mejorar la intensidad del campo en la punta del electrodo, se aumenta el ángulo de inclinación de los electrodos hacia 90° (perpendiculares a la superficie del rotor). No obstante, para obtener fuerzas tangenciales en una sola dirección, se necesita cierta inclinación respecto a la perpendicular, dado que la reducción del ángulo de inclinación incrementa la fuerza tangencial. Se elige un ángulo de 30°.

Aumentar ángulo inclinación

Reducir ángulo inclinación

Aumenta la intensidad del campo

Unidirecciona las fuerzas tangenciales

Figura 30. Relaciones de parámetros de diseño.

«A micro corona motor»

L. Sanghoon et al., 5 octubre 2004. [En línea].

Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 14 junio 2016].

Se obtiene y comprueba experimental la característica del micro motor corona objeto de estudio. Las conclusiones son:

- Pasar de 2 a 4 electrodos hace que se necesite menos tensión para que el motor funcione a una misma velocidad, pero el motor para su funcionamiento a una menor velocidad y tensión debido a la producción de un arco eléctrico.

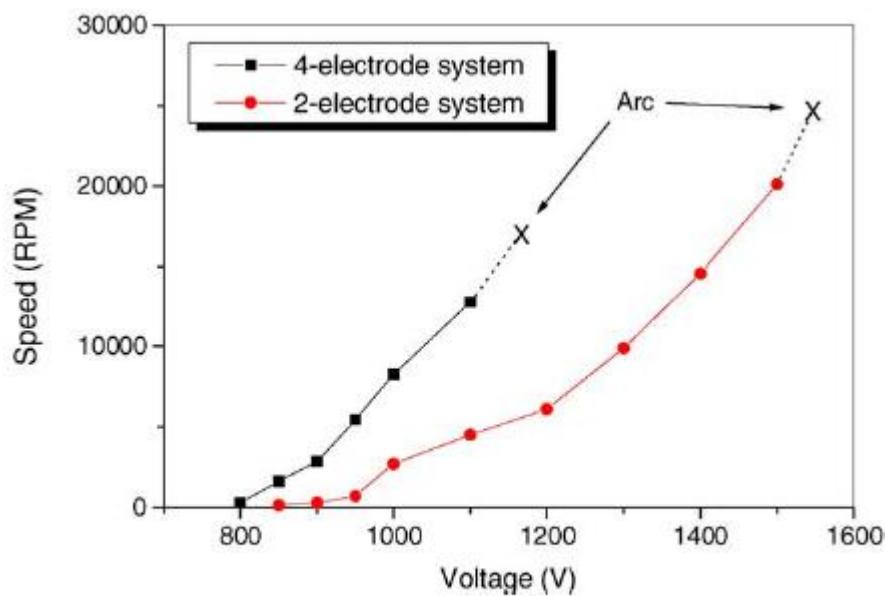


Fig. 6. Measurements of corona motor speed versus applied electrode voltage with vee-jewel bearings at both ends.

- La estimación del par concluye que un aumento de la velocidad angular del estado estacionario, supone un aumento del par de resistencia (relación lineal), igual al par proporcionado. Los momentos obtenidos experimentalmente se han comparado con los simulados, coincidiendo en gran medida.

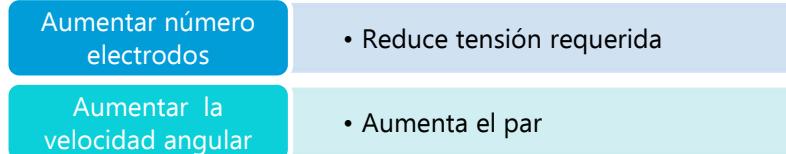


Figura 31. Relaciones de parámetros de diseño.

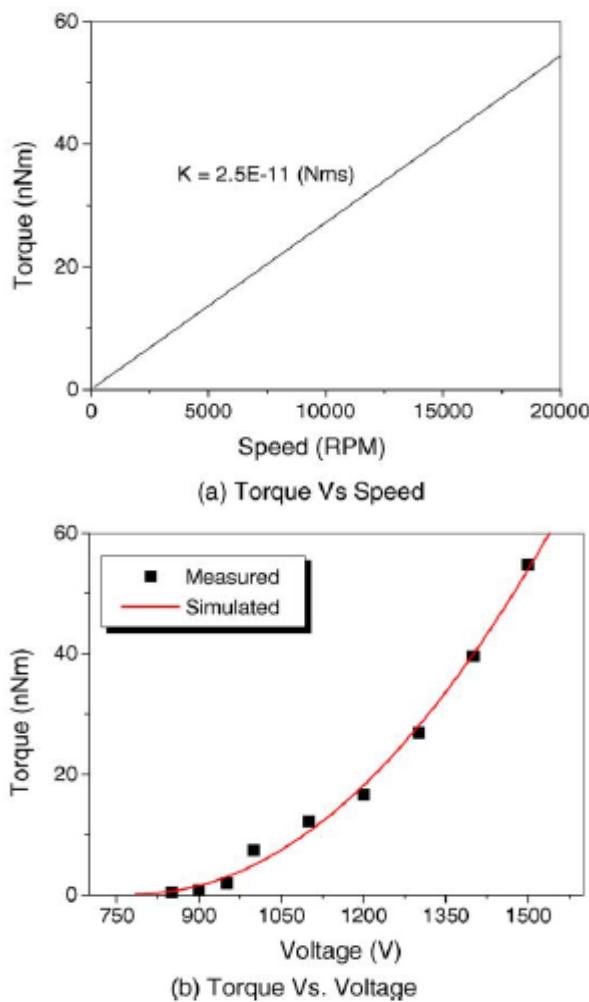


Fig. 9. Torque estimation: (a) torque T_f estimated using $K = 2.5E - 11$ (N m s) from the spin-down test. (b) comparison between measured and simulated T_d ($=T_f$).

[«rimstar.org»](http://rimstar.org)

[En línea].

Available:

http://rimstar.org/science_electronics_projects/corona_motor_electrostatic_atmospheric_motor.htm. [Último acceso: 14 junio 2016].

Se fabrican dos tipos de motores, que tienen en común la utilización de un bote de plástico y su tapa, recubierto en su interior con papel de aluminio, como rotor. El primero de ellos, de "eje estático", usa un bolígrafo como eje, recortes de una bandeja de horno, de pequeño grosor y de aluminio, para los electrodos, que se son sujetados mediante trozos de perchas metálicas. Por otro lado, el motor de "eje solidario" usa una varilla de latón como eje y hojas de un raspador como electrodos.

La única comparación entre ambos motores es que el motor de "eje solidario" es más potente que el otro.

Anexo VIII. Modelo desarrollado para antena aérea

A continuación se detalla el modelo construido para el cálculo de una antena aérea basada en unos globos que elevan el cable.

Los globos atados al cable conectado al motor, elevarán el cable hasta una altura que vendrá dada por la longitud del cable que ata los globos al motor y por la velocidad del viento. Se tendrá una situación tal que:

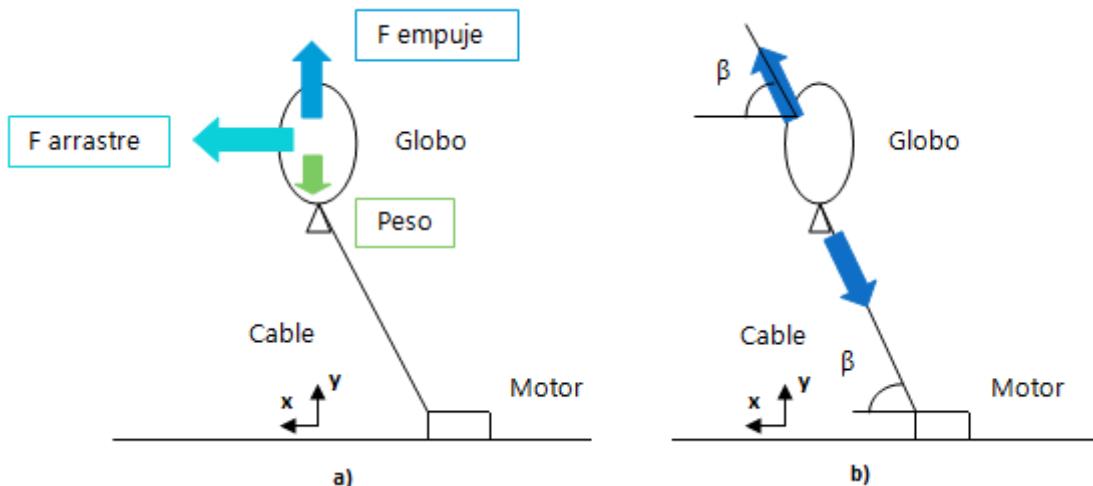


Figura 32. a) Fuerzas que actúan sobre el sistema. b) Equilibrio de fuerzas.

Sobre el sistema actúan distintas fuerzas:

- Peso, P : dado por la masa del globo, de la mezcla de helio y aire que contiene, y del cable que eleva.

$$P = g(l_{cable}m_{lineal} + j \cdot m_{globo\ hinchado})$$

Dónde:

$g \equiv$ aceleración gravedad

$l_{cable} \equiv$ longitud del cable

$m_{lineal} \equiv$ masa lineal del cable

$j \equiv$ número de globos

$m_{globo\ hinchado} \equiv$ masa del globo hinchado (látex y mezcla helio aire)

- Fuerza de empuje, F_e : dada por el peso del volumen de aire desplazado por el globo.

$$F_e = g\rho_{aire}V_{globo}$$

Dónde:

$\rho_{aire} \equiv$ densidad del aire

$V_{globo} \equiv$ volumen del globo



- Fuerza de arrastre, F_d : dada por la resistencia que ofrece el globo a la velocidad del aire. La velocidad del aire aumenta con la altura, teniendo una tendencia asintótica que puede ser dada por:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{aire} u^2 A$$

Dónde:

$$\begin{aligned}C_d &\equiv \text{coeficiente de arrastre} \\u(z) &\equiv \text{velocidad del aire} = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \\&\alpha \equiv \text{coeficiente de rugosidad del terreno} \\A &\equiv \text{área frontal proyectada}\end{aligned}$$

De esta manera, las fuerzas que actúan sobre el globo en el sistema de coordenadas son:

$$\begin{aligned}F_x &= F_d \\F_y &= F_e - P \\&\text{con } \beta = \arctan \left(\frac{F_y}{F_x} \right)\end{aligned}$$

Los datos de las distintas variables se han obtenido mediante el distribuidor de la mezcla de helio aire [38] y de sendos estudios respecto a la aerodinámica de la ascensión de un globo [28], [29].

De esta forma, para resolver el sistema hay que realizar un proceso iterativo, en cuyo paso inicial se supone que el globo se encuentra a la altura máxima, que corresponde con el cable extendido perpendicularmente respecto al suelo, de forma que la fuerza de empuje es máxima. La fuerza resultante que actúa sobre el globo da el ángulo del cable respecto al suelo, obteniendo una nueva altura a la que actuará una fuerza de arrastre menor, por lo que habrá que calcular de nuevo la fuerza resultante.

$$\begin{aligned}h(0) &= l_{cable}; \quad F_d(0) \\h(1) &= l_{cable} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = l_{cable} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{F_y}{F_d(0)}\right)\right); \quad F_x(1) \\&\cdot \\&\cdot \\&\cdot \\h(n) &= l_{cable} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{F_y}{F_d(n-1)}\right)\right); \quad F_x(n)\end{aligned}$$

Cinco iteraciones son suficientes para tener errores del 0%.

Mediante el modelo desarrollado, se busca estudiar la influencia de distintas variables sobre la altura alcanzada por el sistema.

Para comparar las cantidades de volumen mezcla helio aire que se necesita, se ha definido la unidad del "globo", que es una esfera de látex de 22'86 cm de diámetro.



Se ha usado un coeficiente de rugosidad intermedio, correspondiente con localizaciones con muchos árboles y algún edificio.

Validación del modelo

Se han comprobado los resultados que proporciona el modelo mediante la comparación con los datos experimentales que se obtuvieron en el "Experimento 3" recogido en el capítulo 5 de este trabajo, "Actas experimentales", del cual se incluyen algunas fotos:



Figura 33. Medida nº 2.



Figura 34. Medida nº 5.



Figura 35. Medida nº 6.

Se ha tenido en cuenta la influencia del deshinchado paulatino de los globos durante la hora que duró el experimento, los cuales se deshinchan en 6 horas de media. Este deshinchado se ha aproximado mediante una reducción lineal del diámetro de los globos. Se observa en las gráficas adjuntas que su no consideración influye en los resultados.

Los resultados experimentales se encuentran en su mayoría en el intervalo definido por las alturas máximas y mínimas calculadas, correspondientes a las velocidades mínima y máxima de viento respectivamente que se registraron según AEMET.

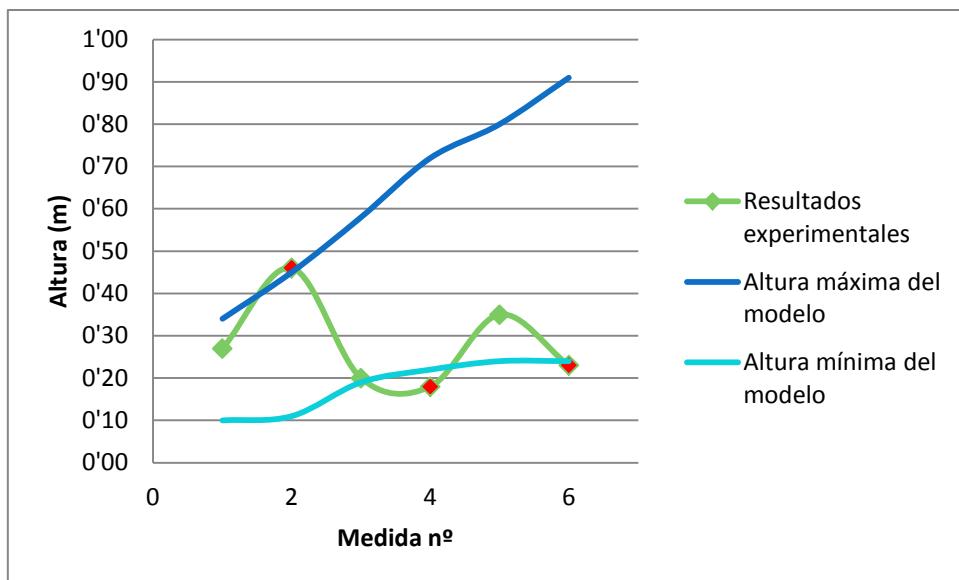


Figura 36. Validación del modelo sin considerar el deshinchado de los globos.

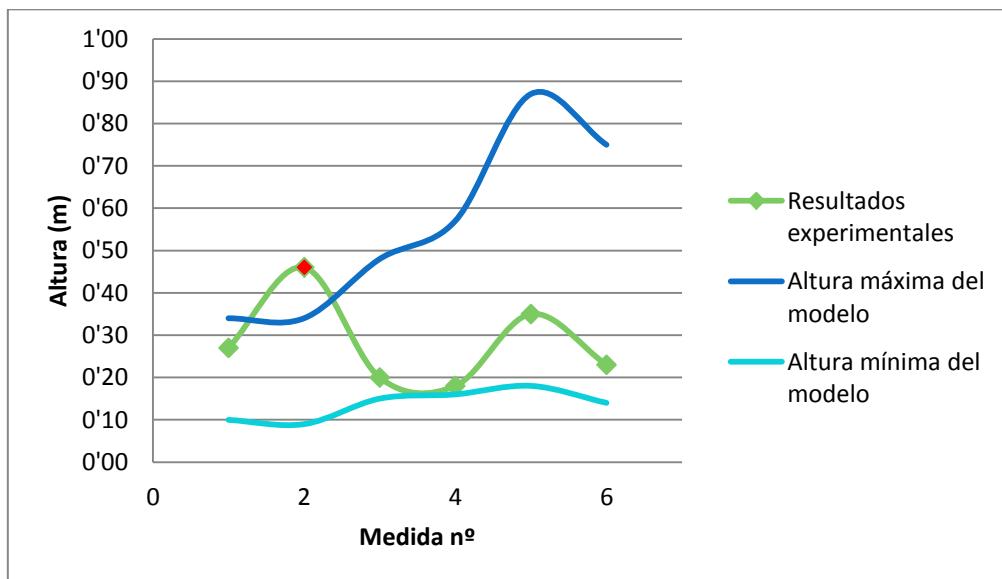


Figura 37. Validación del modelo considerando el deshinchado de los globos.

Se realiza un inciso respecto a la longitud del cable. A pesar de que el conjunto de globos este unido a una longitud concreta de cable, el sistema solo eleva la porción de cable que no está en contacto con el suelo.

Análisis de sensibilidad

Variación del número de globos

Magnitud	Valor	Unidades
Nº globos	-	
Longitud cable	4'0	m
Vel. viento (1'5 m)	5'00	km/h
Coef. rug.	0'24	

Figura 38. Parámetros del sistema para el análisis de la variación de la velocidad del viento.

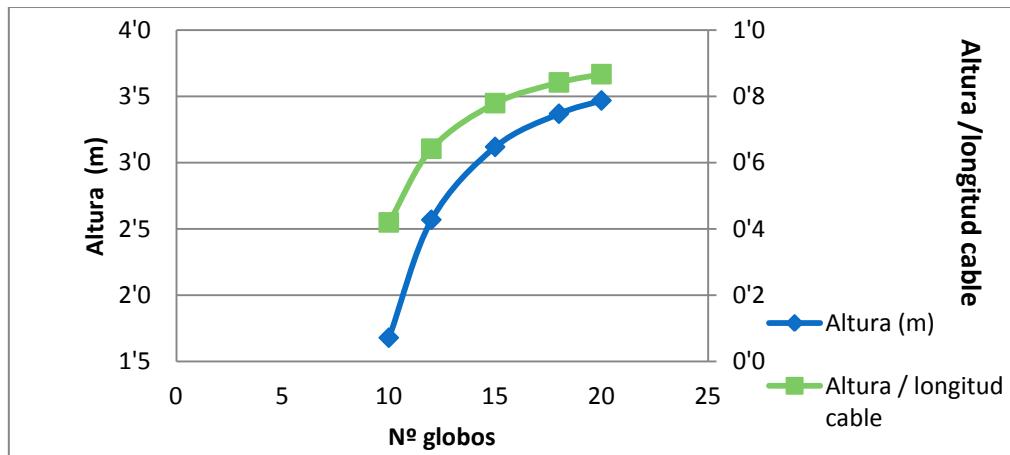


Figura 39. Variación del número de globos.

Destacar que si sólo se utilizan los mínimos globos necesarios para compensar el peso del sistema, la mínima existencia de viento hará que no alcancen mucha altura. Por otro lado, si se usan más globos de los necesarios, esta altura aumenta, y se asciende más altura por unidad de cable.

Variación de la velocidad del viento

Magnitud	Valor	Unidades
Nº globos	10	
Longitud cable	4'0	m
Vel. viento (1'5 m)	-	km/h
Coef. rug.	0'24	

Figura 40. Parámetros del sistema para el análisis de la variación de la velocidad del viento.

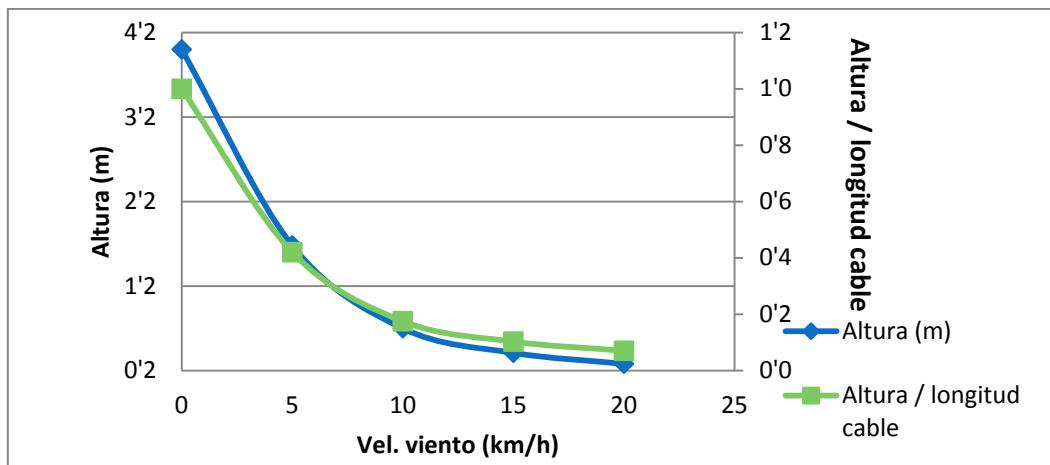


Figura 41. Variación de la velocidad del viento.

Se observa que una existencia de viento de tan solo 5 km/h hace que la altura alcanzada se reduzca a la mitad.

Variación de la longitud del cable

Magnitud	Valor	Unidades
Nº globos	10	
Longitud cable	-	m
Vel. viento (1'5 m)	2'50	km/h
Coef. rug.	0'24	

Figura 42. Parámetros del sistema para el análisis de la variación de la longitud del cable.

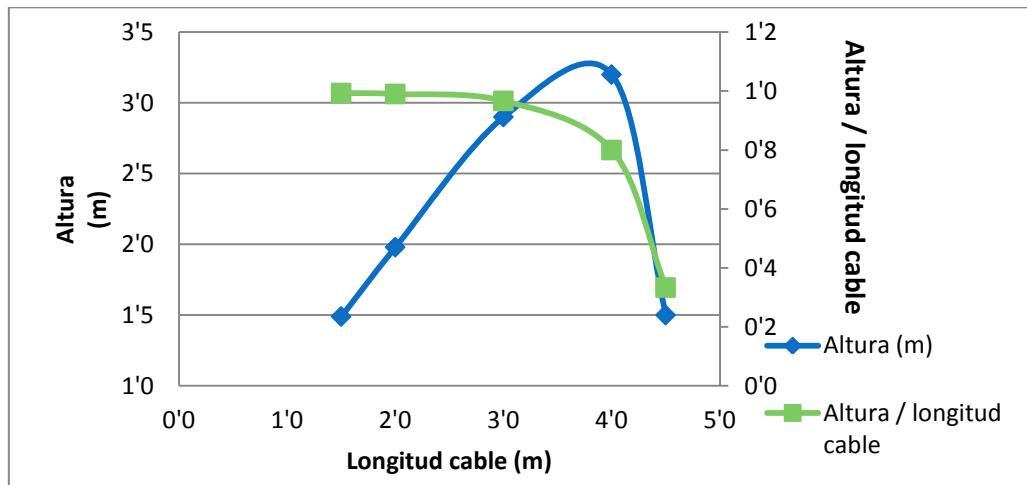


Figura 43. Variación de la longitud del cable.

Existe una longitud de cable para una velocidad de viento que hace que la altura alcanzada por el globo sea máxima.



Dependencia de la altura con la longitud del cable, a distintas velocidades de viento

Magnitud	Valor	Unidades
Nº globos	10	
Longitud cable	-	M
Vel. viento (1'5 m)	-	km/h
Coef. rug.	0'24	

Figura 44. Parámetros del sistema para el análisis de la dependencia de la altura con la longitud del cable, a distintas velocidades de viento.

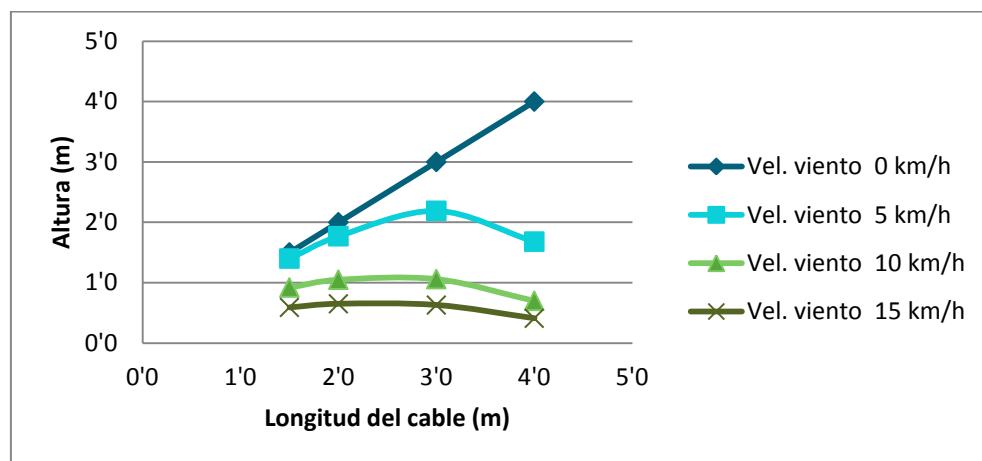


Figura 45. Dependencia de la altura con la longitud del cable, a distintas velocidades de viento.

En ausencia de viento, la altura máxima viene dada por la longitud del cable máxima que puede levantar el sistema

Con presencia de viento, la altura máxima se da para longitudes de cable inferiores a la máxima.

Las conclusiones del modelo desarrollado son:

Aumento número globos

Aumento altura

Aumento velocidad del viento

Reducción altura

Longitud de cable óptima

Altura máxima

Figura 46. Relaciones entre variables del sistema de captura de energía.