



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño e implementación del motor
electrostático corona con aprovechamiento de
la electricidad atmosférica

Design and implementation of a corona
electrostatic motor exploiting atmospheric
electricity

Autor: Pedro Luis Compais Serrano
Director: José Ramón Beltrán Blázquez
Departamento: Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Universidad Zaragoza
24/06/2016



Diseño e implementación del motor electrostático corona con aprovechamiento de la electricidad atmosférica

Design and implementation
of a corona electrostatic motor
exploiting atmospheric electricity

Resumen

El objetivo principal del trabajo es la construcción y validación de un motor electrostático corona que utilice la electricidad atmosférica. Para su realización, se abordarán los siguientes problemas: análisis constructivo del motor electrostático corona, diseño e implementación del motor, análisis de la captura de electricidad atmosférica y característica y medida operativa.

Se usarán como herramientas del proyecto el estudio teórico del comportamiento de los motores electrostáticos y del sistema eléctrico atmosférico. El propio diseño y construcción del motor, así como la validación del sistema desarrollado, serán otras herramientas de la metodología del proyecto.

En este proyecto se ha conseguido construir y validar un motor electrostático corona, además de profundizar en la problemática del sistema de captura de electricidad atmosférica.



Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Análisis del estado del arte	3
2.1	Electricidad atmosférica.....	3
2.2	Motor electrostático.....	5
2.3	Principio de funcionamiento del motor corona	6
2.4	Técnicas de simulación de la descarga corona.....	6
2.5	Formas constructivas del motor	7
2.6	Sistema de captura de electricidad atmosférica.....	8
3.	Motor	10
3.1	Requerimientos de diseño.....	10
3.1.1	Inherentes al propio funcionamiento del motor corona	11
3.1.2	Obtención de electricidad atmosférica.....	11
3.1.3	Sencillez y accesibilidad.....	12
3.1.4	Adaptabilidad del motor	12
3.2	Diseño.....	13
3.2.1	Rotor	13
3.2.2	Estator.....	14
3.2.3	Soporte.....	14
3.3	Construcción	15
4.	Sistema de captura de electricidad atmosférica	17
4.1	Requerimientos de diseño	17
4.2	Diseño y construcción	17
5.	Actas experimentales	19
5.1	Experimento 1.....	19
5.2	Experimento 2.....	19
5.3	Experimento 3.....	20
6.	Otras consideraciones.....	21
6.1	Valoración del resultado experimental con "antena aérea".....	21
6.2	Condiciones meteorológicas en las que operar el motor.....	22



6.3 Generación de subproductos durante el funcionamiento del motor	22
7. Conclusiones	23
8. Bibliografía	25
Anexos	29
Anexo I. Plano del diseño del soporte.....	30
Anexo II. Imágenes ampliadas del diseño.....	31
Anexo III. Imágenes del motor construido.....	32
Anexo IV. Profundización del funcionamiento del motor corona.....	33
«Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor».....	33
Anexo V. Técnicas de simulación de la descarga corona	35
«Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor».....	35
«Simulation of corona discharge in point-plane configuration»	36
«Numerical Simulation of Corona Discharge in Compressed Gases with the Effect of EHD Flow»	37
«Improved fictitious charge method for calculations of electric potential and field generated by point-to-plane electrodes».....	37
«Calculation of electrostatically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines».....	38
Anexo VI. Experimentos de las referencias	39
«Operation of Electric Motors from the Atmospheric Electric Field»	39
«The Earth's Atmosphere as a Source for Electric Power».....	40
«Rimstar.org»	40
«Meridian International Research»	41
Anexo VII. Diseño del motor	42
«Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor».....	42
«A Micro corona motor fabricated by a SU-8 built-on X-ray mask»	43
«A micro corona motor».....	45
«rimstar.org»	47
Anexo VIII. Modelo desarrollado para antena aérea.....	48
Validación del modelo.....	50
Análisis de sensibilidad.....	52



1. Introducción

El desarrollo de las energías renovables ha permitido obtener energía de fuentes naturales como el sol, el viento o las mareas. Una de las características de este tipo de energías es su localidad: la obtención de energía está limitada por las condiciones meteorológicas o la situación geográfica. Por otro lado, para aprovechar las energías renovables parece que es necesario disponer de máquinas eléctricas de gran tamaño o dispositivos de alta tecnología, lo que se asocia con inversiones importantes, y entre otras razones, hace que estas energías no se utilicen a pequeña escala. Sin embargo, ¿son estos aspectos inherentes a las energías renovables, es decir, rasgos distintivos e ineludibles?

La existencia de una fuente de energía natural disponible en cualquier punto del planeta podría cambiar la propiedad de variabilidad, ampliando el concepto de las energías renovables a una nueva dimensión. Sin embargo, ¿qué fuente de energía natural cumpliría estas condiciones? La respuesta es la atmósfera. La atmósfera almacena energía eléctrica, que por ejemplo se ve manifestada en el rayo de una tormenta eléctrica. Este hecho no implica que sólo se pueda obtener energía de la atmósfera mediante rayos; existen otras formas menos destructivas y con mayor grado de control. Más adelante se detallará una de estas formas, y se estudiará su capacidad como fuente de generación.

Una vez determinada la atmósfera como fuente de energía, la siguiente cuestión a abordar es qué dispositivo puede transformar esta energía en otro tipo de energía más útil. La existencia de los motores electrostáticos habilita el uso de esta fuente de energía, que además, gracias a los motores corona, se puede construir una máquina con un diseño sencillo y materiales baratos e incluso reciclables.

No obstante, el empleo de un motor corona presenta incertidumbres hoy en día. A pesar de que la invención del primer motor corona data de hace más de cien años, no es posible encontrar una versión comercial de él en el mercado actual. Una de las causas de esta situación puede ser la actitud negativa de su creador y los físicos de la época, que consideraban que el motor no era viable económicamente debido a que no podía desarrollar una potencia suficiente para integrarse en la industria [1].

Aunque el motor corona fuese descartado entonces para su uso industrial, puede ser útil en otro tipo de situación. En particular, su implementación a escala local no está descartada, pero la ausencia de estudios al respecto no despeja todas las incertidumbres existentes

En último lugar, para transferir la energía eléctrica de la atmósfera al motor, se necesitará de un sistema de captura de energía, del cual se estudiará su viabilidad.

A raíz de la carencia de información en la implementación del motor corona con aprovechamiento de la electricidad atmosférica, este trabajo surge como estudio preliminar para aportar más conocimiento en el aspecto de su viabilidad.



La memoria se establece de acuerdo al orden cronológico de realización de este Trabajo Fin de Grado, y está estructurada de la siguiente manera. En el capítulo 2 se habla del estado del arte, abordando el problema de escasez y ausencia de contraste entre las distintas fuentes bibliográficas en el campo del uso del motor corona con aprovechamiento de la electricidad atmosférica. El capítulo 3 y 4 se basan en la información recopilada en el capítulo 2 para extraer conclusiones respecto al diseño del motor corona y sistema de captura de electricidad atmosférica, respectivamente. En el capítulo 5 se recoge la validación experimental realizada para el sistema desarrollado, de cuyas valoraciones se habla en el capítulo 6. Finalmente, en el capítulo 7 se comentarán las conclusiones y el trabajo futuro a realizar relacionado con este Trabajo Fin de Grado.

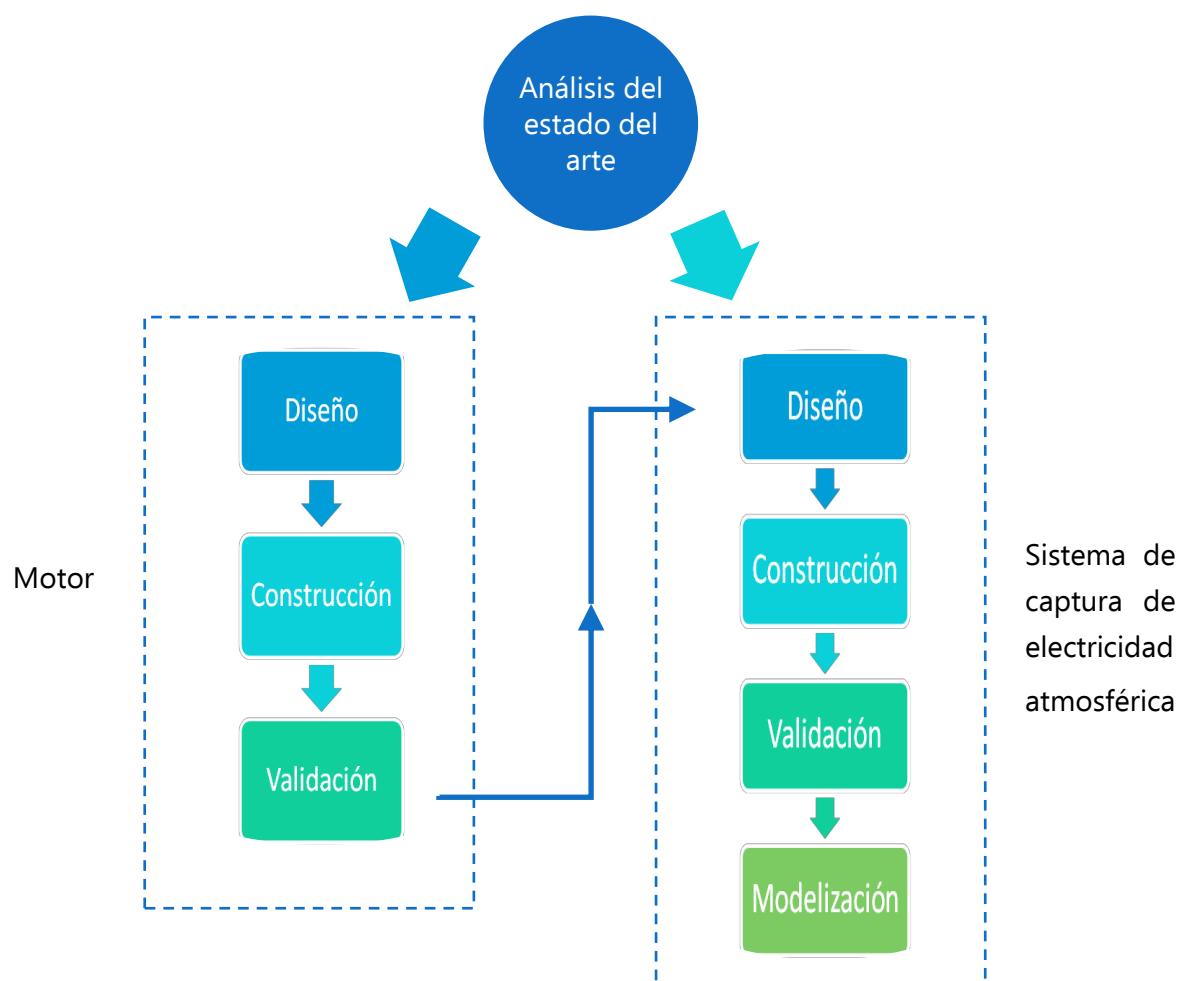


Figura 1. Secuencia de tareas del trabajo.

2. Análisis del estado del arte

En este capítulo se recopilan diversos estudios relativos a la electricidad atmosférica, el motor electrostático corona y el sistema de captura de electricidad atmosférica. Cabe destacar que varios de estos trabajos presentan distintos datos en algunas cuestiones que los interrelacionan, detalladas en las sucesivas secciones de este capítulo, por lo que se ha realizado, además, un esfuerzo de contraste.

2.1 Electricidad atmosférica

"La Tierra, su atmósfera y la zona local del espacio influenciada por el campo magnético del planeta son eléctricamente activos, con diversos mecanismos de generación y transporte de la electricidad. [...] A pesar de que los fenómenos eléctricos tienen una distribución, a menudo es útil aproximar los grandes efectos con un circuito modelo de agrupación, llamado *Círculo eléctrico global* (GEC)" [2].

"En este circuito, las tormentas en la Tierra son la principal fuente de electricidad de la atmósfera. Las tormentas generan tensiones mediante el transporte vertical de cargas positivas en corrientes de aire ascendentes. Las cargas se usen a partículas relativamente grandes de hielo o gotas de agua, cuyo tamaño es suficiente para arrastrar a las cargas sin que puedan oponerse al flujo ascensional, siendo incapaces de volver y recombinarse con cargas negativas más cercanas al suelo" [2].

A medida que la tensión aumenta, parte de la carga se devuelve al suelo en forma de rayo o flujo iónico, mientras el resto sigue el flujo ascensional hacia la ionosfera, dónde la carga es libre de distribuirse horizontalmente". En la "Figura 2", R_s representa la resistencia total de las tormentas [2].

"[...] El resto de la atmósfera es eléctricamente pasiva, con un aire altamente resistivo separando la Tierra conductora de la ionosfera. La carga es devuelta a la Tierra a través de la rama de buen clima a la derecha del circuito, cuya resistencia (R_f en la "Figura 2") es mucho menor que R_s debido a que sólo una pequeña porción de la Tierra está cubierta por tormentas, mientras que la mayoría no. Por lo tanto, hay una gran área para el flujo de corriente de buen clima, que hace su resistencia total mucho más baja" [2].

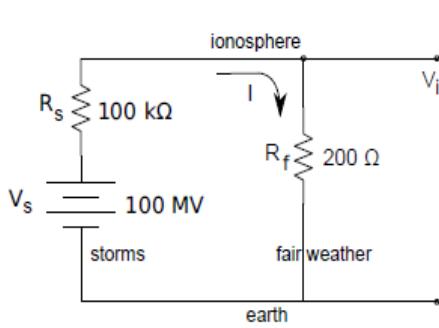


Figura 2. Circuito eléctrico global. [2]

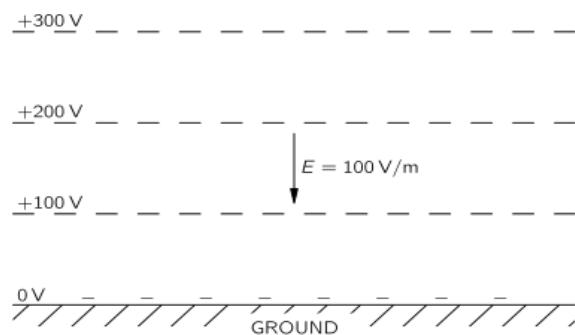


Figura 3. Distribución potencial sobre la Tierra. [3]



En la atmósfera existe por lo tanto, incluso en condiciones de buen clima, un gradiente de potencial y una corriente vertical [4], [5],

La existencia de un gradiente de potencial, de por ejemplo, 100 V/m, quiere decir que a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo, se tienen 100 V y a 2 m 200 V. No obstante, no es suficiente con colocarse a una altura sobre el nivel del suelo para tener una tensión determinada, ya que la deformación de las líneas equipotenciales hace que se necesite de forma general más altura.

A continuación se propone un ejemplo: si una persona está de pie sobre el suelo, a pesar de medir entre 1 o 2 m, a la altura de su cabeza no se tendrá una tensión entre 100 a 200 V, sino de 0 V, dado que ha formado con el suelo una superficie equipotencial, gracias a que el cuerpo es un conductor admisiblemente bueno. Este hecho hace que se deformen el resto de líneas equipotenciales del campo eléctrico terrestre [3], [6].

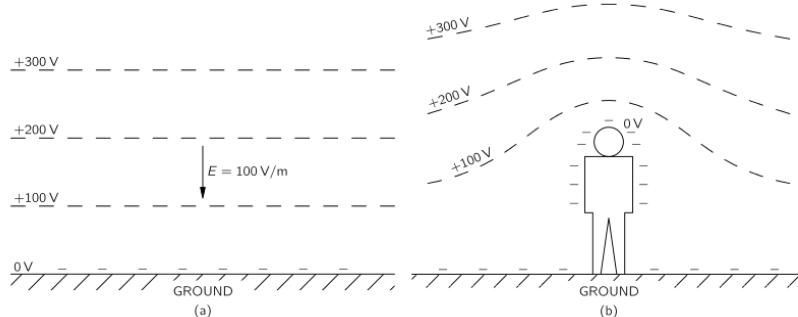


Figura 4. a) Distribución potencial sobre la Tierra. b) Distribución potencial en la proximidad de una persona sobre un lugar llano. [3]

No se ha encontrado un valor único para las magnitudes de la densidad de corriente o gradiente de potencial, pero en distintos trabajos ([3], [2], [7], [8], [6], [9]), se obtienen valores similares, que se pueden resumir en que el gradiente de potencial se encuentra en el rango de 50 a 120 V/m en condiciones de buen clima en las capas de la atmósfera por debajo de los 2 km, y que la densidad de corriente es aproximadamente de 2 o 3 pA/m². En [2] se presenta la siguiente gráfica, que expresa la potencia obtenida para colectores de distinto diámetro a distinta altura:

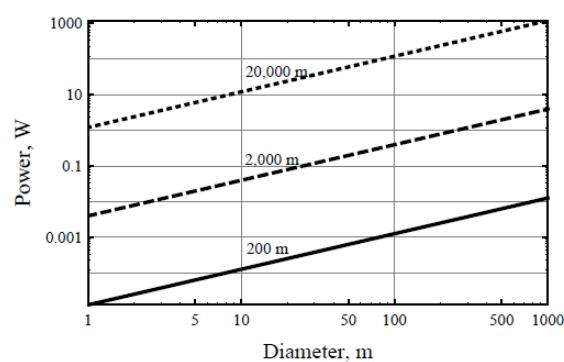


Figura 5. Potencia obtenida para colectores de distinto diámetro y a distinta altura. [2]



La atmósfera puede servir de fuente de energía, pero la energía disponible es limitada [2]. Para aplicaciones locales en las que se dispusiese de un globo de un metro de diámetro situado a 200 metros, se tendrían $10 \mu\text{W}$ [2], potencia suficiente para ser utilizada por dispositivos de almacenamiento de energía ("Energy Harvesting"), usados para aplicaciones médicas, relojes o sensores, por ejemplo [10].

Además, este gradiente de potencial puede ser mayor en otras condiciones meteorológicas [11], o incluso triplicar su valor según la estación del año [12]. A pesar de que la energía disponible en la atmósfera es limitada, la electricidad atmosférica sigue presentando distintas ventajas [12]:

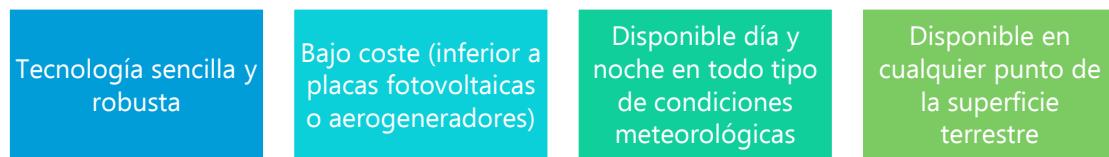


Figura 6. Ventajas de la electricidad atmosférica. [12]

2.2 Motor electrostático

Para que un motor opere con la intensidad y tensión anteriormente mencionadas, debe de tener como poco una impedancia de $10^5 \Omega$. Por lo tanto, los motores electromagnéticos comunes, que suelen necesitar unas intensidades elevadas, no pueden funcionar en estas circunstancias. Sin embargo, la alta impedancia de los motores electrostáticos los hace aptos para funcionar obteniendo energía de la atmósfera [11]. Además, los motores electrostáticos permiten trabajar en sistemas de pequeña escala sin ver reducida rápidamente su eficiencia, como ocurre a los motores electromagnéticos [13].

Dentro de los motores electrostáticos, existen tres tipologías distintas: de chispa, electrets y corona. Sus características se muestran en la siguiente tabla [1], [11], [13]:

Motores electrostáticos	Tensión de alimentación (V)	Velocidad desarrollada (rpm)	Potencia entregada (W)
De chispa	Del orden de 10^3	-	Reducida
Electrets	≥ 500	60 (500 V)	Reducida
Corona	≥ 2.000	6.000 - 12.000 (7 - 13 kV)	Del orden de 10^2

Tabla 1. Características de los motores electrostáticos. [1], [11], [13]

Además de las propiedades enunciadas en la tabla, los motores corona son los que presentan propiedades más atractivas: su diseño es sencillo, no requieren materiales caros, tienen una relación de potencia-peso alta y una eficiencia del 60% en su forma constructiva más sencilla [1], [11], [13]. Por lo tanto, se recomienda el uso del motor corona porque es el más adecuado para aprovechar las cantidades significativas de energía disponible en la atmósfera [11].

2.3 Principio de funcionamiento del motor corona

En el motor corona, el estator se compone de electrodos puntiagudos que dejan un espacio mínimo con la superficie del rotor, de forma que el rotor pueda ser cargado a través de una descarga corona de los electrodos, debido a la ionización del aire por parte de un campo de alta tensión. Cada electrodo transfiere carga al rotor de la misma polaridad que el electrodo, de forma que por fuerzas de Coulomb, cada electrodo repele las partes del estator con la misma polaridad y atrae por las de distinta polaridad, dando lugar a un movimiento giratorio [13], [14], [15].

Los electrodos se conectan de forma alterna a las fuentes de alta tensión y distinta polaridad [16], o de forma alterna a la fuente de alta tensión y a tierra [17] (según las fuentes que se tengan). La parte más puntiaguda de los electrodos hace que la carga se vea acumulada en esta zona respecto al resto del electrodo.

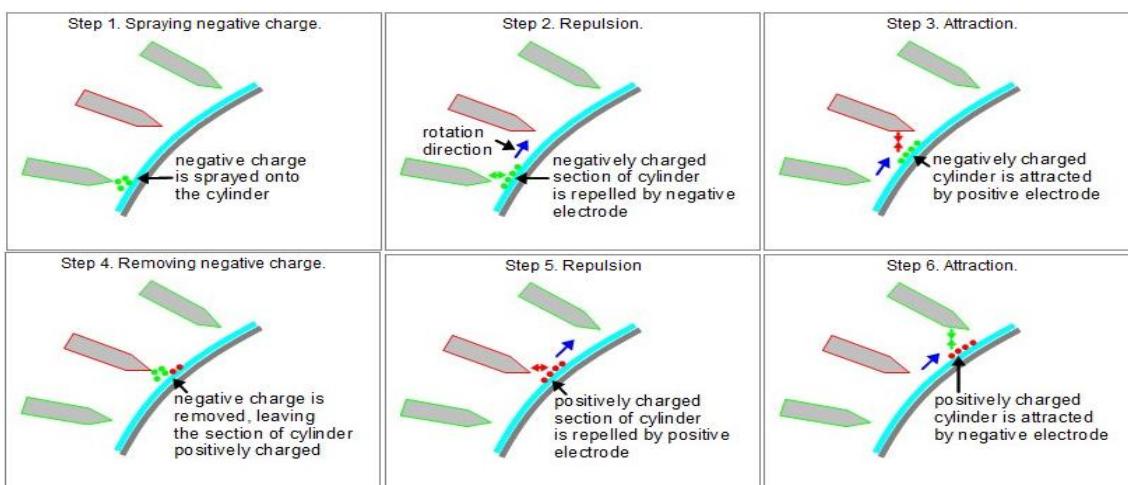


Figura 7. Funcionamiento del motor corona con una fuente de alta tensión. [17]

La operación del motor corona mediante el uso de la electricidad atmosférica se basa en el gradiente de potencial y la densidad de corriente presentes en la atmósfera. Su funcionamiento requiere de un dispositivo de captura de electricidad atmosférica a suficiente altura sobre la línea equipotencial de 0 V (formada por el suelo y los distintos elementos que conforman con él una superficie equipotencial).

En el "Anexo IV" de este trabajo se profundiza en el funcionamiento del motor corona [16], [18], [19].

2.4 Técnicas de simulación de la descarga corona

Para elegir los parámetros del motor, en primer lugar se podría simular su operación para ver las variables con mayor influencia. La modelización y simulación del motor corona se consideró en un primer momento, pero un estudio preliminar respecto a ella



determinó no realizarla debido a su complejidad y extensión del cálculo [16], [20], [21], [22], [23], lo que podría interferir en la consecución de los objetivos del trabajo.

Para obtener más información al respecto, se realiza una introducción al tema en el "Anexo V" del presente trabajo.

2.5 Formas constructivas del motor

Dentro de los estudios más actuales, se han observado dos tipologías de construcción del motor corona mediante la comparación de distintos estudios (sin analizar la forma de fabricación o características, sólo su esquema mecánico) [14], [15], [16], [17].

En la primera de ellas, el rotor gira en torno a un eje, con el que tiene un contacto puntual; sólo una de las dos bases presenta un orificio por el que se introduce el eje, que contacta con la otra base por el interior del rotor. Para que el rotor se mantenga en esa posición, el eje se dispone en posición vertical sobre el plano del suelo. Además, cuando el rotor gira, el eje no; permanece estático. A esta tipología de construcción se aludirá como "eje estático" en el resto del trabajo.

La segunda tipología de construcción consiste en un eje que atraviesa al rotor, de forma que ambos giran solidariamente. En esta forma de construcción, el eje permanece a un plano paralelo al del suelo. A esta tipología de construcción se aludirá como "eje solidario" en el resto del trabajo.

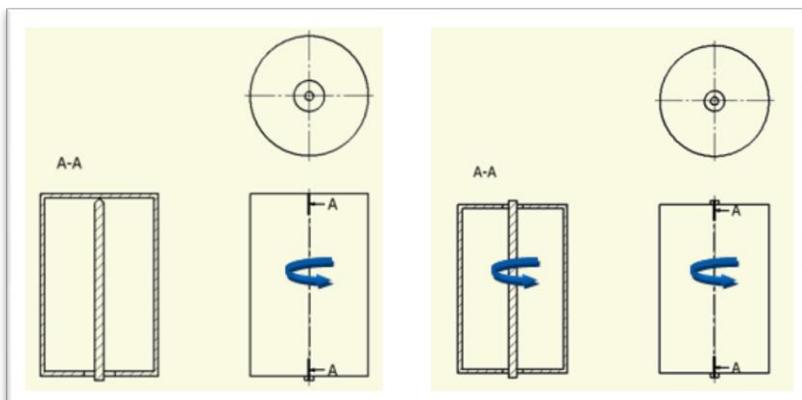


Figura 8. "Eje estático" y "eje solidario" respectivamente.

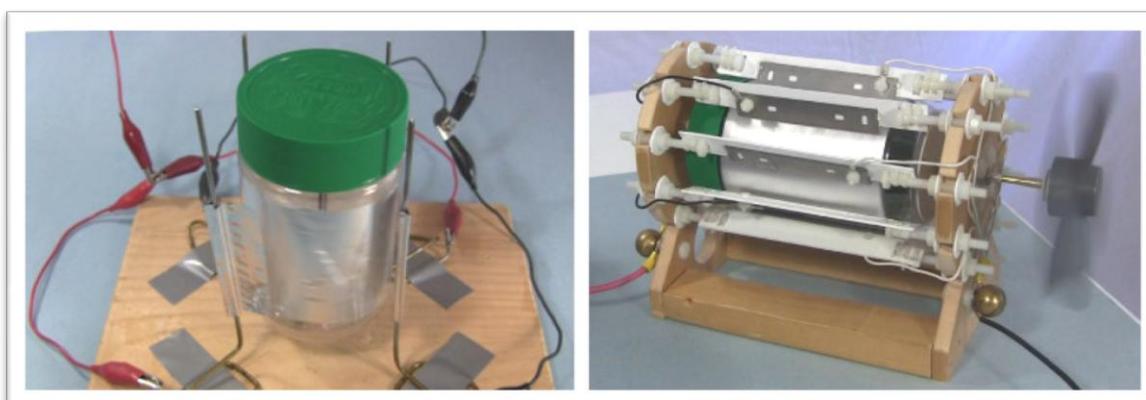


Figura 9. "Eje estático" y "eje solidario" respectivamente. [17]



Del análisis de los distintos estudios [14], [15], [16], y [17], cuyos resúmenes se encuentran en el "Anexo VII", se destacan las siguientes relaciones:

Operación a menor tensión

- Mayor número de electrodos
- Reducción del radio de curvatura de los electrodos
- Reducción del espaciado de los electrodos con el rotor

Mejora del movimiento giratorio

- Ángulo de inclinación de electrodos óptimo

Figura 10. Relaciones entre variables en el diseño del motor corona. [14], [15], [16], [17]

2.6 Sistema de captura de electricidad atmosférica

La primera imagen que puede surgir al hablar sobre sistemas de captura de electricidad atmosférica es la de un pararrayos: un elemento fijo que se eleva varios metros sobre su correspondiente línea equipotencial de 0 V (tejado de un edificio), que gracias a su bajo radio de curvatura (su forma puntiaguda) hace que se deformen más las líneas equipotenciales, aumentando el gradiente de tensión en su zona local, proporcionando tensiones cercanas a las de la ruptura dieléctrica del aire [24].

Aunque con esta aplicación no se pretende atraer rayos (se habla de un funcionamiento del motor en condiciones de buen clima, sin posibilidades de tormenta eléctrica), la forma del pararrayos convencional lo hace adecuado para su uso como sistema de captura de energía, debido al aumento que provoca en el gradiente potencial cercano a él. De esta manera, se acelera y amplifica de forma local el flujo natural de carga. A medida que la carga se transfiere desde la ionosfera hacia el elemento captador, la ionosfera ve repuesta esta cantidad de carga mediante la que se obtiene gracias al Sol a través del viento solar [12], [18], [19].

Se han observado dos tipologías de sistemas de captura de electricidad atmosférica, a las que se llamará en este trabajo "antenas fijas" y "antenas aéreas", haciendo referencia a que unas son dispositivos de una longitud fija, mientras que las otras hacen uso de cable suspendido en el aire mediante algún elemento.

Se presenta una tabla a modo de resumen de las distintas experiencias realizadas en [1], [11] y [17], expuestas en el "Anexo VI" de este trabajo. Antes de observar la tabla, hay que hacer hincapié en distintos aspectos:

- "Edificio 1" hace referencia a una tipología de edificio: el experimento se realizó en el tejado de un edificio de 11 plantas, que se encontraba alejado de los edificios colindantes.
- "Electret 1" y similares hacen referencia a modelos particulares de motor.
- Cuando se habla de longitud de antena efectiva, se refiere a un caso particular de "antena aérea" en el que a pesar de tener un cable de una longitud concreta, la altura que alcanza el sistema es otra distinta.



- Se observa que estos experimentos proporcionan en general una potencia superior a 10 μW , potencia estimada en [2] para un globo de un metro de diámetro situado a 200 metros. No sólo se supera esa potencia, sino que se obtiene casi a la mitad de la altura calculada en el caso más desfavorable (exp. nº 8). Destacar que se llegó a obtener una potencia máxima 3 órdenes de magnitud superior a 10 μW a 91 m en la exp. nº 6.

Exp. nº	Tipología de antena	Material radiactivo	Longitud de antena (m)	Situación	Motor operativo
1	Fija	Sí	7	Nivel del suelo	Electret 1
2			7	Edificio 1	
3		No	-	-	
4	Aérea				
5	Fija	No	7	Edificio 1	Corona 1
6	Aérea	No	91 (0 efectivos)	Edificio 1	Corona 2
7					Electret 2
8	Aérea	No	120	Nivel del suelo	Corona 3

Tabla 2. Experimentos realizados en la bibliografía. [1], [11], [17]

Exp. nº	Tensión (kV)	Intensidad (na)	ω (rpm)	Potencia (μW)
1	0'5	100	60	50
2	1 (mín)	1.000	100 (mín)	1000
3	0'1 (mín)	50 (mín)	-	5 (mín)
4	0'1 (mín)	50 (mín)	-	5 (mín)
5	4	100	100	400
6	-	-	-	73.500
7	6	-	-	-
8	-	-	-	-

Tabla 3. Experimentos realizados en la bibliografía. [1], [11], [17]



3. Motor

El carácter de este trabajo, que quiere hacer uso de una energía renovable con un mayor grado de accesibilidad a escalas de consumo reducidas, hace que los aspectos constructivos tomen una orientación concreta hacia la sencillez y disponibilidad, compartiendo varias características con uno de los motores realizados en [17], que se detallarán posteriormente.

En el presente capítulo se definen los requerimientos de diseño del motor electrostático corona que ocupa este trabajo, para después diseñarlo y construirlo, detallando algunas de las cuestiones que surgieron gracias a la materialización del motor.

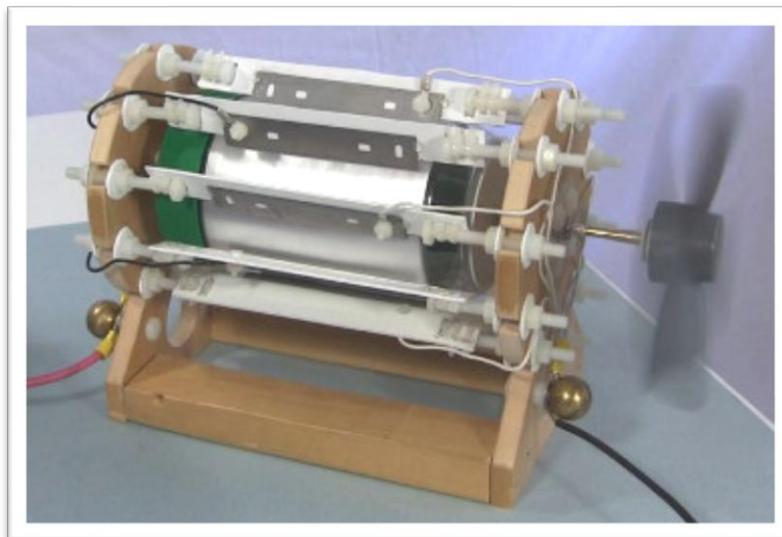


Figura 11. Motor de “eje solidario” realizado en [17].

3.1 Requerimientos de diseño

Las condiciones de diseño del motor van a venir dadas por cuatro tipos de requerimientos:

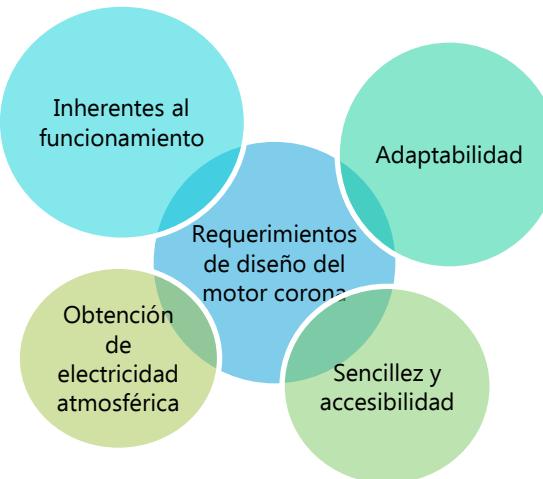


Figura 12. Requerimientos de diseño del motor corona.



Los requerimientos de adaptabilidad del motor hacen referencia a cuestiones que favorezcan la experimentación y toma de datos ante distintas configuraciones del mismo motor.

Resulta complicado establecer una jerarquización entre estos tipos de requerimientos debido a las relaciones existentes entre ellos, detalladas más adelante. Sí que se puede decir que todos son requerimientos intrínsecos al objeto de este proyecto, salvo el requerimiento de adaptabilidad, cuyo objetivo es favorecer la experimentación.

A continuación se detalla cada uno de los distintos tipos de requerimientos.

3.1.1 Inherentes al propio funcionamiento del motor corona

Los requerimientos inherentes al funcionamiento del motor imponen las siguientes características:

- Radio de curvatura de los electrodos bajo.
- Espaciado entre electrodos y superficie rotor reducido.

El valor numérico de estos aspectos va a ser dado por los materiales elegidos para los electrodos (fijarán el radio de curvatura) y rotor (su grado de excentricidad, por pequeño que sea, hará aumentar el espaciado).

3.1.2 Obtención de electricidad atmosférica

Es necesario que el motor a construir funcione con electricidad atmosférica, por lo que será conveniente reducir la tensión que necesita el motor para funcionar, de forma que la altura que se necesita alcanzar sobre la superficie equipotencial de 0 V sea menor.

Este requerimiento se obtiene a partir de las evidencias experimentales comentadas en el capítulo 2.4, "Sistema de captura de electricidad atmosférica", de este trabajo.

Más adelante, en el capítulo 5, "Actas experimentales", se refleja que el funcionamiento de una "antena aérea" no es tan sencillo, por lo que aún es más prioritaria la reducción de tensión.

Para cumplir el requerimiento, se elige realizar un motor con las siguientes prestaciones:

- Con 6 electrodos. No se fabrica con el mínimo número de electrodos porque necesitaría más tensión para funcionar, ni tampoco con más para mantener la sencillez del diseño, que es otro requerimiento.
- Con ángulo de inclinación de los electrodos variable (como en [17]), dado que los datos del ángulo óptimo que se tienen son para otras tipologías de motor [14], [15].

Por otro lado, el uso de electricidad atmosférica hace que los electrodos se conecten de forma alterna al sistema de captura de energía y a la referencia de "tierra", de



manera que se tiene una sola alta tensión, como se ha explicado en la parte de los anexos de "Profundización del funcionamiento del motor corona".

3.1.3 Sencillez y accesibilidad

Este tipo de requerimientos tienen una gran influencia en la elección de materiales del motor. No obstante, aunque se consideren requerimientos, en esta sección sólo se van a nombrar los materiales fundamentales para el motor. En el resto de materiales, la sencillez y adaptabilidad será más una doctrina que un requerimiento, dado que tampoco se pueden definir inequívocamente: una persona que decide construir esta tipología de motor, al llegar el momento de construir los electrodos, podría usar unas hojas de cúter o una bandeja de horno de aluminio, elegiría el más accesible.

Una vez hecha esta consideración, se pasan a nombrar las características elegidas para las partes fundamentales (que coinciden con los de [17]):

- Rotor formado por un bote de plástico (y su tapa) y papel de aluminio en su interior.
- Soporte de del motor realizado con madera.

3.1.4 Adaptabilidad del motor

En [17], se considera un gran acierto el diseño del estator del motor de "eje solidario", el cual permite variar el ángulo de inclinación de los electrodos. Este diseño se basa en que un electrodo está compuesto de tres partes: la parte de metal, un soporte de plástico y dos tornillos con tuercas, lo que permitiría variar la longitud de los electrodos o rotor. No obstante, se ha visto que esa característica de su motor no se ve totalmente explotada, dado que la variación de la longitud del rotor se ve inhabilitada por el diseño de la base del soporte del motor.

Para conseguir el requerimiento de adaptabilidad del motor, se ha decidido:

- Separar las bases del soporte.

A modo de resumen, se enumeran todos los aspectos elegidos para el diseño del motor:

Motor corona	<ul style="list-style-type: none">• Radio de curvatura de electrodos bajo• Espaciado entre electrodos y rotor reducido
Electricidad atmosférica	<ul style="list-style-type: none">• 6 electrodos• Ángulo de inclinación de electrodos variable
Sencillez y accesibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Rotor de plástico• Soporte de madera
Adaptabilidad	<ul style="list-style-type: none">• Bases separadas

Figura 13. Requerimientos y características del motor.



3.2 Diseño

El motor a construir en este trabajo está basado en el diseño del motor de [17], por lo que se procede a explicarlo con más detalle. En esta sección, se hará un inciso en las partes que se han diseñado de otra manera. La lista de materiales del motor queda de la siguiente manera:

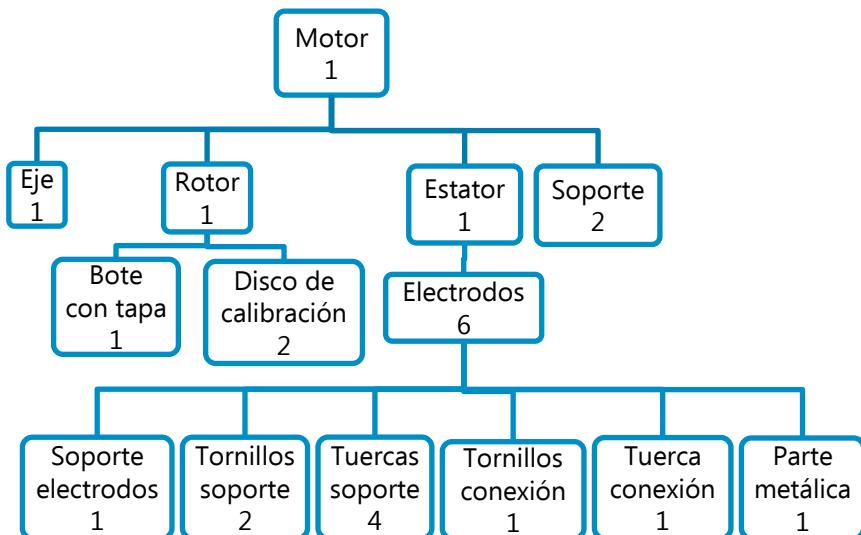


Figura 14. Lista de materiales.

A continuación se detalla cada componente y los materiales que lo forman.

3.2.1 Rotor

Formado por:

- bote de plástico (y su tapa, con papel de aluminio)
- círculos de plástico de equilibrado del giro

La superficie lateral del bote se ha cubierto por dentro con una capa de papel de aluminio.

En la base del bote y la tapa se realiza un agujero más grande que el diámetro del eje. El equilibrado del giro del rotor se realiza con dos círculos de plástico, cada uno con un agujero del diámetro del eje, de forma que haya un ajuste de interferencia entre ambos y giren de forma solidaria. Estos círculos de plástico son adheridos a la base del bote y a la tapa mediante cinta de carrocería. El equilibrado compensa la excentricidad del bote, favoreciendo el giro del rotor, y se realiza modificando la posición de los círculos de plástico respecto a la tapa y base del bote.

A diferencia de [17]:

- Se precisa que el plástico usado es poliestireno (PS). El eje usado es de acero en vez de latón.



3.2.2 Estator

Los electrodos del estator se componen de tres partes:

- Parte metálica. Se aconseja limar para que la carga no se acumule en sus esquinas.
- Soporte electrodos.
- Tornillos de soporte: tornillos de nylon con tuercas que hacen de elementos de unión con el soporte del motor.
- Tornillos de conexión: tornillos de nylon con tuercas que se colocan en la parte metálica para sujetar el cable que conecta con la alta tensión o tierra, según el electrodo.

A diferencia de [17]:

- En lugar de usar bridadas de plástico para unir los "tornillos de soporte" a la parte de plástico, estas se juntan mediante PVC con una pistola termofusible. Debido a la temperatura que alcanza el PVC, se ha escogido como plástico que haga de soporte del electrodo un polipropileno (PP) resistente a la temperatura, que se puede conseguir fácilmente a partir de recipientes de plástico para calentar la comida en el microondas. De esta manera, se ahorra una cantidad de material de 4 bridadas por electrodo y se usa el mismo método de unión para la parte de plástico con los "tornillos de soporte" que con la parte metálica.
- En vez de usar como parte metálica hojas de raspador, se han usado hojas de cíuter porque eran más accesibles. Además, se ha prescindido de impregnar una parte de los electrodos en un líquido de protección contra altas tensiones.
- En contraposición a la unión de los electrodos al soporte mediante coronas circulares de plástico, que hacen de arandelas para las tuercas de los "tornillos de soporte", se han eliminado mediante el diseño del soporte a la medida del diámetro de los tornillos, de forma que su propia tuerca los puede sujetar. Se han ahorrado 4 arandelas por electrodo.

3.2.3 Soporte

El soporte se diseña en madera y tiene una base que lo mantiene de pie. El soporte presenta hendiduras para alojar los "tornillos de soporte". Sobre él, se unen todos los cables que conectan los electrodos de forma alterna a la fuente de energía y a tierra. Además, hay dos agujeros en los que se emplazan dos rodamientos para facilitar el giro del motor.

A diferencia de [17]:

- Se tienen dos bases en lugar de una sola, dividiendo el soporte en dos, de forma que se permite adaptar el motor a rotores de distinta longitud mediante el cambio de posición de estas dos partes con las tuercas de los "tornillos de soporte".
- Las hendiduras en las que se alojan los "tornillos de soporte" son más profundas para permitir el uso de rotores de menor radio.
- En lugar de pasar los cables alrededor del soporte, se pasan a través de él mediante otros dos agujeros.



- En vez de colocar los rodamientos entre dos cuadrados de plástico, que se unen al soporte mediante tornillos, se han hecho los agujeros del soporte para que tengan un ajuste de interferencia con los rodamientos. Se han ahorrado en total 4 cuadrados de plástico, 8 tornillos y 8 tuercas.

Con el diseño comentado anteriormente, algunas partes del motor como el rotor, soporte o zonas de plástico, se pueden elaborar a partir de materiales reutilizados.

En los anexos se presenta el plano del soporte. A continuación se muestran unas imágenes del diseño del motor, que se pueden observar con más detalle en los anexos:

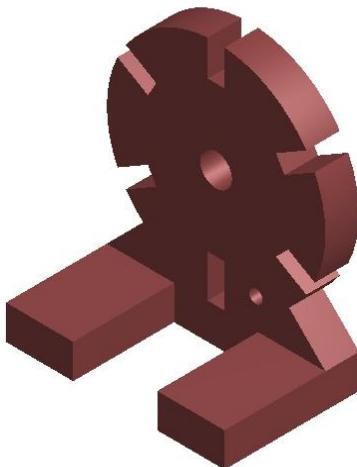


Figura 15. Diseño del soporte.

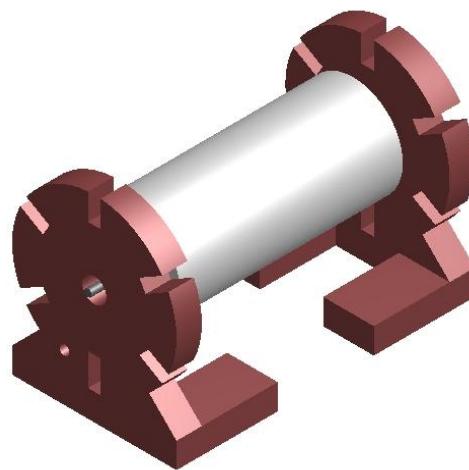


Figura 16. Diseño del rotor, eje y soportes.

3.3 Construcción

La construcción del motor es la materialización del diseño anterior, que permitió observar y corregir ciertos aspectos no considerados o realizados de forma deficiente:

- Una de las hendiduras del soporte se cortó con demasiada holgura, haciendo necesaria la fabricación de 4 arandelas de plástico para que las tuercas de los "tornillos del soporte" permitieran la sujeción.
- Algunos cables de las conexiones eléctricas tendían a tocar el rotor, lo que dificultaba el giro. Se usó cinta de carrocería para fijar los cables y que no entrasen en contacto con el rotor.

Finalmente, tras comprobar el funcionamiento del motor, se observó que el eje se movía axialmente al girar, por lo que se puso cinta de carrocería alrededor del eje en un extremo para que se impidiese este movimiento, de forma que el eje con la cinta de carrocería no podía pasar a través del rodamiento.



Se presentan algunas imágenes del motor construido, recogidas en el “Anexo III”.

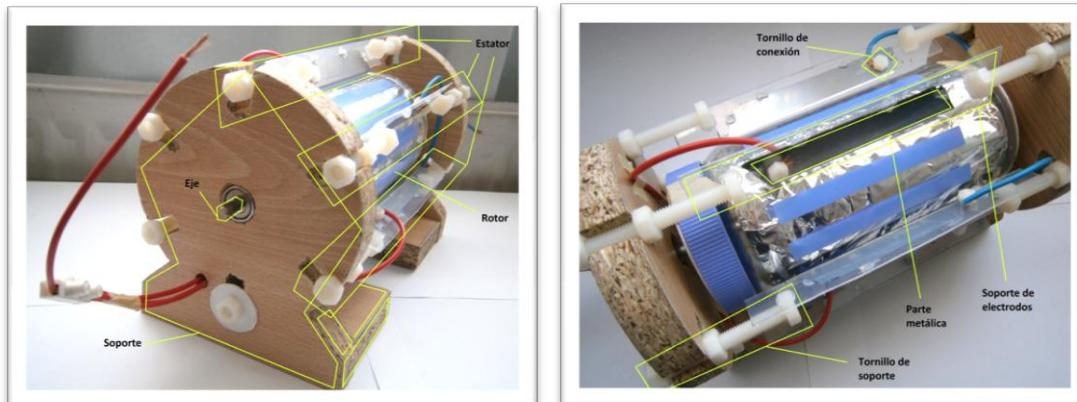


Figura 17. Motor construido.

Figura 18. Motor construido.



4. Sistema de captura de electricidad atmosférica

En el presente capítulo se abordan los requerimientos de diseño impuestos para el sistema de captura de electricidad atmosférica, para luego realizar su diseño y construcción.

4.1 Requerimientos de diseño

Los requerimientos de diseño para el sistema de captura de energía son:

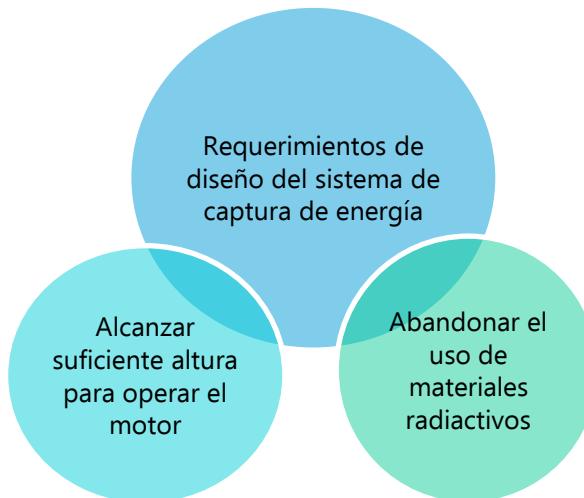


Figura 19. Requerimientos de diseño del sistema de captura de energía.

4.2 Diseño y construcción

Dado que no se tienen datos precisos respecto a la altura necesaria para el funcionamiento del motor (condiciones meteorológicas, emplazamiento, tipo de motor), se decide diseñar un sistema de "antena aérea", dado que permitiría alcanzar mayores alturas que la "antena fija". De esta manera, se evita la posibilidad de que haya que construir los dos tipos de antena, en caso de que la "antena fija" no proporcionase suficiente altura como para que el motor funcione.

Debido a las experiencias recopiladas en la sección 2.6 del presente trabajo, "Sistema de captura de electricidad atmosférica", el diseño y construcción del sistema de captura de energía es muy sencillo, y se basa en un conjunto de globos que eleva el cable conectado a los electrodos de alta tensión del motor. La opción de usar un dron se desechó porque no se observó ninguna ventaja respecto a los globos, además de presentar un menor grado de accesibilidad y poder requerir más energía que la que se



obtendría con el motor corona (22'2 W [25], 66'6 W [26] o 143'9 W [27] que puede consumir un dron en un vuelo, tres órdenes de magnitud superior a la máxima potencia desarrollada por un motor corona según la sección 2.6 de este trabajo, "Sistema de captura de electricidad atmosférica").

El extremo del cable elevado sobre el suelo tiene sus hebras separadas, de forma que cada hebra presenta un bajo radio de curvatura.



5. Actas experimentales

En este capítulo se recogen los experimentos realizados en este trabajo, así como sus resultados. Se comprobaron el funcionamiento del motor en laboratorio, su implementación con aprovechamiento de la electricidad atmosférica y el comportamiento aerodinámico del sistema de captura de energía.

5.1 Experimento 1

Datos	Motor
Fecha	19/05/2016
Localización	Zaragoza
Hora	10:00 - 10:30
Emplazamiento	Laboratorio
Antena	Fuente de tensión
Motor	Ángulo de electrodos de 50°
Resultado	Positivo; 300 rpm (26 kV). Alcanza los 60 kV

Tabla 3. Experimento 1.

Comentarios: el motor funciona en laboratorio proporcionando 300 rpm a 26 kV. Si se aumenta(o reduce) la tensión que lo alimenta, su velocidad angular aumenta (o reduce). Al trabajar a una tensión de 60 kV, surgen vibraciones en el motor.

5.2 Experimento 2

Datos	Motor y sistema de captura de energía
Fecha	21/05/2016
Localización	Aguilón (Zaragoza)
Hora	12:00 - 12:30
Condiciones meteorológicas	
Viento (km/h)	6 - 16 (Daroca)
Emplazamiento	Campo (cultivos)
Altura (m)	714
Antena	"Antena aérea": 12 globos de helio ($\varnothing = 22$ cm)
Motor	Ángulo de electrodos de 50°
Resultado	Negativo

Tabla 4. Experimento 2.



Comentarios: de los 714 m de altura, 237 se midieron con GPS y 477 con barómetro. La velocidad del aire (viento) es dato de AEMET, escogido para el municipio más cercano a la localización del experimento del que se disponía información.

Se consiguió alcanzar 3 m sobre el suelo con 20 m de cable. La existencia de un viento mínimo hace que los globos no se eleven de forma vertical, reduciendo la altura que se pueda alcanzar.

5.3 Experimento 3

Datos	Sistema de captura de energía
Fecha	19/06/2016
Localización	Aguilón (Zaragoza)
Hora	11:00 - 12:00
Condiciones meteorológicas	
Viento (km/h)	25 (Aguilón, Zaragoza), 6 - 15 (Calatayud, Zaragoza)
Emplazamiento	Parcela
Antena	"Antena aérea"
Resultado	Detallado en la sección 6.1 del trabajo

Tabla 5. Experimento 3.

Comentarios: Viento es dato de AEMET. Se tomaron datos para validar el modelo desarrollado comentado en la sección 6.1 del trabajo, "Valoración del resultado experimental con *antena aérea*".



6. Otras consideraciones

En este capítulo se desarrollan distintos aspectos que no se podían categorizar en otros capítulos, ya sea por su carácter a posteriori (como el desarrollo de un modelo que dé respuesta a los resultados experimentales de la sección 5.3 del trabajo) o porque guardan cierta relación con las conclusiones del trabajo, como cuándo se ha de operar el motor construido o que subproductos genera.

6.1 Valoración del resultado experimental con “antena aérea”

El experimento con la “antena aérea” fue muy esclarecedor, ya que puso en relieve que la altura que se alcanza con globos con un viento de 6 km/h no corresponde con la longitud del cable.

Este hecho impulsó la investigación de las “antenas aéreas” que usan globos. Observando estudios sobre la aerodinámica de globos y el modelado de la ascensión de globos sonda [28], [29], se decidió hacer un modelo de la altura máxima que se podía alcanzar con los globos.

Realizando un análisis de sensibilidad al modelo realizado, que se ha validado con resultados experimentales en el “Anexo VIII”, se observa que en ausencia de viento la altura alcanzada viene dada por la longitud de cable que pueden levantar los globos. Mientras tanto, en presencia de viento, la altura máxima que se puede alcanzar no se da con la longitud de cable máxima que pueden levantar los globos.

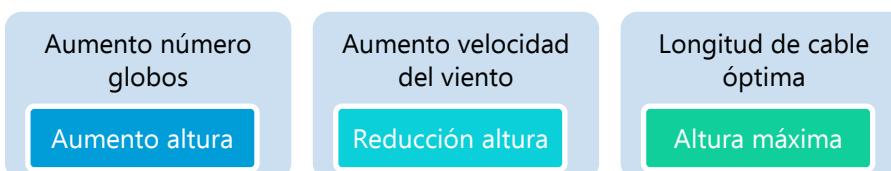


Figura 20. Relaciones entre variables del sistema de captura de energía.

Debido al efecto del viento sobre la altura alcanzada, es recomendable realizar un estudio aerodinámico del sistema de captura energética, de forma que se pueda alcanzar una mayor altura en presencia de viento. Este estudio aerodinámico podría encontrar diseños óptimos que incluso usasen la velocidad del viento para impulsar la “antena aérea” en su ascensión.

Además, se podría estudiar el diseño un sistema de captura de energía en el que en vez de un globo hinchado de helio, cuya adquisición puede ser más complicada que la del resto de materiales del motor, usase una variante de la “interna voladora”, haciendo referencia a las linternas hechas con papel y un armazón de otro material, en cuyo interior se prende una llama que calienta el aire, reduciendo su densidad y elevando al conjunto.



6.2 Condiciones meteorológicas en las que operar el motor

Que la energía proveniente de la electricidad atmosférica esté disponible día y noche en cualquier condición meteorológica, no quiere decir que se deba de emplear bajo cualquier circunstancia, especialmente cuando el sistema de captura de energía utiliza los mismos principios que un pararrayos. Por lo tanto, se recomienda usar el motor en condiciones de buen clima; sin posibilidad de tormenta eléctrica. El desarrollo de un sistema de protección contra rayos para el motor podría cambiar esta consideración.

Por otro lado, el uso de "antenas aéreas" sin diseño aerodinámico hace que sólo se pudiese utilizar este sistema en condiciones sin viento, lo que añadiría variabilidad a este uso de la electricidad atmosférica, dejando de ser independiente de condiciones meteorológicas.

6.3 Generación de subproductos durante el funcionamiento del motor

En el funcionamiento del motor corona, el fenómeno de la descarga corona, que también se da en líneas de alta tensión del sistema eléctrico actual [30], hace que se produzca ozono como residuo, como se puede observar en [17]. La existencia de ozono en la troposfera (capa de la atmósfera que está en contacto con la superficie terrestre) lo hace contaminante, a diferencia del ozono de la estratosfera [31].

El ozono es un contaminante secundario que junto a otros contaminantes, da lugar al smog fotoquímico. El ozono es irritante para concentraciones mayores a $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tiene carácter ácido y puede dañar la vegetación. [32] [33].

En primera instancia, se debería de realizar un estudio que midiese la concentración del ozono en el aire debido al funcionamiento del motor corona para analizar en qué condiciones se podría operar el motor.

Otra línea de pensamiento sería la valorización del residuo, convirtiéndolo en un subproducto gracias a sus propiedades, que le permiten actuar como desinfectante del agua [34]. De esta manera, podría convertirse en el producto principal del motor corona, proporcionando una desinfección de agua en lugares que no tengan acceso a los correspondientes tratamientos de desinfección. Habría que medir la eficacia en la desinfección del agua de la cantidad de ozono producida por el motor.

En el caso de que no se produjese esa cantidad de ozono, se podría estudiar si el ozono perdería su carácter contaminante e irritativo si fuese disuelto en el agua.



7. Conclusiones

El acceso a la información de la tecnología que usa la energía de la atmósfera es complicado. El primer problema que hay que superar es el de hallar y contrastar datos que verifiquen la existencia de esta energía, dado que no es un conocimiento científico arraigado y puede no existir tanto trabajo en esta área como en otras.

En segundo lugar, la valoración de este tipo de energía parece dar peso únicamente a algunas de sus propiedades en lugar de a todas, obviando sus mejores cualidades. Parece que la cuestión de la potencia eclipsa totalmente a la accesibilidad o disponibilidad.

Superando estos problemas, se tiene que la electricidad atmosférica es una tecnología de bajo coste, disponible día y noche, independientemente de las condiciones climáticas e independientemente de la región geográfica, que además podría alimentar dispositivos de acumulación de energía ("Energy Harvesting") que podrían servir por ejemplo para aplicaciones médicas [2], [10], [35].

En este trabajo se ha contrastado la estimación de cantidad de electricidad atmosférica disponible con varios resultados experimentales obtenidos de diversos estudios, comprobando que la energía que ofrece la atmósfera es mayor de lo que se pensaba, llegando a ser tres órdenes de magnitud superior en algún caso.

Pasando ahora a los dos grandes bloques de este trabajo (el motor y el sistema de captura de energía) se redactan las conclusiones a las que se ha llegado.

La operación de un motor corona construido a partir de materiales sencillos es viable técnicamente, como se ha corroborado. Que la construcción y verificación de un motor corona requieran menos esfuerzo que su simulado, podría indicar la necesidad de elaborar un modelo sencillo que se aproxime a su funcionamiento, permitiendo tener más información respecto al motor y su característica operativa.

En cuanto al diseño del sistema de captura de electricidad atmosférica, se presuponía fácil de realizar debido que en diversos experimentos de la bibliografía se consiguió hacer girar un motor o iluminar leds con "antenas fijas" [11], [12]. La prueba de un sistema sencillo basado en una "antena aérea" puso en relieve lo erróneo de esta presunción. Pero esto no es una limitación de la tecnología; el problema radica en que no se han encontrado estudios en profundidad respecto al diseño de "antenas aéreas" o "antenas fijas", los cuales deberían hacerse para conocer detalles de su viabilidad.

Con este trabajo se consigue una mayor noción de la tipología de "antena aérea", cuya complejidad no ha sido encontrada en ningún otro estudio del aprovechamiento de la electricidad atmosférica.

Finalmente, concluir que el estudio de la implementación del motor corona con uso de la electricidad atmosférica carece de una visión global e integral. No se han encontrado análisis o estudios de las cantidades de ozono que produce, ocurriendo lo mismo que con la tipología de antena; no podemos decir que esta tecnología está limitada por una cuestión de la que no se tiene toda la información



La industrialización del motor corona se descartó hace más de 100 años, relegándolo a un segundo plano, mientras que su implementación con el aprovechamiento de la electricidad atmosférica está en duda desde más de 40 años, tiempo en el que diversos estudios no han sido capaces de cerrar la cuestión relativa a su viabilidad.

Sin embargo, las características de la situación actual pueden impulsar la implementación del motor corona con aprovechamiento de la electricidad atmosférica. La escala local del sistema estudiado sigue la tendencia marcada por el crecimiento de las energías renovables y la generación distribuida. Además, la aparición de dispositivos de acumulación de energía ("Energy Harvesting"), que permiten la utilización de energía de fuentes que en principio parecerían despreciables, no hace más que habilitar a este sistema como fuente de energía.

A partir de este Trabajo Fin de Grado, que corrobora a la atmósfera como fuente de energía y al motor corona como un diseño sencillo y operativo, los siguientes estudios a realizar se centrarían por un lado en el nexo de unión de ambos: el sistema de captura de electricidad atmosférica. Este trabajo deja constancia de la infravaloración que ha sufrido el diseño de este sistema de captura, en especial la tipología de "antena aérea", cuya sencillez de diseño ha sido revocada mediante un modelo aerodinámico validado experimentalmente. Por lo tanto, se debería de profundizar tanto en el diseño de las "antenas fijas" como en el de las "antenas aéreas", de forma que su tipología no limite las ventajas de la electricidad atmosférica.

Una vez se obtuviese la electricidad atmosférica y se transformase mediante el motor, habría que realizar el desarrollo electrónico de un circuito que permitiese transformar la energía mecánica del motor en energía eléctrica. Por lo tanto, se tendría que estudiar el sistema desde el punto de vista de que es capaz de transformar un tipo de electricidad (la atmosférica) en otro que presenta características más adecuadas para su uso.

Finalmente, se debería de realizar un estudio de los residuos que produce el motor corona en su funcionamiento, así como su posible valorización, para disponer de toda la información respecto a la implementación del motor.

En las últimas décadas ha habido un desarrollo tecnológico, cambiando el contexto en el que se desarrolla esta implementación, favoreciendo su viabilidad. Por ejemplo, las inusuales propiedades de los motores corona hacen posible superar los problemas de fricción y durabilidad de los micromotores, a la vez que proporcionan mayor par [14], [15].

El cambio de situación debe de ser acompañado de un cambio de planteamiento, ya que ahora la implementación del motor electrostático corona con aprovechamiento de la electricidad atmosférica presenta nuevas posibilidades. Es momento de dar el siguiente paso.



8. Bibliografía

- [1] W. Aston, «The Earth's Atmosphere As a Source for Electric Power,» [En línea]. Available: <http://electretscientific.com/author/Article.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [2] J. Crowley, «The Fair-Weather Atmosphere as a Power Source,» de *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2011, Paper A2*, 2011.
- [3] M. A. Gottlieb y R. Pfeiffer, «Electricity in the Atmosphere,» California Institute of Technology, [En línea]. Available: http://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_09.html. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [4] A. M. Santoña, «Descargas eléctricas,» [En línea]. Available: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Descargas-el%C3%A9ctricas.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [5] A. Bennet, «Measurement of Atmospheric Electricity During Different Meteorological Conditions,» University of Reading, julio 2007. [En línea]. Available: <http://www.met.rdg.ac.uk/phdtheses/Measurement%20of%20Atmospheric%20Electricity%20During%20Different%20Meteorological%20Conditions.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [6] R. R. Podestá, «El gradiente de potencial eléctrico de la atmósfera,» [En línea]. Available: <http://www.liada.net/universo/digital/Podesta/Campo%20Electrico%20Atmosferico.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [7] K. Nicoll, «Measurements of atmospheric electricity,» 2012. [En línea]. Available: http://centaur.reading.ac.uk/32237/1/KAN_AEaloft.pdf. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [8] D. Siinigh et al., «The atmospheric global electric circuit: An overview,» [En línea]. Available: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0906/0906.1280.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [9] R. Harrison, «The global atmospheric electrical circuit and clima,» University of Reading. [En línea]. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [10] maxim integrated TM, «Energy-Harvesting Charger and Protector,» [En línea]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/MAX17710.html>. [Último acceso: 22 junio 2016].
- [11] O. Jefimenko, «Operation of Electric Motors from the Atmospheric Electric Field,» 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].
- [12] «MERIDIAN INTERNATIONAL RESEARCH,» [En línea]. Available:



- [http://www.meridian-int-res.com/Energy/Atmospheric.htm.](http://www.meridian-int-res.com/Energy/Atmospheric.htm) [Último acceso: 14 junio 2016].
- [13] O. D. Jefimenko, «Electrostatic Motors,» West Virginia University, 1973. [En línea]. Available: <http://rexresearch.com/jefimenko/jefimenkoesmotors.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [14] S. Lee et al., «A Micro corona motor fabricated by a SU-8 built-on X-ray mask,» 6 noviembre 2003. [En línea]. Available: DOI 10.1007/s00542-004-0385-4. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [15] L. Sanghoon et al., «A micro corona motor,» 5 octubre 2004. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [16] M. Abdel-Salam et al., «Analysis of a Corona-Discharge Based Electrostatic Motor,» Electrical Engineering Department, Assiut University, abril 2014. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [17] «rimstar.org,» [En línea]. Available: http://rimstar.org/science_electronics_projects/corona_motor_electrostatic_atmospheric_motor.htm. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [18] M. Rickard et al., «Characterization of ionic wind velocity,» 2005. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [19] H. Kalman y E. Sher, «Enhancement of heat transfer by means of corona wind created by a wire electrode and confined wings assembly,» 2001. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [20] P. A. K. Adamiak, «Simulation of corona discharge in point-plane configuration,» 25 enero 2004. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [21] L. Zhao y K. Adamiak, «Numerical Simulation of Corona Discharge in Compressed Gases with the Effect of EHD Flow,» 2008. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [22] D. Benyoucef y M. Yousfi, «Improved fictitious charge method for calculations of electric potential and field generated by point-to-plane electrodes,» 2015. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [23] M. Talaat, «Calculation of electrostatically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines,» 2014. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].
- [24] M. S. César Briozzo, «Pararrayos no convencionales,» [En línea]. Available: http://www.lightningsafety.com/nlsi_lhm/pararrayos-no-convencionales.pdf. [Último acceso: 14 junio 2016].
- [25] «amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Syma-X5C-Explorers-2-4G-Quadcopter/dp/B00OCFMVHE?ie=UTF8&creative=24526&creativeASIN=B00OCFMVHE&hvdev=c&hvnetw=g&hvqmt=&linkCode=df0&ref_=asc_df_B00OCFMVHE



- 34504667&tag=googshopes-21. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [26] «amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/WLtoys-helicoptero-V666N-canal-camara/dp/B017O7GLNQ?ie=UTF8&creative=24514&creativeASIN=B017O7GLNQ&hvdev=c&hvnetw=g&hvqmt=&linkCode=df0&ref_=asc_df_B017O7GLNQ34504696&tag=googshopes-21. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [27] «igogo,» [En línea]. Available: <http://www.igogo.es/product375982.html?currency=EUR&gclid=CP6A6fuUrM0CFYIK0wodBaEMIg>. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [28] R. Cross, «Aerodynamics of a party balloon,» University of Sydney, [En línea]. Available: <http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/PUBLICATIONS/37.%20partyballoonB.pdf>. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [29] A. Gallice et al., «Modeling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion,» 20 octubre 2011. [En línea]. Available: <http://www.atmos-meas-tech.net/4/2235/2011/amt-4-2235-2011.pdf>. [Último acceso: 6 junio 2016].
- [30] F. R. Campos y G. C. Trujillo, «Metodología para la evaluación de pérdidas corona en líneas de transmisión,» [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902937.pdf>. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [31] Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, *Ingeniería del Medio Ambiente. Contaminación Atmosférica*, Universidad Zaragoza.
- [32] Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, «Efectos sobre la salud y posibles actuaciones de prevención, control y reducción de la contaminación,» [En línea]. Available: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/ozono/ozono.html>. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [33] Commission for Environmental Cooperation, «Ozono troposférico,» [En línea]. Available: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/986-north-american-mosaic-overview-key-environmental-issues-es.pdf>. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [34] Hidro Water S.L., Triozon, «El ozono en el tratamiento del agua,» [En línea]. Available: http://www.triozon.org/documentos/tecnico_comercial/agua.pdf. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [35] maxim integrated TM, «MAX17710. Energy-Harvesting Charger and Protector,» [En línea]. Available: https://www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/MAX17710.html#tb_tab2. [Último acceso: 19 junio 2016].
- [36] J. Torres y R. Dhariwal, «Electric field breakdown at micrometer separations,» *Nanotechnology*, nº 10, pp. 102-107, 1999.



- [37] P. Slade y E. Taylor, «Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced electrical contacts,» *IEEE Trans. Components Packaging Manuf. Technol.*, vol. 25, nº 3, pp. 390-396, 2002.
- [38] WORTHINGTON CYLINDERS, «Hoja de datos de seguridad,» 11 febrero 2015. [En línea]. Available: [http://worthingtonindustries.com/getmedia/902c138f-5c3b-44f9-b9db-a5d22c4517b1/WC042-Helium-Blend-Mexico-SDS-\(Spanish\).pdf](http://worthingtonindustries.com/getmedia/902c138f-5c3b-44f9-b9db-a5d22c4517b1/WC042-Helium-Blend-Mexico-SDS-(Spanish).pdf). [Último acceso: 16 6 2016].
- [39] K. Adamiak y P. Atten, «Simulation of corona discharge in point-plane configuration,» 25 enero 2004. [En línea]. Available: www.sciencedirect.com. [Último acceso: 2016].