

2012



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

# ANÁLISIS DEL ALMACENAMIENTO DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS Y PERFECCIONAMIENTO DIELÉCTRICO DE LA MÁQUINA DE WIMSHURST

## MEMORIA

### CONVOCATORIA SEPTIEMBRE

REALIZADO POR: DAVID RICO CAMPOS  
ESPECIALIDAD: ELÉCTRICIDAD  
DIRECTOR: JESÚS LETOSA FLETA

## MEMORIA DESCRIPTIVA

MEMORIA DESCRIPTIVA .....	4
1. ANTECEDENTES .....	4
2. OBJETO DEL PROYECTO .....	4
3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ELECTRICIDAD .....	5
3.1. LINEA DEL TIEMPO .....	5
3.2. MÁQUINAS ELECTROESTÁTICAS.....	9
4. JAMES WIMSHURST .....	16
5. MÁQUINA DE WIMSHURST.....	18
5.1. ¿CÓMO FUNCIONA LA MÁQUINA DE WIMSHURST? .....	18
5.2. EXPERIMENTOS REALIZABLES CON LA MÁQUINA DE WIMSHURST .	20
6. ENERGÍA ELECTROESTÁTICA Y CAPACIDAD .....	22
6.1. ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA.....	23
6.2. CAPACIDAD .....	25
6.3. ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA .....	28
6.4. COMBINACIONES DE CONDENSADORES.....	29
6.5. DIELECTRICOS.....	31
6.6. ESTRUCTURA MOLECULAR DE UN DIELECTRICO .....	33
7. ESTUDIO DE LOS CONDENSADORES .....	36
7.1 CONDENSADORES INICIALES EN LA MÁQUINA DE WIMSHURST .....	36
7.2 CONDENSADORES CON DIELECTRICO DE TEFLÓN .....	37
7.3 CONDENSADORES DE ALTA TENSIÓN INDUSTRIALES.....	41
7.4. DISEÑO EN 3D .....	46
7.4. CREACIÓN DE PIEZAS .....	52
7.4. ENSAMBLAJE .....	54
8. PRUEBA DE LOS CONDENSADORES EN LA MÁQUINA DE WIMSHURST..	56
8.1. PRUEBA 1.....	56
8.2. MEDIDAS CORRECTORAS.....	59
8.3. PRUEBA 2.....	66
9. CAPACIDAD DE LOS CONDENSADORES.....	69
9.1. CÁLCULO SEGÚN ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE.....	69

9.2. MEDIDA DE CAPACIDAD CON INSTRUMENTOS DE PRECISIÓN.....	69
10. CONCLUSIÓN.....	72

## MEMORIA DESCRIPTIVA

### 1. ANTECEDENTES.

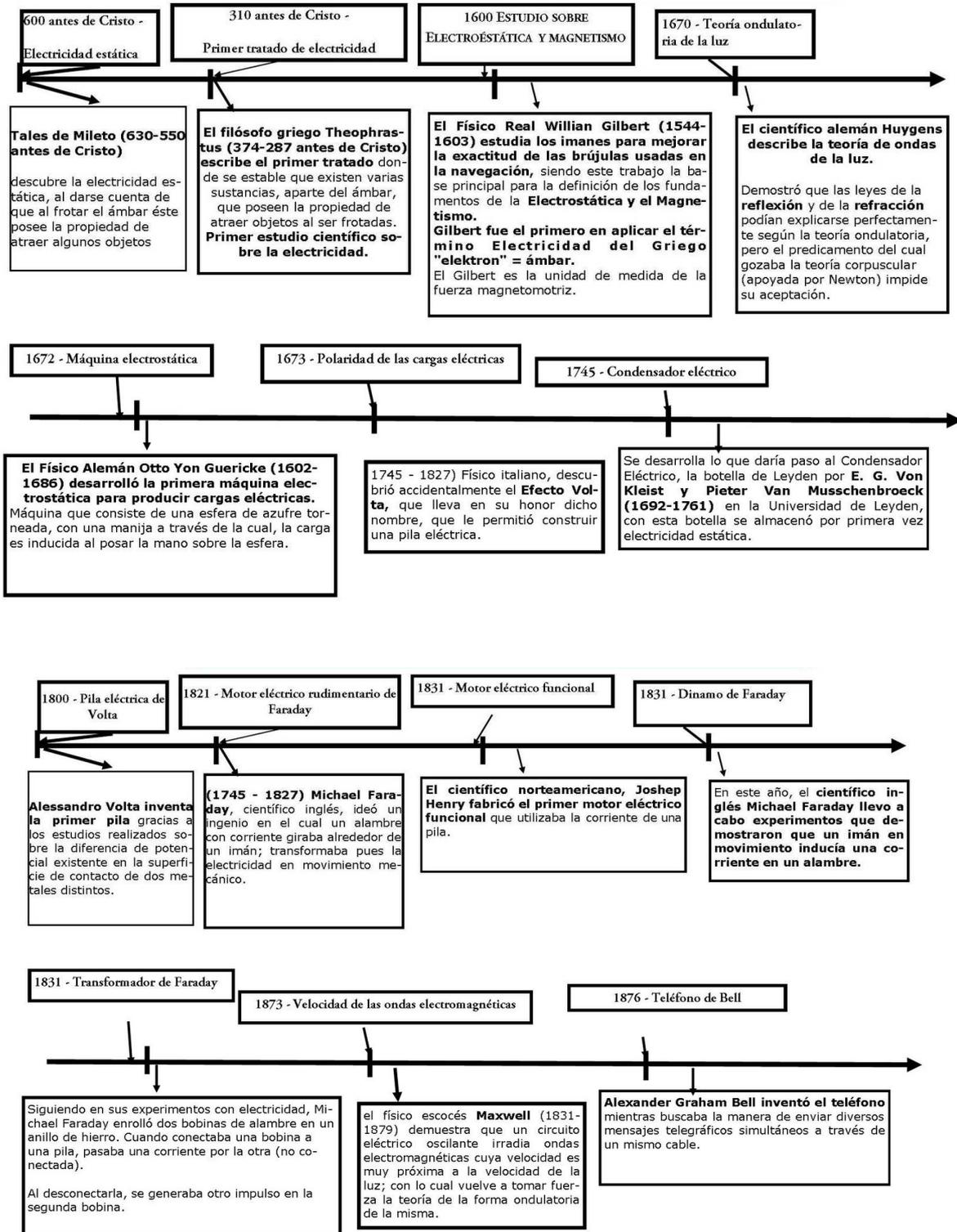
Se redacta el presente proyecto: “Análisis del almacenamiento de cargas electrostáticas y perfeccionamiento dieléctrico de la máquina de Wimshurst” a petición de Jesús Letosa Fleta en Zaragoza a 25 de Agosto de 2012 .

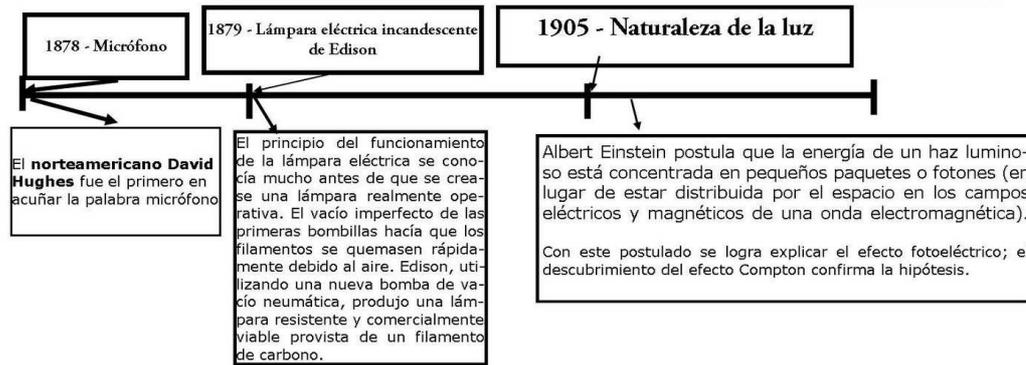
### 2. OBJETO DEL PROYECTO.

El objeto del presente proyecto es la mejora de los condensadores de la máquina de Wimshurst propiedad de la universidad de Zaragoza, tanto en su funcionalidad como en su acabado estético , la finalidad de dicha mejora es conseguir que el arco eléctrico entre las esferas “Explosores” se produzca a distancias superiores a la actual.

### 3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ELECTRICIDAD

#### 3.1. LINEA DEL TIEMPO





El siglo XVII puede considerarse como el punto de partida de los estudios sistemáticos de la electricidad. Sin embargo, es posible que el filósofo griego Tales de Mileto, que vivió en torno al 600 a.C, ya supiera que el ámbar adquiere la propiedad de atraer objetos al ser frotado, algo semejante al magnetismo, pero con la diferencia de que el ámbar no atraía metales, sino plumas y otros cuerpos ligeros, tales como hojas secas, pajas y tejidos.

Otro filósofo griego, Teofrasto, afirmaba en un tratado escrito tres siglos después que otras sustancias poseen esa propiedad.

Un ilustre escritor, llamado Plinio, escribió acerca del ámbar y sus cualidades, comparándolo con la piedra imán, la piedra imán es un mineral que transmite, por contacto o frotación, a una barra o una aguja de acero puesta en equilibrio sobre una púa, la propiedad de dirigir uno de los extremos hacia el polo Norte, y la de atraer a ciertos metales.

Otra cosa sabía Plinio, y era que cierto pez; el llamado torpedo puede producir descargas eléctricas lo suficientemente intensas para causar gran daño a una persona. Pero nunca le pasó por la mente que existiera la menor relación entre el poder del ámbar, el pez y la piedra imán.

Sin embargo, el primer estudio científico de los fenómenos eléctricos no apareció hasta el 1600d.C., cuando se publicaron las investigaciones del médico británico William Gilbert, persona muy estudiosa y médico de cámara de la reina Isabel de Inglaterra, quien aplicó el término: eléctrico; (del griego elektron: ámbar) a la fuerza que ejercen esas sustancias después de ser frotadas.

William Gilbert procedió personalmente a realizar ciertos experimentos con algunas sustancias, a fin de descubrir si, a semejanza del ámbar, adquirirían, al ser frotadas, la extraña propiedad de atraer a otros cuerpos; logró así comprobar que muchas de ellas, como el azufre, el lacre, la goma, la resina, la sal gema, y otros varios cuerpos poseen el poder de atraer los metales, las piedras, las tierras, los fluidos y aún el humo cuando es espeso. También

distinguió entre las acciones magnética y eléctrica. La vida de Gilbert fue en extremo provechosa para el mundo, pues a partir de sus descubrimientos, el desarrollo de la electricidad ha sido extraordinario y podemos decir que es incesante.

Siguió a Gilbert un irlandés, Robert Boyle, Boyle demostró que la electricidad permanece en los cuerpos cierto tiempo después de haber cesado el rozamiento o frotación. El mero hecho de que él se dedicara al estudio de la electricidad bastó para que otros hombres de ciencia se interesaran también por aquella extraña fuerza, pues el sabio irlandés gozaba de gran estima, especialmente entre los personajes ilustres en el continente europeo. La primera máquina para producir una carga eléctrica fue descrita en 1672 por el físico alemán Otto von Guericke. Descubrió una manera de producir luz por medio de la electricidad, pero nadie supo aprovecharse de su invento. El uso de la luz eléctrica no se generalizó hasta 1878. Construyó una máquina estaba formada por una esfera de azufre movida por una manivela, sobre la que se inducía una carga cuando se apoyaba la mano sobre ella.

El siguiente suceso fue Esteban Gray quien nació en Londres a finales del siglo XVII. Consagró su existencia al conocimiento de la electricidad y descubrió que los cuerpos no electrizables por fricción pueden serlo cuando se les coloca en contacto con otro que lo haya sido previamente. Esto quiere decir que hay unos buenos conductores de electricidad y otros, en cambio, que no lo son.

El científico francés Charles François de Cisternay Du Fay, fue el primero en distinguir claramente los dos tipos diferentes de carga eléctrica: positiva y negativa que coexisten en todos los cuerpos, pero mutuamente neutralizadas. Du Fay empezó a trabajar partiendo de los experimentos de Gray, y fue mucho más lejos en sus investigaciones. El condensador más antiguo, la botella de Leyden, fue concebida, parece que al mismo tiempo pero por separado, por un monje inventor y un catedrático llamado Musschembroek de Leyden. Fue desarrollado en 1745. Estaba formado por una botella de vidrio recubierta por dos láminas de papel de estaño, una en el interior y otra en el exterior. Si se cargaba una de las láminas con una máquina electrostática, se producía una descarga violenta si se tocaban ambas láminas a la vez. La botella de Leyden, aunque construía por primera vez en Holanda, fue perfeccionada en Inglaterra por sir Guillermo Watson, otro genio de aquella época. Se valió de alambres para hacer pasar la corriente de una botella a otra. Al hacer pasar la corriente a lo largo del alambre advirtió que la persona que sostenía su extremidad opuesta, a unos 3700 metros de distancia de él, recibía la descarga prácticamente en el instante mismo que la energía salía de la botella, propiedad que luego ser utilizada en la telegrafía.

El inventor estadounidense Benjamin Franklin, que nació en Boston, Massachusetts en 1706, y comenzó su carrera con muy escasos estudios, en la modesta imprenta de su hermano, dedicó mucho tiempo a la investigación de la electricidad. Murió en 1790. Fue el primero que captó y condujo rayos en provecho y defensa de la humanidad. Su famoso experimento con una cometa demostró que la electricidad atmosférica que provoca los fenómenos del relámpago y el trueno es de la misma naturaleza que la carga electrostática de una botella de Leyden. Tan pronto como se convenció de la certeza de los hechos construyó el primer pararrayos. Si era posible hacer pasar el rayo a la tierra, guiándole su camino, entonces no destruiría edificios ni privaría de la vida a personas ni animales. Franklin desarrolló entonces una teoría según la cual la electricidad es un fluido; único que existe en toda la materia, y sus efectos pueden explicarse por el exceso o la escasez de ese fluido. A partir de este momento, los descubrimientos sucedieron sin interrupción, y cada año surgían nuevas sorpresas. Faraday, que realizó numerosas contribuciones al estudio de la electricidad a principios del siglo XIX, también desarrolló la teoría de las líneas de fuerza eléctricas.

Otro que aportó una importante labor al campo de la electricidad fue Henry Cavendish, su principal descubrimiento, en materia de electricidad, fue que el alambre de hierro es 400.000.000 de veces mejor conductor que el agua pura destilada. Con la ayuda de la electricidad hizo explotar una mezcla de oxígeno e hidrógeno, y obtuvo por resultado agua pura.

Los físicos italianos Luigi Galvani y Alessandro Volta llevaron a cabo los primeros experimentos importantes con corrientes eléctricas. Estas se detallan en el apartado 3.1 Máquinas Electroestáticas.

Michael Faraday, nacido en Londres en 1791 y quien fuera discípulo de Humphry Davy, demostró que la corriente que circula por una espira de cable puede inducir electromagnéticamente una corriente en una espira cercana, convirtiéndose la primera en un imán; el magnetismo de la espiral se interrumpe si la corriente se corta. Así se muestra claramente la íntima relación existente entre el magnetismo y la electricidad.

### 3.2. MÁQUINAS ELECTROESTÁTICAS.

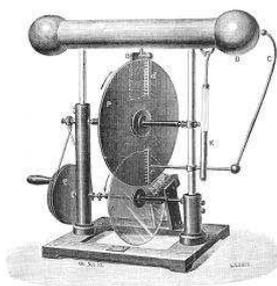
Entre las principales máquinas electrostáticas tenemos:

#### 1. MÁQUINA DE WIMSHURST

Esta máquina solo la mencionaremos en este apartado, ya que en apartados posteriores serán dedicados en exclusiva a ella.

#### 2. MÁQUINA DE CARRÉ

**Inventor:** Fernando Philippe Edouard Carré (1824-1900) fue un ingeniero francés, nacido en Moislains ( Somme ) el 11 de marzo de 1824. Carré es mejor conocido como el inventor de la refrigeración de los equipos utilizados para producir hielo. Carré también llevó a cabo la investigación en el campo de la electricidad. En 1877, inventó un regulador de luz eléctrica. También inventó la máquina de Carré, un generador electrostático utilizado para producir altas tensiones. Murió el 11 de enero de 1900 en Pommeuse ( Seine-et-Marne ).



**Funcionamiento:** La Máquina se compone de dos circuitos perfectamente aislados en comunicación cada uno de ellos con una botella de Leyden. Consta de un disco de material electrizable que gira con una manivela frente a dos peines en comunicación cada uno con su circuito, diametralmente opuestos y cada uno enfocando a una cara del disco.

Cuando hacemos girar el disco, de manera que pase en su giro, por el primero de los peines (el inferior) correspondiente a unos de los circuitos, este peine absorbe carga, al cargarse el circuito de este peine con una polaridad, solicita a través de su terminal (una esfera) la electricidad de signo contrario intentando neutralizarse, esto hace que el circuito contrario absorba del disco por su peine (en la parte superior) esta carga opuesta.

La carga se incrementa progresivamente. Esta carga tiene un límite, determinado: por la capacidad del conductor, botella de Leyden correspondiente, el aislamiento, por la capacidad de polarización del dieléctrico, por la velocidad de rotación, por el tamaño de la máquina, por el material de fricción, en definitiva, por muchas variables que influyen en el resultado final.

### 3. MÁQUINA DE NAIRNE

**Inventor:** Edward Nairne nació en Sandwich , Inglaterra en 1726 fue un fabricante de instrumentos ópticos. Fue aprendiz de Loft Mateo en 1741 y estableció su propio negocio en Cornhill (Londres), después de la muerte de Loft en 1748.

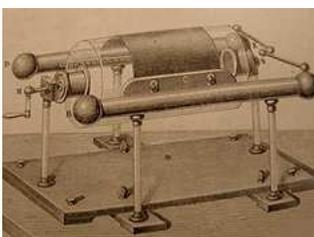
Nairne patentó varias máquinas eléctricas, incluyendo un generador electrostático que consiste en un cilindro de vidrio montado sobre aisladores de vidrio, el dispositivo puede suministrar carga positiva o negativa.

En la octava edición del manual de instrucciones de este dispositivo afirmó que "La electricidad es un tratamiento específico recomendado para el tratamiento de ciertas enfermedades, y merece que se tenga en la mas alta estima para el tratamiento de muchas otras ". Se recomienda su uso para los trastornos nerviosos, contusiones, quemaduras, los ojos inyectados en sangre, dolor de muelas, ciática, epilepsia, histeria, escalofríos, etc.

A Nairne se le atribuye la creación de la goma de borrar. Antes de que se utilizara caucho se usaban migajas de pan para borrar. Nairne sin darse cuenta, tomó un pedazo de goma en lugar de pan rallado y descubrió sus propiedades para borrar.

Nairne era un colaborador habitual de la Philosophical Transactions de la Royal Society de Londres, y fue elegido miembro de esa institución en 1776. Gozó de una reputación internacional amplia, y se escribía con Benjamin Franklin para quien hizo una serie de imanes y un telescopio en torno al 1758.

Murió en Londres el 1 de septiembre de 1806.



**Funcionamiento:** Esta máquina está constituida por un cilindro rotatorio, el cual es frotado por una almohadilla de piel, la electricidad que se produce por el

frotamiento es recogida en uno de sus polos por un peine diametralmente opuesto a la almohadilla. Las cargas de signo contrario se recoge de una placa en que la cual descansa la almohadilla. El cilindro se mueve mediante una manivela sujeta al eje del cilindro. La chispa salta entre los terminales de los conductores, sujetos por columnas aislantes y en comunicación con botellas de Leyden.

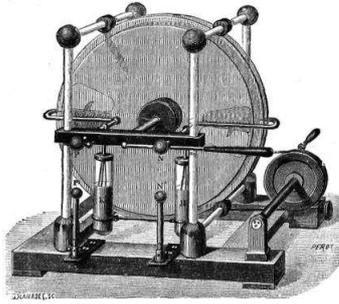
#### 4. MÁQUINA PRIMITIVA POR FROTAMIENTO DIRECTO

Después de la máquina de Otto de Guricke y Hauksbee, entre 1743 y 1745 fue modificada para conseguir otras más cómodas y potentes principalmente en Alemania, G. M. Bose, A. Gordon y J. Winkler entre otros, mediante una polea se hacia rotar una esfera o cilindro de vidrio que era frotado por una piel consiguiendo cargas de una sola polaridad.

#### 5. MÁQUINA DE HOLTZ

**Inventor:** Wilhelm Holtz Nació el 15 de octubre de 1836 era un físico alemán natural de Saatel bei Barth , Mecklemburgo . Entre 1857 y 1862 estudió física y ciencias naturales en Berlín, Dijon y Edimburgo. Después llevo a cabo experimentos con la electricidad en Berlín, y más tarde trabajó en las universidades de Halle y Greifswald, donde en 1884 se convirtió en profesor de física.

En 1865 inventó " La Máquina Electrostática de Influencia o Inducción", es un generador de inducción electrostática que convierte el trabajo mecánico en energía. En los años siguientes Holtz hizo modificaciones, y fabrico varios de estos dispositivos. Los Generadores electrostáticos de esta época son nombrados a veces como " Máquinas Toepler-Holtz ", nombrados así por el físico alemán Toepler (1836-1912), quien durante el mismo período de tiempo construyo una "máquina de influencia", independiente de Holtz, Toepler sostiene en diversos artículos que el es el primer inventor de estas máquinas . Murió el 27 de septiembre de 1913



**Funcionamiento:** La máquina consta originalmente de dos discos de vidrio, uno mayor que el otro, siendo el mayor de 60 cm. con una separación fija de 3 mm y aislado, este gira paralelo el menor por medio de una manivela y un sistema multiplicador de revoluciones mediante poleas. El disco fijo lleva unas escotillas diametralmente opuestas donde se colocan unas láminas o armaduras con lengüetas que apuntan al disco móvil, y mediante inducción transmitirle las cargas, que igualmente por inducción, este otro disco, pasa a los peines de los conductores, colocados delante y frente a las armaduras. Los conductores, se encuentran conectados a botellas de Leyden y producen una chispa en sus terminales.

La puesta en marcha de la máquina puede ser complicado y ha de cebarse en un principio con otra máquina, electróforo de Volta o cualquier procedimiento apropiado.

## 6. EI ELECTRÓFORO

**Inventor:** Alessandro Volta nació y fue educado en Como, Italia. Hijo de una madre de origen noble y de un padre de la alta burguesía. Recibió una educación básica y media humanista, pero al llegar a la enseñanza superior, optó por una formación científica.

En el año 1774 fue nombrado profesor de física de la Escuela Real de Como. Un año después, Volta realizó su primer invento, un aparato relacionado con la electricidad. Con dos discos metálicos separados por un conductor húmedo, pero unidos con un circuito exterior. De esta forma logra por primera vez, producir corriente eléctrica continua, inventando el electróforo perpetuo, un dispositivo que una vez que se encuentra cargado, puede transferir electricidad a otros objetos, y que genera electricidad estática. Entre los años 1776 y 1778, se dedicó a la química, descubriendo y aislando el gas de metano. Un año más tarde, en 1779, fue nombrado profesor titular de la cátedra de física experimental en la Universidad de Pavía.

En 1780, un amigo de Volta, Luigi Galvani, observó que el contacto de dos metales diferentes con el músculo de una rana originaba la aparición de corriente

eléctrica. En 1794, a Volta le interesó la idea y comenzó a experimentar con metales únicamente, y llegó a la conclusión de que el tejido muscular animal no era necesario para producir corriente eléctrica. Este hallazgo suscitó una fuerte controversia entre los partidarios de la electricidad animal y los defensores de la electricidad metálica, pero la demostración, realizada en 1800, del funcionamiento de la primera pila eléctrica certificó la victoria del bando favorable a las tesis de Volta.

Alessandro Volta comunicó su descubrimiento de la pila a la Royal Society londinense el 20 de marzo de 1800. La comunicación de Volta fue leída en audiencia el 26 de junio del mismo año, y tras varias reproducciones del invento efectuadas por los miembros de la sociedad, se confirmó el descubrimiento y se le otorgó el crédito de éste.

En septiembre de 1801, Volta viajó a París aceptando una invitación del emperador Napoleón Bonaparte, para exponer las características de su invento en el Instituto de Francia. El propio Bonaparte participó con entusiasmo en las exposiciones. El 2 de noviembre del mismo año, la comisión de científicos distinguidos por la Academia de las Ciencias del Instituto de Francia encargados de evaluar el invento de Volta emitió el informe correspondiente aseverando su validez. Impresionado con la batería de Volta, el emperador lo nombró conde y senador del reino de Lombardía, y le otorgó la más alta distinción de la institución, la medalla de oro al mérito científico. El emperador de Austria, por su parte, lo designó director de la facultad de filosofía de la Universidad de Padua en 1815.

Sus trabajos fueron publicados en cinco volúmenes en el año 1816, en Florencia. Los últimos años de vida los pasó en su hacienda en Camnago, cerca de Como, donde falleció el 5 de marzo de 1827.

**Esquema del electróforo:** El objetivo del electróforo es cargar positivamente un disco de material conductor.

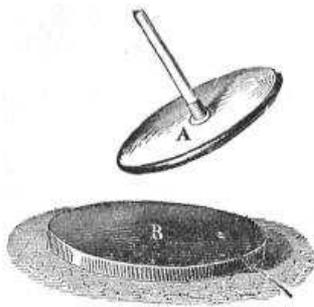
Está formado por:

- Un disco de material conductor, generalmente metálico, con un mango aislante para sostenerlo (en el dibujo superior se ve el mango, en los esquemas debajo no está representado).

- Una lámina de material aislante. En la versión original era una torta de resina.
- Piel de gato (en la versión original), piel de conejo, o un simple tejido de lana bien seco, más fácil de conseguir.

### Funcionamiento:

1. En primer lugar, frotamos la superficie superior de la torta de resina o de la lámina aislante con la piel de gato o conejo (del lado de los pelos), o con un



tejido de lana, a fin de que la superficie quede cargada negativamente por fricción. Una vez que el aislante está cargado, acercamos el disco metálico sosteniéndolo por el mango aislante, con lo que tanto el disco conductor, como la torta de resina o la lámina aislante, se polarizan, situándose las cargas negativas del conductor en la superficie superior como consecuencia de la repulsión

ejercida por las cargas negativas que el material aislante tiene en su superficie.

2. Apoyamos el disco conductor encima del aislante, en contacto. Como el aislante tiene exceso de carga negativa su potencial es negativo; como están próximos, el potencial del disco metálico neutro también es negativo.

3. Conectamos el disco conductor a tierra (si no tenemos algo que sirva de toma de tierra, basta con que lo toquemos con un dedo); como la tierra está a potencial de 0 V y el disco metálico tiene un potencial negativo, el disco tiende a perder carga negativa. Se origina una corriente de carga negativa (circulación de electrones) desde el disco hasta la tierra, que cesa cuando el potencial del disco es 0 V. Esto sucede cuando el disco queda cargado positivamente de forma que su potencial positivo se anula con el negativo generado por el aislante, con lo que el potencial total es de 0 V. Dicho de otra manera, así referimos a tierra el potencial de la cara superior del material aislante.

4. Desconectamos el disco metálico de la toma de tierra, el potencial eléctrico sigue siendo de 0 V.

5. Separamos el disco metálico del aislante, agarrándolo por el mango, ya que si tocásemos el disco con la mano, en el momento en que alejásemos el disco de la lámina aislante, el potencial del disco pasaría de 0 V a un potencial positivo, con lo que electrones de nuestro cuerpo pasarían al disco,

descargándolo. Esta acción de alejar el disco del material aislante cargado es la que inducirá en el disco metálico una carga de algunos miles de voltios. Ahora el disco metálico ha quedado cargado positivamente; si tiene una carga suficiente y acercamos un dedo al disco sin tocarlo, veremos que salta una chispa entre nuestro dedo y el disco, que quedará así descargado.

El científico alemán Georg Christoph Lichtenberg construyó en 1777 uno de los mayores electróforos que se han hecho. Tenía poco menos de dos metros de diámetro, y el disco metálico debía subirse y bajarse con un sistema de poleas. Se reportaron chispas de hasta 38 cm (casi 400.000 voltios). Lichtenberg empleó estas descargas

#### 4. JAMES WIMSHURST

**James Wimshurst** (13 de abril de 1832- 03 de enero de 1903) Fue un inventor, ingeniero y carpintero de barcos inglés.



Wimshurst nació en Poplar, Inglaterra y era el hijo de Henry Wimshurst, un constructor de barcos del Muelle de Ratcliffe Croos. Wimshurst se educó en Steabonheath House en Londres donde, posteriormente, fue aprendiz de James Mare en la fundición Thames hasta 1853. En 1865, se casó con Clara Tribble. En 1865, después de que fuera enviado a Liverpool, pasó a trabajar en la aseguradora de aquella ciudad. En 1874, se enroló en la Cámara de Comercio como "supervisor jefe carpintero de barcos" en Lloyds. Posteriormente, en 1890, se convirtió en representante de la Cámara de Comercio en una conferencia internacional en Washington.

Wimshurst dedicó gran cantidad de su tiempo libre a trabajos experimentales. Además de su actividad en el campo de la electricidad, inventó una particular bomba de vacío, un instrumento para indicar la estabilidad del barco y varios métodos para la conexión a tierra de la corriente eléctrica. En 1878, empezó a experimentar con los impulsos eléctricos que generaban ciertas máquinas con propósitos lúdicos y científicos. En 1880, se interesó en gran cantidad por las máquinas electrostáticas de inducción. Su casa de Clapham, Inglaterra, disponía de un amplio taller en el cuál se disponía de numerosas herramientas y aparatos que posibilitaban la iluminación eléctrica. Wimshurst fabricó generadores electrostáticos, como los ideados por W Nicholson, F.P. Carré y W.T.B Holtz. Wimshurst realizó algunas modificaciones a los de los mencionados, dando como resultando lo que se conoce como la Máquina de Holtz-Wimshurst.

Poco después, Wimshurst desarrolló una "máquina dúplex". El diseño consta de dos discos rotando en sentidos opuestos, con sectores metálicos de conducción en cada una de sus superficies. Comparado con las de sus

predecesores, esta máquina era menos sensible a las condiciones atmosféricas y no requería ser alimentada con otro tipo de corriente. Este tipo de máquina fue, además, mejorada por otros diseñadores (como la máquina Pidgeon desarrollada por W. R. Pidgeon, la cual incrementaba el efecto de inducción y la salida eléctrica). En 1882, Wimshurst desarrolló la "Máquina Cilíndrica". Para 1883, sus mejoras en el generador electrostático permitieron al aparato ser conocido como la **máquina de Wimshurst**. En 1885, una de las más grandes máquinas de Wimshurst se construyó en Inglaterra (presente hoy en el Museo de la Ciencia y la Industria de Chicago).

Wimshurst se convirtió en miembro de la Institución de Ingenieros Eléctricos en 1889. En 1891, publicó una máquina que generaba alta tensión mediante corriente alterna. En 1896, se encontró un nuevo uso para sus máquinas de múltiples discos (más de ocho) en el generador de rayos Roentgen para radiografías y electroterapia. Por esta contribución a la ciencia médica, fue nombrado miembro de la Royal Society en 1898.

Murió en Clapham, Inglaterra, a la edad de 70 años.

## 5. MÁQUINA DE WIMSHURST

### 5.1. ¿CÓMO FUNCIONA LA MÁQUINA DE WIMSHURST?



La máquina de Wimshurst, fue inventada por James Wimshurst en Inglaterra, y fue descrita por primera vez en 1883. Estructuras similares, no sectoriales, (sin láminas metálicas adheridas) fueron descritas previamente por Holtz y Poggendorff en Alemania, alrededor del 1869 y por Musaeus en 1872.

Una máquina sectorizada descrita por Holtz en 1876, se hizo muy popular por su funcionamiento fiable y su construcción simple, aunque su eficacia era relativamente pobre.

En la máquina de Wimshurst, las hojas metálicas actúan como objeto cargado en parte del ciclo y como objetos de carga inducida en otra parte del ciclo.

Se observará, sin embargo, que el proceso de carga inductiva, requiere que exista con anterioridad un objeto cargado. Si admitimos que la máquina arranca en su movimiento, con ausencia total de carga, ¿cómo se produce el fenómeno?.

El problema es similar al de la cuchilla de afeitar apoyada en equilibrio sobre su filo; en teoría, la cuchilla no debería caer al estar perfectamente equilibrada y no existir una dirección privilegiada de caída en el espacio. Sin embargo cae, debido simplemente a que es imposible equilibrar la cuchilla de forma perfecta. En el caso de la máquina de Wimshurst, el arranque y la construcción de carga, se producen simplemente porque en principio, la máquina no es perfectamente neutra.

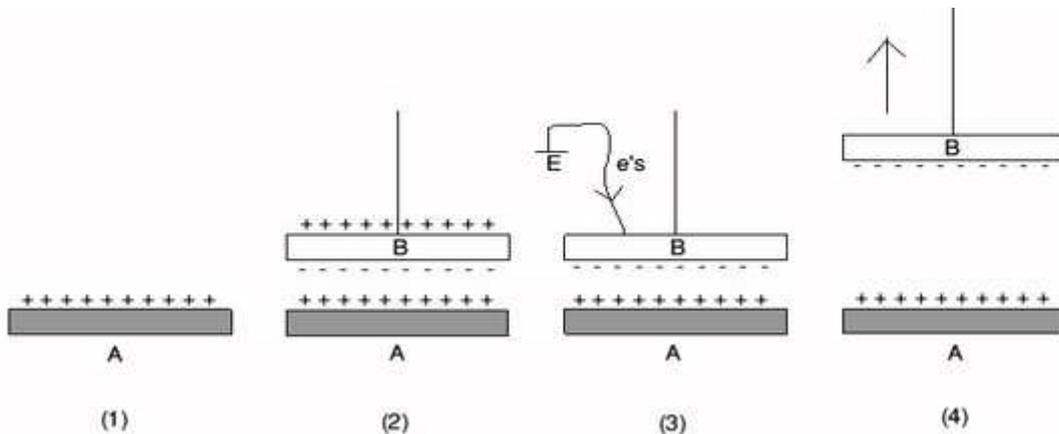
Por supuesto, no es posible saber la polaridad que la máquina tomará una vez la arranquemos (la hoja de afeitar puede caer en cualquier dirección). Por esa razón, algunas máquinas de Wimshurst incorporan un trocito de piel, que

ofrece un mínimo de carga en algún punto, de forma que la máquina arrancará con la misma polaridad cada vez.

Una vez la máquina arranca, hay cuatro funciones idénticas realizándose, dos en cada disco. En realidad, se trata de cuatro electrofóro, dos positivos y dos negativos.

Una máquina de Wimshurst típica puede producir chispas de longitud aproximadamente un tercio del diámetro del disco y varias decenas de microamperios.

El aislamiento y el tamaño de la máquina determinar la tensión de salida máxima que puede alcanzarse.



El efecto de aproximación entre las secciones positivas y neutras de los discos en rotación, realiza el efecto de inducción del electrofóro, y los cepillos de carga de los brazos aislados, recogen la carga positiva para llevarla al terminal.

Las chispas brillantes requieren una corriente de gran intensidad. La corriente puede ser obtenida almacenando la carga extraída de los discos rotantes en botellas de Leyden.

El diseño clásico incluye dos botellas de Leyden con los terminales aislados de la máquina conectados a los terminales de entrada de carga de las botellas, existiendo interconexión entre los terminales exteriores de las mismas.

Arcos significativamente mayores, pueden obtenerse añadiendo unas pequeñas esferas a los terminales de la máquina, concretamente al terminal

positivo. El efecto conseguido, consiste en la ampliación de la zona de ionización, lo que equivale a una ampliación de la zona de influencia del campo eléctrico.

En arcos cortos, el extremo positivo se presenta más brillante. En arcos largos, el extremo positivo, presenta un pequeño tramo recto, mientras que el negativo se presenta habitualmente fibrilado y de mayor brillo. El porqué de esta inversión del brillo, es algo que aún hoy en día representa un misterio.



### ***5.2. EXPERIMENTOS REALIZABLES CON LA MÁQUINA DE WIMSHURST***

- Si ponemos esencia de trementina en un vaso y acercamos su superficie a la bola positiva de la máquina de Wimshurst veremos que la trementina es atraída por la bola y forma como una pequeña tromba al unirse a ella. Si en vez de acercarlo a la bola positiva, lo hacemos a la negativa, no sólo no habría atracción, sino que en la trementina se produciría un pequeño hueco debido a la repulsión eléctrica.
- Si colocamos una cartulina entre las dos bolas en los terminales de la máquina de Wimshurst esta se agujereará debido a las chispas eléctricas.

- Si colocamos próximas las dos bolitas de los terminales, se produce una chispa continua entre dichas esferas.
- Si colocamos velas encendidas muy cerca de las dos esferas, veremos que la parte brillante de la llama es atraída por el polo negativo y repelida por el polo positivo. Se verá perfectamente el resultado de la atracción ya que sobre la bola metálica del polo negativo quedará una marca negra del humo y sobre la bola cargada positivamente, no queda tal depósito.
- Para la obtención de grandes chispas aisladas separamos bastante las dos esferas de los terminales. Al arrancar la máquina, en las botellas de Leyden, se irá acumulando una gran potencial eléctrico. Si aproximamos las dos esferas, al hallarse a la distancia conveniente saltará una chispa muy intensa y de relativa longitud.
- Con tiritas de papel de estaño, pegadas en zig-zag sobre una placa de vidrio, ebonita o cartón, podemos obtener, al conexionar sus dos extremos con las esferas de una máquina de Wimshurst, chispas que irán recorriendo las sinuosidades de las tiras de papel de estaño.

## 6. ENERGÍA ELECTROESTÁTICA Y CAPACIDAD

Si transportamos una carga puntual “ $q$ ” desde un lugar muy lejano a una región donde existen presentes otras cargas, debemos realizar un trabajo  $qV$ , en donde  $V$  es el potencial en la posición final debido a las cargas próximas. El trabajo realizado se almacena en forma de energía potencial electrostática. La energía potencial electrostática de un sistema de cargas es el trabajo total necesario para construir el sistema.

Al situar una carga sobre un conductor aislado, el potencial del conductor crece. El cociente entre la carga y el potencial se llama **capacidad** del conductor. Un dispositivo útil para almacenar carga y energía es el condensador, formado por dos conductores muy próximos, pero aislados uno del otro. Conectados a una diferencia de potencial, tal como una batería, los conductores adquieren cargas iguales y opuestas. El cociente entre la magnitud de carga sobre cada conductor y la diferencia de potencial entre los conductores es la capacidad del condensador. Los condensadores tienen muchas aplicaciones. El mecanismo de iluminación “Flash” de las cámaras fotográficas posee un condensador que almacena la energía necesaria para proporcionar un destello súbito de luz. El condensador también se utiliza en circuitos de sincronización de radios, televisores, etc.

El primer condensador fue la botella de Leyden, un recipiente de vidrio recubierto exteriormente con láminas de oro. Fue inventada en el siglo XVIII en la Universidad de Leyden (Holanda) cuando uno de los experimentadores que estaban estudiando los efectos de las cargas eléctricas sobre las personas y los animales tuvo la idea de almacenar una gran cantidad de carga en una botella de agua. Para ello sostenía la botella en una mano mientras la carga procedente de un generador electrostático era conducida hasta el agua por medio de una cadena. Cuando trató de sacar la cadena del agua con la otra mano sufrió una sacudida eléctrica que le dejó inconsciente. Benjamin Franklin comprobó que el dispositivo para almacenar cargas no debía tener necesariamente forma de botella y utilizó en su lugar vidrios de ventana cubiertos de hojas metálicas, que se llamaron vidrios de Franklin. Con varios de estos vidrios conectados en paralelo, Franklin almacenó una carga y con ello trató de matar a un pavo. En su

lugar, sufrió él mismo una fuerte descarga. Más tarde, Franklin escribió: “Trataba de matar un pavo y por poco no maté un ganso”.

### 6.1. ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA

Si tenemos una carga puntual  $q_1$ , el potencial a una distancia  $r_{1,2}$  viene dado por:

$$V = \frac{kq_1}{r_{1,2}}$$

Para traer una segunda carga puntual  $q_2$  desde una distancia infinita a una distancia  $r_{1,2}$ , debe realizarse el trabajo:

$$W_2 = q_2 V = \frac{kq_2q_1}{r_{1,2}}$$

Para traer una tercera carga, debe realizarse trabajo en contra del campo eléctrico producido por ambas cargas,  $q_1$  y  $q_2$ . El trabajo necesario para transportar una tercera carga a una distancia  $r_{1,3}$  de  $q_1$  y una distancia  $r_{2,3}$  de  $q_2$  es:

$$W_3 = \frac{kq_3q_1}{r_{1,3}} + \frac{kq_3q_2}{r_{2,3}}$$

El trabajo total para unir las tres cargas puntuales es la energía potencial electrostática  $U$  del sistema de las tres cargas:

$$U = \frac{kq_2q_1}{r_{1,2}} + \frac{kq_3q_1}{r_{1,3}} + \frac{kq_3q_2}{r_{2,3}} \quad \text{“Ecuación:1”}$$

Esta cantidad de trabajo es independiente del orden en el cual las cargas se transportan hasta alcanzar sus posiciones finales. En general:

La energía potencial electrostática de un sistema de cargas puntuales es el trabajo necesario para transportar las cargas desde una separación infinita hasta sus posiciones finales.

Los dos primeros términos del segundo miembro de la ecuación “Ecuación:1” pueden escribirse de la forma:

$$\frac{kq_2q_1}{r_{1,2}} + \frac{kq_3q_1}{r_{1,3}} = q_1 \left( \frac{kq_2}{r_{1,2}} + \frac{kq_3}{r_{1,3}} \right) = q_1 V_1$$

en donde  $V_1$  es el potencial debido a las cargas “ $q_2$ ” y “ $q_3$ ”. De igual modo, el segundo y tercer términos representan el producto de la carga “ $q_3$ ” por el potencial debido a las cargas “ $q_1$ ” y “ $q_2$ ” y el primero y tercer términos representan el producto de la carga  $q_2$  por el potencial debido a las cargas “ $q_1$ ” y “ $q_3$ ”. Así, podemos expresar la ecuación \*1 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} U &= \frac{kq_2q_1}{r_{1,2}} + \frac{kq_3q_1}{r_{1,3}} + \frac{kq_3q_2}{r_{2,3}} \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{kq_2q_1}{r_{1,2}} + \frac{kq_3q_1}{r_{1,3}} + \frac{kq_3q_2}{r_{2,3}} + \frac{kq_2q_1}{r_{1,3}} + \frac{kq_3q_1}{r_{1,2}} + \frac{kq_3q_2}{r_{2,3}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left[ q_1 \left( \frac{kq_2}{r_{1,2}} + \frac{kq_3}{r_{1,3}} \right) + q_2 \left( \frac{kq_3}{r_{2,3}} + \frac{kq_1}{r_{1,2}} \right) + q_3 \left( \frac{kq_1}{r_{1,3}} + \frac{kq_2}{r_{2,3}} \right) \right] \end{aligned}$$

La energía potencial electrostática  $U$  de un sistema de  $n$  Cargas puntuales es por tanto:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i$$

en donde  $V_i$  es el potencial en la posición de la carga  $i$  producido por todas las demás cargas.

La “ecuación:1” describe también la energía potencial electrostática de una distribución continua de carga. Consideremos un conductor esférico de radio  $R$ . Cuando la esfera transporta una carga  $q$ , su potencia relativo a  $V = 0$  en el infinito es

$$V = \frac{kq}{R}$$

El trabajo necesario para transportar una cantidad adicional de carga  $dq$  desde el infinito al conductor es  $V dq$ . Este trabajo es igual al incremento de energía potencial del conductor:

$$dU = V dq = \frac{kq}{R} dq$$

La energía de potencial total  $U$  es la integrada de  $dU$  cuando  $q$  crece desde cero a su valor final  $Q$ . Integrado desde  $q = 0$  a  $q = Q$ , se obtiene:

$$U = \frac{kQ^2}{2R} = \frac{1}{2} QV \quad \text{"Ecuación:2"}$$

en donde  $V=kQ/R$  es el potencial sobre la superficie de la esfera cargada. Aunque la "ecuación:2" se ha deducido para un conductor esférico, es valida para cualquier conductor. El potencial de un conductor es proporcional a su carga  $q$ , es decir ,  $V = \alpha q$ , en donde  $\alpha$  es una constante. Por tanto, el trabajo necesario para transportar una carga adicional  $dq$  desde el infinito al conductor es proporcional a su carga  $q$ , es  $V dq = \alpha q dq$ , y el trabajo total necesario para depositar la carga  $Q$  sobre el conductor  $i$  al potencial  $V_i$  con la carga  $Q_i$ , la energía potencial electroestática es:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i V_i$$

## 6.2. CAPACIDAD

El potencial (relativo al potencial cero en el infinito) de un simple conductor aislado, portador de una carga  $Q$ , es proporcional a esta carga y depende del tamaño y forma del conductor. En general, cuanto mayor es el conductor, mayor es la cantidad de carga que puede almacenar para un determinado potencial. Por ejemplo, el potencial de un conductor esférico de radio  $R$ , portador de una carga  $Q$  es

$$V = \frac{kQ}{R}$$

El cociente entre la carga  $Q$  y el potencia  $V$  de un conductor aislado es su capacidad.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Esta magnitud mide la “Capacidad” de almacenar carga para una determinada diferencia de potencial. Como el potencial es siempre proporcional a la carga, esta relación no depende de  $Q$  o  $V$ , sino sólo del tamaño y forma del conductor. La capacidad de un conductor esférico es

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{kQ/R} = \frac{R}{k} = 4\pi\epsilon_0 R$$

La unidad SI de capacidad es el culombio por voltio y se denomina **faradio (F)** en honor al gran físico experimental inglés, Michael Faraday

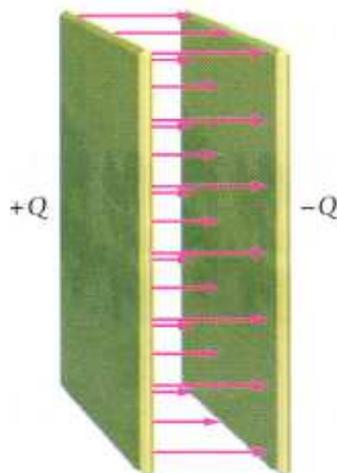
$$1F = 1 \text{ C/V}$$

Como el faradio es una unidad relativamente grande, se utilizan frecuentemente los submúltiplos como el microfaradio o picofaradio. Como la capacidad se mide en faradios y el radio “R” en metros, la ecuación siguiente nos dice que la unidad SI de permitividad del espacio libre,  $\epsilon_0$ , se expresa en faradios por metro.

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 8,85 \text{ pF/m}$$

Un sistema de dos conductores portadores de cargas iguales y opuestas constituye un condensador. Habitualmente un condensador se carga transfiriendo una carga  $Q$  de un conductor a otro, con lo cual uno de los conductores queda con la carga  $+Q$  y el otro con  $-Q$ . La capacidad del dispositivo se define por el cociente  $Q/V$ , en donde  $Q$  es la magnitud de la carga en cualquiera de los dos conductores y  $V$  la magnitud de la diferencia de potencial entre los conductores. Para calcular la capacidad, situamos cargas iguales y opuestas sobre los conductores y después determinamos la diferencia de potencial  $V$  a partir del campo eléctrico  $E$  entre ellos.

**Condensador de placas paralelas** Un condensador común es el



condensador de placas paralelas, formado por dos grandes placas conductoras paralelas. En la práctica, las placas pueden ser láminas metálicas muy finas, separadas y aisladas una de otra por una lámina delgada de plástico. Este “sandwich” se arrolla para ahorrar espacio. Sea  $A$  el área de cada placa y  $d$  la distancia de separación, que es pequeña comparada con la longitud y anchura de las placas. Situamos una carga  $+Q$  sobre una placa y  $-Q$  sobre la otra. Estas

cargas se atraen entre sí y se distribuyen uniformemente sobre las superficies interiores de las placas. Como las placas están muy próximas, el campo en cualquier punto entre ellas ( excluyendo los puntos próximos a los bordes) es aproximadamente igual al campo uniforme de magnitud  $E = \sigma / 2\epsilon_0$  resultando así un campo total  $\mathcal{E} = \sigma / \epsilon_0$ , siendo  $\sigma = Q/A$  la carga por unidad de área en cada una de las placas. Como el campo que existe entre las placas de este condensador es uniforme la diferencia de potencial entre las placas es igual al campo multiplicado por la separación de las placas, d:

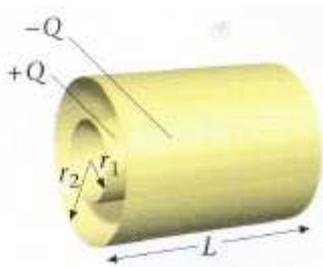
$$V = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

La capacidad del condensador de placas paralelas es, por tanto:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Obsérvese que como V es proporcional a Q, la capacidad no depende de Q ni de V. En un condensador de placas paralelas, la capacidad es proporcional a la superficie de las placas e inversamente proporcional a la distancia de separación. En general la capacidad depende del tamaño, forma y geometría de los conductores y del medio aislante que les separa.

**Condensador cilíndrico** Un condensador cilíndrico consta de un pequeño



cilindro o alambre conductor de radio r1 y una corteza cilíndrica mayor de radio r2 concéntrica con la anterior. Un cable coaxial, como el utilizado en la televisión por cable puede considerarse un condensador cilíndrico. La capacidad por unidad de longitud de un cable coaxial es importante en la determinación de las características de transmisión del cable.

Si disponemos la carga +Q en el conductor interno y la carga -Q en el conductor externo y calculamos la diferencia de potencial  $V = V_1 - V_2$  a partir del campo eléctrico entre los conductores, el cual se deduce de la ley de Gauss. Como el campo eléctrico depende de r, debemos integrar para determinar la diferencia de potencial.

- 1) La capacidad se define por la relación Q/V:  $C = Q/V$

2)  $V$  está relacionado con el campo eléctrico entre las cortezas:

$$dV = -\mathbf{E} \cdot d\ell = -E_r dr$$

3) Para determinar  $E_r$  escogemos una superficie cilíndrica gaussiana de radio entre los conductores ( $r_1 < r < r_2$ ). El área de la superficie gaussiana es, por tanto,  $2\pi rL$ . La ley de Gauss nos da:

$$\oint_S \mathbf{E}_n \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{\text{interior}}$$

$$E_r 2\pi rL = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

4) Despejamos  $E_r$ :

$$E_r = \frac{1}{2\pi L \epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

5) Integrar para determinar  $V = V_1 - V_2$ :

$$V = V_1 - V_2 = \int_{r_2}^{r_1} dV = \int_{r_2}^{r_1} -E_r dr$$

$$= \int_{r_1}^{r_2} +E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

6) Del resultado anterior se deduce  $C$ :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(r_2/r_1)}$$

Por lo tanto llegamos a la conclusión de que la capacidad en un condensador cilíndrico es proporcional a la longitud de los conductores.

### 6.3. ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Durante la carga de un condensador, una carga positiva del conductor cargado negativamente se transfiere al conductor cargado positivamente. Parte de este trabajo queda almacenado en forma de energía potencial electrostática.

Sea  $q$  la carga transferida al cabo de cierto tiempo durante el proceso. La diferencia de potencial es entonces  $V = q/C$ . Si se transfiere ahora una pequeña cantidad adicional de carga  $dq$  desde el conductor negativo a potencial cero hasta el conductor positivo a un potencial  $V$ , la energía potencial de la carga se incrementa en

$$dU = V dq = \frac{q}{C} dq$$

El incremento total de energía potencial  $U$  es la suma o integral de estas cargas  $dU$  cuando  $q$  crece desde cero a su valor final  $Q$

$$U = \int dU = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

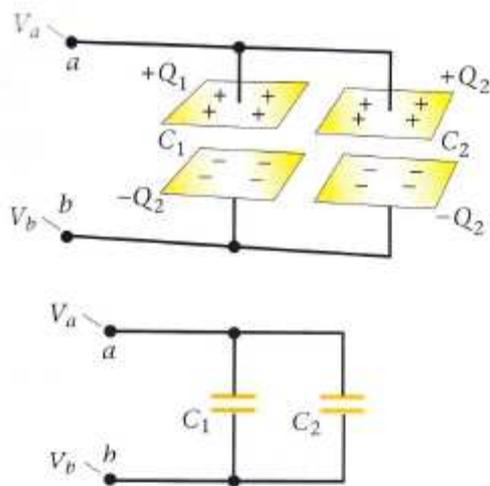
Esta energía potencial es la energía almacenada en el condensador. Utilizando  $C=Q/V$  podemos expresar esta energía de varios modos:

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2$$

#### 6.4. COMBINACIONES DE CONDENSADORES.

- **Paralelo**

Frecuentemente se utilizan dos o más condensadores en combinación. Cuando dos condensadores se conectan como muestra la siguiente figura,



de tal modo que las placas superiores de los dos condensadores están unidas por un alambre conductor y, por tanto, a un mismo potencial  $V_a$  y las dos placas inferiores están también conectadas entre sí y están a un potencial común  $V_b$ , se dice que los condensadores están conectados en paralelo. Cuando los condensadores están conectados en paralelo, la diferencia de potencial es la misma entre las placas de cada condensador.

En la anterior figura se supone que los puntos  $a$  y  $b$  están conectados a una batería o a algún otro dispositivo que mantiene una diferencia de potencial  $V=V_a-V_b$  entre las placas de cada condensador. Si las capacidades son  $C_1$  y  $C_2$ , las cargas  $Q_1$  y  $Q_2$  almacenadas sobre las placas vienen dadas por:

$$Q_1 = C_1 V \text{ y } Q_2 = C_2 V$$

$$\text{La carga total almacenada es } Q = Q_1 + Q_2 = C_1 V + C_2 V = (C_1 + C_2) V$$

Una combinación de condensadores en un circuito puede reemplazarse por un solo condensador que almacene la misma cantidad de carga para una determinada diferencia de potencia. Decimos entonces que el condensador sustituto posee una capacidad equivalente. La capacidad equivalente de dos

condensadores en paralelo es el cociente de la carga total almacenada y la diferencia de potencial.

$$C_{eq} = C/V = C_1 + C_2$$

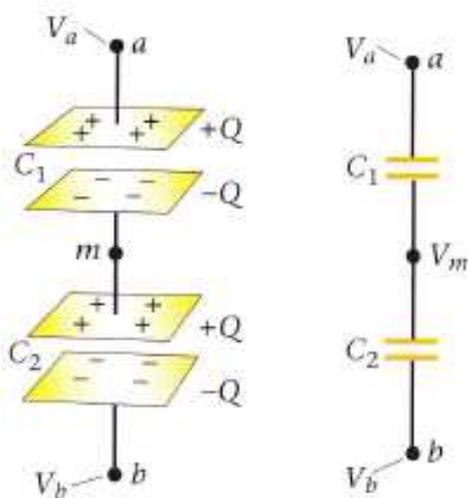
Así pues, la capacidad equivalente de dos condensadores en paralelo es igual a la suma de las capacidades individuales. Cuando añadimos un segundo condensador en paralelo, incrementamos la capacidad, ya que esencialmente el área del conductor crece, permitiendo que una carga mayor se almacene con la misma diferencia de potencial.

El mismo razonamiento puede extenderse a tres o más condensadores conectados en paralelo.

- **Serie**

En la siguiente figura se muestran dos condensadores conectados de modo que la magnitud de la carga en ambos es la misma. Esta conexión de condensadores se llama en serie. La diferencia de potencial a través de la combinación en serie es la suma de las diferencias de potencial a través de los condensadores individuales.

Cuando los puntos a y b se conectan a los terminales de una batería, se establece una diferencia de potencial  $V = V_a - V_b$  entre los dos condensadores. Si



una carga  $+Q$  se deposita sobre la carga superior del primer condensador, el campo eléctrico producido por dicha carga inducirá una carga negativa igual a  $-Q$  sobre su placa inferior. Esta carga procede de los electrones extraídos de la placa superior del segundo condensador. Por tanto, existirá una carga igual a  $+Q$  en la placa superior del segundo condensador y una carga correspondiente  $-Q$  en su placa inferior. La diferencia de potencial a través del primer condensador es.

$$V_1 = V_a - V_m = \frac{Q}{C_1}$$

en donde  $V_m$  es el potencial de las placas adyacentes y el cable de conexión. De igual modo, la diferencia de potencial a través del segundo condensador es:

$$V_2 = V_a - V_m = Q/C_2$$

La diferencia de potencial entre los dos condensadores en serie es la suma de estas diferencias de potencial:

La capacidad equivalente de dos condensadores en serie es:

$$C_{eq} = Q/V$$

$$1/C_{eq} = (1/C_1) + (1/C_2)$$

Esta ecuación puede generalizarse para tres o más condensadores conectados en serie.

## 6.5. DIELECTRICOS

Un material no conductor, como, por ejemplo, el vidrio, el papel o la madera, se denomina dieléctrico. Michael Faraday descubrió que cuando el espacio entre dos conductores de un condensador se ve ocupado por un dieléctrico, la capacidad aumenta en un factor  $k$ , que es característico del dieléctrico. La razón de este incremento es que el campo eléctrico entre las placas de un condensador se debilita por causa del dieléctrico. Así para una carga determinada sobre las placas, la diferencia de potencial se reduce y la relación  $Q/V$  se incrementa.

Si el campo eléctrico original entre las placas de un condensador sin dieléctrico es  $E_0$ , el campo en el dieléctrico insertado entre las placas es:

$$E = E_0 / k$$

donde  $k$  es la constante dieléctrica. En un condensador de placas paralelas de separación  $d$ , la diferencia de potencial entre las placas es:

$$V = E d = (E_0 d)/k = V_0/k$$

siendo  $V$  la diferencia de potencial con dieléctrico y  $V_0 = E_0 d$  la diferencia de potencial original sin dieléctrico. La nueva capacidad es:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{V_0/k} = k \frac{Q}{V_0}$$

es decir

$$C = k C_0$$

en donde  $C_0 = Q/ V_0$  es la capacidad original. La capacidad de un condensador de placas paralelas lleno de un dieléctrico de constante  $k$  es, por lo tanto

$$C = \frac{\kappa\epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon A}{d}$$

en donde

$$\epsilon = \kappa\epsilon_0$$

es la permitividad del dieléctrico.

En la exposición anterior hemos supuesto que la carga sobre las placas del condensador no cambiaba cuando le introducía el dieléctrico. Esto es cierto si el condensador se carga y después se separa de la fuente (Batería) antes de insertar el dieléctrico. Si el dieléctrico se inserta durante el proceso de carga, la batería suministra más carga para mantener la diferencia de potencial original. La capacidad se incrementará en un factor  $k$ .

Los dieléctricos no sólo incrementan la capacidad de un condensador, sino que además proporcionan un medio para separar las placas conductoras paralelas y además elevar la diferencia de potencial a la cual tiene lugar la ruptura dieléctrica. Consideremos un condensador de placas paralelas formado por dos hojas de metal separadas por una lámina delgada de plástico. El plástico permite que las hojas metálicas se encuentren muy próximas sin llegar a ponerse en contacto eléctrico y como la resistencia del plástico a la ruptura es mayor que la del aire, se pueden alcanzar mayores diferencias de potencial.

La siguiente tabla relaciona la constante dieléctrica y la resistencia a la ruptura del dieléctrico de algunas sustancias aislantes. Obsérvese que para el aire,  $k=1$ , de modo que para la mayor parte de los casos no necesitamos distinguir entre el aire y el vacío.

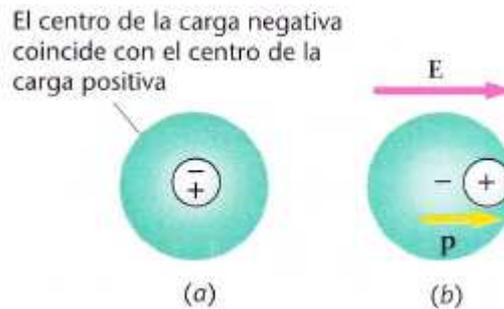
Dieléctrico	C. dieléctrica relativa* k	rigidez dieléctrica** (kV/mm)
Vacío	1	∞
Aire	1.00054	3.0
Agua destilada	80	-
Papel	3.5	14
Mica	5.4	100
Porcelana	6.5	4
Cuarzo fundido	3.8	8
Vidrio pirex	4.5	13
Baquelita	4.8	12
Polietileno	2.3	50
Ambar	2.7	90
Poliestireno	2.6	25
Teflón	2.1	60
Neopreno	6.9	12

## 6.6. ESTRUCTURA MOLECULAR DE UN DIELECTRICO

Un dieléctrico debilita el campo eléctrico entre las placas de un condensador porque sus moléculas producen un campo eléctrico adicional de sentido opuesto al del campo externo producido por las placas. Este campo eléctrico se debe a los momentos bipolares eléctricos de las moléculas del dieléctrico.

Aunque los átomos y moléculas son eléctricamente neutros, son afectados por los campos eléctricos debido a que contienen cargas positivas y negativas que pueden responder a campos externos. Un átomo puede considerarse como un núcleo muy pequeño, cargado positivamente, rodeado por una nube electrónica, cargada negativamente. En algunos átomos y moléculas la nube electrónica es esféricamente simétrica, de modo que su "centro de cargas" está en el centro del átomo o molécula, coincidiendo con la carga positiva. Un átomo o molécula de este tipo posee un momento bipolar cero y se llama no polar. Sin embargo, en presencia de un campo eléctrico externo la carga positiva y la carga negativa experimentan fuerzas en direcciones opuestas. Las cargas positivas y las cargas negativas se separan hasta que la fuerza atractiva que ellas ejercen entre sí equilibran las fuerzas debidas al campo eléctrico externo. Se dice

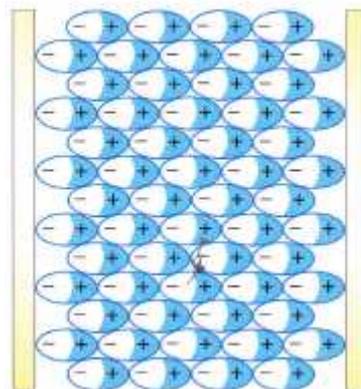
entonces que la molécula está polarizada y que se comporta como un dipolo eléctrico.



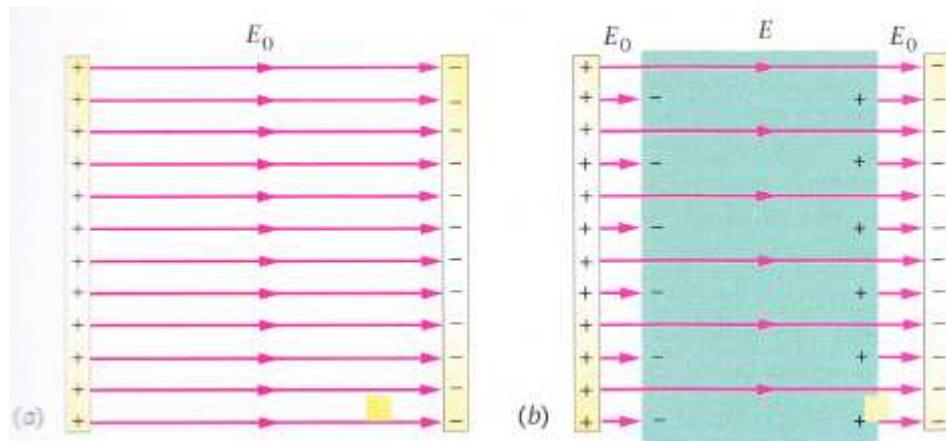
En algunas moléculas los centros de la carga positiva y negativa no coinciden incluso en ausencia de un campo eléctrico externo. Estas moléculas polares tienen un momento bipolar eléctrico permanente.

Cuando un dieléctrico se sitúa en el campo de un condensador, sus moléculas se polarizan de modo que se produce un momento bipolar neto paralelo al campo. Si las moléculas son polares, sus momentos dipolares, orientados originalmente al azar tienden a alinearse debido al par de fuerzas ejercido por el campo. Si las moléculas no son polares el campo induce momentos bipolares que son paralelos al campo. En cualquier caso, las moléculas del dieléctrico se polarizan en la dirección del campo externo.

El efecto neto de la polarización de un dieléctrico homogéneo en un condensador es la creación de una carga superficial sobre las caras del dieléctrico próximas a las placas, como se indica en la siguiente figura.



Esta carga superficial, ligada al dieléctrico, se denomina carga ligada porque está unida a las moléculas del dieléctrico y no puede desplazarse como la carga libre de los conductores. Así, el campo eléctrico neto entre las placas se debilita como indica la siguiente figura.



## 7. ESTUDIO DE LOS CONDENSADORES

### 7.1 CONDENSADORES INICIALES EN LA MÁQUINA DE WIMSHURST

Tras refrescar los conocimientos teóricos sobre el funcionamiento de los condensadores procedemos a estudiar los actuales condensadores o botellas de Leyden.

La base sobre la que se apoya la construcción del condensador es un “tarro” de vidrio, el vidrio tiene una constante dieléctrica  $k = 4,5$  y una rigidez dieléctrica de  $13\text{kV/mm}$ .

Si sabemos que el espesor del vidrio es  $4,7\text{mm}$  podemos suponer que dicha botella funcionara correctamente hasta valores de diferencia de potencial cercanos a  $61\text{ kV/mm}$ .

$$4,7\text{mm} * 13\text{ kV/mm} = 61,1\text{ kV}$$

Sabemos también que el recorrido que debería hacer un arco eléctrico para contornear la botella es de  $150\text{mm}$  , sabiendo que la rigidez dieléctrica del aire es  $3\text{kV/mm}$  sería necesaria una diferencia de potencial entre las placas de  $450\text{kV}$

Como la diferencia de potencial de perforación es menor que la de contorneo el vidrio debería perforarse antes de que se produjera el contorneo sobre el mismo.

**Nota:** No conozco ninguna otra máquina que siga el patrón anterior mente descrito, es decir que se destruya antes de activarse sus mecanismos de “Seguridad”

Las botellas constan de dos placas de cobre interior y exterior.

La placa exterior tiene las siguientes dimensiones

Diámetro:  $0,16\text{m}$  Longitud:  $0,20\text{m}$

La placa tiene las siguientes dimensiones

Diámetro:  $0,153\text{m}$  Longitud:  $0,20\text{m}$

Como sabemos la fórmula para el cálculo de una condensador cilíndrico es:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(r_2/r_1)}$$

Debemos añadir el valor de K en la formula para añadir el efecto del semiconductor entre las placas de cobre.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi k \epsilon_0 L}{\ln(r_2/r_1)}$$

Por lo tanto la capacidad de las botellas de Leyden es:

1118pF

## 7.2 CONDENSADORES CON DIELECTRICO DE TEFLÓN

Tras comprobar que los condensadores “de serie” soportan una diferencia de potencial entre su placas de 61kV/mm, empezaremos por buscar un material con un mejor valor de rigidez dieléctrica.

Material	Constante k	Rigidez dielectrica (kV/mm)
Vidrio Pyrex	4.5	13
Polietileno	2.3	50
Teflón	2.1	60
Ambar	2.7	90

Descartamos el Ambar por su escasez y su elevado precio al ser considerado piedra semi-preciosa.

Seleccionamos el Teflón y polietileno por tener una mayor Rigidez dieléctrica.

Puesto que ambos materiales tienen una menor constante k que el vidrio las dimensiones de los condensadores a montar deberán ser distintas a las botellas de Leyden de “Serie”.

Es en este punto cuando pesamos en la posibilidad de realizar una replica por ordenador en 3D tanto de la máquina de Wimshurst como de los condensadores, de manera que el efecto visual de los nuevos condensadores se encontrara en armonía con el resto de la máquina y no desmereciera el conjunto.

El proceso de creación se explicará en el apartado 7.4

Tras dibujada dicha máquina se llegó a la conclusión de que las dimensiones apropiadas para los condensadores podrían ser :

Un cuerpo de Teflón o Polietileno de 400 mm de longitud, un diámetro exterior de 250mm y un diámetro interior de 240mm

Una placa de cobre exterior con un diámetro interior de 250 mm, exterior de 251mm y longitud 200mm

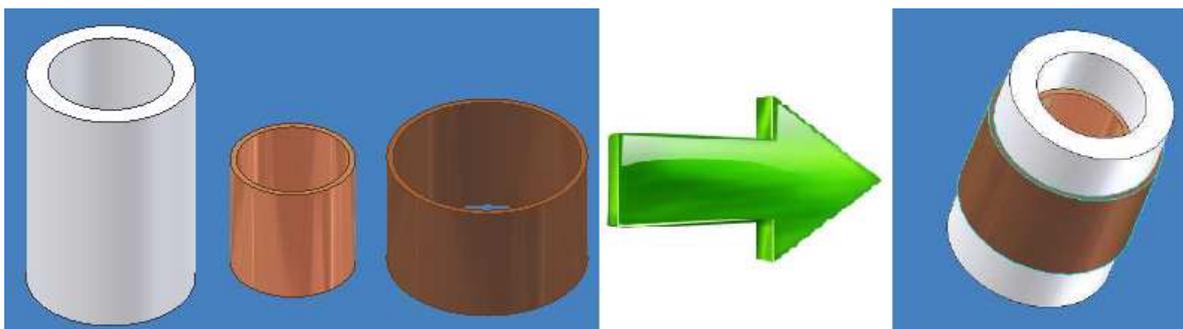
Una placa de cobre interior con un diámetro interior de 239 mm, exterior de 240mm y longitud 200mm

Si sabemos que el espesor del material es 10mm podemos suponer que el nuevo condensador funcionara correctamente hasta valores de diferencia de potencial cercanos a 500 kV/mm.

$$10\text{mm} * 50 \text{ kV/mm} = 500 \text{ kV "En teoria"}$$

Sabemos también que el recorrido que debería hacer un arco eléctrico para contornear la botella es de 110mm aproximadamente, sabiendo que la rigidez dieléctrica del aire es 3kV/mm sería necesaria una diferencia de potencial entre las placas de 330kV/mm.

En este condensador se produciría un contorneo antes de que se perforará el material.



Con las medidas anteriormente citadas pedimos un presupuesto a dos empresas de Zaragoza capaces de suministrar y rectificar el material a nuestras necesidades.

SanMetal, S.A

Traid Villaroya hermanos, S.L

La respuesta fue muy similar en ambas empresas:

PODEMOS SERVIR:

TUBO DE PTFE (TEFLON) DE Ø 245 \* Ø 230 y 300 mm. LONG. (ES EL LARGO MAXIMO QUE  
PODEMOS HACER ESTAS PIEZAS)  
TOLERANCIAS Ø EXTERIOR 0 + 8 mm. Ø INTERIOR 0 - 6% mm.

A..... 31 €/KG. + IVA  
PESO APROX. 7 KGS.  
PLAZO DE ENTREGA, 4 – 6 SEMANAS (AGOSTO INHABIL)

TUBO DE POLIETILENO DE Ø 245 \* Ø 230 y 300 mm. LONG. TOLERANCIAS Ø EXTERIOR 0 +  
8 mm. Ø INTERIOR 0 - 6% mm.

A..... 3,9 €/KG. + IVA  
PESO APROX. 16 KGS.  
PLAZO DE ENTREGA, 4 – 6 SEMANAS (AGOSTO INHABIL)

PARA EL COBRE NO HAY NINGÚN TUBO PARA PODER ACOPLARLO; CREEMOS QUE LA ÚNICA  
POSIBILIDAD QUE TENDRÍAN SERIA QUE UN METALISTERO PARTIENDO DE CHAPA DEL  
ESPESOR QUE NECESITEN LES HAGA EL TUBO SOLDANDO TANTO PARA FUERA COMO PARA  
DENTRO.

PORTES DEBIDOS.  
CONDICIONES A CONCRETAR.  
CORDIALES SALUDOS  
J. RAMON LAHOZ  
DPTO. COMERCIAL

La conclusión es que no podríamos construir los condensadores de las dimensiones apropiadas, no solo por el elevado coste económico, sino por que la capacidad de estos condensadores también sería inferior a la de la Botella de Leyden de “Serie”.

**Coste económico con PTFE:**

262,57 €

**Coste económico con Polietileno:**

75,504 €

En ninguno de los dos casos anteriores contamos el precio de las placas de cobre ni la mano de obra del metalista, además debemos construir dos condensadores por lo que el precio sería el doble.

Aun así calculamos la capacidad que tendrían los condensadores con las dimensiones que se nos ofrecían.

$$C=304\text{pF}$$

Proseguimos en buscando algún otro material con buenas características para el montaje.

Material	Constante $k$	Rigidez dielectrica (kV/mm)
<i>Vidrio Pyrex</i>	4.5	13
<i>Polietileno</i>	2.3	50
<i>Teflón</i>	2.1	60
<i>Ambar</i>	2.7	90
<i>Mica</i>	5.4	100

Así encontramos la Mica.

Las **micas** son minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes, dentro del subgrupo de los filossilicatos.

Su sistema cristalino es monoclinico. Generalmente se las encuentra en las rocas ígneas tales como el granito y las rocas metamórficas como el esquisto. Las variedades más abundantes son la biotita y la moscovita.

Las micas figuran entre los minerales más abundantes de la naturaleza. En total constituyen aproximadamente 3,8% del peso de corteza la terrestre, encontrándose, fundamentalmente en rocas intrusivas ácidas y esquistos micáceos cristalinos. Se encuentra en la naturaleza junto con otros minerales (cuarzo, feldespato) formando vetas dentro de rocas, generalmente, duras. Es necesario realizar voladuras de las rocas para después eliminar los minerales extraños y obtener así la llamada mica en bruto. El rendimiento de esta explotación es muy bajo. Normalmente se cifra en un 1% a un 2%, raramente se llega al 10%. La mica en bruto es posteriormente exfoliada, recortada y exfoliada de nuevo para pasar a ser clasificada de acuerdo con el tamaño de los cuadrados obtenidos. Posteriormente, es clasificada de nuevo atendiendo a la transparencia, contenido de minerales extraños, lisura de la superficie, etc.

## Usos

Las particulares características de elasticidad, flexibilidad y resistencia al calor de las láminas, al agua, hacen que constituyan un precioso material para la industria debido a sus propiedades como aislantes eléctricos y térmicos. La mica se utiliza en aplicaciones de alta responsabilidad como aislamiento de máquinas de alta tensión y gran potencia, turbogeneradores, motores eléctricos, y algunos tipos de condensadores. Debido a que la mica mantiene sus propiedades eléctricas cuando se calienta hasta varios centenares de grados, se le considera un material de la clase térmica alta (clase C según las normas). A temperaturas muy altas, la mica pierde el agua que contiene y pierde transparencia, su espesor aumenta y sus propiedades mecánicas y eléctricas empeoran. La temperatura a la que la mica comienza a perder el agua oscila entre 500-600 °C para la mica flogopita y 800-900 °C en la mica moscovita.

A la vez que buscamos este otro posible material encontramos otra posible solución, utilizar una serie de condensadores industriales de alta tensión para economizar los gastos.

### ***7.3 CONDENSADORES DE ALTA TENSIÓN INDUSTRIALES***

Puesto que los gastos de rectificación y mano de obra son muy elevados abandonaremos la idea inicial de construcción de una botella de Leyden para soportar una diferencia de potencial superior a los 100kV.

En la pagina de RS online buscamos condensadores industriales , y encontramos unos condensadores de 15kV y 1000pF

Nuestra idea inicial es la de colocar dos series de 10 condensadores para poder conseguir una diferencia de potencial de 150kV.

El montaje de los condensadores es el siguiente.



Para colocar la serie de condensadores cortamos dos barras de madera y le realizamos una serie perforaciones separadas 1,5 mm entre cada una de ellas, esta separación corresponde a la distancia entre las patas de los condensadores.



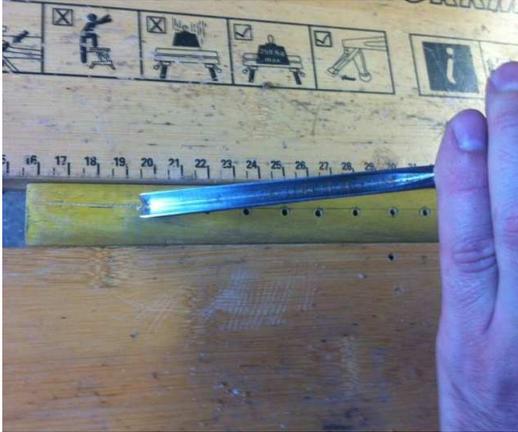
Para mantener en posición vertical la barra de madera en el interior del cilindro de cristal se realizo un taladro en la base de la barra de madera de 8mm de diámetro.



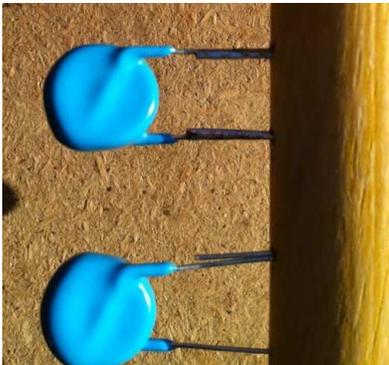
Se realizo una rosca en el agujero con la ayuda de un tornillo de M8.



Posterior mente calculamos la longitud de la barra roscada de M8 necesaria para atravesar las diferentes piezas y roscarse en el interior de la barra de madera y la cortamos con una sierra para metal.



Se le realizaron dos hendiduras con gubias en la superficie de la barra de madera, haciendo estas la función de “Rozas” y alojan en su interior los distintos cables que conectaran los condensadores.

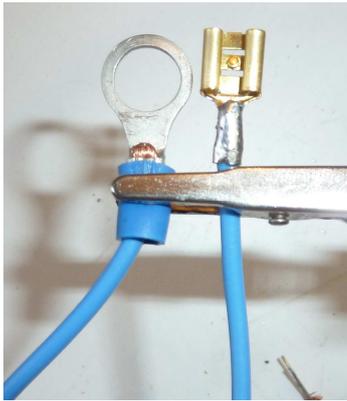


Los condensadores se soldaron pata a pata en serie con una configuración en Zigzag, este echo es meramente decorativo, pues una conexión en serie lo es sea cual fuere la figura que realicen sus componentes.

Para unir la pata inferior del ultimo condensador con la barra roscada de 8 mm que sirve tanto de soporte vertical como de conductor eléctrico se compraron unos terminales eléctricos de 8mm. El cable de unión entre la pata inferior y la barra roscada es amarillo/verde.

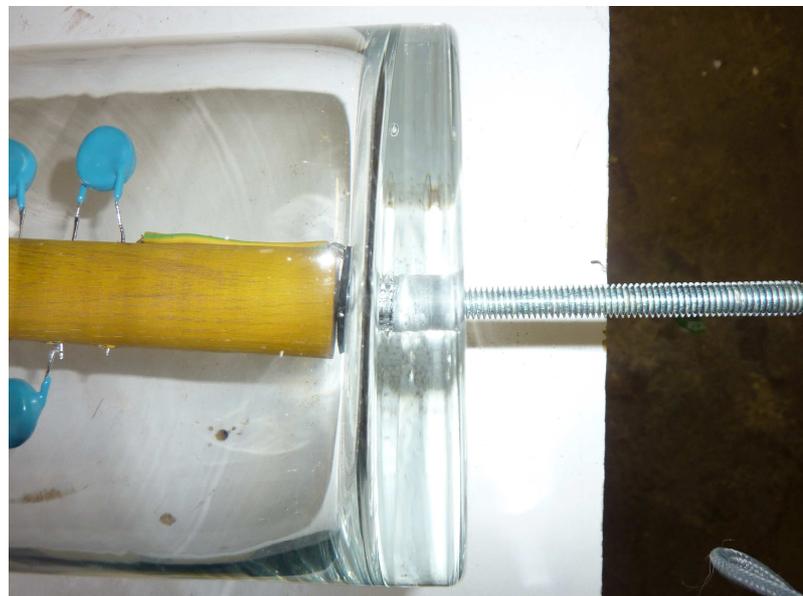


La unión entre la pata superior y la barra roscada que esta en contacto con



las esferas de descarga se realizo mediante conectores Faston. En uno de los condensadores se utilizo cable de color azul y en el otro cable de color marrón. Indicar que simplemente se colocaron por motivos estéticos, ya que es imposible saber cual de los dos condensadores empezara a cargarse positivamente y cual negativamente.

Había que encontrar unos cilindros de vidrio con las dimensiones apropiadas, tras unos días de búsqueda encontramos unos jarrones de vidrio. Estos jarrones estaban cerrados por la parte inferior, por lo que nos hicimos con una broca de diamante industrial para poder perforar la parte inferior, este agujero servirá tanto para pasar un tornillo y sujetar el condensador a la superficie como para sacar un cable y conectar los dos condensadores.

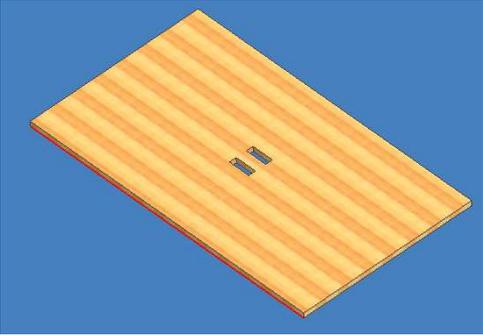
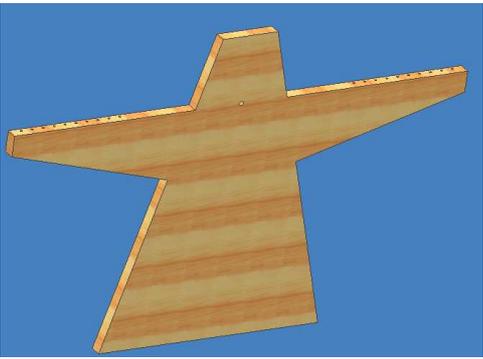
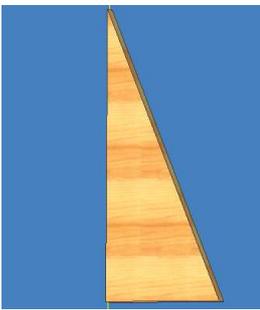


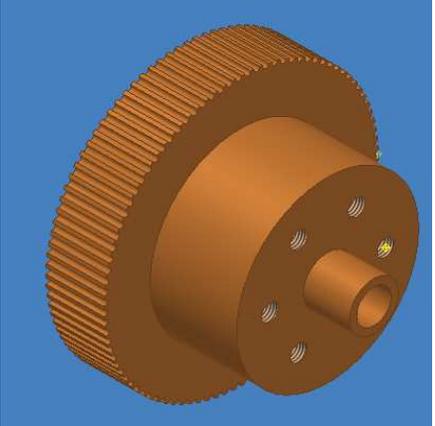
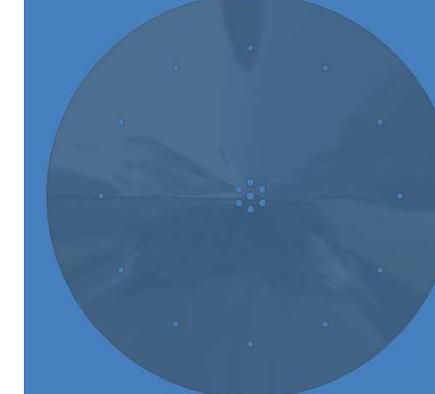


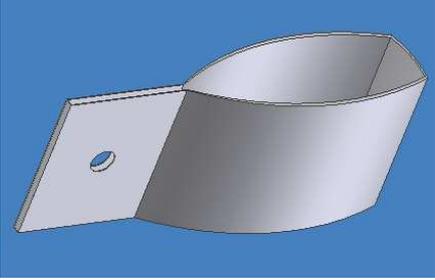
#### 7.4. DISEÑO EN 3D

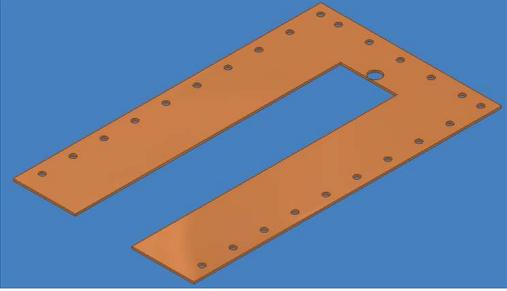
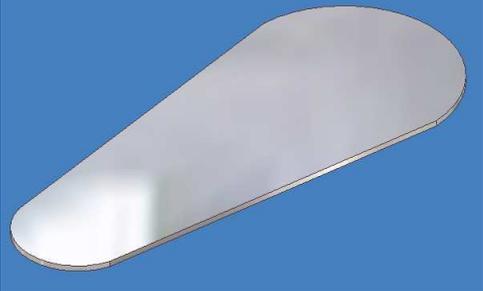
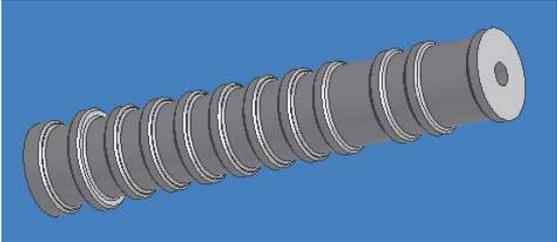
A continuación se expone un listado de los componentes que conforman la máquina de Wimshurst la cual se encuentra en la Universidad de Zaragoza.

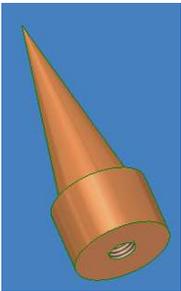
Todos los componentes aquí citados han sido dibujados con el programa Autodesk Inventor Professional 10.0 , se pueden encontrar en los archivos adjuntos con el mismo nombre con el que se citan a continuación.

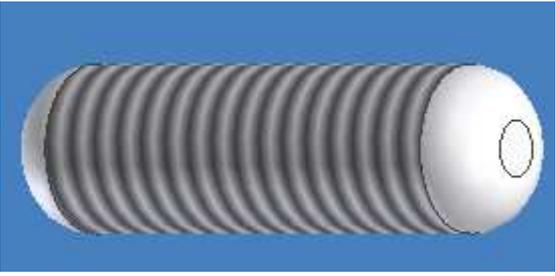
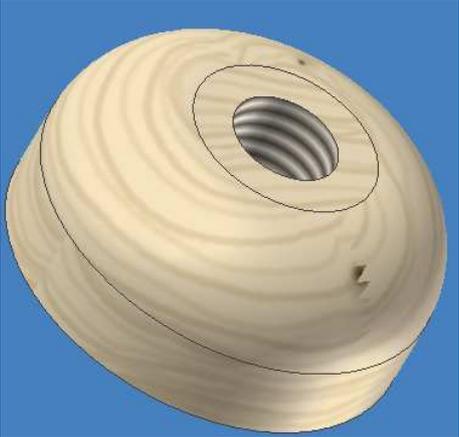
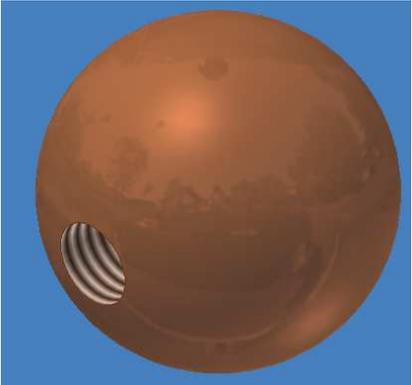
	<p><b>1 X Tabla soporte:</b> Su función es servir de base para el resto de las piezas.</p>
	<p><b>2 X Para Soporte:</b> Se colocaran paralelas entre si y paralelas a la <b>Tabla Soporte</b> soportando el peso de todos los componentes.</p>
	<p><b>2 X Pata Central:</b> Ayudan a mantener la verticalidad de la pieza <b>Para Soporte</b>. <b>4 X Pata Lateral:</b> Idénticas a las <b>Patatas Centrales</b> pero de dimensiones inferiores.</p>

	<p><b>1 X Barra Roscada:</b> Sujetara los Discos de metacrilato y otras piezas, dotando al sistema de un eje de revolución</p>
	<p><b>2 X Eje:</b> Transmite la energía mecánica a los discos de metacrilato.</p>
	<p><b>2 X DiscoGrand:</b> En el se pegaran las distintas aletas metálicas, este es el más grande de los discos de metacrilato.</p>
	<p><b>2 X DiscoPeque:</b> Este disco sirve para dar rigided al <a href="#">DiscoGrand</a>.</p>

	<p><b>2 X Barra de cobre:</b> En el se alojarán las escobillas que fricciónarán con las <a href="#">Aletas</a></p>
	<p><b>2 X Porta escobillas:</b> En realidad esta pieza esta compuesta por 2 piezas (tubolaton y tubolaton1, el motivo es que resulta mucho más fácil de diseñar.</p>
	<p><b>2 X Escobilla</b></p>
	<p><b>2 X Tabla union:</b> Une los brazos de las piezas <a href="#">Para Soporte</a>, sirve de soporte para los brazos de la maquina y los aisladores.</p>

	<p><b>2 X cobre union1:</b> Une los brazos de las piezas <b>Para Soporte</b>, sirve de soporte para los cepillos que rozan con las <b>Aletas</b>.</p>
	<p><b>36 X Aletas:</b> Colocadas sobre el <b>DiscoGrand</b> de manera radial.</p>
	<p><b>2 X Barra 1 :</b> Al igual que pasará con el porta escobillas esta formado por distintas piezas para facilitar su dibujo (Barra bola1 Cabeza, Barra bola1 union, Barra bola1).</p>
	<p><b>2 X Aislador</b></p>

	<p><b>2 X Barra 2</b> : Al igual que pasará con el porta escobillas esta formado por distintas piezas para facilitar su dibujo (Barra bola2 Cabeza, Barra bola2 union, Barra bola2 Cabeza,).</p>
	<p><b>1 X rosca pincho</b> : Se utiliza para roscar la pieza <b>Pincho</b> y colocarla sobre una de las piezas <b>Barra2</b></p>
	<p><b>1 X Pincho</b> : Esta pieza se podría eliminar de la maquina, ya que se cubre a su vez con una esfera.</p>
	<p><b>1 X Bola</b>: Esta pieza esta formada por dos medias esferas para facilitar su diseño.(media bola)</p>

	<p><b>1 X union de bolas:</b> Esta pieza une una bola pequeña de metal con otra mas pequeña, es de material plástico y debería ser metalica.</p>
	<p><b>1 X Arandela de madera:</b> Esta pieza se encuentra en la unión anterior, también debería ser ,metalica.</p>
	<p><b>1 X Bola pequeña</b></p>

**Arandelas:**

- 2 x Métrica 12

**Tuercas:**

- 2 x Métrica 12

**Tornillos:**

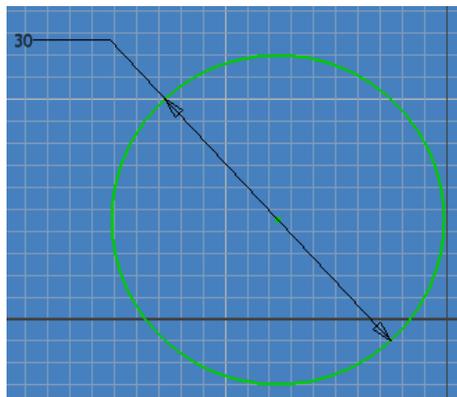
- 4x Perno M6 X 25 ISO 4762
- Barilla 3 x15 6
- 56 X Perno ISO 7045 – M6 X 14 – 4.8
- 29 X Perno ISO 2009 – M8 X 14 – 4.8
- 16 X Perno M6X 16 ISO 4762

## 7.4. CREACIÓN DE PIEZAS

Ahora explicare cual es el método de trabajo que he utilizado para realizar la simulación de la maquina en 3D.

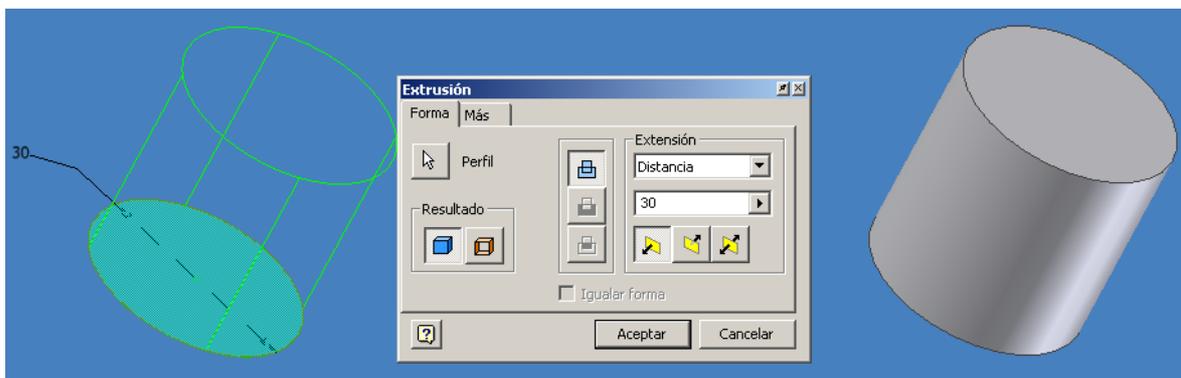
Primero tome medidas de todas las piezas que conforman la maquina física.

Después cada una de las piezas se debe dibujar en un boceto, dicho boceto se realiza en 2 dimensiones, similar a dibujar en un papel. Debemos colocar las cotas antes de terminar el boceto.



Una vez terminado el boceto podemos usar la extrusión o revolucionar el boceto.

### Extrusión

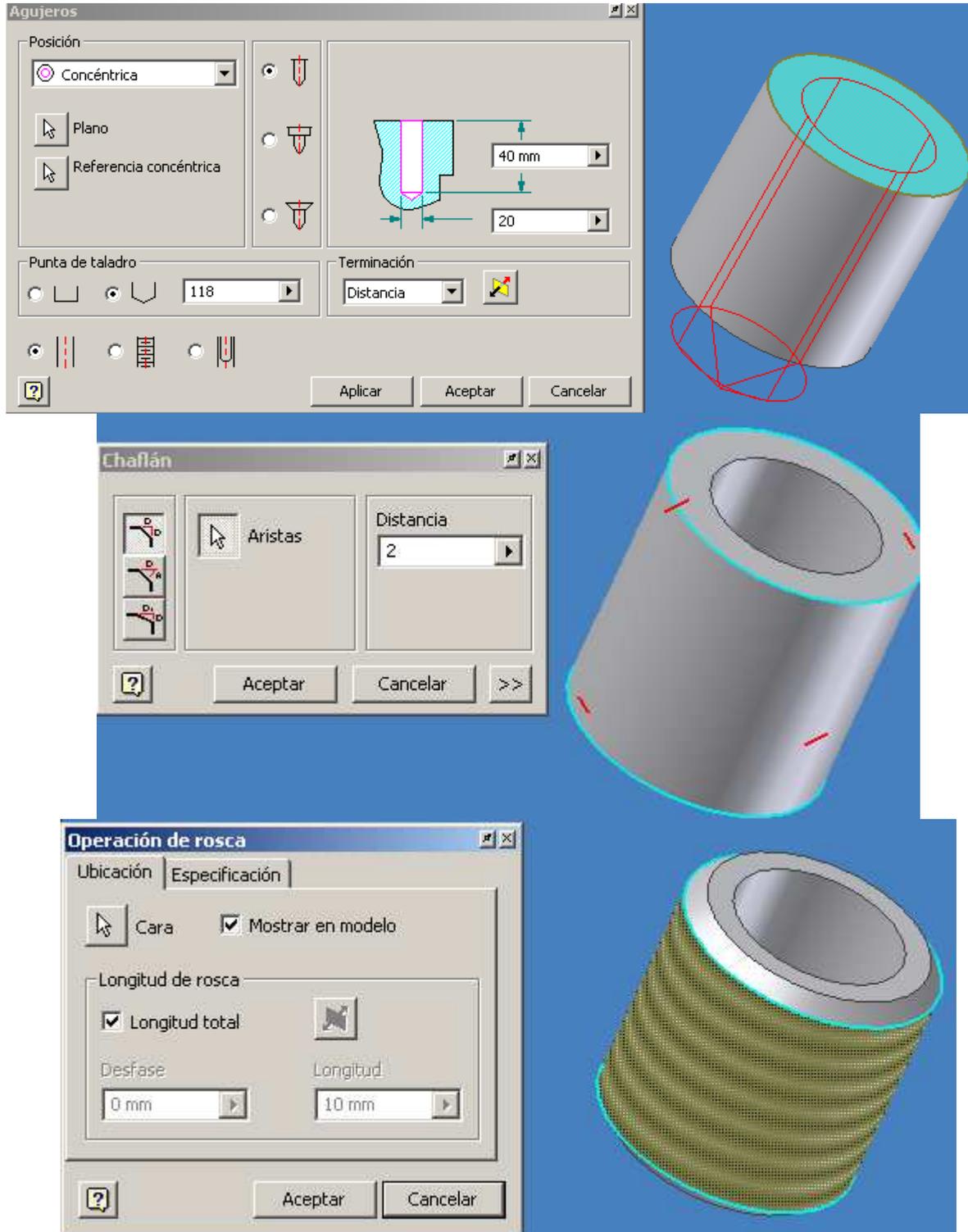


### Revolución

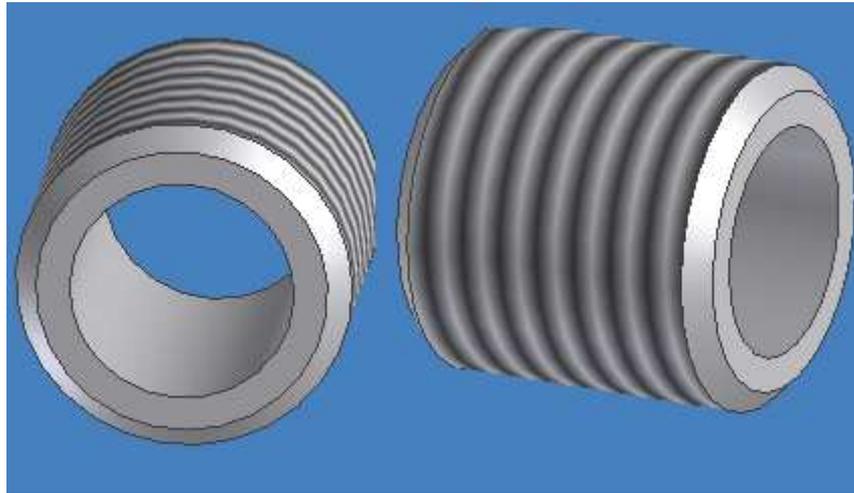


Posterior mente se le pueden hacer cortes chaflanes agujeros y cualquiera etc.

Le realizaremos un agujero un chaflán y una rosca exterior



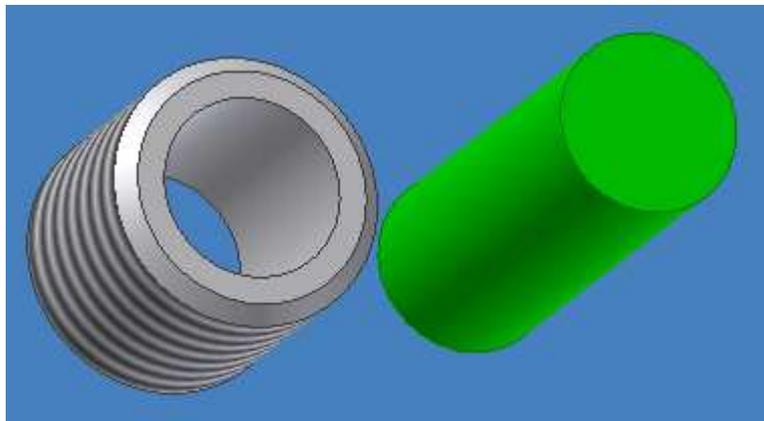
El resultado final es:



#### **7.4. ENSAMBLAJE**

Una vez tienes dos piezas creadas, puedes unir las para que formen un mismo conjunto, a este tipo de unión se le denomina ensamblaje.

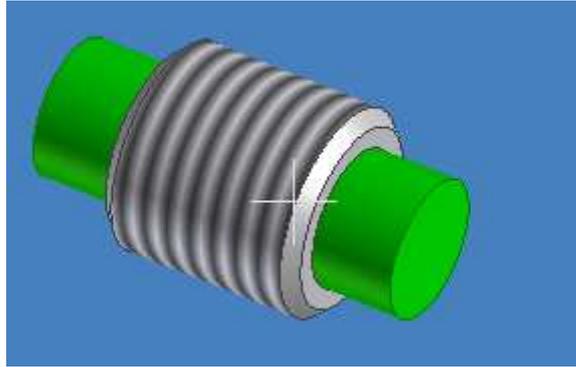
Primero debes insertar las dos piezas primeras a unir, el resto si es que los hay pueden incorporarse en cualquier momento.



Una vez introducidas las piezas pueden moverse libremente en los 3 ejes X,Y,Z, y por lo tanto lo que se debe hacer es incorporarle restricciones en su movimiento, o lo que es lo mismo limitar sus grados de libertad.

Nosotros introduciremos una barra de 20 mm de sección y 55mm de longitud en la pieza que realizamos en el apartado anterior.

Este es un caso muy sencillo pues solo se debe usar la restricción insertar y el desfase en milímetros entre las caras a insertar , con un desfase de -12mm la pieza queda aproximadamente centrada .



En otras ocasiones se deberá añadir muchas más restricciones a una pieza para que no se pueda girar o no se pueda desplazar de un punto para que se quede perpendicular a otra pieza etc, en nuestro proyecto hay piezas con más de 4 restricciones.

En total tenemos puestas:

321 Restricciones de movimiento

21 ángulos

4 Tangentes

10 Inserciones

Contamos con 60 piezas en la maquina sin contar piezas que se encuentran repetidas con Patrones rectangulares o circulares, como pueden ser las aletas metalizas pegadas a los discos de metacrilato.

Una vez tenemos el ensamblaje de las piezas podemos pasar a la creación del despiece, donde a cada pieza le indicaremos la posición inicial y final y la trayectoria a seguir, con este despiece posteriormente grabaremos un video para exponerlo en la presentación del proyecto.

Para realizar el diseño en 3D los ensamblajes y despieces han sido necesarias más de **180 h**, no se incluye en el computo de estas horas las utilizadas en la toma de medidas de la maquina física ni las utilizadas en la consulta de distintos tutoriales.

## 8. PRUEBA DE LOS CONDENSADORES EN LA MÁQUINA DE WIMSHURST

### 8.1. PRUEBA 1

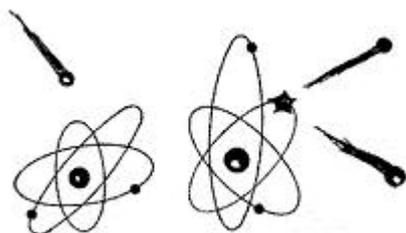
Tras el montaje de ambos condensadores los instalamos en la máquina.

Si todo funcionará correctamente deberíamos ser capaces de crear chispas de más de 20 cm entre las esferas.

Nuestra sorpresa fue que al conectar los condensadores la máquina no podía apenas generar chispa alguna.

Sin embargo el olor a día de lluvia era muy intenso, este fenómeno se produce por la ionización del aire.

**Ionización** es un concepto que se utiliza en el ámbito de la química para nombrar al proceso y a las consecuencias de ionizar. El verbo ionizar, por su parte, hace referencia a la disociación una molécula en diferentes iones o a la transformación de una molécula o de un átomo en un ion.



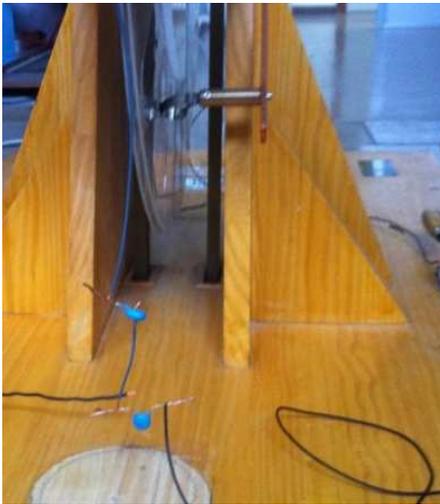
La ionización, por lo tanto, es un procedimiento a través del cual se generan iones (un átomo o una molécula que dispone de carga eléctrica a partir de ganar o de perder una cierta cantidad de electrones).

La partícula que dispone de una mayor cantidad de electrones en comparación a la molécula o al átomo neutro recibe el nombre de anión (tiene carga neta negativa). La partícula que, en cambio, presenta menos electrones que el átomo o la molécula neutra se llama catión (con carga positiva).

**La ionización química** puede desarrollarse de diversas maneras. Una de ellas es el traspaso de electrones, como en el caso del cloruro de sodio (el cloro experimenta una reacción con el sodio).

**La ionización física**, en cambio, consiste en aislar los electrones que forman parte de la molécula neutra a través del suministro de la energía requerida. El aporte de energía puede realizarse a partir de la irradiación ionizante (con rayos X o luz ultravioleta), el calentamiento a altas temperaturas o la aplicación de un campo eléctrico.

La ionización está presente en el funcionamiento de los tubos fluorescentes, en los televisores de plasma y en los rayos que aparecen en medio de una tormenta. También es posible esterilizar un instrumento mediante la ionización, que permite eliminar los microorganismos de un determinado lugar gracias a la aplicación de radiación.

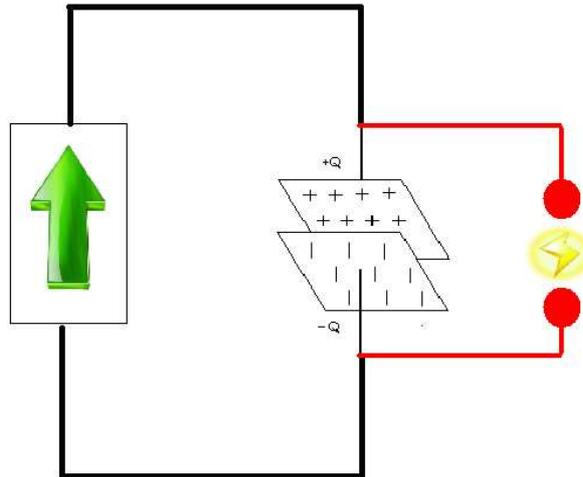


De manera que se desmonto uno de los cilindros de vidrio con condensadores y empezamos a colocar condensadores en serie de uno en uno para ver que potencial se puede alcanzar en la maquina antes de empezar a ionizar el aire.

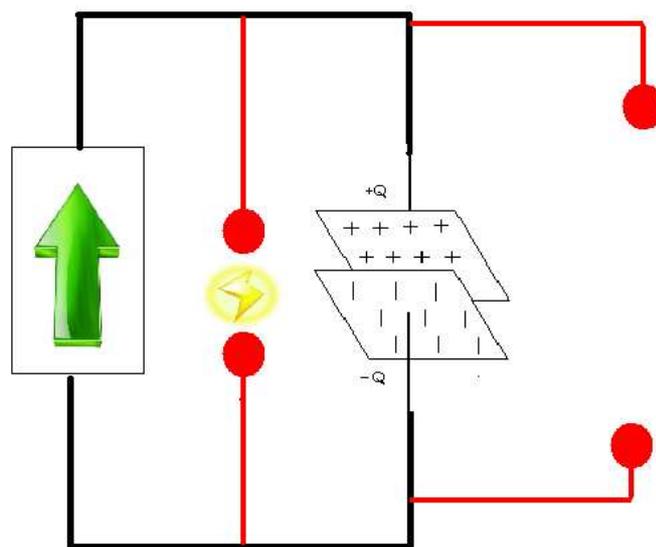
Se comenzó solamente con uno y se fueron añadiendo sucesivamente condensadores en serie hasta llegar a 5 condensadores en serie.

Se observo que el salto del arco eléctrico llegaba a su límite en 25 mm que viene a ser aproximadamente 70kV, si esta distancia se aumenta la máquina deja de producir descargas y solo ioniza el aire.

Llegamos a la siguiente conclusión: La máquina se comporta como una generador de corriente, si todo funcionara perfectamente deberíamos poder aportar carga al condensador infinitamente para que así aumentara la diferencia de potencial entre las esferas o “explosor” y una vez alcanzada la tensión de ruptura dieléctrica apareciera un arco.



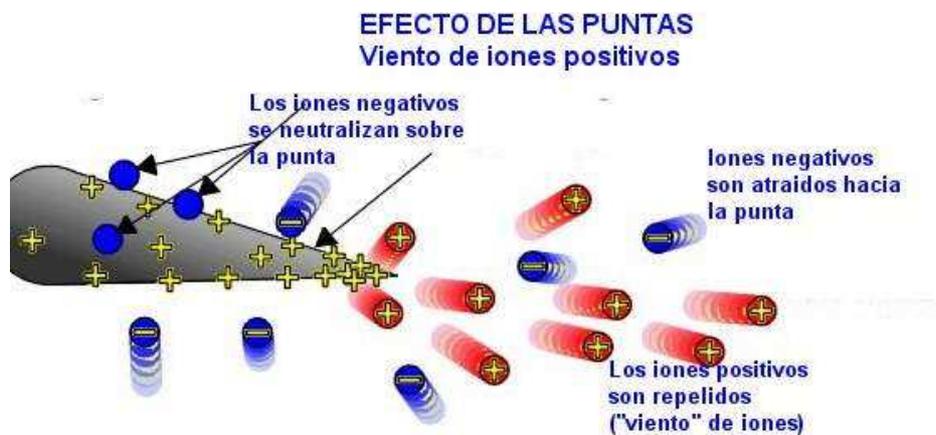
Sin embargo en la realidad existen unos “explosores virtuales” producidos por la ionización del aire, esta se produce en las esquinas metálicas que la máquina tiene, de manera que si separamos los explosores a una distancia mayor que la distancia de los “explosores virtuales” la máquina no es capaz de aumentar esa diferencia de potencial y se descarga a través del aire.



## 8.2. MEDIDAS CORRECTORAS

### Efecto de las puntas

Cuando los conductores metálicos terminan en punta se acumula mucha carga en ellas, la densidad de carga es muy alta y en las proximidades se crea un intenso campo que ioniza el aire.



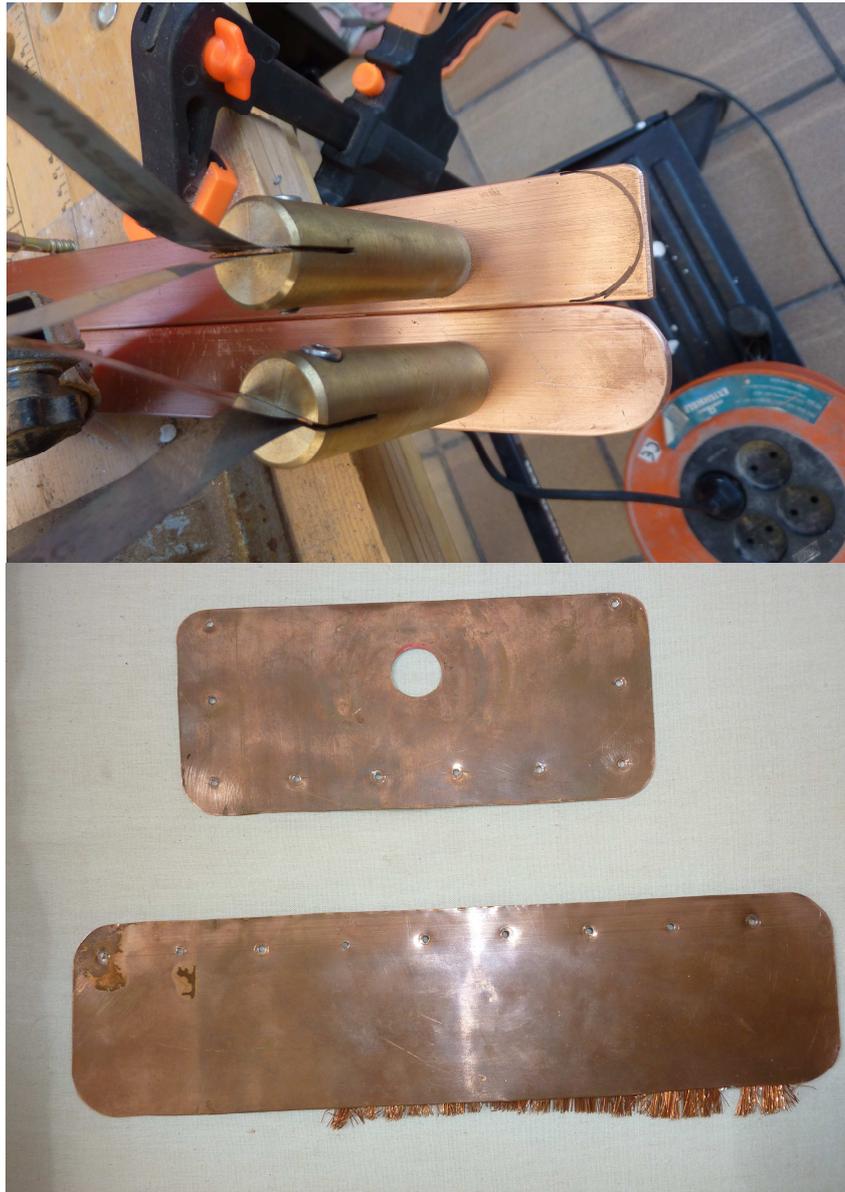
Este efecto fue descubierto por el norteamericano Franklin y en él se basa su invento del pararrayos publicado en 1753 en su famoso "Almanaque del pobre Richard".

Llegamos a la conclusión de que se debía aislar la máquina del aire en la medida de lo posible y eliminar la mayor cantidad de esquinas posible.

Para ello realizaríamos las siguientes medidas correctoras en la máquina:

Primero redondear todas la esquinas que existan en los materiales conductores, deberemos pues desmontar todas las piezas.



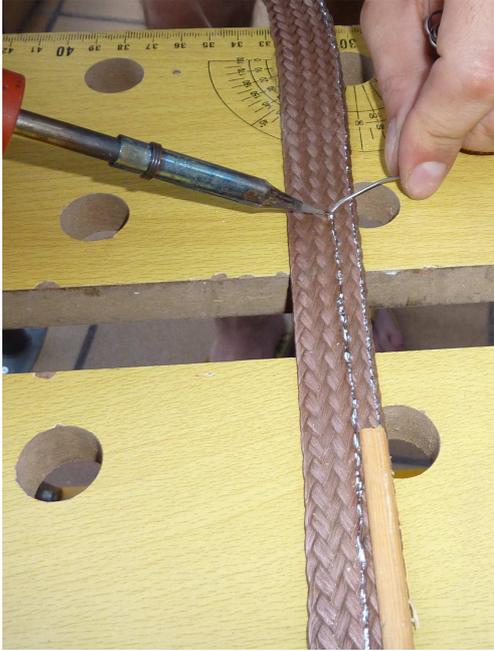


Las escobillas que atraen las cargas de las aletas metálicas serán reemplazadas y sujetadas correctamente, ya que simplemente se encuentran sujetas por cinta aislante; con el paso del tiempo y por la gravedad estas escobillas se han ido descolgando por lo que el contacto eléctrico no es correcto.



Usaremos un cable plano en lugar del actual cable multifilar rizado.

El primer paso es limpiar el óxido del cable.



El segundo paso es realizar dos cordones de soldadura paralelos entre sí y al cable, de manera que estos cordones sirvan de sujeción a los hilos de cobre trenzados que conforman el cable. Para ello abriremos el cable en dos para que tenga un menor grosor y una mayor superficie de contacto.

Limpiaremos la zona en la cual soldaremos las escobillas de restos de pegamento y óxido.

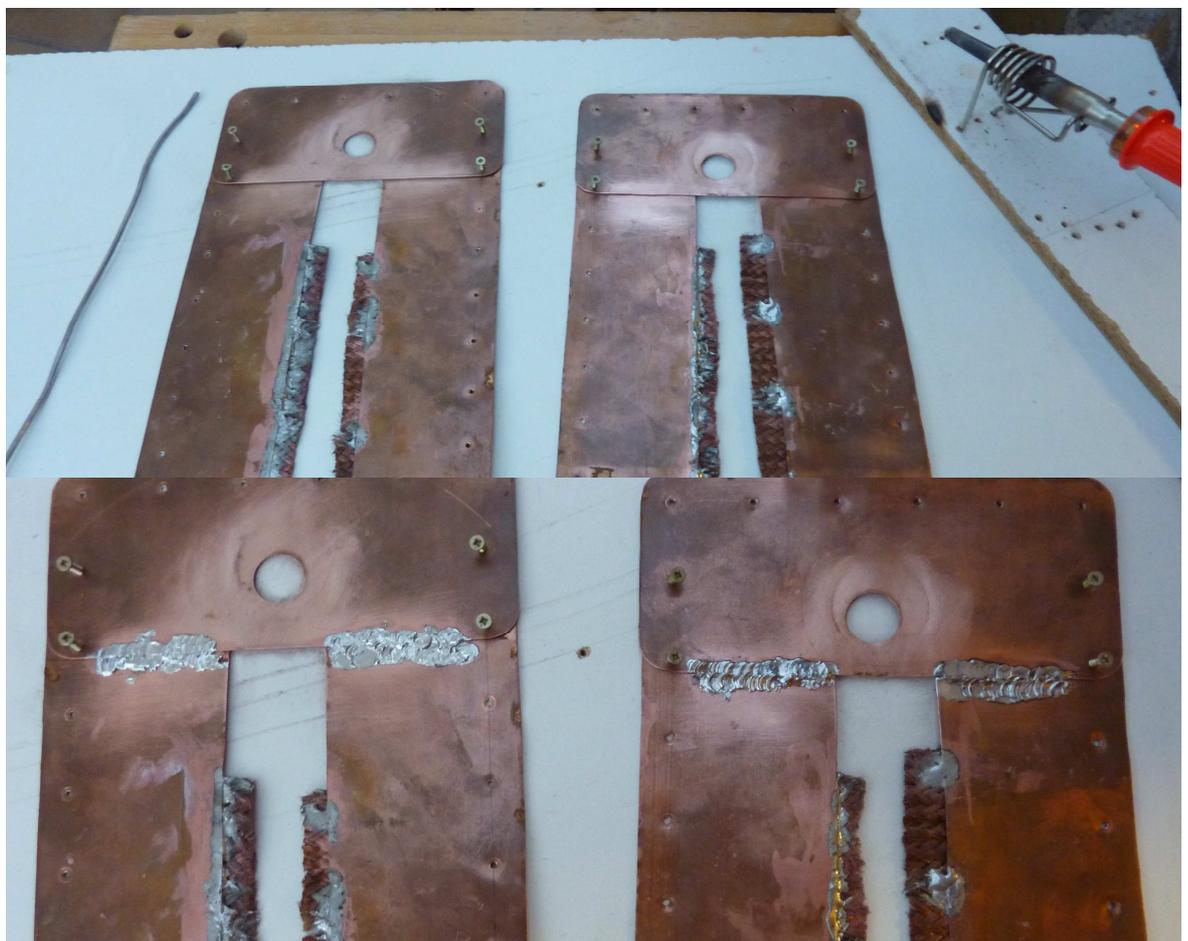


Una vez cortadas las escobillas las soldaremos a los porta escobillas mediante un soldador de potencia y estaño, necesitamos agua de soldadura para que la unión sea lo más correcta posible.





Por último soldaremos las 3 piezas que conforman el porta escobillas para mejorar el contacto entre las mismas, de manera que posteriormente podremos aislarlas con barniz de manera mucho más eficiente.



Esta es una imagen de las escobillas y su sistema de sujeción inicial.



Por último mostrar la diferencia del grosor en el hilo de estaño empleado para soldar los condensadores y el utilizado en esta soldadura.

Se barnizarán las piezas para aislarlas del aire, de manera que se dificulte aun más la ionización. Utilizaremos un barniz especial: Royal Diamond ANTI-FLASH G-142.



El electroesmalte ANTI-FLASH G-142, es un barniz Alkyd Epoxy de color rojo, con cargas minerales incorporadas, que le confieren propiedades especiales de conductividad térmica y rigidez dieléctrica. Posee alta resistencia a la temperatura Clase F (155°C).

### CARACTERISTICAS FISICAS

Color .....	Rojo (RAL 3011)
Densidad a 20°C (grs/cm <sup>3</sup> ) .....	1.2
Viscosidad Copa Ford Nº 4 a 20°C (seg) .....	140+-40
Materia fija (%) .....	65+-5
Tiempo de secado sobre placa a 20°C (horas) .....	6
Tiempo de secado sobre placa a 120°C (horas) .....	2
Clase térmica .....	F (155°C)
Estabilidad almacenaje a 20°C .....	12 meses.

### CARACTERISTICAS DIELECTRICAS

Perforación dieléctrica en grueso película 0.01 mm.	
ESTADO NATURAL .....	1400 V
Después de 8 días en agua destilada .....	1200 V
Después de 8 días en aceite de transformadores .....	1500 V

### DILUYENTE

En el caso que se desee reducir la viscosidad, debe emplearse nuestro DILUYENTE F-5.

## Porta escobillas



## Barras de transferencia de carga



La unión entre ambos condensadores se realizará por la parte visible de la **tabla soporte** que sujeta todo el conjunto, pues podrían sucederse problemas de aislamiento al estar cerca de partes metálicas en su parte inferior.

Se elimina de la unión el interruptor metálico de la parte posterior de la máquina, por estar completamente formado por piezas con múltiples esquinas.

Por último reduciremos a 7 el número de condensadores de alta tensión conectados en serie.

### 8.3. PRUEBA 2

#### Máquina completamente montada



Este es el aspecto que finalmente tiene la máquina antes de realizar las diferentes pruebas, y debo decir que los condensadores parecen estar en perfecta sintonía con la máquina e integrándose perfectamente en el diseño.

Sin embargo se debe indicar que mi especialidad es eléctrica y no diseño , por tanto lo que se busca es la utilidad funcional y no la estética.

#### Resultados

Los resultados una vez más no han sido los esperados, el aislamiento de las piezas ha resultado suficiente como para apreciar un aumento muy significativo en la distancia máxima a la cual se produce el arco eléctrico.

### 1. Sin barniz aislante:



### 2. Sin barniz aislante:



La máquina tiene metálicas sin aislar con barniz ANTI-FLASH G-142, como las barras que permiten variar la proximidad entre las esferas “explosores”, de modo que sustituimos las barras y las esferas por un cable conductor sujetado a una pértiga de alta tensión. Eliminando en un golpe las esquinas y todo ese material conductor al aire.



Los resultados obtenidos con la pértiga y con las barras metálicas, aun teniendo en cuenta que no se cuenta con las esferas metálicas son casi idénticos.

## 9. CAPACIDAD DE LOS CONDENSADORES

*En cualquier grupo de datos, la cifra que evidentemente es correcta, sin ninguna necesidad de comprobación, es la errónea. "Ley de Murphy"*

En este apartado utilizaremos el cálculo de incertidumbre para medir la capacidad de uno de nuestros condensadores "Cadena de condensadores en serie".

### 9.1. CÁLCULO SEGÚN ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE

Según el fabricante son condensadores de **1000pf** con una desviación del 20%

El cálculo de condensadores en serie como se vio con anterioridad es el siguiente:

$$1/C_{eq} = (1/C1) + (1/C2)$$

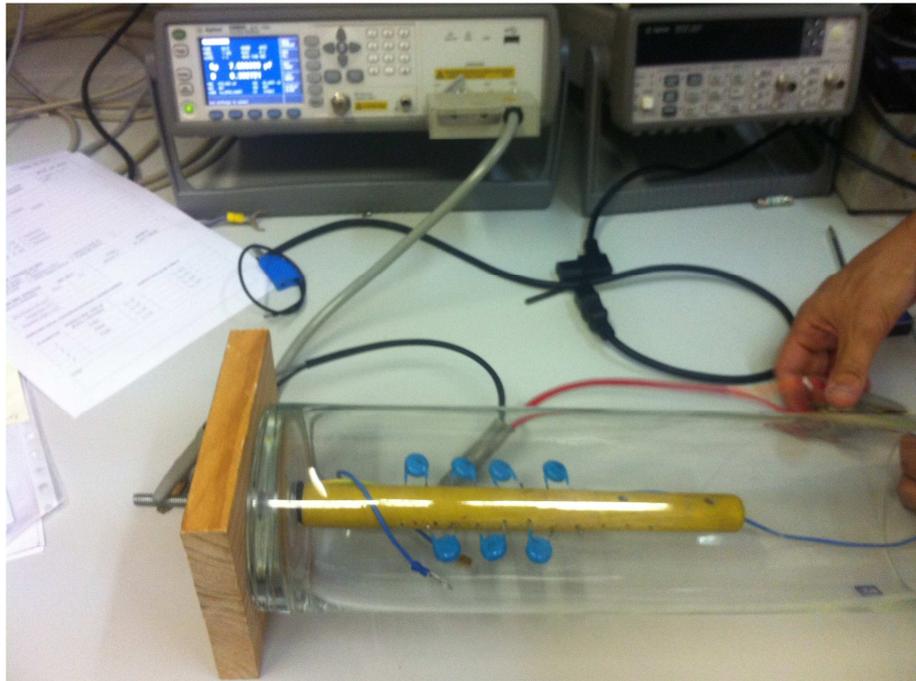
Esta ecuación puede generalizarse para tres o más condensadores conectados en serie.

Por lo tanto la capacidad de los 10 condensadores en serie es de:

$$C \rightarrow VCV = 100pF$$

### 9.2. MEDIDA DE CAPACIDAD CON INSTRUMENTOS DE PRECISIÓN

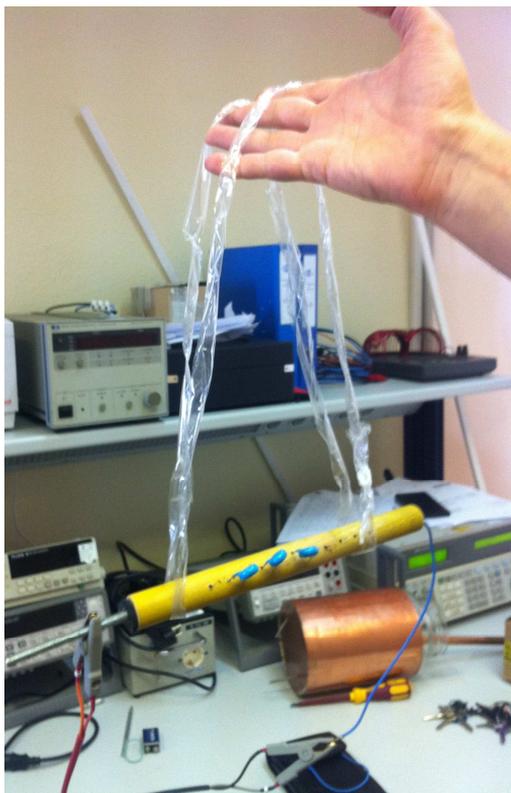
Mediremos la capacidad de nuestra serie de condensadores con un Medidor de precisión Agilent E4980A LCR .El proceso anterior se ha llevado a cabo 10 veces. La intención es dar un valor aproximado con el valor medio de las diez lecturas, comprobando que se aproximan a los valores teóricos.



Las lecturas obtenidas son las siguientes.

Medida	Capacidad (pF)
1	82,56731
2	84,62401
3	75,65991
4	80,05419
5	84,90252
6	77,92067
7	89,59068
8	92,81673
9	77,13296
10	98,18795

Media(pF)	84,35
-----------	-------



Para medir con mayor precisión sería necesario una gran elaboración, puesto que al tratarse de una capacidad muy pequeña el valor de esta se ve afectada por agentes externos como pueden ser los mismos cables, o partes metálicas de la mesa en el laboratorio.

Por ese motivo se extrajo la cadena de condensadores del cilindro de vidrio en el que se encuentra alojado y se colocó en suspensión.

## 10. CONCLUSIÓN

*Un proyecto mal planeado se lleva tres veces el tiempo estimado para terminarse, uno bien planeado tomará solamente el doble. "Ley de Murphy"*

Cuando comencé este proyecto no podía imaginar el tiempo y la dedicación que una investigación como esta puede exigir.

Debo agradecer a los profesores de la carrera el habernos enseñado a "buscarnos la vida", pues un ingeniero como el nombre indica debe ser una persona capaz de utilizar el ingenio para la solución de problemas.

Gracias a ello pude aprender a utilizar un programa desde cero, Autodesk Inventor 10,(aunque el comienzo fue duro) estoy muy contento con el resultado final.

La creación del despiece 3D apenas dura un minuto y ha requerido una gran cantidad de horas, más de 120, si bien es cierto que ahora podría realizar el mismo trabajo en mucho menos tiempo.

Con la creación de los condensadores no solo refresque mis conocimientos sobre el cálculo de los mismos, tuve que buscar y utilizar herramientas que nunca antes había utilizado, como es una broca con cabeza de diamante industrial refrigerada por agua, la cual utilice para la perforación del vidrio.

Una vez montados los condensadores en la máquina el resultado no fue el esperado, el arco eléctrico no aumentaba.

La diferencia de potencial "limite" y por tanto la longitud del arco eléctrico que la máquina es capaz de generar es independiente de los condensadores que lleve instalados, los condensadores solamente almacenan la carga y aumentan la intensidad del arco "Su luminosidad o visibilidad", por lo tanto el colocar uno u otro condensador es irrelevante , siempre y cuando la diferencia de potencial máxima de trabajo del los mismos se encuentre por encima de la ruptura dieléctrica del aire en los explosores.

La diferencia de potencial máxima a la cual la máquina es capaz de elevarse es dependiente de sus elementos constructivos y su aislamiento, tras aislar y eliminar todos los elementos metálicos los resultados obtenidos son los

indicados en el apartado prueba 2, y por tanto si se quiere aumentar la distancia del arco eléctrico se deberá mejorar el aislamiento de la máquina.

Se propone como siguiente paso a seguir lijar toda la superficie de madera, puesto que el barniz sometido a unas diferencias de potencial tan elevadas puede estar transportando cargas mediante corrientes superficiales.